

УДК 621.791:537.525

І.В. МЕЛЬНИК, С.Б. ТУГАЙ, В.О. КИРИК  
НТУ «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», Київ  
Д.В. КОВАЛЬЧУК  
Приватне Акціонерне Товариство НВО «Червона Хвиля», Київ

## **ТЕОРЕТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ РОБОЧОГО ТИСКУ ГАРМАТ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІЙ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ**

*У статті проведений порівняльний аналіз методів аналітичного та чисельного розрахунку глибини зварювального шва металевих виробів за умови здійснення зварювання у низькому вакуумі електронним пучком, який формується гарматою високовольтного тліючого розряду. Показано, що хоча аналітичний метод розрахунку є простим та зручним, але, у разі його використання, розрахункові залежності правильно відображають динаміку зміни глибини шва лише у разі малих тисків та високої прискорювальної напруги. У даному випадку проблема забезпечення точності та адекватності аналітичних розрахунків за простими співвідношеннями насамперед пов'язана з тим, що не враховується залежність діаметра електронного пучка в фокусі від його струму. Запропонований чисельний метод розрахунку дозволяє оцінювати глибину шва в значно більш широкому діапазоні робочих тисків електронної гармати. Для розрахунку глибини зварювального шва були використані відомі прості аналітичні залежності, які дозволяють обчислити глибину проплавлення металу залежно від його термодинамічних властивостей, а також геометричних та енергетичних параметрів електронного пучка. Як параметри пучка розглядалися прискорювальна напруга, струм пучка та його фокальний діаметр. Для проведення аналітичних та чисельних оцінок були окремо враховані існуючі аналітичні залежності фокального діаметру електронного пучка від його струму, а також залежність струму електронної гармати високовольтного тліючого розряду від тиску у розрядній камері. Чисельні розрахунки проводились через аналіз функціональної залежності, в яку входили глибина зварювального шва та тиск газу у розрядній камері гармати як явні параметри, та через пошук нульового значення цієї функції шляхом розв'язування відповідного нелінійного рівняння. Аналіз поведінки функції у заданому інтервалі значень тиску та глибини зварювального шва показав, що така постановка задачі є цілком коректною з математичної точки зору. У статті наведені результати тестових аналітичних та чисельних розрахунків залежності глибини зварювального шва від тиску гелію в розрядній камері гармати, отримані для виробів із титану, та проведений аналіз отриманих розрахункових результатів.*

*Ключові слова: нелінійне рівняння, електронний пучок, електронно-променеє зварювання, глибина зварювального шва, фокальний діаметр електронного пучка, електронні гармати високовольтного тліючого розряду.*

І.В. МЕЛЬНИК, С.Б. ТУГАЙ, В.А. КИРИК  
НТУ України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», Київ  
Д.В. КОВАЛЬЧУК  
Частное Акционерное Общество НПО «Червона Хвиля», Київ

## **ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАБОЧЕГО ДАВЛЕНИЯ ПУШЕК ВИСОКОВОЛЬТНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

*В статье проведен сравнительный анализ методов аналитического и численного расчета глубины сварочного шва металлических изделий при осуществлении сварки в низком вакууме электронным пучком, который формируется пушкой высоковольтного тлеющего разряда. Показано, что хотя аналитический метод расчета является простым и удобным, но, в случае его использования, расчетные зависимости правильно отражают динамику изменения глубины шва только в случае малых давлений и высоких ускоряющих напряжений. В данном случае проблема обеспечения точности и адекватности аналитических расчетов по простым соотношениям прежде всего связана с тем, что не учитывается зависимость диаметра электронного пучка в фокусе от его тока. Предложенный численный метод расчета позволяет оценивать глубину шва в значительно более широком диапазоне рабочих давлений электронной пушки. Для расчета глубины сварочного шва были использованы известные простые аналитические зависимости, позволяющие вычислить глубину проплавления металла в зависимости от его термодинамических свойств, а также геометрических и энергетических параметров электронного пучка. Как параметры пучка рассматривались ускоряющее напряжение, ток*

пучка и его фокальной диаметр. Для проведения аналитических и численных оценок были отдельно учтены существующие аналитические зависимости фокального диаметра электронного пучка от его тока, а также зависимость тока электронной пушки высоковольтного тлеющего разряда от давления в разрядной камере. Численные расчеты проводились через анализ функциональной зависимости, в которую входили глубина сварочного шва и давление газа в разрядной камере пушки как явные параметры, и через поиск нулевого значения этой функции путем решения соответствующего нелинейного уравнения. Анализ поведения функции в заданном интервале значений давления и глубины сварочного шва показал, что такая постановка задачи является вполне корректной с математической точки зрения. В статье приведены результаты тестовых аналитических и численных расчетов зависимости глубины сварочного шва от давления гелия в разрядной камере пушки, полученные для изделий из титана, и проведен анализ полученных расчетных результатов.

