

МАТЕМАТИЧНЕ І КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

UDC 621.384.6+539.1.074.8

DOI: 10.20998/2079-0023.2021.02.05

A. С. МАЗМАНИШВИЛИ, Н. Г. РЕШЕТНЯК, А. Ю. СИДОРЕНКО

ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ФОРМИРУЕМОГО МАГНЕТРОННОЙ ПУШКОЙ С ВТОРИЧНОЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ, В СПАДАЮЩЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ СОЛЕНОИДА: ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований и расчетов по формированию 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 рассеяния постоянных магнитов. Транспортировка пучка осуществлялась в системе, состоящей из медных колец с внутренним диаметром 66 мм, находящейся на расстоянии 85 мм от среза магнетронной пушки. Изучена зависимость тока пучка от амплитуды и градиента спада поля. Проведенные исследования показали возможность формирования радиального электронного пучка с энергией в десятки килоэлектронвольт в спадающем магнитном поле соленоида. Оптимизацией распределения магнитного поля (создаваемого соленоидом и кольцевыми магнитами) и его градиента спада можно добиться увеличения попадания электронов на одно кольцо (до ~72 % тока пучка). На основе математической модели движения электронного потока синтезировано программное средство, позволяющее получать и интерпретировать характеристики результирующих потоков. Полученные численные зависимости удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами для магнитного поля с большим градиентом спада. Рассмотрены различные конфигурации магнитного поля. Получены решения прямой задачи моделирования траекторий электронов для заданных начальных условий и параметров. Рассмотрены различные конфигурации магнитного поля. Показано, что для выбранных начальных условий для пучка электронов и распределений продольного магнитного поля вдоль оси пушки и канала транспортировки поток электронов попадает на вертикальный участок, длина которого порядка миллиметра. Таким образом, изменяя амплитуду и распределение магнитного поля, можно регулировать ток в радиальном направлении вдоль длины трубы, и, следовательно, место электронного облучения.

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

O. С. МАЗМАНИШВІЛІ, М. Г. РЕШЕТНЯК, Г. Ю. СИДОРЕНКО

ДИНАМІКА ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В СПАДАЮЧОМУ СОЛЕНОЇДАЛЬНОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ МАГНЕТРОННІЙ ГАРМАТИ З ВТОРИЧНОЕМИСІЙНИМ КАТОДОМ: ЕКСПЕРИМЕНТ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

У даній роботі представлені результати експериментальних досліджень та розрахунків за динамікою пучка електронів у магнетронній гарматі зі вторинноемісійним катодом. При енергії електронів 35...65 кеВ виміряні параметри пучка. Рух частинок здійснювався у спадаючому магнітному соленоїдальному полі. Ділянка руху складалася з 14 кілець діаметром 66 мм, розташованих на відстані 85 мм від анода гармати. Вивчено залежність струму пучка від амплітуди та градієнта спаду поля. Експериментально показана можливість концентрації пучка електронів з енергією в десятки кеВ у спадаючому магнітному полі соленоїда. Оптимізацією розподілу магнітного поля, що створене соленоїдом та кільцевими магнітами) та його градієнта спаду можна домогтися збільшення попадання електронів на одне кільце (до ~72 % струму пучка). На основі математичної моделі руху електронного потоку синтезовано програмний засіб, що дозволяє отримувати та інтерпретувати характеристики результируючих потоків. Чисельно проведено моделювання динаміки руху сукупності електронів (кількість частинок 1000) у магнітному полі соленоїда. Отримані чисельні залежності задовільно узгоджуються з експериментальними результатами для магнітного поля з великим градієнтом спаду. Для цих умов проведено пряме моделювання руху електронів. Розглянуто різні зміни магнітного поля. Показано, що для обраних початкових умов пучка електронів і розподілу магнітного поля в системі електронний згусток виявляється на вертикальній ділянці міліметрового розміру. Таким чином, змінюючи амплітуду та розподіл магнітного поля, можна регулювати струм у радіальному напрямку вздовж довжини труби, і, отже, місце електронного опромінення.

Ключові слова: магнетронна пушка, вторинноемісійний катод, електронний пучок, математичне моделювання, розподіл магнітного поля.

O. S. MAZMANISHVILI, M. G. RESHETNYAK, G. YU. SYDORENKO

DYNAMICS OF AN ELECTRON BEAM FORMED BY MAGNETRON GUN WITH THE SECONDARY EMISSION CATHODE IN THE DECLINING MAGNETIC FIELD OF SOLENOID: EXPERIMENT AND SIMULATION

The article presents the results of research and calculations on the formation of a radial electron beam by a magnetron gun with a secondary emission

© А. С. Мазманишвили, Н. Г. Решетняк, А. Ю. Сидоренко, 2021

cathode in the electron energy range 35..65 keV and measuring its parameters during transportation in the total decreasing magnetic field of the solenoid and the stray field of permanent magnets. The beam was transported in a system consisting of copper rings with an inner diameter of 66 mm, located at a distance of 85 mm from the exit of the magnetron gun. The dependence of the beam current on the amplitude and gradient of the field decay has been studied. The studies carried out have shown the possibility of stable formation of a radial electron beam with an energy of tens of keV in the decreasing magnetic field of the solenoid. By optimizing the distribution of the magnetic field (created by the solenoid and ring magnets) and its decay gradient, it is possible to achieve an increase in the incident of electrons on one ring (up to ~72% of the beam current). On the basis of the mathematical model of the movement of the electron flow, a software tool has been synthesized that makes it possible to obtain and interpret the characteristics of the resulting flows. The obtained numerical dependences are in satisfactory agreement with the experimental results for a magnetic field with a large decay gradient. Various configurations of the magnetic field are considered. Solutions to the direct problem of modeling electron trajectories for given initial conditions and parameters are obtained. Various configurations of the magnetic field are considered. It is shown that for the selected initial conditions for the electron beam and the distributions of the longitudinal magnetic field along the axis of the gun and the transport channel, the electron flux falls on a vertical section, the length of which is on the order of a millimeter. Thus, by changing the amplitude and distribution of the magnetic field, it is possible to control the current in the radial direction along the length of the pipe, and, therefore, the place of the electron irradiation.

