

О. С. МАЗМАНІШВІЛІ, доктор фізико-математичних наук, професор, старший науковий співробітник ННЦ ХФТІ, м. Харків, Україна, e mail: mazmanishvili@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0373-0626>

М. Г. РЕШЕТНЯК, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник ННЦ ХФТІ, м. Харків; Україна, e mail: nreshetnyak@kpt.kharkov.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2345-6789>

Г. Ю. СИДОРЕНКО, 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, e mail: annsydorenko01@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0761-2793>

ЕЛЕКТРОННІ ПУЧКИ У ГРАДІЄНТНОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ: УПРАВЛІННЯ ПЕРЕТВОРЕННЯМ ПОЗДОВЖНЬОГО РУХУ У ПОПЕРЕЧНИЙ

В роботі розглянуто рух електронів у циліндричному магнітному полі з потенціалом градієнтного вигляду. Отримано, що у вибраному полі вихідний рух електронів уздовж поздовжньої осі перетворюється на радіальний рух. Визначено, що таке перетворення обумовлено впливом соленоїдального магнітного поля з великим поздовжнім градієнтом. Перетворення поздовжнього напрямку руху на поперечне виявилось стійким в діапазоні енергій 20...55 кеВ електронів і в інтервалі 5...50 мм радіальних розмірів пучка частинок. За допомогою програмного засобу вивчено основні залежності руху електронного пучка в заданому соленоїдальному магнітному полі. В даній роботі приведені результати чисельного моделювання траєкторій електронів у градієнтному магнітному полі зі вторинноемісійним катодом кругової форми, розташованим у середній системі. Для вивчення механізму стійкості по відношенню до магнітного поля використано два експериментально реалізовані магнітних поля. На основі цих двох полів чисельно синтезовано масиви додаткових 4 полів. Для сукупності з 6 названих полів чисельно вивчена робота гармати, коли частка відчуває стійке перетворення напрямку руху. Показано, що при заданій енергії електрона та фіксованому магнітному полі параметром, що визначає поворот частинок, є градієнт магнітного поля на межі ділянки вольту. Отримано, що ефект повороту має місце для розглянутого інтервалу радіальних розмірів пучка, що призводить до фокусування частинок. Показана можливість на основі регулювання поля в цілому керувати вертикальною координатою сфокусованого пучка, тим самим дано інтерпретацію порогової залежності реєстрації електронів на детекторі. Досліджено залежність формування підсумкового розподілу частинок від амплітуди та градієнта магнітного поля вздовж осі системи. Наводяться результати чисельного моделювання руху електронного потоку. На основі моделі руху електронного потоку розглянуто характеристики результуючого електронного пучка. В даній статті показано, що пучок, що має радіальні розміри 5...50 мм, фокусується по вертикалі на ділянку розміром 1 мм.

Ключові слова: електронний пучок, магнетронна гармата, динаміка електронів, перетворення напрямку руху, керування, градієнтне магнітне поле, математичне моделювання.

Вступ. Магнетронні гармати з холодними вторинноемісійними катодами перспективні для використання їх при створенні потужних НВЧ-приладів, прискорювальної техніки у зв'язку з високою щільністю струму, конструктивною простотою, стабільністю емісії катодів тощо [1–3]. Як об'єкт дослідження, магнетронна гармата має ту перевагу, що вона може бути модифікована для проведення експериментів різного типу [4–6]. Застосування інтенсивних магнітних полів з підвищеним градієнтом їхньої напруженості дає можливість розглянути нові явища в просторовій картині еволюції електронних пучків. Незважаючи на складність аналітичного дослідження [6–8], для отримання кількісних залежностей цілком можливе застосування обчислювальних методів та порівняння числових результатів із даними експерименту.

Раніше в ході чисельних експериментів [8–11] були виявлені випадки перетворення поздовжнього руху електронів на радіальне, які мали місце у градієнтному магнітному полі магнетронної гармати. У роботі на основі гамільтонового формалізму руху електронів у магнітному полі синтезовано програмний засіб [6, 7], що дозволяє провести чисельне моделювання динаміки трубчастих електронних потоків у циліндричному магнітному полі. Разом з досвідченими даними наводяться результати чисельного моделювання руху електронного потоку. Отримані результати моделювання свідчать про явище регульованого поперечного руху.

