

СИСТЕМА КОНСТРУКТИВНИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОННИХ ГАРМАТ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ, ЯКІ ФОРМУЮТЬ ПРОФІЛЬНІ ЕЛЕКТРОННІ ПУЧКИ

І.В. МЕЛЬНИК, А.В. ПОЧИНОК

Анотація. Розглянуто систему конструктивних параметрів моделі електродних систем електронних гармат високовольтного тліючого розряду, які формують профільні електронні пучки з кільцевим фокусом. Відмітною рисою запропонованої моделі є те, що як ключовий параметр обрано кут нахилу твірної поверхні конусного анода до осі симетрії електродної системи. Сформовано систему нерівностей, які визначають геометричні, фізичні та обчислювальні обмеження на конструктивні параметри модельованої електродної системи, а також технологічні допуски на них. Як результат проведених досліджень створено повну, замкнену та несуперечливу систему геометричних параметрів моделі електродних систем електронних гармат високовольтного тліючого розряду, які формують профільні електронні пучки із кільцевим фокусом. Сформовані обмеження на конструктивні параметри моделі, подані у вигляді системи нерівностей, використано у програмному комплексі, призначеному для моделювання електродних систем електронних гармат високовольтного тліючого розряду, з метою контролю вхідних параметрів моделі на початковому етапі комп'ютерного моделювання.

Ключові слова: система параметрів моделі, конструктивні параметри, геометричні параметри, електронна гармата, електродна система, високовольтний тліючий розряд, профільний електронний пучок.

ВСТУП

Електронні гармати на основі високовольтного тліючого розряду (ВТР) широко застосовують для реалізації електронно-променевої технології у різних галузях промисловості, зокрема в електронній промисловості, приладобудуванні, металургії, машинобудуванні, автобудуванні та авіабудуванні [1–7]. Це зумовлено тим, що гармати ВТР мають низку переваг порівняно із традиційними технологічними електронними гарматами з розжарюваними катодами, серед яких варто відзначити такі [1, 2, 7]:

- 1) стабільність роботи гармат ВТР протягом тривалого часу в середовищі різних газів, зокрема інертних та активних;
- 2) відносно дешевизну електронних гармат ВТР і технологічного вакуумного обладнання, яке забезпечує їх роботу;
- 3) простоту керування струмом розряду електронних гармат газодинамічним способом та з використанням допоміжних низьковольтних розрядів;
- 4) можливість формування профільних електронних пучків з кільцевим фокусом, які забезпечують рівномірне прогрівання циліндричних виробів по всьому периметру.

Серед цих переваг однією з найбільш значущих є можливість формування профільних електронних пучків, оскільки вони забезпечують швидкодійне проведення технологічних операцій, які неможливо виконувати з використанням електронних пучків з точковим фокусом або лазерних пучків. Серед таких операцій слід виокремити автоматичне моноімпульсне зварювання корпусів електронних приладів і термічне оброблення циліндричних виробів з їх рівномірним прогріванням по всьому периметру [1, 7].

Спрощену конструктивну схему електродної системи ВТР, призначеної для формування порожнистого конусного електронного пучка з кільцевим фокусом, зображено на рис. 1.

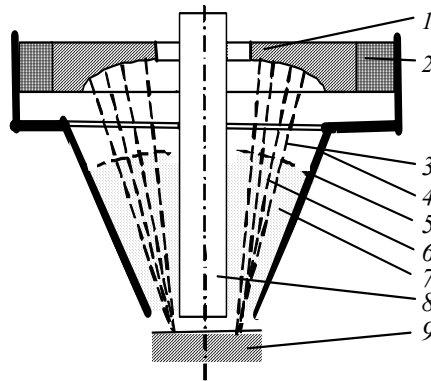


Рис. 1. Конструктивна схема аксіально-симетричної електродної системи ВТР, призначеної для формування порожнистого конусного електронного пучка: 1 — катод; 2 — високовольтний ізолятор; 3 — електронний пучок; 4 — анод; 5 — плазмозна межа; 6 — електронний пучок; 7 — анодна плазма; 8 — допоміжний циліндричний електрод; 9 — виріб, який обрамляється

Така електродна система (рис. 1) — один з можливих варіантів формування електронного пучка з кільцевим фокусом. Крім цього, у літературі розглядаються й аналізуються електродні системи ВТР, які формують дискові та трубчасті електронні пучки [1, 7, 8]. Проте теоретично можна показати, що з геометричного погляду такі системи є окремим випадком електродної системи, показаної на рис. 1, яка формує порожнистий конусний електронний пучок із заданим кутом збіжності.

Проблема полягає у тому, що на тепер не існує точних та адекватних математичних моделей, які б описували складні фізичні процеси, що перебігають в електродних системах технологічних гармат ВТР, які формують профільні електронні пучки. Тут окремим складним завданням є формування системи конструктивних геометричних параметрів для такої моделі. Саме ця важлива науково-технічна та інженерна проблема і буде розглянута у роботі.

ЗАГАЛЬНА КОНЦЕПЦІЯ ФОРМУВАННЯ ФІЗИКО-ТОПОЛОГІЧНОЇ МОДЕЛІ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОНІВ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ, ЯКІ ФОРМУЮТЬ ПРОФІЛЬНІ ЕЛЕКТРОННІ ПУЧКИ

Узагальнену методику формування фізико-топологічних моделей джерел електронів ВТР, які формують профільні електронні пучки, розглянуто

у працях [9, 10]. Вона полягає у тому, що межа анодної плазми 5, яка окремо показана на рис. 1, розглядається як прозорий для електронів електрод із фіксованим потенціалом, який є близьким до анодного.

За умови великих значень струму розряду можна вважати, що плазмова межа паралельна поверхні сферичного катода [1, 9, 10], а за умови малих значень струму форма плазмової межі зазвичай визначається експериментально через фотографування розрядного проміжку та комп'ютерний аналіз отриманих фотографій з використанням карт зображень і методів розпізнавання образів [10, 11]. Якщо розглядати лише перший випадок, який відповідає значенням максимального струму розряду, положення плазмової межі визначається на підставі того, що об'єм, який займає плазма, не залежить від геометрії електродної системи. Це дозволяє спочатку визначити положення анодної плазми у простій лінійній системі із плоскими електродами, а після цього перерахувати це значення для об'єму анодної порожнини в електродній системі, зображеній на рис. 1. Правомірність такого підходу також теоретично й експериментально обґрунтовано у працях [1, 9].