Keywords: magnetron gun, secondary-emission cathode, electron beam, mathematical design, distribution of magnetic-field.

Введение. В настоящее время ведутся работы по широкому применению радиационных технологий. В данном направлении можно выделить ряд актуальных задач: формирование и использование устойчивого пучка электронов для стерилизации медицинской продукции [1, 2, 3], изменение поверхностных свойств металлов и фазового состава путем поверхностной обработки электронным пучком и т.д. При обработке электронным пучком некоторых типов сталей получено увеличение твердости от 2 до 5 раз и возрастания срока службы. При обработке лопаток газовых турбин электронным пучком увеличивается срок службы в 2...2,5 раз [4, 5].

Обзор предметной области. Актуальность. Рассмотрение задач управления электронным пучком требует создания нужной геометрии магнитного поля с целью формирования устойчивого пучка электронов при его передаче вдоль канала ускорителя. Такая реализация связана с предварительным компьютерным моделированием динамики электронного пучка для конкретных ускорителей и последующей экспериментальной проверкой результатов. Подобные расчеты проводились в ряде работ. Так, в работе [6] получены результаты расчетов динамики сгустков ускоренных электронов в периодически меняющемся во времени магнитном поле в линейном СВЧ-ускорителе на стоячей волне. В работе [7] приводятся теоретические расчеты геометрии магнитного поля для формирования электронных вращающихся сгустков. Проведено численное моделирование продольного сжатия трубчатого пучка без учета эффектов пространственного заряда и получены оптимальные параметры установки для реализации продольного сжатия трубчатого пучка в магнитной системе типа „касп“. Исследованы зависимости характеристик сжатого пучка, определяющие допуски на его начальные параметры и параметры магнитной системы. В работе [8] проведено численное моделирование процесса инжекции пучка электронов сходящимся магнитным полем в магнитную ловушку. Промоделирован эффект появления угловой расходимости скоростей электронов в магнитном поле при транспортировке пучка и его сжатии. Определен диапазон токов пучка, при превышении которого появляются отраженные от пробки электроны. В работе [9] рассмотрена динамика пучка в магнитном поле кольцевого соленоида. Разработан программный модуль для моделирования динамики частиц в

магнитных полях, конфигурация контуров которых задается аналитически. В работе [10] на основе метода макрочастиц получены конфигурационные портреты пучка, и распределение плотности заряда вдоль канала в триодных системах, изучено влияние геометрии системы на формирование виртуального катода.

Следует отметить, что получение электронных пучков с помощью описанных в представленных работах установок обуславливает небольшой срок службы катодов. В НИЦ ХФТИ на протяжении последних лет ведутся исследования с источниками электронов с холодными катодами, работающими в режиме вторичной эмиссии с их поверхности в скрещенных электрических и магнитных полях [11, 12]. Достоинством вторичноэмиссионного источника является: отсутствие накала, простота конструкции, способность работать в условиях технического вакуума ($\sim 10^{-6}$... $\sim 10^{-5}$ Торр), безинерционность включения, высокая плотность тока ~ 50 А/см² с единицы поперечной площади катодов, при этом катоды не теряют эмиссионную способность после напуска атмосферы. Считается, согласно оценкам, что время жизни катодов из платины составляет ~ 10000 ч.

Цель. В данной работе представлены результаты исследований по динамике пучка электронов в магнетронной пушке с вторичноэмиссионным катодом. При энергии электронов в 35..65 кэВ измерены параметры пучка. Движение частиц осуществлялось в спадающем магнитном соленоидальном поле и поле рассеяния постоянных магнитов и описана математическая модель движения электронного потока в этом поле. Актуальность работы обусловлена отсутствием достаточных экспериментальных и теоретических результатов, описывающих формирование электронного пучка в установках с холодными катодами.

Экспериментальная установка и методика исследований. Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

Для питания магнетронной пушки использовался импульсный генератор **1**, который обеспечивал получение импульса напряжения с выбросом на вершине ~ 100 кВ, амплитуда плоской части импульса ~ 65 кВ, длительность импульса ~ 15 мкс. Источник электронов (С – катод, А – анод) размещается в вакуумном объеме **3**. Магнетронная пушка имела анод диаметром 78 мм и катод диаметром 38 мм. Для

транспортировки электронного пучка создается магнитное поле соленоидом 4, состоящим из четырёх секций, каждая из которых питалась от источников постоянного тока. Изменяя ток в каждой из катушек можно регулировать продольное распределение магнитного поля в канале транспортировки пучка и тем самым использовать различные режимы формирования электронного пучка.

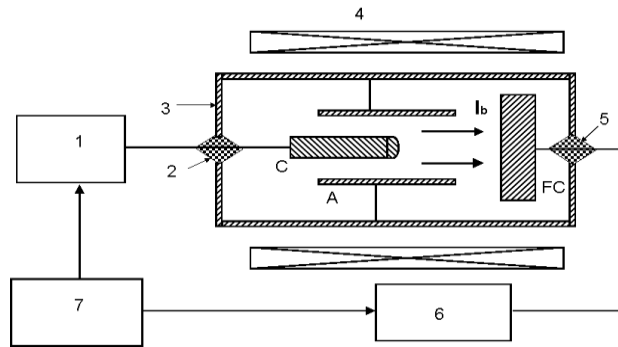


Рис. 1. Блок схема экспериментальной установки.