У ННЦ «ХФТІ» на основі магнетронної гармати було створено прискорювач електронів, який використовує осьовий електронний пучок для опромінення металевих мішеней [1, 3, 6] (див. рис. 1). Як об'єкт для досліджень магнетронна гармата має ту перевагу, що, з одного боку, вона може бути модифікована для проведення експериментів різного типу, з іншого боку, незважаючи на складність виконання аналітичного дослідження, для отримання кількісних залежностей є можливим використання обчислювальних методів та порівняння числових результатів із даними експерименту. Одним із можливих напрямів є комбінація магнітного поля в гарматі, створюваного соленоїдами, та полем додаткових постійних магнітів [7–9, 12–15].

Об'єктом даної роботи є вивчення параметрів електронного пучка при його транспортуванні в інтенсивному градієнтному магнітному полі соленоїда і побудова обчислювальної моделі руху електронного потоку в області зростання поля.

Метою дослідження було створення моделі руху електронного пучка з енергією в десятки кеВ у знакозмінному градієнтному магнітному полі, вивчення формування траєкторій електронів, залежності динаміки частинок від початкових умов та розподілу магнітного поля вздовж осі системи. Наводяться результати моделювання руху електронного потоку. У процесі моделювання є можливість в умовах експери-

© Мазманішвілі О. С., Решетняк М. Г., Сидоренко Г. Ю., 2023



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом НТУ «ХПІ» у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Конфлікт інтересів: Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



менту встановити явище перетворення поздовжнього руху на радіальне.

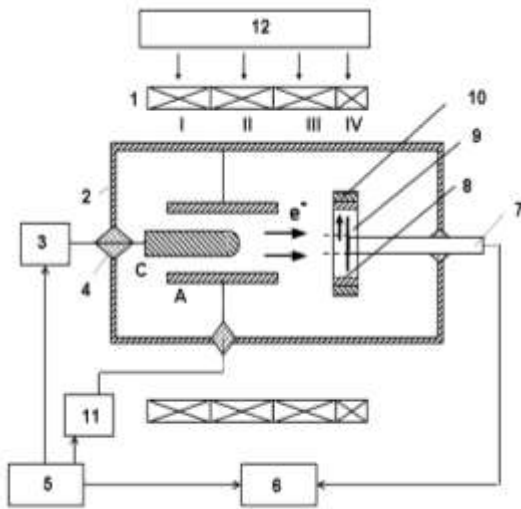


Рис. 1. Блок-схема експериментальної установки.

1 – секції соленоїда (I, II, III, IV), 2 – вакуумний об'єм, 3 – високовольтний імпульсний генератор, 4 – ізолятор, 5 – блок синхронізації, 6 – система, що вимірює, 7 – стрижень, що центрує, 8 – мідна вставка, 9 – циліндр Фарадея, 10 – постійний магніт, 11 – генератор, 12 – джерело струмів для управління магнітним полем соленоїда, А – анод, С – катод

1. Методика досліджень

Проведено дослідження по формуванню електронного пучка магнетронною гарматою (діаметр 40 мм, діаметр анода 78 мм) та вимірюванню його параметрів при напрузі на катоді 20...55 кВ.

В Табл. 1 наведено параметри електронного пучка в залежності від конфігурації магнітного поля. Проаналізувавши її, можна зробити висновок, що за певних умов пучок енергії 55 кеВ як ціле рухався по осі системи і реєструвався на циліндрі Фарадея. За інших умов пучок на циліндрі Фарадея не реєструвався, оскільки, рухаючись в радіальному напрямку, влучав на мідну вставку. При цьому спостерігалися випадки, коли зміна напрямку пучка та місце реєстрації мала стрибкоподібний характер.