За умови відомої геометрії плазмової межі для моделювання самоузгодженої електронно-іонної оптики в електродній системі ВТР, зображеній на рис. 1, можуть бути застосовані відомі алгоритми, сформульовані у працях [9, 10]. Для аналізу розподілу електричного поля використовується числовий розв'язок рівняння Пуассона в циліндричних координатах, а для розрахунку просторового заряду — модифікований метод недеформованих тубок струму.

Отже, важливим завданням є формування замкненої та несуперечливої системи геометричних параметрів для електродної системи, конструктивну схему якої зображено на рис. 1. Така система параметрів передбачає не лише формування набору конкретних геометричних величин, але і введення взаємозв'язків між ними та відповідних обмежень [12–14].

ГЕОМЕТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ ЕЛЕКТРОДНОЇ СИСТЕМИ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ, ЯКА ФОРМУЄ ПОРОЖНИСТИЙ КОНУСНИЙ ЕЛЕКТРОННИЙ ПУЧОК, ТА ЇХ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ЗАВДАННЯМИ ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ГАРМАТ

Головними вимогами до системи геометричних параметрів фізико-топологічної моделі електродної системи ВТР, яку необхідно сформувати, є повнота, несуперечливість та простота визначення цих параметрів [12]. Крім цього, необхідно зменшити до мінімуму кількість розмірних параметрів, вимірювання яких під час інженерного проектування гармати може давати значні похибки. Виходячи із цих міркувань, усі параметри фізико-топологічної моделі розглядалися через зв'язок з кутом нахилу α твірної конусної поверхні анода до осі симетрії електродної системи. За такої умови зв'язки між конструктивними геометричними розмірами електродної системи формувалися через тригонометричні співвідношення.

Такий підхід до формування системи параметрів моделі відповідає не лише вимогам повноти та несуперечливості, але й умові універсальності моделі. Річ у тім, що через зміну параметра α можна моделювати різні типи

електродних систем ВТР, які формують профільні електронні пучки з кільцевим фокусом. Наприклад, електродні системи, які формують трубчасті електронні пучки, можна розглядати як системи, для яких значення $\alpha = 0^\circ$, а для систем, які формують дискові пучки, значення $\alpha = 90^\circ$ [8]. У праці [8] розглянуто базові рівняння для фізико-топологічних моделей електродних систем ВТР, які формують дискові та профільні електронні пучки, і через числове розв'язування цих рівнянь знайдено залежності положення плазмової межі відносно катода від геометричних розмірів електродної системи. Проте через велику кількість розмірних параметрів та складність системи нелінійних рівнянь для отриманої системи рівнянь не знайдено аналітичного розв'язку [8].

У зв'язку з цим відмітною рисою системи параметрів моделі електродних систем ВТР, яка пропонується у роботі, є її простота, яка полягає у тому, що взаємозалежні геометричні розміри зв'язуються між собою через значення кута α . За такої умови зв'язки між параметрами значно спрощуються і відсутність функції квадратного кореня, використання якої є притаманним для систем геометричних параметрів у разі формування зв'язків між лінійними розмірами, дозволяє звести математичну модель до кубічного рівняння відносно висоти анодної плазми, а таке рівняння може бути розв'язано аналітично.

Базові геометричні розміри для електродної системи ВТР, конструктивну схему якої зображено на рис. 1, показано на рис. 2. Головними із цих розмірів є висота анодної плазми $d_{\text{п}}$, положення плазмової межі відносно катода $d_{\text{кп}}$, товщина катода $h_{\text{к}}$, висота анода $h_{\text{а}}$, максимальний радіус основи конусного анода $r_{\text{а}}$, мінімальний радіус основи конусного анода $r_{\text{кон}}$, який відповідає області виведення електронного пучка з електронної гармати до технологічної камери, радіус сфери катода $R_{\text{к}}$, максимальний поперечний розмір сферичної поверхні катода біля анода $r_{\text{к1}}$, мінімальний поперечний розмір сферичної поверхні катода біля циліндричного електрода $r_{\text{к2}}$, радіус циліндра $r_{\text{п}}$ та його висота $h_{\text{п}}$.

Зрозуміло, що геометричні параметри $d_{\text{п}}$ і $d_{\text{кп}}$ є внутрішніми параметрами моделі, а $R_{\text{к}}$, $r_{\text{кон}}$, $r_{\text{к1}}$, $r_{\text{к2}}$, $r_{\text{п}}$, $h_{\text{п}}$ — конструктивними. Тому пошук залежностей $d_{\text{п}}$ від конструктивних параметрів завжди є головним завданням моделювання на першому етапі проектування газорозрядних електронних гармат, оскільки анодна плазма в електронно-оптичних системах ВТР розглядається як рухомий електрод із заданим потенціалом, положення якого залежить від конструктивних параметрів електродної системи, а також від тиску в камері гармати, перерахованого на довжину електродної системи [1], та від прискорювальної напруги [1, 9, 10].

У теорії ВТР система алгебричних рівнянь, які описують положення плазмової межі відносно катода, записується у вигляді [2, 15]:

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right)_{r \in \Gamma} = \sqrt{\frac{n_e k T_e}{\varepsilon_0 A(\varphi^*)}}, \quad A(\varphi^*) = \frac{1}{4} \left(\sqrt{1 + \frac{2q\varphi^*}{kT_e}} + e^{-\frac{2q\varphi^*}{kT_e}} - 2 \right), \quad (1)$$

де n_e — концентрація електронів у плазмі; T_e — їх температура; q — заряд іонів плазми; ϵ_0 — електрична стала; k — стала Больцмана; ϕ^* — приелектродний потенціал, який залежить від складу використовуваного технологічного газу. Зазвичай значення параметра ϕ^* лежить у межах кількох вольтів.