1 – высоковольтный импульсный генератор; 2, 5 – проходные изоляторы; 3 – вакуумная камера магнетронной пушки с вторичноэмиссионным катодом (С – катод, А – анод), 4 – соленоид, создающий продольное магнитное поле, FC – цилиндр Фарадея; 6 – компьютерная измерительная система, 7 – блок синхронизации

Система транспортировки электронов состояла из 14 медных колец с внутренним диаметром ~66 мм, находящейся на расстоянии ~85 мм от среза магнетронной пушки (рис. 2). Для фиксации однородности радиального электронного пучка 11-е кольцо было разрезано на 4 идентичных сегмента.

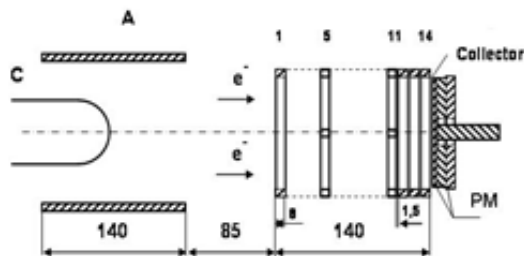


Рис. 2. Расположение элементов пушки и системы измерения тока пучка (А – анод, С – катод, 1...14 – металлические кольца, PM – постоянные магниты. Кривые 1, 2 – суммарное магнитное поле соленоида и поля рассеяния постоянных магнитов, кривая 3 – поле без использования постоянных магнитов)

На рис. 3 приведено распределение продольного магнитного поля (кривые 1, 2, 3 вдоль оси магнетронной пушки и канала транспортировки пучка, при которых проводились эксперименты. Направления полей кольцевых магнитов было противоположное. Обработка результатов измерений параметров импульсов напряжения, токов в радиальном и осевом направлениях проводилась с помощью компьютерной измерительной системы (6).

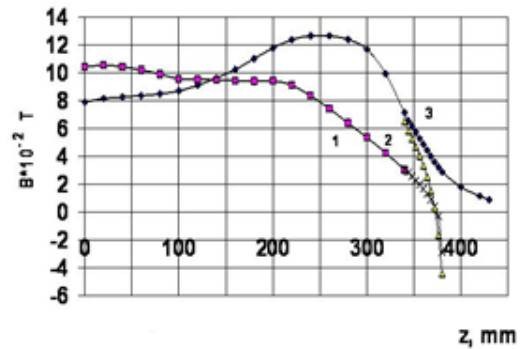


Рис. 3. Распределение продольного магнитного поля вдоль оси пушки и канала транспортировки пучка

Экспериментальные результаты и их обсуждение.

Были проведены эксперименты, в которых для регулирования спада магнитного поля использовалось рассеянное магнитное поле в кольцевых магнитах, которые размещались на оси системы. В экспериментальных исследованиях в диапазоне энергий электронов 35...65 кэВ обнаружено, что величина тока пучка в радиальном направлении и его распределение вдоль длины металлических колец зависит от амплитуды распределения магнитного поля вдоль оси системы и градиента спада поля.

На рис. 4 приведены типичные осциллограммы сигналов напряжения на катоде U и токов в радиальном направлении I_{13} и I_{14} снятые с 13-го и 14-го колец, которые были получены при распределении магнитного поля, показанного на рис. 3 (кривая 2). Эксперименты показали, что при этом распределении магнитного поля, как видно из рис. 5, ток в радиальном направлении на 14-е кольцо составлял ~70 % тока пучка при энергии электронов ~42 кэВ. Магнитное поле в области расположения 14-го кольца имело градиент спада ~280 Ое/см при напряженности магнитного поля на середине кольца ~400 Ое/см. Ток в радиальном направлении на 13-е кольцо составлял ~15 %, а на 12-е – ~4 %, а ток, идущий в осевом направлении, составлял ~11 % тока пучка.

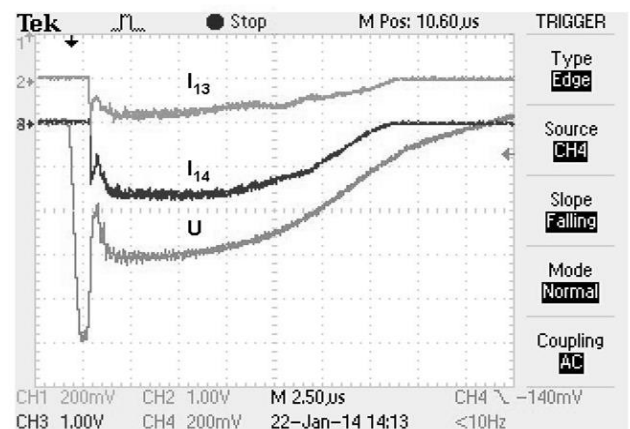


Рис. 4. Осциллограммы импульсов токов в радиальном направлении (I_{13} , I_{14}) и импульс напряжения на катоде (U). I_{13} – 4.5 А/дел, I_{14} – 14 А/дел, U – 14 кВ/дел

Исследования показали, что при уменьшении градиента спада магнитного поля до ~ 100 Ое/см (без использования постоянных магнитов), в области 14-го кольца (рис. 3, кривая 3), ток в радиальном направлении на кольцо уменьшился на 80 %, как видно из рис. 5 (для кривой 3). При этом увеличивались токи в радиальном направлении с 13-го кольца по 10-е соответственно.

Экспериментально установлено, что, варьируя распределение магнитного поля вдоль оси магнетронной пушки (рис. 3, кривая 1), можно было регулировать ток вдоль длины колец. Как видно из рисунка, в области нахождения магнетронной пушки и вдоль измерительной системы магнитное поле было спадающее. При этом распределении магнитного поля максимум тока смещался с 14-го кольца на 11-е и составлял ~ 38 % тока пучка при энергии электронов 45 кэВ. Магнитное поле в области расположения 11-го кольца было спадающее с градиентом поля ~ 110 Ое/см. Так как 11-е кольцо было разрезано на 4 идентичных сегмента, то, снимая радиальные токи с двух противоположных разнесенных на 180° сегментов, можно было судить об азимутальной однородности пучка.