Таблиця 1 – Типи магнітного поля та напрямки руху пучка

Магнітне поле (рис. 2)	Струм в осьовому напрямку, А	Струм в радіальному напрямку, А	Струм в чотирьох секціях соленоїда, А
B_1	30	0	35, 0, 18, 54
B_2	0	18	35, 0, 31, 0
B_3	0	17	-33, 0, -16, -54

На рис. 2 представлено розподіл поля B_1 (ромбики). Конфігурація цього поля, досить плавна, забезпечує проходження пучка вздовж вертикальної осі і реєстрацію на циліндрі Фарадея. На рис. 2 також наведені конфігурації полів B_2 (кружечки) і B_3 (хрестики), у яких напруженість (модулем) не перевищує 0.1 Т, при цьому градієнт поля досягав 9 Т/м. При синтезі цих полів у схемі рис. 1 був додатково використаний

постійний кільцевий магніт напруженості 0.21 Т, напрямок поля якого було протилежне напрямку поля соленоїдів. В результаті конфігурація магнітного поля була знакомісною і мала ділянки з великим градієнтом. Рух частинок у полях таких конфігурацій якісно відрізнявся. Зокрема, пучок електронів як ціле повертався на 90° і рухався в радіальному напрямку, причому струм пучка на циліндрі Фарадея пороговим чином зростав в нуль.

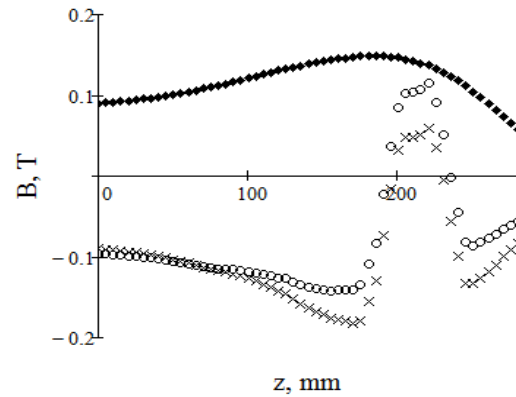


Рис. 2. Три магнітні поля B ; ромбики – поле B_1 , кола та хрестики – поля B_2 та B_3

Таким чином, виникає задача з вивчення властивостей електронного пучка при його транспортуванні в інтенсивному магнітному градієнтному полі і побудови обчислювальної моделі руху електронного потоку в області зростання поля.

2. Математичне моделювання. Конфігурації полів B_1 , B_2 і B_3 відрізняються від поля B_1 явно вираженою градієнтною властивістю в інтервалі від 170 мм до 210 мм. Після емісії пучок частинок, рухаючись уздовж осі системи, влітає в область з великим градієнтом поля, взаємодія з яким визначає траєкторію кожної частинки.

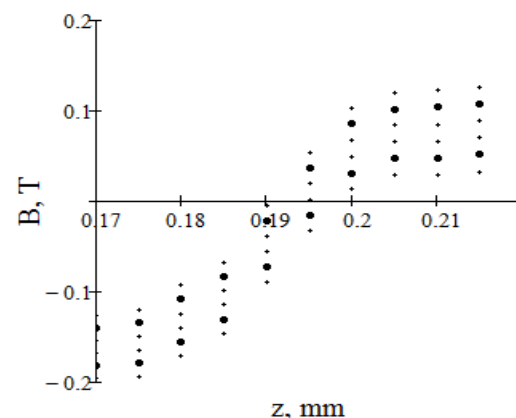


Рис. 3. Набір із 6 магнітних полів A_1, \dots, A_6 в області з великим градієнтом, кружальцями показані поля A_2 та A_5

Оскільки поля B_2 і B_3 створюються шляхом підібраних наборів варіантів струмів на обмотках секцій-соленоїдів (I, II, III, IV), оцифровані масиви цих

полів були взяті за основу подальшого моделювання. Програмний засіб [5] було використано для чисельного моделювання динаміки трубчастих електронних потоків у магнітному циліндричному полі з великим градієнтом. З цією метою було створено числові масиви A_1, \dots, A_6 з 6 додаткових магнітних полів:

$$A_k = B_2 + \frac{k-2}{3}(B_2 - B_3). \quad (1)$$

Таким чином, при $k = 2$ отримуємо поле $A_2 = B_2$ а при $k = 5$ отримуємо $A_5 = B_3$ (див. рис. 3).

При моделюванні був обраний пучок з 9 частинок, початкова умова на старті яких був рівномірний розподіл за радіусом від $r_0 = 28$ мм до $r_0 = 85$ мм у площині $(x_0; y_0)$.