Ключевые слова: нелинейное уравнение, электронный пучок, электронно-лучевая сварка, глубина сварочного шва, фокальный диаметр электронного пучка, электронные пушки высоковольтного тлеющего разряда.

I.V. MELNYK, S.B. TUHAI, V.O. KYRYK  
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnical Institute"  
D.V. KOVALCHUK  
Private Actioner Society, Scientific and Industrial Association "ChervonaHvyliia"

## **THEORETICAL ESTIMATION OF OPERATION PRESSURE OF HIGH-VOLTAGE GLOW DISCHARGE GUNS FOR APPLYING IN ELECTRON-BEAM TECHNOLOGY OF METAL PRODUCTS WELDING**

*In the article a comparative analysis of methods for analytical and numerical calculation of the depth of a welding seam of metal products, during its welding in the soft vacuum by an electron beam, which is formed by high-voltage glow discharge guns, is provided. It is shown, that although the analytical method of calculation is simple and convenient, but, in the case of its use, the calculated dependences correctly reflect the dynamics of changing of the welding depth only in the case of low pressures and high acceleration voltage. In this case, the problem of ensuring the accuracy and adequacy of analytical calculations by using the simple relations is primarily due to the fact that the dependence of the electron beam diameter at the focus on its current isn't taken into account. The proposed numerical calculation method allows to estimate the weld depth in a much wider range of operating pressures of the electron gun. To calculate the depth of the seam, the well-known simple analytical dependences were used, which allows to calculate the depth of metal penetration in the seam depending on its thermodynamic properties, as well as on the geometry and energy parameters of the electron beam. Accelerating voltage, beam current and focal diameter were considered as beam parameters. To providing analytical and numerical estimates was separately took into account the existing analytical dependences of the electron beam focal diameter on its current, as well as the dependence of the current of high-voltage glow discharge electron guns on the pressure in discharge chamber. Numerical calculations were carried out through the analysis of the functional dependence, which included the depth of the weld and the gas pressure in the discharge chamber of the gun as explicit parameters, and through the search for the zero value of this function by solving the corresponding nonlinear equation. Analysis of the behavior of the function in a given range of values of pressure and depth of the weld showed that such a formulation of the problem is quite correct by the mathematical point of view. The results of testing of analytical and numerical calculations for the dependence of the welding seam depth on the helium pressure in the discharge chamber of the gun, obtained for titanium products, have been presented and analyzed in the article.*

*Keywords: nonlinear equation, electron beam, electron beam welding, seam depth, electron beam focal diameter, high voltage glow discharge electron guns*

### **Вступ**

Сьогодні технології електронно-променевого зварювання знаходять широке впровадження у різних галузях промисловості, зокрема у машинобудуванні, авіабудуванні, космічній індустрії, хімічній промисловості, а також в приладобудуванні та електронній промисловості. Загалом це пов'язано з такими вагомими перевагами сучасних електронно-променевих зварювальних технологій [1 – 6]:

1. висока якість виробів, яка обумовлена реалізацією процесу зварювання у вакуумі в умовах високої чистоти;

2. висока загальна та питома потужність електронного пучка, що забезпечує можливість отримання високоякісних швів з глибоким проплавленням, зокрема для виробів з великою товщиною металевих стінок;

3. простота керування просторовими та геометричними параметрами електронного пучка з використанням електричних та магнітних полів;

4. простота керування потужністю електронних пучків через введення додаткових електродів та використання методів модуляції.

Електронно-променеве зварювання металів у вакуумі є сучасною та перспективною технологією, яка спроможна сьогодні замінити традиційні способи зварювання, зокрема аргонно-дугове та контактне, а також складає серйозну конкуренцію сучасним технологіям лазерного зварювання [1 – 3, 7]. Головною перевагою електронного пучка над лазерним як зварювального технологічного інструменту є висока якість виробів, яка забезпечується через проведення зварювання у вакуумі, а також можливість забезпечення ефективного керування просторовими та енергетичними параметрами електронного пучка з використанням електричних та магнітних полів [1 – 4]. Незважаючи на те, що зварювання лазерним пучком можна проводити в повітрі в умовах атмосферного тиску, взагалі без використання вакуумного обладнання [7], якість деталей, які були зварювані електронним пучком в умовах високого або середнього вакууму, зазвичай є значно кращою [1 – 4].