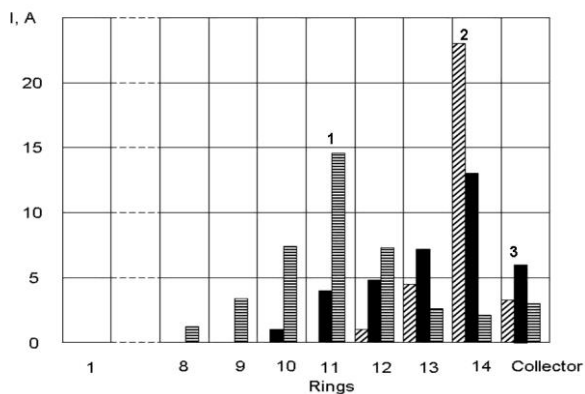


Рис. 5. Сравнительная гистограмма распределения токов в радиальном направлении по кольцам для различных градиентов спада магнитного поля, приведенного на рис. 3; 1 – магнитное поле (кривая 1), 2 – магнитное поле (кривая 2), 3 – магнитное поле (кривая 3)

На рис. 6 приведены осциллограммы импульсов токов в радиальном направлении, снятые с 2-го и 3-го сегментов 11-го кольца. Из осциллограмм видно, что форма и амплитуда сигналов с сегментов при распределении магнитного поля, показанного на рис. 3 (кривая 1), практически совпадают. Коэффициент азимутальной неоднородности пучка равнялся ~ 1.1 .

Ранее проведенные исследования показывают, что азимутальная однородность электронного пучка в сильной степени зависит от продольного распределения магнитного поля [1]. Оптимальным для формирования электронного пучка является распределение магнитного поля на катоде, при котором коэффициент азимутальной однородности пучка – минимальный.

На рис. 7 приведена зависимость тока на 14-м кольце от градиента спада магнитного поля. Из рисунка видно, что с увеличением градиента спада

магнитного поля значительная часть тока $\sim > 70$ % от общего тока пучка протекает через одно металлическое кольцо.

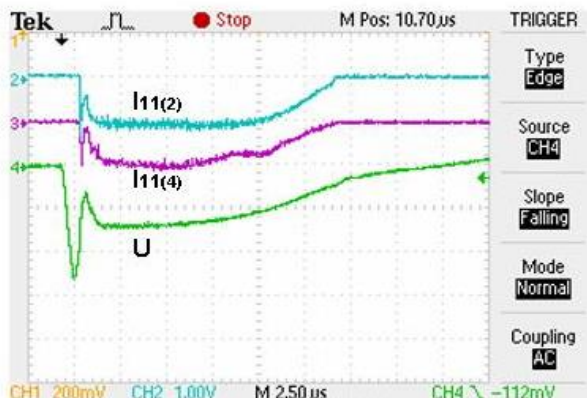


Рис. 6. Осциллограммы импульсов токов в радиальном направлении с двух сегментов 11-го кольца ($I_{11(2)} = 3.6$ А, $I_{11(4)} = 3.5$ А) и импульс напряжения на катоде (U); $I_{11(2)} - 3.5$ А/дел, $I_{11(4)} - 3.5$ А/дел, $U \sim 30$ кВ/дел

Следует отметить, что в диапазоне градиента спада магнитного поля до ~ 110 Ое/см эти данные были получены с помощью регулирования спада поля только соленоидом.

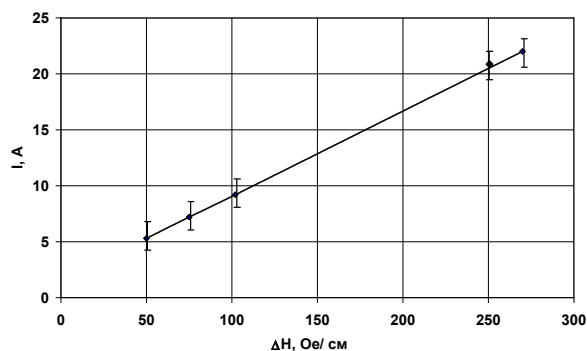


Рис. 7. Зависимость тока в радиальном направлении на 14-е кольцо от градиента спада магнитного поля

Амплитуда тока пучка в радиальном направлении на металлические кольца и его распределение вдоль длины колец зависела не только от градиента спада магнитного поля, но и от величины напряженности магнитного поля в этой области.

В исследованиях показано, что плотность мощности пучка на металлическом кольце составляет ~ 0.1 МВт/см² (энергия $E \sim 62$ кэВ, ток $I \sim 28$ А) при длительности импульса ~ 15 мкс и частоте повторения ~ 3 Гц. Если допустить, что весь ток в радиальном направлении равномерно распределен по длине кольца, то приведенной мощности будет недостаточно для модификации внутренней поверхности материалов трубчатых изделий. В дальнейшем будут проведены исследования различных режимов работы ускорителя при энергии электронов 100... 120 кэВ для повышения плотности мощности на внутренней цилиндрической поверхности.

Математическое моделирование. 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. Для понимания и объяснения физических процессов, сопровождающих механизм такого формирования, следует провести теоретический анализ задачи, в которой электрон с энергией E , стартующий на некотором расстоянии r_0 от нот оси системы, влетает в заданное соленоидальное магнитное поле. Требуется получить траекторию для электрона. Такая задача имеет обобщение для пучка исходных электронов с заданным стартовым распределением по радиусу r_0 и по направлениям r'_0 .