Типовий приклад динаміки пучка з 9 частинок наведено на рис. 4. Можна бачити, що для всіх початкових радіусів траєкторії електронів схожі, а саме, в градієнтній області їхній рух перетворюється з поздовжнього на поперечне. Така зміна має місце всім розглянутих початкових радіусів. При цьому здійснюється фокусування частинок уздовж вертикальної осі системи.

Для деталізації типу руху та супутніх повороту та фокусування було виконано серію чисельних експериментів, у яких змінювалися як поля A_1, \dots, A_6 , так і початкові умови на площині $(x_0; y_0)$. Стійкість руху також перевірялася шляхом варіацій енергії частинок E , а також початкових умов вертикалі z_0 .

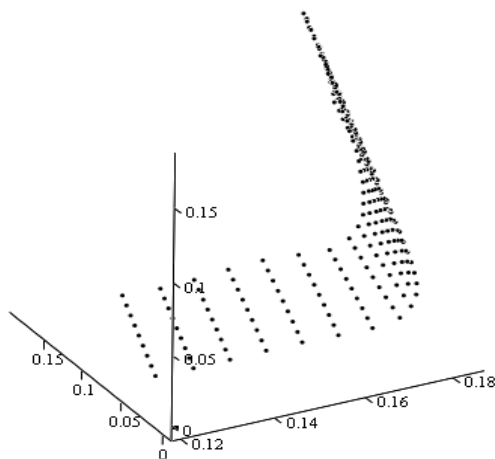


Рис. 4. Динаміка пучка (приклад із 9 частинками)

На рис. 5 наведено траєкторії частинок для двох полів градієнтного типу A_1 і A_6 , а також поля B_1 з рис. 2 зі слабо вираженою градієнтною властивістю. Можна бачити, що траєкторія частки у полі B_1 носить регулярний характер з невеликою зміною поточного радіусу $r = r(z)$ у прогнотному інтервалі від 170 мм до 210 мм. У тій же градієнтній області має місце поворот траєкторії з наступним фокусуванням, що реєструвалося для всіх шести полів A_1, \dots, A_6 .

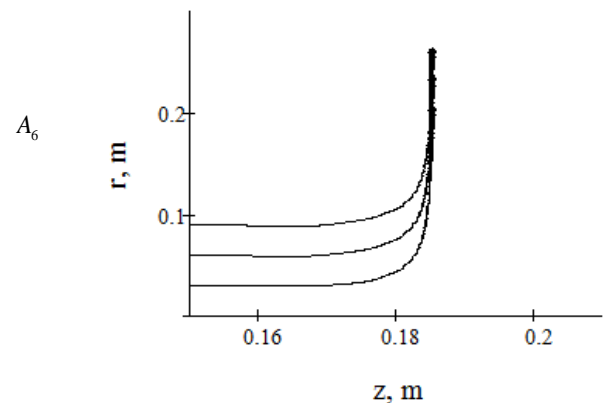
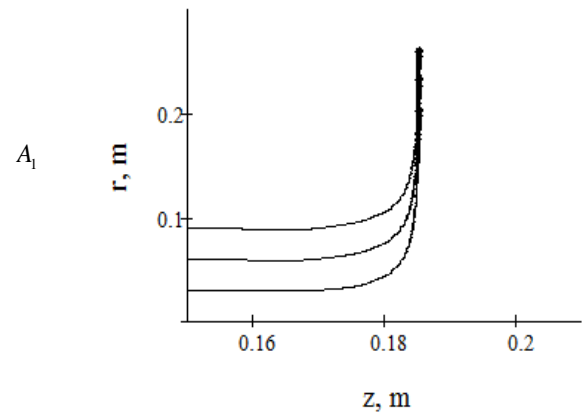
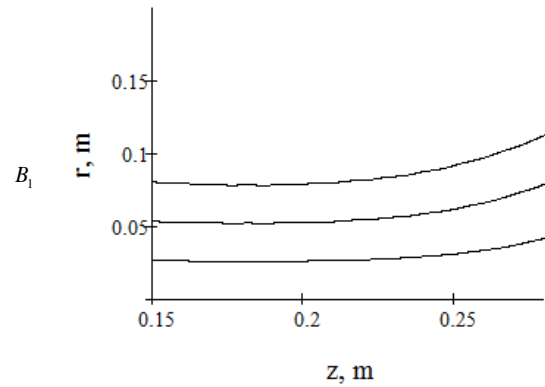