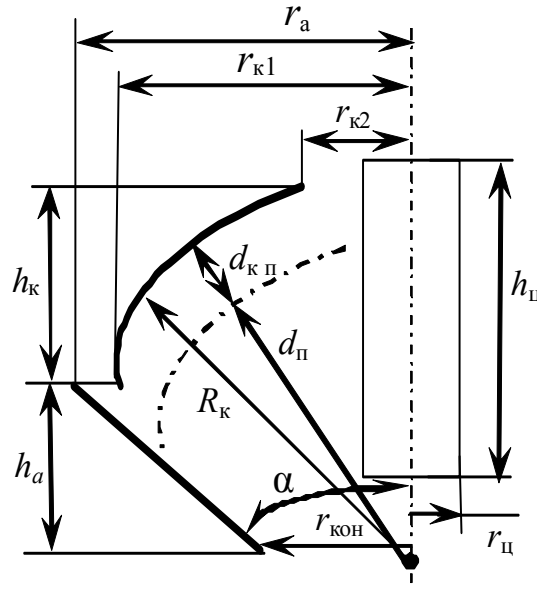


Рис. 2. Геометричні параметри електродної системи ВТР, спрощену конструктивну схему якої зображено на рис. 1

Проте, оскільки розв’язування нелінійної системи рівнянь (1) для електродних систем ВТР із складною геометрією викликає певні обчислювальні труднощі, фахівці під час формування відповідних математичних моделей намагаються використовувати спрощені підходи, основані на апроксимації експериментальних даних про положення плазмової межі. Зокрема, у працях [9, 10] показано й обґрунтовано припущення, що для великих струмів розряду плазмова межа паралельна поверхні катода, а об’єм анодної плазми не залежить від геометрії електродної системи. Це дозволяє визначати об’єм плазмової межі у системах ВТР зі складною геометрією електродів з використанням простого співвідношення [1]

$$V_{\text{л}} = V_{\text{к}}, \quad (2)$$

де $V_{\text{л}}$ — об’єм плазмової межі в еквівалентній лінійній електродній системі; $V_{\text{к}}$ — її об’єм в електродній системі (див. рис. 1). У лінійній електродній системі об’єм анодної можна розрахувати за таким співвідношенням [1]:

$$V_{\text{л}} = \pi r_{\text{а}}^2 \left(L - \frac{I_{\text{л}}}{Q_{e0} \left(\chi\gamma + \sqrt{\frac{m_i}{m_e}} \right) - \frac{5\mu_{i0} k T_e}{R_{\text{к}}^2 p_{\text{а}0}^2 e} \sqrt{\frac{m_i}{k T_e}}} \right), \quad (3)$$

де $I_{\text{л}}$ — струм розряду в лінійній електродній системі; $r_{\text{а}}, R_{\text{к}}, L$ — геометричні розміри лінійної системи; $m_{\text{е}}, m_{\text{і}}$ — маса електрона та маса іонів залишкового газу відповідно; $Q_{\text{е0}}$ — усереднений перетин перезарядження іонів на атомах газу; χ — середній коефіцієнт подовження траєкторій електронів у ВТР; $T_{\text{е}}$ — температура електронів у плазмі; γ — коефіцієнт відбиття електронів від поверхні анода; $\mu_{\text{і0}}$ — рухомість електронів в анодній плазмі. Щодо обчислення положення плазмової межі у системі електродів ВТР, яка формує порожнистий конічний електронний пучок, конструктивну схему якої зображено на рис. 2, то для неї об'єм, який займає анодна плазма, можна розрахувати як об'єм тіла обертання [16]:

$$V_{\text{к}} = \int_a^b r^2(z) dz, \quad (4)$$

де $r(z)$ — аналітична функція, яка описує геометрію плазмової межі; a та b — межі інтегрування, які визначаються лінійними розмірами електродної системи (рис. 2). Якщо плазмова межа вважається паралельною поверхні катода, тоді об'єм анодної плазми обчислюється через кут α як об'єм кульового сегмента. Ураховуючи формулу (4), маємо

$$V_{\text{к}} = \pi \left(\left(\frac{4}{3} (R_{\text{к}} - d_{\text{п}})^3 - r_{\text{к1}}^3 \right) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) - r_{\text{ц}}^2 (R_{\text{к}} - d_{\text{п}}) - \frac{4}{3} r_{\text{ц}}^2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) + r_{\text{ц}}^2 (r_{\text{кон}} - d_{\text{п}}) \right). \quad (5)$$

Прирівнюючи співвідношення (3) та (5) з урахуванням співвідношення (2), можна отримати кубічне рівняння залежно від параметра $d_{\text{кп}}$ і розв'язати його з використанням формул Кордано [16]. Якщо плазмова межа не є паралельною поверхні катода, для описання її геометричної форми можна використовувати співвідношення [10, 11]:

$$r(z) = \sqrt{C(\ln(A) - \ln(z - B))}, \quad (6)$$

де A, B, C — напівемпіричні коефіцієнти, які визначаються за допомогою фотографування розрядного проміжку та комп'ютерного аналізу яскравості отриманих фотографій з використанням карт зображень та методів розпізнавання образів [11]. Але рівняння (6) можна розв'язати лише числовим способом.

Щодо товщини катода $h_{\text{к}}$, то цей геометричний параметр не впливає на електронно-оптичні властивості електродної системи, проте, оскільки ступінь нагрівання катода іонним потоком суттєво впливає на значення коефіцієнта вторинної іонно-електронної емісії, цей конструктивний параметр з урахуванням внутрішніх термодинамічних параметрів системи охолодження визначає енергетику розряду та струм електронного пучка. Математичні моделі для визначення температури катода та залежності коефіцієнта вторинної іонно-електронної емісії від температури для електродних систем ВТР, які формують електронні пучки з точковим фокусом, наведено у пра-

цях [10, 17]. З іншого боку, параметр h_k пов'язаний з геометричними параметрами R_k і h_t тригонометричним співвідношенням

$$h_k = R_k \left(\cos(\alpha) - \sqrt{1 + \left(\frac{r_{\text{ц}}}{h_{\text{ц}}} \right)^2} \right). \quad (7)$$

Із використанням співвідношення (7) можна оцінити температуру катода та струм електронного пучка [17].