Гамильтониан рассматриваемой задачи в полярной 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, 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. Теперь уравнения движения можно записать в виде

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

К уравнениям (2) необходимо присоединить начальные условия для r_0 , z_0 , ϑ_0 , а также для p_{r0} , p_{z0} , $p_{\vartheta0}$. Устойчивость численного алгоритма решения связана с шагом Δs решения, где $s = ct$ (t – текущее время), и ларморовским параметром $\mu = e_0 B / mc$. Численное решение системы (2) будет сходиться к его аналитическому аналогу, если $\mu \Delta s \ll 1$, что обеспечивается при $\Delta s \ll 0.0001$ м.

Численно искать решение системы (2) возможно, если амплитуда $f(z)$ магнитного поля, а также её производная $\frac{\partial}{\partial z} f(z)$, будут заданы в аналитическом виде. Для этого была создана процедура, позволяющая на основании массива магнитного поля (рис. 2, 3), а также известных геометрических характеристик использованных соленоидов восстанавливать распределение амплитуды магнитного поля на оси z . Аналитическое представление для функции $f(z)$ возможно восстановить, опираясь на известную формулу [13]

$$A(z) = \frac{1}{4} \left(\frac{z-z_r}{\sqrt{(z-z_r)^2 + R^2}} - \frac{z-z_l}{\sqrt{(z-z_l)^2 + R^2}} \right), \quad (3)$$

в которой $A(z)$ – соленоидальная функция магнитного поля, R , z_l , z_r – радиус, левая и правая границы

соленоида, и аналогично для каждого из соленоидов. Набор из M экземпляров такого рода соленоидальных функций не образует полного базиса, пригодного для решения. Однако если учесть, что соленоиды следуют последовательно вдоль оси Z , а левые и правые фронты спадающего магнитного поля в каждом 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, запишем уравнения для амплитуд магнитного поля $\{H_m\}$ в каждой из точек измерения $\{z_n\}$, $n = 0, 1, \dots, N$, вдоль оси Z :

$$\sum_{m=1}^M H_m A_m(z_n) = Z_n, \quad (4)$$

последовательностью $\{Z_n\}$, которой обозначена совокупность результатов измерения объемом N . В качестве решения будем рассматривать набор оценок значений величин $\{H_m\}$, $m = 0, 1, \dots, M$. На основании известного метода наименьших квадратов [13] используем то решение системы (4), которое приближается к точному в смысле его наименьшего среднеквадратичного отклонения. В результате получаем искомое решение $\{H_m\}$. На рис. 8 приведен пример проведенного восстановления. Соответствующую производную $\frac{\partial}{\partial z} f(z)$ амплитуды можно получить, опираясь на выражение (3).

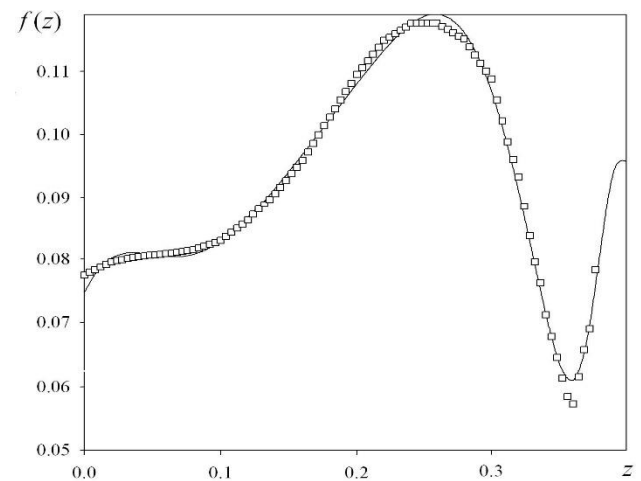


Рис. 8 – Пример экспериментальных данных (квадратики) и восстановленной аналитической функции $f(z)$

Результатом рассматриваемой задачи Коши [13] будет являться траектория электрона (или пучок таких траекторий), отвечающий множеству начальных условий. Потребовав выполнения заданного условия (например, достижение радиальной компонентой r некоторого значения r_2) можно получить необходимую информацию о результирующем пучке и изучить его свойства.

Численно проведено моделирование динамики движения совокупности электронов (количество частиц 1000) в магнитном поле соленоида. Фазовая карта (z, r) для выбранного электрона с $r_0 = 0.020$ м,

энергией $E = 30$ кэВ, которая была получена при распределении магнитного поля, показанного на рис. 3 (кривая 2) приведена на рис. 9.

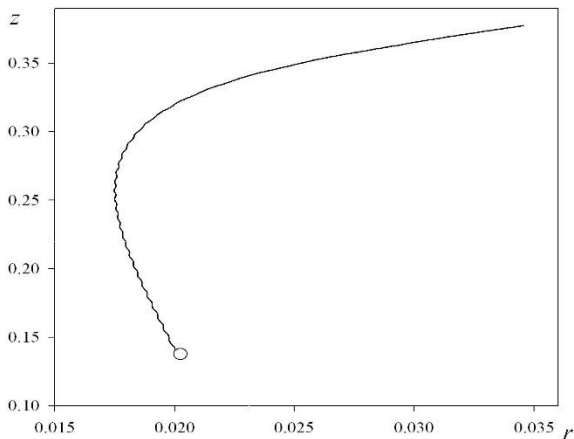


Рис. 9. Фазовая карта (z, r) для выбранной частицы

Пример траектории для одного выбранного электрона с теми же начальными условиями приведен на рис. 10, на котором также горизонтальной линией указан пороговый уровень $r_U = 0.033$ м.

Начальные условия для электронов возможно варьировать, для приводимых результатов принималось: начальный радиус $r_0 = 0.020$ м (радиус кольца эмиссии); $\Delta r_0 = 0.001$ м; $z_0 = 0.014$ м (место эмиссии по вертикали); координата z'_0 определялась энергией частиц (в полученных зависимостях энергия E частиц равнялась 30...60 кэВ), при этом начальное распределение по азимуту ϑ_0 задавалось равномерным. Точность расчетов определялась количеством шагов в интегрирующем алгоритме Рунге – Кутты.