Рис. 5. Приклади траєкторій частинок

Зміщення Δz точки фокусування показано на рис. 6. При зміні параметра керування k в діапазоні параметра $0 \dots 7$ воно склало $180 \leq \Delta z \leq 197$ мм. Таким чином, область, що містить місце регульованого фокусування, має поздовжній розмір ≈ 17 мм. Сама ділянка фокусування частинки пучка, у свою чергу має розмір $\delta z \approx 2$ мм уздовж вертикальної осі, що утворений ларморовськими коливаннями електронів у циліндричному магнітному полі, чия амплітуда визначається початковим радіусом r_0 .

3. Математична модель та обговорення результатів. На основі гамільтонового формалізму руху електронів у магнітному полі побудовано програмний засіб, що дозволяє провести чисельне

модельовання динаміки електронних потоків у градієнтному магнітному полі [3, 4]. Скористаємося полярною системою координат (r, z, ϑ) та запишемо гамільтоніан електрона в магнітному полі в циліндричній системі [5, 6]

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

де e_0 , m – заряд та маса спокою електрона, p_r , p_z , p_ϑ – канонічні імпульси, A – магнітний потенціал. Його з урахуванням азимутальної симетрії запишемо у вигляді $A = A(r, z) = rB(z)$, де $B(z)$ – напруженість магнітного поля в точці.

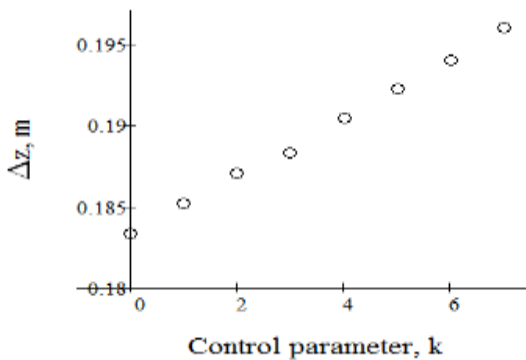


Рис. 6. Залежність керованого зміщення по вертикалі Δz від параметра вибору поля k

Рівняння руху для координат та імпульсів мають загальний вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{r} = \frac{p_r}{m}, \\ \dot{z} = \frac{p_z}{m}, \\ \dot{\vartheta} = \frac{1}{m} \left(\frac{p_\vartheta}{r} - e_0 r B(z) \right) \frac{1}{r}, \\ \dot{p}_r = -\frac{1}{m} \left(\frac{p_\vartheta}{r} - e_0 r B(z) \right) \left(\frac{p_\vartheta}{r^2} - e_0 B(z) \right), \\ \dot{p}_z = -\frac{1}{m} \left(\frac{p_\vartheta}{r} - e_0 r B(z) \right) \left(-e_0 r \frac{\partial}{\partial z} B(z) \right) \\ \dot{p}_\vartheta = 0. \end{array} \right. \quad (3)$$

Як видно з рівнянь (3), на формування траєкторії частинки впливає як розподіл магнітного поля B вздовж осі z , так і його похідна.

У системі (3) із 6 рівнянь розглянемо друге рівняння для z та п'яте для канонічного імпульсу p_z . З цих рівнянь випливає, що похідна dp_z/dt може зійтися до нуля, якщо

$$\left(p_\vartheta - e_0 r^2 B(z_F) \right) \frac{\partial}{\partial z} B(z) = 0. \quad (4)$$