ОБМЕЖЕННЯ, ЯКІ НАКЛАДАЮТЬСЯ НА ПАРАМЕТРИ МОДЕЛІ

Зрозуміло, що не для всіх значень параметрів електродної системи, наведених на рис. 2, можлива технічна реалізація такої системи. Тому на визначені у попередньому розділі конструктивні параметри моделі накладається низка обмежень, зумовлених різними факторами. У зв'язку з цим у теорії проектування електронних систем розрізняють геометричні, фізичні, обчислювальні та технологічні обмеження [12–14]. Найпростішими є геометричні обмеження, які зумовлені можливою некоректністю описання топології визначеної електродної системи через невиконання законів геометрії для визначених значень параметрів. Невиконання геометричних обмежень зазвичай призводить до обчислювальних помилок під час розв'язання задачі моделювання, тому перевірка цих обмежень на початку виконання програми моделювання є важливим критерієм надійності роботи таких комп'ютерних програм. Фізичні обмеження накладаються на значення геометричних параметрів моделі у тому випадку, коли вони не суперечать законам геометрії, але є неможливими з огляду на відповідні фізичні закономірності. Наприклад, значення $(r_{k2} - r_{\text{ц}})$ для параметрів електродної системи (див. рис. 1) має відповідати правилу забезпечення надійної електричної ізоляції для заданих значень прискорювальної напруги і тиску технологічного газу [18]. Обчислювальні обмеження на значення параметрів моделі накладаються тоді, коли вони не мають ні геометричних, ні фізичних обмежень, але гранична величина точності числових алгоритмів розрахунку та можливості наявних комп'ютерних засобів не дозволяють виконувати точні розрахунки для параметрів зі значеннями, більшими або меншими за задану граничну величину [19]. Зазвичай обчислювальні обмеження накладаються на значення параметрів моделі тоді, коли немає відповідних геометричних та фізичних обмежень [12].

Технологічні обмеження визначаються технологією виготовлення елементів електродної системи та інженерними вимогами до максимальних допусків на розкид значень заданих геометричних розмірів і кутів [19].

Насамперед слід відзначити, що система геометричних параметрів, заданих на рис. 2, є надлишковою. Поздовжній розмір сферичної поверхні катода, заданий радіусом r_{k1} , пов'язаний із радіусом сфери катода R_k та кутом α співвідношенням

$$r_{k1} = R_k \sin(\alpha), \quad (8)$$

а відстань від плазмової межі до поверхні катода $d_{\text{кп}}$ виражається через висоту плазми $d_{\text{п}}$ та радіус сфери катода R_k :

$$d_{\text{кп}} = R_{\text{к}} - d_{\text{к}}. \quad (9)$$

Рівняння (8) зв'язує конструктивні параметри електродної системи, а рівняння (9) — внутрішні параметри з конструктивним параметром $R_{\text{к}}$.

Проте значення $r_{\text{к1}}$ і $r_{\text{к2}}$ зручно використовувати для обчислення фізичних обмежень, які зумовлюють ізоляційні властивості електродної системи, а значення $d_{\text{кп}}$ є більш зручним для аналізу особливостей електронно-оптичних властивостей електродної системи, хоча під час розв'язування рівняння (2) зазвичай зручніше шукати параметр $d_{\text{п}}$ [1, 9, 10].

Зрозуміло, що на параметри електродної системи (рис. 2) накладаються такі геометричні обмеження:

$$r_{\text{к2}} > r_{\text{ц}}; \quad r_{\text{а}} > r_{\text{к1}}; \quad \alpha > \arctg\left(\frac{r_{\text{ц}}}{h_{\text{ц}}}\right). \quad (10)$$

Існує інше геометричне обмеження, яке накладається на мінімальний поздовжній розмір катода $r_{\text{к2}}$:

$$r_{\text{к2}}^{\text{min}} = R_{\text{к}} \sin\left(\arctg\left(\frac{r_{\text{ц}}}{h_{\text{ц}}}\right)\right) = \frac{R_{\text{к}} r_{\text{ц}}}{h_{\text{ц}} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{r_{\text{ц}}}{h_{\text{ц}}}\right)^2}}. \quad (11)$$

Проте на параметри $r_{\text{к2}}$, $r_{\text{а}}$ та α накладаються більш строгі фізичні обмеження, пов'язані із забезпеченням вимог до електричної міцності розрядного проміжку. Згідно із теорією газового розряду мінімальна відстань між електродами, за умови заданої прискорювальної напруги $U_{\text{пр}}$ і тиску в розрядній камері p , обчислюється відповідно до закону Пашена за співвідношенням [18]

$$d_{\text{min}} = \frac{2,72 U_{\text{пр}}}{A p} \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right), \quad (12)$$

де A — напівемпіричний коефіцієнт; γ — коефіцієнт вторинної іонно-електронної емісії для визначеного матеріалу катода. Згідно зі співвідношенням (12) нерівності (10) переписуються у вигляді:

$$r_{\text{к2}} > r_{\text{ц}} + d_{\text{min}}; \quad r_{\text{а}} > r_{\text{к1}} + d_{\text{min}}; \quad \alpha > \arctg\left(\frac{r_{\text{ц}} + d_{\text{min}}}{h_{\text{ц}}}\right). \quad (13)$$

Співвідношення (11) з урахуванням першої нерівності системи (13) набирає вигляду

$$r_{\text{к2}}^{\text{min}}(r_{\text{ц}}) = \left(1 - \frac{R_{\text{к}}}{h_{\text{ц}} \sqrt{1 + \left(\frac{r_{\text{ц}}}{h_{\text{ц}}}\right)^2}}\right) r_{\text{ц}} > d_{\text{min}}. \quad (14)$$

Оскільки нерівність (14) є нелінійною, знайти залежність $r_{к2}^{\min}(r_{ц})$ можна лише з використанням числових розрахунків. Відповідні графічні залежності для різних значень параметрів моделі R_k і $h_{ц}$, які отримані з використанням засобів програмування системи MatLab [20, 21], показано на рис. 3.