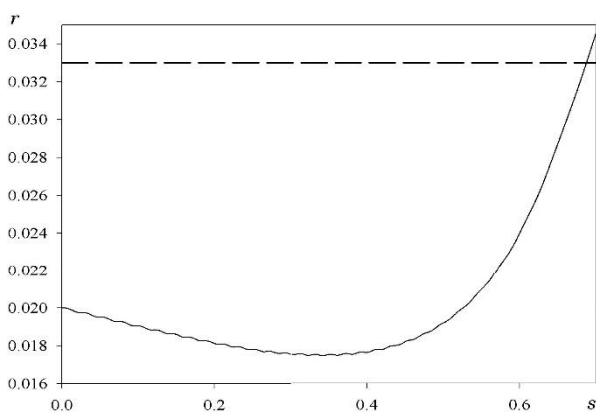
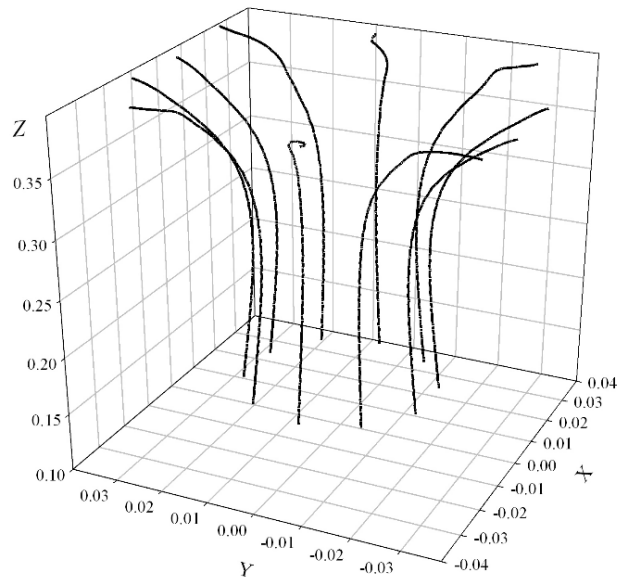
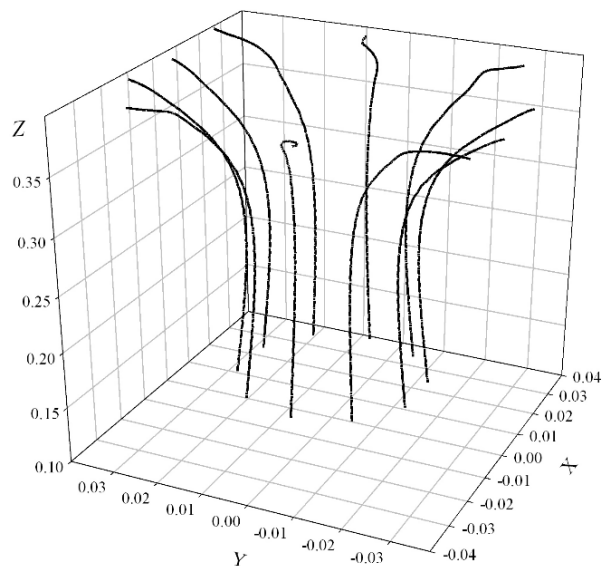


Рис. 10. Зависимость радиальной компоненты движения $r(s)$ от пройденного пути $s = ct$ для выбранной частицы

На рис. 11 приведено два семейства из 10 траекторий электронов, $z_0 = 0.014$ м (ось Z – вертикальная), у которых начальный азимутальный угол равномерно распределен на $(0, 2\pi)$. Видно, что по мере движения в спадающем магнитном поле, электроны отклоняются от оси Z , при этом достигается заданный пороговый радиус r_U .



а



б

Рис. 11. Набор траекторий частиц (вид сбоку):
а – $E = 30$ кэВ; б – $E = 40$ кэВ

На рис. 12 приведены расчетные гистограммы вертикальных значений $G(z_U)$ при достижении электронами с энергией $E = 40$ кэВ и $E = 50$ кэВ радиального уровня $r_U = 0.033$ м, которые были получены при распределении магнитного поля, показанного на рис. 3 (кривая 1). Видно, что поток электронов (объем выборки – 1000) попадает на вертикальный участок, протяженность которого Δz_U составляет доли миллиметра. Такая концентрация обусловлена исходным распределением по координате z , размеры которого (согласно постановке задачи) малы ($\Delta z_0 = 0.001$ м). Также малыми были выбраны интервалы возможных значений в распределениях

исходного потока частиц по другим координатам (или равны нулю).

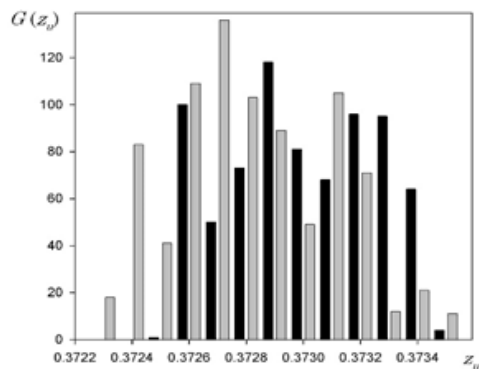


Рис. 12. Гистограммы $G(z_U)$ вертикальных значений z_U электронного пучка при достижении ими радиуса $r_U = 0.033$ м. Серые столбики – $E = 50$ кэВ, черные – $E = 40$ кэВ

Анализ движения потоков частиц с увеличенным фазовым объемом, в частности, с большим вертикальным размером Δz_0 и большего разброса по импульсам p_{z0} и p_{r0} приводит к выводу о соответствующем увеличении вертикального участка Δz_U , на котором реализуется выполнение условия попадания на заданный радиус.

Выводы.