У градієнтній області похідна $\frac{\partial}{\partial z} B(z)$ ніде не перетворюється на нуль (рис. 2, рис. 3). При $z = z_0$ імпульс p_ϑ пропорційний канонічному імпульсу p_z , тобто $(2E/E_0)^2$, де E – енергія електрона, $E_0 = 511$ кеВ – енергія спокою електрона. На початку руху імпульс p_ϑ змінюється незначно. Під час руху вздовж поздовжньої вісі електрон наближається ліворуч до градієнтної області, у якій функція $B(z)$ швидко зростає. При досить великій величині $B(z_F)$ в деякій точці $z = z_F$ значення круглої дужки в (4) обертається в нуль. Наближення частки до цієї точки z , однак, носить асимптотичний характер руху у радіальному напрямку. Сама координата z_F на осі z залежить від обраного магнітного поля (див. рис. 3) і для описаних вище полів A_0, \dots, A_7 зміщувалася від $z_F = 180$ мм при $k = 0$ до $z_F = 197$ мм при $k = 7$. Таким чином, збільшення керуючого параметра k відповідає загальному зменшенню амплітуди поля A згідно (1) і тому більш влучанню частинки в градієнтну область (див. рис. 6) при більшій координаті $z = z_F$. Можна сказати, що має місце «бульдозерний» ефект.

Розглянуто рух електронів у циліндричному магнітному полі з потенціалом градієнтного вигляду. Вивчено формування пучка з енергією 55 кеВ у такому магнітному полі. Отримано, що у вибраному полі вихідний рух електронів уздовж поздовжньої осі перетворюється на радіальний рух. Визначено, що таке перетворення обумовлено впливом соленоїдального магнітного поля з великим поздовжнім градієнтом. Перетворення поздовжнього напрямку руху в поперечне виявилось стійким у діапазоні енергій 20...55 кеВ електронів та інтервалі 5...50 мм радіальних розмірів пучка частинок. Показано, що при заданій енергії електрона та фіксованому магнітному полі параметром, що визначає поворот частинок, є градієнт магнітного поля на межі ділянки вльоту. Отримано, що ефект повороту має місце для інтервалу радіальних розмірів пучка, що призводить до фокусування частинки.

Висновки. Удосконалення магнетронної гармати, що полягає у застосуванні інтенсивних магнітних полів з підвищеним градієнтом їхньої напруженості, дає можливість розглянути нові явища в просторовій картині еволюції електронних пучків.

Показана можливість на основі регулювання поля як ціле керувати вертикальною координатою сфокусованого пучка, тим самим дано інтерпретацію порогової залежності реєстрації електронів на детекторі. Досліджено залежність формування підсумкового розподілу частинок від амплітуди та градієнта магнітного поля вздовж вісі системи. На основі чисельної моделі руху електронного потоку розглянуто характеристики результуючого електронного пучка. Показано, що пучок, що має вхідні радіальні розміри 5...50 мм, фокусується по вертикалі на ділянку 1 мм.