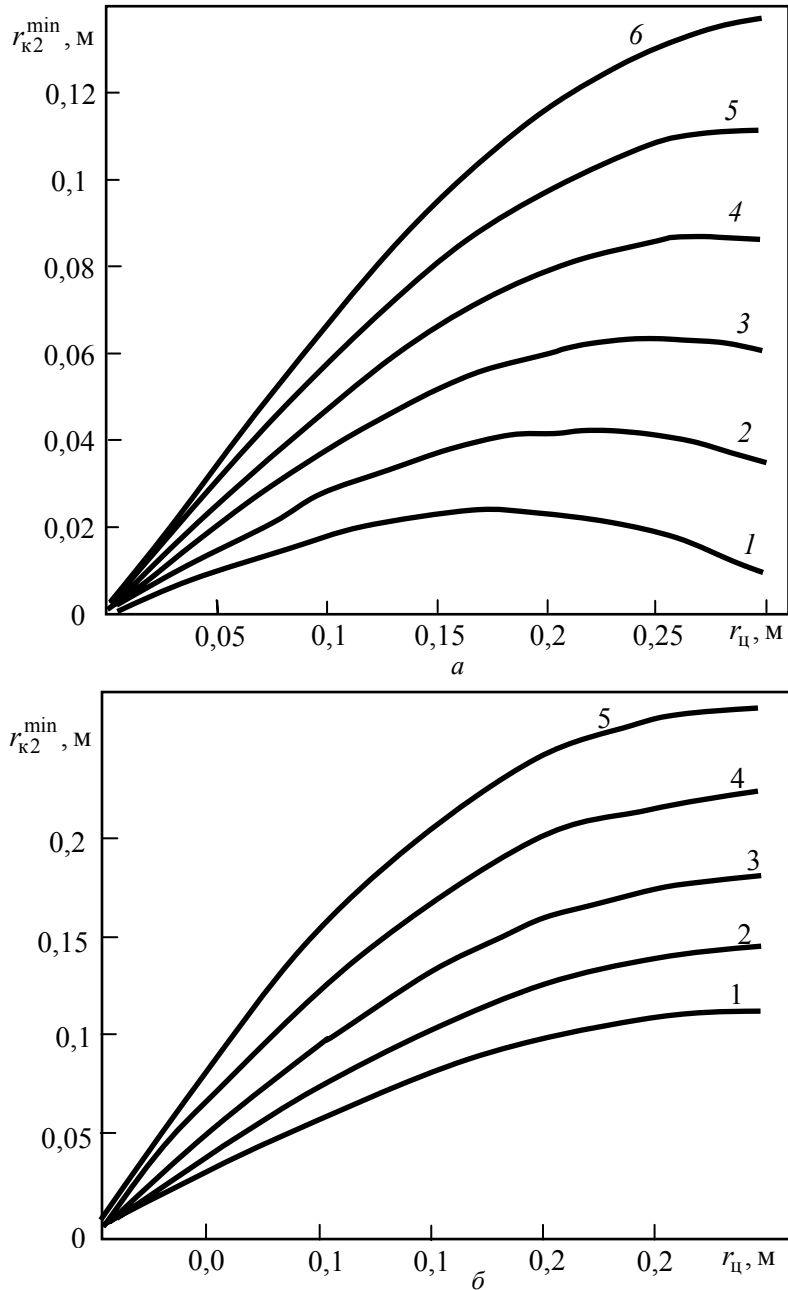


Рис. 3. Залежність мінімального значення поздовжнього розміру катода біля циліндра $r_{к2}^{\min}$ від радіуса циліндра, радіуса сфери катода a — $h_{ц} = 0,5$ м; 1 — $R_k = 0,85$ м, 2 — $R_k = 0,8$ м, 3 — $R_k = 0,75$ м, 4 — $R_k = 0,7$ м, 5 — $R_k = 0,65$ м, 6 — $R_k = 0,6$ м та висоти циліндра; $\bar{\sigma}$ — $R_k = 0,8$; 1 — $h_k = 0,5$ м, 2 — $h_k = 0,45$ м, 3 — $h_k = 0,4$ м, 4 — $h_k = 0,35$ м, 5 — $h_k = 0,3$ м

Іншим геометричним обмеженням на параметри моделі електродної системи ВТР можна надати вигляду

$$h_{\text{ц}} < R_{\text{к}}, \quad r_{\text{кон}} > r_{\text{ц}}, \quad h_{\text{ц}} > h_{\text{к}}, \quad r_{\text{к1}} > r_{\text{к2}}, \quad r_{\text{а}} > r_{\text{кон}}. \quad (15)$$

На підставі наведених міркувань для мінімального значення кута α з урахуванням співвідношення (14) можна записати

$$\alpha_{\text{min}} = \arctg\left(\frac{r_{\text{к2}}^{\text{min}}}{h_{\text{ц}}}\right), \quad (16)$$

тоді співвідношення (16) стає більш строгим, ніж третя нерівність системи (10). Максимальне значення кута $\alpha = 90^\circ$ відповідає електродній системі, яка формує дисковий електронний пучок [8].

Для висоти анодного електрода $h_{\text{а}}$ також існують геометричні обмеження:

$$h_{\text{а}} < R_{\text{к}} - h_{\text{к}}, \quad h_{\text{а}} < R_{\text{к}} - h_{\text{ц}}. \quad (17)$$

Мінімальне значення радіуса сфери катода $R_{\text{к}}$ задається обмеженнями:

$$R_{\text{к}} > h_{\text{а}} + h_{\text{к}}, \quad R_{\text{к}} > h_{\text{ц}}, \quad (18)$$

які є наслідком нерівностей (17). А на максимальне значення радіуса сфери катода геометричних та фізичних обмежень не існує; окремий випадок $R_{\text{к}} = \infty$ відповідає плоскій поверхні катода. Тому для цього випадку накладається лише обчислювальне обмеження, яке для використовуваних алгоритмів розрахунку електронно-оптичних властивостей електродної системи та застосованих обчислювальних засобів встановлено на рівні

$$R_{\text{к}} < 10^6 \text{ м}. \quad (19)$$

ТЕХНОЛОГІЧНІ ДОПУСКИ НА ГЕОМЕТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ МОДЕЛІ

Наведемо тепер оцінку технологічних допусків на конструктивні параметри електродної системи, наведеної на рис. 2. У загальному випадку можливі технологічні допуски можна оцінити в ході обчислювальних експериментів через аналіз впливу змін відповідного конструктивного розміру на фокальні параметри електронного пучка [14]. Такий метод в обчислювальній математиці називається методом малих збурень і у загальному випадку записується у вигляді таких простих співвідношень [14]:

$$\varepsilon_F = \frac{\partial F(x)}{\partial x} \Delta x; \quad \varepsilon_d = \frac{\partial d_{\text{п}}(x)}{\partial x} \Delta x, \quad (20)$$

де x — змінний конструктивний параметр; F — положення фокуса електронного пучка; $d_{\text{п}}$ — товщина фокального кільця; ε_F — допустиме значення зміни положення фокуса пучка; ε_d — допустиме значення зміни товщини фокального кільця. Зрозуміло, що в разі використання співвідношення (20) значення ε_F і ε_d задаються в абсолютних одиницях і мають розмірність вимірюваної величини. Якщо зручніше визначати технологічні допус-