Проведенные исследования показали возможность устойчивого формирования радиального электронного пучка с энергией в десятки килоэлектронвольт в спадающем магнитном поле соленоида. Распределение тока пучка вдоль металлических колец и сам ток пучка в радиальном направлении зависит от амплитуды магнитного поля вдоль оси системы и градиента спада поля. Оптимизацией распределения магнитного поля (создаваемого соленоидом и кольцевыми магнитами) и его градиента спада можно добиться увеличения попадания электронов на одно кольцо (до ~ 72 % тока пучка).

На основе математической модели движения электронного потока синтезировано программное средство, позволяющее получать и интерпретировать характеристики результирующих потоков. Рассмотрены различные конфигурации магнитного поля. Численно получены решения прямой задачи моделирования траекторий электронов. Экспериментально показано, что поток электронов попадает на вертикальный участок, длина которого порядка миллиметра для выбранных распределений продольного магнитного поля вдоль оси пушки и канала транспортировки. Полученные численные зависимости удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами для магнитного поля с большим градиентом спада.

Таким образом, изменяя амплитуду и распределение магнитного поля, можно регулировать ток в радиальном направлении вдоль длины трубы, и, следовательно, место электронного облучения. В дальнейшем необходимо провести исследование различных режимов работы магнетронной пушки при энергии электронов 100...120 кэВ и выбрать оптимальные

характеристики электронного облучения для обработки внутренних поверхностей трубчатых изделий.

Список литературы

1. Belugin V. M., Mischenko A. V., Pirozhenko V. M., Rozanov N. E., Zavadtsev A. A., Korolev A. N., Simonov K. G. Compact electron linacs for radiation technology systems. *Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference*. 2001. Vol. 4. P. 2515–2517.
2. Довбня А. Н., Лавриненко С. Д., Закутин В. В. и др. Модификация поверхности циркония и сплава Zr 1% Nb электронным пучком ускорителя на основе магнетронной пушки *ВАНТ. Серия «Физика радиационного материаловедения»*. 2011, № 2(72), вып. 97. С. 39–45.
3. Быстров П. А., Розанов Н. Е. Методика и программа «Beap scanning» расчета процессов в системе развертки релятивистского электронного пучка с широким энергетическим спектром. *ВАНТ*, 2012, №4, вып. 87. С. 87–91.
4. Голковский М. Г., Корчагин А. И., Куksанов Н. К. и др. Перспектива применения электронно-лучевой технологии для повышения износостойкости боковой поверхности рельсов в действующем пути. *Сб. докладов X Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине* (г. Санкт-Петербург, 1–4 октября, 2001). М.: ЦНИИатоминформ, 2001. С. 393–396.
5. Глухих В. А., Печерский О. П., Яценко Б. И. Модификация поверхностных свойств материалов с помощью мощных импульсных электронных пучков. *Сб. докладов X Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине* (г. Санкт-Петербург, 1–4 октября, 2001). М.: ЦНИИатоминформ, 2001. С. 445–447.
6. 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, no. 12. P. 4502–4514.
7. Азарян Н. С., Баренгольд С. А., Доля С. Н., Месяц Г. А., Перельштейн Э. А. Азарян Н. С., Баренгольд С. А., Доля С. Н., Месяц Г. А., Перельштейн Э. А. Моделирование формирования электронного кольца с использованием пикосекундных электронных пучков в магнитной системе типа "касп". *Журнал технической физики*. 2010. Т. 80, вып. 4. С. 126–134.
8. Астрелин В. Т., Кандауров И. В., Свешников В. М. Численное моделирование транспортировки и сжатия электронного пучка сходящимся магнитным полем при его инжекции в многопробочную ловушку ГОЛ-3. *Успехи прикладной физики*. 2013. Т. 1, № 5. С. 580–585.
9. Тузиков А. В., Александров В. С., Шевцов В. Ф. Моделирование динамики пучка в магнитном поле спиральной катушки. *Письма в ЭЧАЯ*. 2006. Т. 3, №7 (136). С. 55–59.
10. Коваль Т. В., Офицеров В. В., Обухов Д. С., Марченко А. Л. Исследование самосогласованной динамики сильноточного электронного пучка в триодах с виртуальным катодом. *Вестник науки Сибири*. 2012. № 3, вып. 4. С. 16–23.
11. Волколупов Ю. Я., Довбня А. Н., Закутин В. В. и др. Формирование электронных пучков в магнетронном диоде с металлическим вторичноэмиссионным катодом. *Журнал технической физики*. 2001. Т. 71, вып. 2. С. 98–104.
12. Довбня А. Н., Закутин В. В., Решетняк Н. Г. и др. 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.
13. Маделунг Э. *Математический аппарат физики*. Москва: Физматгиз, 1961. 620 с.

References (transliterated)