Список використаної літератури

- Ayzatsky M. I., Dovbnya A. N., Mazmanishvili A. S., Reshetnyak N. G., Romasko V. P., Chertishchev I. A. Studies on formation of the radially-directed electron beam generated by the magnetron gun with the secondary emission cathode. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 2016. Issue 66, vol. 3(103). P. 78–94.
- 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.
- Ayzatsky N. I., Churyumov G. I., Dovbnya A. N., Zakutin V. V., Reshetnyak N. G., Starchevskiy Y. L. Generation and formation of axially symmetrical tubular electron beam in a cold metal secondary-emission cathode magnetron gun. Part 1. Experiment // *IEEE Transaction and electron device*, April, 2016. Vol. 63, no. 4. P. 1704–1709.
- Miyamoto K. *Fundamentals of Plasma Physics and Controlled Fusion*. Moscow: Fizmatlit. 2007. 424 p.
- Engelko V., Mueller G., Andreev A., Berutchev N., Komarov O., Petuchov A., Tkatchenko K. Pulsed electron beam facilities (GESA) for surface treatment of materials. *Proceedings of the 10th International Conference on Applied Charged Particle Accelerators in Medicine and Industry*, 2012. P. 412–417.
- 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.
- Mazmanishvili A. S., Reshetnyak N. G. Electron beam transversion management on exit of magnetic gun by gradient magnetic field. *Problems of Atomic Science and Technology, series "Nuclear Physics Investigations"*. 2019. Issue 72. Vol. 6(124). P. 106–113.
- Mazmanishvili A. S., Reshetnyak N. G., Shovkoplyas O. A. Beam and sector regimes of electron flows in cylindrical magnetic field of the magnetron gun. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2020. Vol. 12, no. 3, 03001(5cc).
- Mazmanishvili A.S., Reshetnyak N.G. Transformation of data array of cylindrical magnetic field of the magnetron gun and problem of the radial motion of electrons. *Applied Problems of Mathematical Modeling*, 2020, vol. 3, no. 1. P. 108–116.
- 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.
- Тузигов 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.
- Маделунг Э. *Математический аппарат физики*. Москва, Физматгиз, 1961. 620 с.
- Мазманишвили А. С., Решетняк Н. Г., Сидоренко А. Ю. Динамика электронного пучка формируемого магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом, в спадающем магнитном поле соленоида: эксперимент и моделирование. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПИ», 2021. № 2 (6). С. 96–100.
- Глухих В. А., Печерский О. П., Энгелько В. И., 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). Москва: ЦНИИатоминформ, 2001. С. 445–447.
- Азарян Н. С., Баренгольц С. А., Доля С. Н., Месяц Г. А., Перельштейн Э. А. Азарян Н. С., Баренгольц 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.
- magnetron gun with the secondary emission cathode. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*, 2016, issue 66, vol. 3(103), pp. 78–94.
- 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.
- Ayzatsky N. I., Churyumov G. I., Dovbnya A. N., Zakutin V. V., Reshetnyak N. G., Starchevskiy Y. L. Generation and formation of axially symmetrical tubular electron beam in a cold metal secondary-emission cathode magnetron gun. Part 1. Experiment. *IEEE Transaction and electron device*, April, 2016, vol. 63, no. 4, pp. 1704–1709.
- Miyamoto K. *Fundamentals of Plasma Physics and Controlled Fusion*. Moscow, Fizmatlit. 2007, 424 p.
- Engelko V., Mueller G., Andreev A., Berutchev N., Komarov O., Petuchov A., Tkatchenko K. Pulsed electron beam facilities (GESA) for surface treatment of materials. *Proceedings of the 10th International Conference on Applied Charged Particle Accelerators in Medicine and Industry*, 2012, pp. 412–417.
- Dovbnya A. N., Zakutin V. V., Reshetnyak N. G. etc. Issledovanie formirovaniya puchka v uskoritele elektronov vtorichnoemissionnym istochnikom. [Study of beam formation in an electron accelerator with a secondary emission source]. *Visnyk Kharkivs'kogo universytetu, seria fizychna "Yadra, chastynky, polya"* [Bulletin of Kharkiv University, physical series "Nucleus, particles, fields"], 2006, no. 732, issue. 2(30). pp. 96–100.
- Mazmanishvili A. S., Reshetnyak N. G. Electron beam transversion management on exit of magnetic gun by gradient magnetic field. *Problems of Atomic Science and Technology, series "Nuclear Physics Investigations"*, 2019, issue 72, vol. 6(124), pp. 106–113.
- Mazmanishvili A. S., Reshetnyak N. G., Shovkoplyas O. A. Beam and sector regimes of electron flows in cylindrical magnetic field of the magnetron gun. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2020, vol. 12, no. 3, 03001(5cc).
- Mazmanishvili A.S., Reshetnyak N.G. Transformation of data array of cylindrical magnetic field of the magnetron gun and problem of the radial motion of electrons. *Applied Problems of Mathematical Modeling*, 2020, vol. 3, no. 1, pp. 108–116.
- Tusikov A. V., Aleksandrov V. S., Shevtsov V. F. Modelirovanie 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.
- Astrelin V. T., Kandaurov I. V., Sveshnikov V. M. Chislennoe modelirovanie transportirovki i szhatiya elektronogo puchka shodyatshim magnitnym polem pri ego ihzhekcii 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.
- Madelung E. *Matematicheskiy apparat fiziki* [Mathematical machine of physics]. Moscow, Fizmatgiz, 1961, 620 p.
- Mazmanishvili A. S., Reshetnyak N. G., Sydorenko A. Yu., Dynamika elektronogo puchka formiruемого magnetronnoy pushkoy s vtorichnoemissionnym katodom, v spadayuschem magnitnom pole solenoida: eksperiment i modelirovanie [Dynamics of an electron beam formed by magnetron gun with the secondary emission cathode in the declining magnetic field of solenoid: experiment and simulation]. *Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravlenie i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2021, no. 2 (6), pp. 96–100.
- Gluhiv 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 sarzhzhennykh chastits v promishlennosti i medicine* [Collection of reports of the X International Meeting on the Application of Charged Particle Accelerators in Industry and Medicine] (sity Sankt-Peterburg, 1–4 oktober, 2001). Moscow: TsNIAtominform Publ., 2001, pp. 93–396.
- Asaryan N. S., Barengol'ts S. A., Dolya S. N., Mesyats G. A., Perel'shteyn E. A. Modelirovanie formirovaniya elektronogo kol'tsa