ки у відносних одиницях, співвідношення (20) можна переписати у вигляді [10, 14, 19]:

$$x_p = x_{обч} \left(1 \pm \frac{\Delta x|_{\varepsilon_F = \Delta F(x)}}{x} \right); \quad x_p = x_{обч} \left(1 \pm \frac{\Delta x|_{\varepsilon_{d_n} = \Delta d_n(x)}}{x} \right), \quad (21)$$

де $x_{обч}$ — модельне значення конструктивного параметра; x_p — його реальне значення з урахуванням відносної похибки виготовлення деталей електродної системи. У співвідношеннях (21) знак \pm відповідає можливій зміні заданого значення розміру x у бік як збільшення, так і зменшення. Проте часто у технології виготовлення точних приладів є допустимими лише односторонні зміни заданих параметрів. У такому випадку у співвідношеннях (21) замість знака \pm ставиться або знак $+$, або знак $-$ залежно від можливого напрямку зміни відповідного параметра. Числові експерименти з моделювання електродної системи ВТР (рис. 2) показали, що на параметри моделі мають бути накладені такі технологічні обмеження:

$$\begin{aligned} R_{к.р} &= R_{к.обч} (1 \pm 0,0012), \quad \alpha_p = \alpha_{обч} (1 \pm 0,0014), \quad r_{ц.р} = r_{ц.обч} (1 - 0,0125); \\ r_{к2.р} &= r_{к2.обч} (1 + 0,0131), \quad r_{к1.р} = r_{к1.обч} (1 - 0,0142); \quad r_{а.р} = r_{а.обч} (1 + 0,0112), \\ r_{кон.р} &= r_{кон.обч} (1 + 0,014); \\ h_{ц.р} &= h_{ц.обч} (1 \pm 0,015), \quad h_{а.р} = h_{а.о.о} (1 \pm 0,0137); \\ h_{к.р} &= h_{к.обч} (1 \pm 0,052), \end{aligned} \quad (22)$$

де індекс p відповідає реальним значенням параметрів, а індекс $обч$ — модельним. Обчислені значення для технологічних допусків відповідають величині $\frac{\Delta x}{x} = 0,05$, тобто відносному відхиленню фокальних параметрів електронного пучка на 5%.

З отриманих співвідношень (22) видно, що найбільш строгі обмеження близько 0,1% накладаються на значення радіуса сфери катода R_k та на кут α . Це збігається з відомими з основ електронної оптики теоретичними відомостями про те, що радіус емісійної поверхні катода і кут нахилу анодної поверхні до осі симетрії системи найбільше впливають на електронно-оптичні властивості електродних систем [20]. Для більшості інших параметрів значення допустимого відхилення $\delta = \frac{\Delta x}{x}$ становило близько 1%, а для параметра h_k — близько 5%. Слід зазначити, що величина δ визначалась за співвідношеннями (21), а потім обирались мінімальні значення цієї величини за параметрами ε_F та ε_{d_n} , тобто [12, 19]

$$\delta = \frac{\Delta x_{\min}|_{\varepsilon_F, \varepsilon_{d_n}}}{x}. \quad (23)$$

Згідно з конструктивною схемою електродної системи (рис. 2) значення $r_{ц1}$ і $r_{к1}$ можуть змінюватись тільки у бік збільшення, а значення $r_{к2}$ і r_a — лише у бік зменшення, що зумовлено необхідністю забезпечення електричної міцності розрядного проміжку відповідно до співвідношення (12). Усі розрахунки величини d_{min} виконувались для значень $U_{пр} = 15$ кВ; $p = 5$ Па; $\gamma = 4,3$, матеріал катода — алюміній, робочий газ — азот. Параметр $r_{кон}$ також вважався таким, що може змінюватись лише у бік збільшення, оскільки зменшення цього параметра призводить до значного збільшення втрат потужності електронного пучка через осідання електронів на стінці анода біля вихідного отвору. Отримані співвідношення (22) були використані для розроблення технологічної документації на виготовлення експериментального зразка електронної гармати ВТР.

КОНТРОЛЬ ВХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОДНОЇ СИСТЕМИ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ З ВИКОРИСТАННЯМ ГРАФІЧНОГО ІНТЕРФЕЙСУ КОРИСТУВАЧА ТА ДІАЛОВОВИХ ВІКОН

Отримані результати щодо обмежень на параметри моделі, задані співвідношеннями (10)–(22), використані у програмному комплексі, призначеному для моделювання електронно-оптичних властивостей електродних систем ВТР, які формують профільні електронні пучки. Це дозволило значною мірою підвищити надійність роботи створених програмних засобів та уникнути обчислювальних помилок під час роботи програми. Процедура контролю вхідних параметрів моделі реалізовано з використанням засобів програмування системи MatLab [21, 22]. Вікно вхідного інтерфейсу цієї програми показано на рис. 4, а діалогове вікно для введення геометричних конструктивних параметрів моделі — на рис. 5.

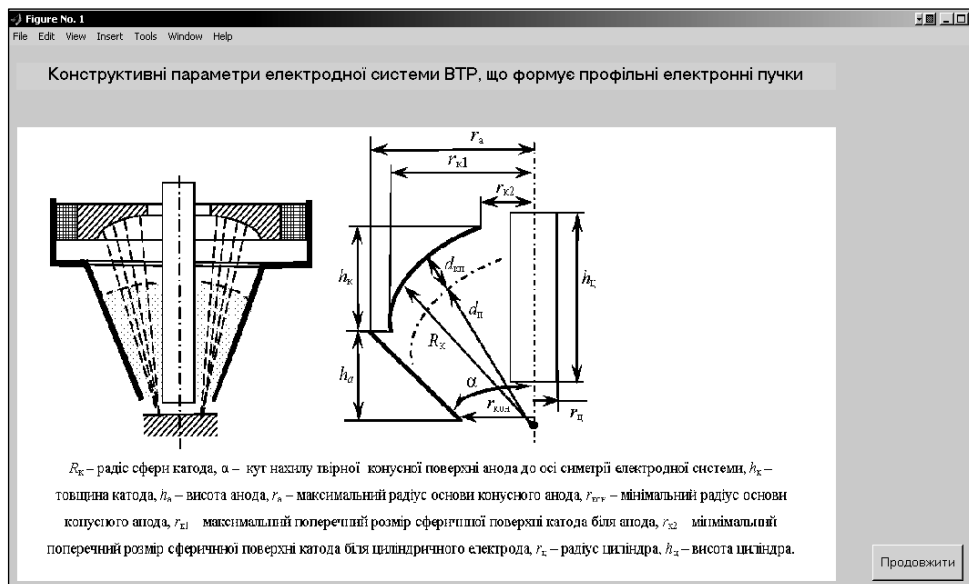


Рис. 4. Вхідний інтерфейс програми моделювання електродної системи ВТР, конструктивна схема якої наведена на рис. 2, екранна копія