1. Belugin V. M., Mischenko A. V., Pirozhenko V. M., Rozanov N. E., Zavadtsev A. A., Korolev A. N., Simonov K. G. Compact electron linacs for radiation technology systems. *Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference*. 2001, vol. 4, pp. 2515–2517.
2. Dovbnya A. N., Lavrinenko S. D. and Zakutin V. V. Modifikaciya povirhnosti 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), issue 97, pp. 39–45.
3. Bistrov P. A., Rozanov N. E. "Metodika i programma «Bean scanning» rascheta processov v sisteme razvertki relyativistskogo elektronogo puchka s shirokim energeticheskim spektrom". *VANT*, no. 4, issue 80. 2012. 87–91.
 4. Golkovski M. G., Korchagin A. I., Kuksanov K. Perspektiva primeneniya elektronno-luchevoy tehnologii dlya povysheniya iznosostoykosti bokovoy poverhnosti rel'sov v deystvuyutshem puti. [The prospect of using electron-beam technology to increase the wear resistance of the side surface of the rails in the operating track]. *Sb. dokladov X mezhdunarodnogo sovetshania po primineniju sarjazhennykh chastits v promishlennosti i medicine* [Collection of reports of the X International Meeting on the Application of Charged Particle Accelerators in Industry and Medicine] (s.Sankt-Peterburg, 1–4 oktober, 2001). Moscow: TsNIIatominform, 2001, pp. 93–396.
 5. Gluhih V. A., Pecherskiy O. P., Engel'ko V. I., Yatsenko B. I. Modifikatsiya poverhnostnykh svoystv materialov s pomotshyu motshnykh impul'snykh ustanovok [Modification of surface properties of materials using high-power pulsed electron beams]. *Sb. dokladov X mezhdunarodnogo sovetshania po primineniju sarjazhennykh chastits v promishlennosti i medicine* [Collection of reports of the X International Meeting on the Application of Charged Particle Accelerators in Industry and Medicine] (s.Sankt-Peterburg, 1–4 oktober, 2001). Moscow: TsNIIatominform, 2001, pp. 93–396.
 6. 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, no. 12, pp. 4502–4514.
 7. Asaryan N. S., Barenko S. A., Dolya S. N., Mesyats G. A., Perel'shteyn E. A. Modelirovaniye formirovaniya elektronogo kol'tsa s ispol'zovaniem pikosekundnykh elektronnykh puchkov v magnitnoy sisteme tipa "kasp" [Simulation of the formation of an electron ring using picosecond electron beams in a "cusp" magnetic system]. *Gurnal tehnicheckoy fiziki*. [Journal of Technical Physics], 2010, issue. 80, no. 4, pp. 126–134.
 8. Astrelin V.T., Kandaurov I.V., Sveshnikov V.M. Chislennoe modelirovaniye transportirovki i szhatiya elektronogo puchka shodyatshim magnitnym polem pri ego izhekicii v mnogoprotochnuyu lovushku GOL-3 [Numerical simulation of the transport and compression of an electron beam by a converging magnetic field during its injection into a GOL-3 multi-mirror trap]. *Uspehi prikladnoy fiziki* [Advances in Applied Physics]. 2013, vol. 1, no. 5, pp. 580–585.
 9. Tusikov A.V., Aleksandrov V. S., Shevtsov V. F. Modelirovaniye dinaiki puchka v magnitnom pole spiral'no' katushki. [Simulation of beam dynamics in the magnetic field of a spiral coil]. *Pis'ma v EChAya* [The brief of ECAY]. 2006, vol. 3, no. 7 (136), pp. 55–59.
 10. Koval' T. V., Ofizerov V. V., Obuhov D. S., Marchenko A. L. Isslodovaniye samosoglasovannoi dinamiki sil'notochnogo elektronogo puchka v triodah s virtual'nym katodom [Study of the self-consistent dynamics of a high-current electron beam in triodes with a virtual cathode]. *Vestnik nauki Sibiri* [Siberian Science Bulletin]. 2012, issue 4, no. 3, pp. 16–23.
 11. Volkolupov Yu. Ya. Dovbnya A. N., Zakutin V. V. Generaciya elektronnykh puchkov v magnetronnom diode s metalicheskim vtorichniemissionnym katodom [Generation of electron beams in a magnetron diode with a metallic secondary-emission cathode]. *GTF*, 2001, issue 71, vol. 7, pp. 88–91.
 12. Dovbnya A. N., N. G. Reshetnyak and V. V. Zakutin. "Issledovaniye formirovaniya puchka v uskoritele elektronov s vtorichniemissionnim istochnikom." *Visnyk "HNU". Ser.: Yadra, chastinki, polya*. [Bulletin "HNU". Ser. "Nuclei, Particles, Fields"]. 2006, issue, 732, vol. 2(30), pp. 96–100.
 13. Madelung E. *Matematicheskiy apparat fiziki* [Mathematical machine of physics]. Moscow, Fizmatgiz, 1961. 620 p.

Поступила (received) 05.10.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мазманішвили Александр Сергеевич – доктор фізико-математических наук, професор, старший научний сотрудник ННЦ ХФТИ, г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0373-0626>; e-mail: mazmanishvili@gmail.com

Решетняк Николай Григорьевич – кандидат фізико-математических наук, старший научний сотрудник ННЦ ХФТИ, г. Харьков; Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2345-6789>; e-mail: nreshetnyak@kipt.kharkov.ua

Сидоренко Анна Юрьевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры системного анализа и информационно-аналитических технологий НТУ «ХПИ», доцент кафедры моделирования систем и технологий ХНУ им. В.Н. Каразина, г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0761-2793>; e-mail: annsydorenko01@gmail.com

Мазманішвілі Олександр Сергійович – доктор фізико-математических наук, професор, старший науковий співробітник ННЦ ХФТИ, м. Харків; Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0373-0626>; e-mail: mazmanishvili@gmail.com

Решетняк Микола Григорійович – кандидат фізико-математических наук, старший науковий співробітник ННЦ ХФТИ, м. Харків; Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2345-6789>; e-mail: nreshetnyak@kipt.kharkov.ua

Сидоренко Ганна Юрїївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій НТУ «ХПІ», доцент кафедри моделювання систем і технологій ХНУ ім. В. Н. Каразіна, м. Харків; Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0761-2793>; e-mail: annsydorenko01@gmail.com

Mazmanishvili Oleksandr Serhiyovych – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, senior staff scientist, National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology", Kharkov; Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0373-0626>; e-mail: mazmanishvili@gmail.com

Reshetnyak Nikolay Grigorievych – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior staff scientist, National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology", Kharkov; Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2345-6789>; e-mail: nreshetnyak@kipt.kharkov.ua

Sydorenko Ganna Yurijivna – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of analysis of systems and information-analytical technologies NTU "KhPI", Associate Professor at the Department of Modeling of systems and technologies KhNU by V. N. Karazin, Kharkov; Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0761-2793>; e-mail: annsydorenko01@gmail.com