References (transliterated)

- Ayzatsky M. I., Dovbnya A. N., Mazmanishvili A. S., Reshetnyak N. G., Romasko V. P., Chertishchev I. A. Studies on formation of the radially-directed electron beam generated by the

s ispol'zovaniem pikosekundnykh elektronnykh putchkov v magnitnoy sisteme tipa "kasp" [Simulation of the formation of an electron ring using picosecond electron beams in a "cusp" magnetic system].

Gurnal tehniceskoy fiziki. [Journal of Technical Physics], 2010, issue. 80, no. 4, pp. 126–134.

Надійшла (received) 05.03.2023

UDC 519.2

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

M. G. RESHETNYAK, Candidate of Physical and Mathematical Sciences (PhD), senior staff scientist, National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology", Kharkiv, Ukraine, e-mail: nreshetnyak@kipt.kharkov.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2345-6789>

G. YU. SYDORENKO, Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of system analysis and information-analytical technologies, Kharkiv, Ukraine, e-mail: annsydorenko01@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0761-2793>

ELECTRON BEAMS IN THE GRADIENT MAGNETIC FIELD: CONTROL FOR CONVERTING LONGITUDINAL MOTION INTO TRANSVERSAL

The motion of electrons in a cylindrical magnetic field with the gradient-type potential is considered. The motion of electrons in the cylindrical magnetic field with the gradient-type potential is considered. It is found that in the selected field, the initial motion of electrons along the longitudinal axis is converted into motion along the radius. It is determined that such the transformation is due to the action of a solenoidal magnetic field with large longitudinal gradient. The transformation of the longitudinal direction of motion into the transverse one turned out to be stable in the energy range of 20...55 keV of electrons and in the range of 5...50 mm of radial dimensions of the particle beam. The main dependences of the motion of the electron beam in the given solenoidal magnetic field are studied with the help of the software tool. The results of numerical simulation of electron trajectories in the gradient magnetic field with the circular secondary emission cathode located in the middle of the system are presented. To study the mechanism of stability with respect to magnetic field, two experimentally realized magnetic fields were used. Based on these two fields, arrays of additional 4 fields are numerically synthesized. For the set of 6 named fields, the operation of the gun, in which the particle undergoes the stable transformation of the direction of motion, is numerically studied. It is shown that for the given electron energy and the fixed magnetic field, the parameter that determines the rotation of the particles is the magnetic field gradient at the boundary of the entry region. It is found that the rotation effect takes place for the considered range of radial beam sizes, which leads to particle focusing. The possibility is shown to control the vertical coordinate of the focused beam on the basis of the field adjustment, thereby giving the interpretation of the pore dependence of the registration of electrons on the detector. The dependence of the formation of the final distribution of particles on the amplitude and gradient of the magnetic field along the axis of the system is studied. The results of numerical simulation on the motion of the electron beam are presented. Based on the model of electron flow motion, the characteristics of the resulting electron beam are considered. It is shown that the beam, having radial dimensions of 5...50 mm, is transformed and focused vertically on the area of 1 mm.

Keywords: electron beam, magnetron gun, electron dynamics, motion direction transformation, gradient magnetic field, control, mathematical modeling.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Мазманішвілі Олександр Сергійович, Mazmanishvili Oleksandr Serhiyovych

Автор 2 / Author 2: Решетняк Микола Григорович, Reshetnyak Mykola Grygorovych

Автор 3 / Author 3: Сидоренко Ганна Юрїївна, Sydorenko Ganna Yurijivna