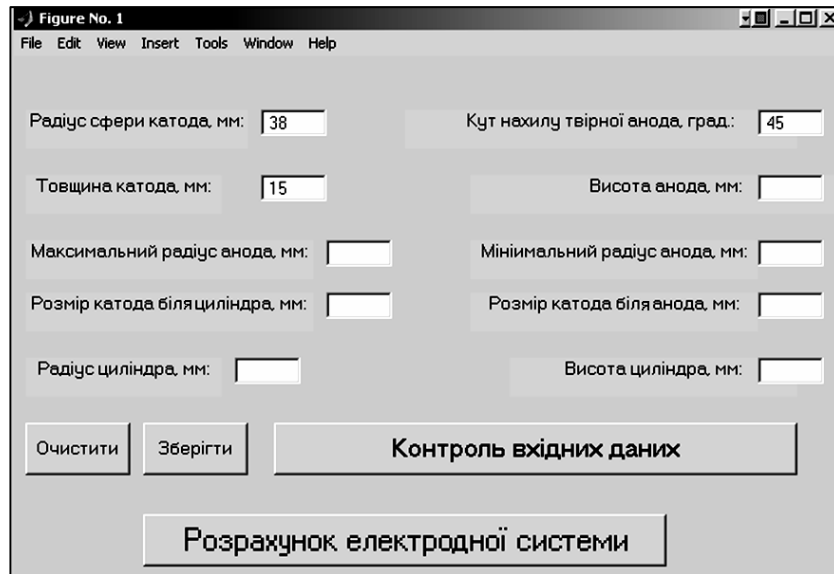


Рис. 5. Діалогове вікно для введення конструктивних розмірів електродної системи ВТР, зображеної на рис. 2, екранна копія

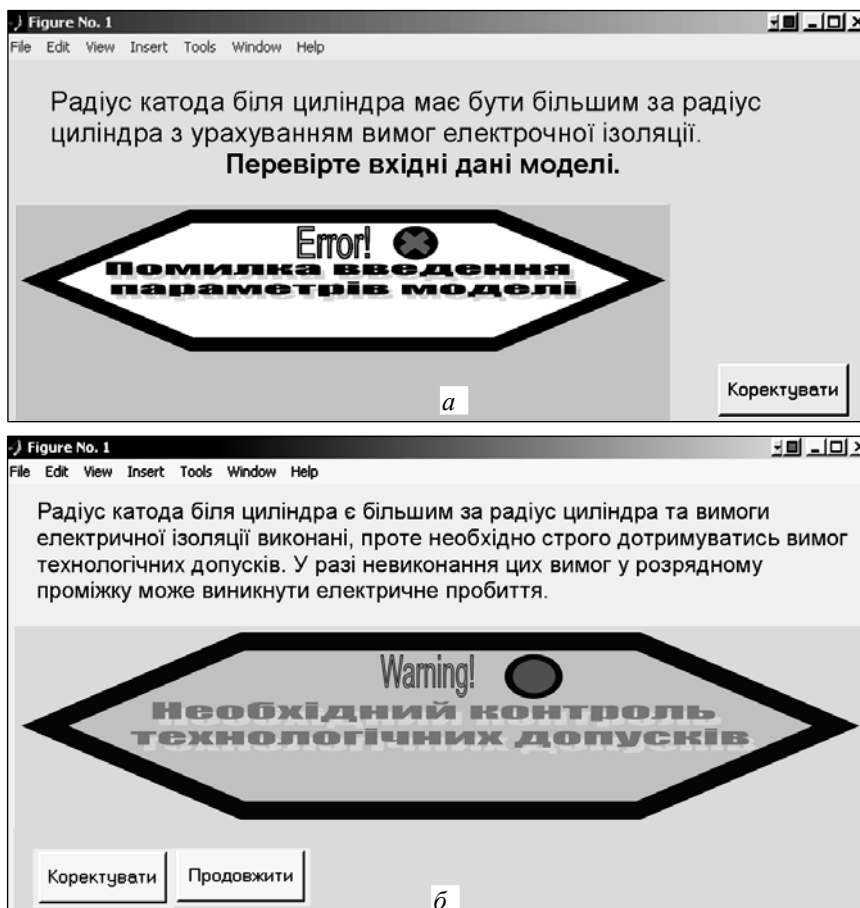


Рис. 6. Діалогові вікна контролю вхідних параметрів моделі газорозрядної гармати ВТР, яка формує профільні електронні пучки: а — вікно повідомлення про помилку вхідних параметрів, екранна копія; б — вікно з попередженням про необхідність строго дотримання технологічних допусків, екранна копія

Перевірити коректність уведених параметрів моделі за співвідношеннями (7–19, 22) можна натисненням відповідної кнопки «Контроль вхідних даних» у діалоговому вікні. У разі натиснення кнопки «Розрахунок електродної системи» також виконується відповідний контроль параметрів моделі, що дозволяє уникнути помилки розрахунків. У випадку, коли в ході контролю вхідних параметрів моделі виявляються помилки, виводяться діалогові вікна з відповідними повідомленнями про необхідність коригування вхідних даних; одне з таких вікон показано на рис 6, а. У програмі окремо аналізується випадок, коли обмеження (7)–(19) виконуються, але невиконання вимог до технологічних допусків, заданих співвідношеннями (22), може призвести або до пробивання газового проміжку, або до істотних втрат струму електронного пучка в області його виведення з розрядної камери гармати в технологічну камеру. Одне з діалогових вікон із таким попередженням показано на рис. 6, б.

АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ВИСНОВКИ

Запропонована система конструктивних параметрів фізико-топологічної моделі електродних систем ВТР, які формують профільні електронні пучки, є повною, замкненою та несуперечливою. Обмеження, які накладаються на геометричні параметри моделі, записані у вигляді строгих правил через математичні нерівності та реалізовані у програмному комплексі, призначеному для моделювання таких електродних систем. Головною відмінною особливістю запропонованої моделі та її перевагою над попередніми є те, що як ключовий конструктивний параметр розглядається кут нахилу твірної конусного анода до осі симетрії системи. Уведення цього ключового параметра дало змогу зробити розроблену модель досить універсальною і розглядати електродні системи ВТР, які формують не лише порожнисті конусні, але й дискові та трубчасті електронні пучки. Це дозволило звести до мінімуму кількість геометричних параметрів конструкції електродної системи та встановити зв'язки між взаємозалежними параметрами через прості тригонометричні співвідношення. На базові конструктивні параметри моделі накладаються не лише геометричні, але й відповідні фізичні, технологічні та обчислювальні обмеження. Тестування розробленого програмного комплексу, призначеного для моделювання електродних систем ВТР, які формують профільні електронні пучки, показало високу надійність роботи розроблених програмних засобів.

Отримані у роботі результати мають велику практичну цінність для фахівців, які займаються проектуванням електронних гармат ВТР та їх упровадженням для реалізації сучасних електронно-променевих технологій у серійному та масовому виробництві.

ЛІТЕРАТУРА

1. Новиков А.А. Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой / А.А. Новиков. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 96 с.

2. *Плазменные процессы в технологических электронных пушках* / М.А. Завьялов, Ю.Е. Крейнфельд, А.А. Новиков, Л.П. Шантурин. — М.: Атомиздат, 1989. — 256 с.
3. *Ладохин С.В. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве* / С.В. Ладохин, Н.И. Левитский, В.Б. Чернявский, Т.В. Лапшук та ін. — К.: Сталь, 2007. — 605 с.
4. *Feinaeugle P. A new generation of plasma-based electron beam sources with high power density as a novel tool for high-rate PVD* / P. Feinaeugle, G. Mattausch, S. Schmidt, F.H. Roegner // Society of Vacuum Coaters, 54-th Annual Technical Conference Proceedings, Chicago. — 2011. — P. 202–209.
5. *Mattausch G. Gas discharge electron sources – proven and novel tools for thin-film technologies* / G. Mattausch, B. Zimmermann, F. Fietzke, J.P. Heinss et al. // Elektrotechnica and Electronica (E+E). — 2014. — Vol. 49, N 5–6. — P. 183–195.
6. *Grechanyuk M.I. Modern electron beam technologies and equipment for melting and physical vapor deposition of different materials* / M.I. Grechanyuk, A.G. Melnyk, I.M. Grechanyuk, V.G. Melnyk et al. // Elektrotechnica and Electronica (E+E). — 2014. — Vol. 49, N 5–6. — P. 115–121.
7. *Denbnovetsky S.V. High voltage glow discharge electron sources and possibilities of its application in industry for realising of different technological operations* / S.V. Denbnovetsky, V.G. Melnyk, I.V. Melnyk // IEEE Transactions on plasma science. — 2003. — Vol. 31, N 5. — P. 987–993.
8. *Melnik I.V. Simulation of geometry of high voltage glow discharge electrodes' systems, formed profile electron beams* / I.V. Melnik // Proceedings of SPIE, Vol. 6278, Seventh Seminar on Problems of Theoretical and Applied Electron and Ion Optics. — P. 627809-1–627809-13.
9. *Denbnovetsky S.V. Model Of Beam Formation In A Glow Discharge Electron Gun With A Cold Cathode* / S.V. Denbnovetsky, J. Felba, V.I. Melnik, I.V. Melnik // Applied Surface Science, 111 (1997). — P. 288–294.
10. *Мельник И.В. Методика моделирования технологических источников электронов высоковольтного тлеющего разряда* / И.В. Мельник, С.Б. Тугай // Электронное моделирование. — 2010. — Т. 32. — № 6. — С. 31–43.
11. *Мельник И.В. Исследование электронно-ионной оптики электродных систем высоковольтного тлеющего разряда с использованием методов компьютерного анализа изображений* / И.В. Мельник // Электронное моделирование. — 2007. — Т. 29, № 1. — С. 45–58.
12. *Норенков И.П. Основы теории и проектирования САПР* / И.П. Норенков, В.Б. Маничев. — М.: Высш. шк., 1990. — 336 с.
13. *Мельник И.В. Классификация моделей электронно-оптических систем с точки зрения методологии САПР* / И.В. Мельник // Электроника и связь. — 2007. — № 2(37). — С. 20–31.
14. *Мельник И.В. Инженерные допуски на конструктивные параметры технологических источников электронов высоковольтного тлеющего разряда* / И.В. Мельник // Электроника и связь, темат. вып. «Проблемы электроники». — 2007. — Ч. 1. — С. 66–70.
15. *Ильин В.П. Численные методы решения задач электрофизики* / В.П. Ильин. — М.: Наука, 1985. — 336 с.
16. *Справочник по математике для инженеров и учащихся ВУЗов* / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. — М.: Наука, 1981. — 720 с.
17. *Мельник В.И. Моделирование температурных режимов работы катода источников электронов высоковольтного тлеющего разряда на основе решения уравнения теплового баланса* / В.И. Мельник, И.В. Мельник // Вестн. Херсон. нац. техн. ун-та. — 2010. — Вып. 3 (39). — С. 311–315.

18. Райзер Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П. Райзер. — М.: Наука, 1987. — 592 с.
19. Денбновецкий С.В. Основы автоматизированного проектирования электронных пирборов / С.В. Денбновецкий, Л.Д. Писаренко, В.К. Резниченко. — К.: Вища. шк., 1987. — 335 с.
20. Силадьи М. Электронная и ионная оптика / М. Силадьи. — М.: Мир, 1990. — 640 с.
21. Мельник І.В. Система науково-технічних розрахунків MatLab та її використання для розв'язання задач із електроніки: навч. посіб. у 2 т. Т. 1. Основи роботи та функції системи. — К.: Ун-т «Україна», 2009. — 507 с.
22. Мельник І.В. Система науково-технічних розрахунків MatLab та її використання для розв'язання задач із електроніки: навч. посіб. у 2 т. Т. 2. Основи програмування та розв'язання прикладних задач. — К.: Ун-т «Україна», 2009. — 327 с.

Надійшла 18.12.2018