Проте, важливим чинником подальшого розвитку технологій електронно-променевого зварювання та їх впровадження у сучасне промислове виробництво є спрощення та зниження вартості технологічного електронно-променевого зварювального обладнання. Одним із шляхів такого розвитку електронно-променевих зварювальних технологій є проведення технологічної операції зварювання у низькому та середньому вакуумі з використанням захисного або активного газового середовища [1 – 4]. Проте, у разі застосування для формування електронного пучка традиційно використовуваних джерел електронів із розжарюваними катодами, для забезпечення нормальної роботи генератора електронного пучка необхідно додатково створювати високий вакуум в об'ємі гармати та виключати можливість наявності активних газів. За такої умови проведення технологічної операції зварювання в низькому вакуумі потребує суттєвого ускладнення вакуумного технологічного обладнання, що у значній мірі збільшує його вартість [1 – 3].

Тому сьогодні інженерна розробка джерел електронів, призначених для застосування в електронно-променевих технологіях зварювання, проводиться за наступними двома головними напрямками:

1. подальше удосконалення конструкцій джерел електронів із розжарюваними катодами та зварювального обладнання на їх основі [1 – 3];

2. розробка джерел електронів нового типу, робота яких ґрунтується на новітніх фізичних принципах, одним з яких може бути емісія заряджених частинок з іонізованого газу або із плазми під дією потужного електричного поля [4 – 6, 8 – 10].

Серед таких джерел електронів, робота яких забезпечується через запалювання тліючого розряду низького тиску, окреме місце займають електронні гармати на основі високовольтного тліючого розряду (ВТР). Головний принцип роботи таких гармат полягає у тому, що емісія електронів здійснюється з розвиненої поверхні охолоджуваного катода як результат її бомбардування іонами залишкового газу, джерелом яких є анодна плазма [8 – 10]. Робочий тиск електронних гармат ВТР відповідає низькому вакууму та зазвичай лежить в діапазоні 1 – 10 Па [4, 8 – 10]. Тому фізичні основи роботи гармат ВТР забезпечують можливість проведення технологічної операції зварювання електронним пучком в низькому вакуумі, у середовищі захисних або активних газів, на простому технологічному обладнанні [8, 9]. Іншою особливістю

технологічних гармат ВТР є можливість формування профільних електронних пучків з метою забезпечення швидкодійного моноімпульсного зварювання виробів із складною геометрією кільцевим, прямокутним або лінійним швом. Наприклад, такий спосіб є вкрай ефективним для зварювання трубчастих виробів, інших круглих деталей, або корпусів електронних приладів [9]. Відповідна схема процесу зварювання показана на рис. 1.

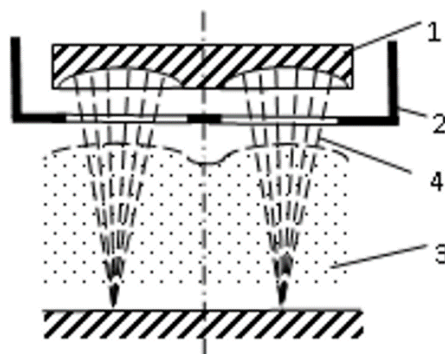


Рис. 1. Принцип формування кільцевого зварювального шва з використанням електронної гармати ВТР. 1 – охолоджуваний катод, 2 – анодна діафрагма, 3 – електронний пучок, 4 – анодна плазма

Проте аналітичних та чисельних методів розрахунку геометричних параметрів зварювального шва, з урахуванням геометричних та енергетичних параметрів електронних пучків, які формуються електронними гарматами ВТР, сьогодні не існує. Отримання та аналіз таких аналітичних співвідношень є метою даної статті.

### Постановка задачі

У загальному вигляді аналіз залежності глибини зварювального шва від прискорювальної напруги, струму електронного пучка та його діаметра може бути проведений через аналітичне або чисельне розв’язування однорідного рівняння теплопровідності, яке в декартових координатах записується наступним чином [1, 11]:

$$\frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial t} - a^2 \left( \frac{\partial^2 T(x,y,z,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x,y,z,t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x,y,z,t)}{\partial z^2} \right) = 0, \quad a = \frac{\chi}{c_p \rho}, \quad (1)$$

де  $t$  – час,  $x, y, z$  – просторові координати,  $a$  – коефіцієнт термічної дифузії,  $\chi$  – теплопровідність металу,  $c_p$  – ізобарна теплопровідність металу та  $\rho$  – густина металу.

Для пошуку аналітичних розв’язків рівняння теплопровідності (1) зазвичай розглядають його ядро, яке у загальному вигляді записується наступним чином [1, 11]:

$$\Phi(x, t) = \frac{1}{(2a\sqrt{\pi t})^n} \exp\left(-\frac{|x|^2}{4a^2 t}\right). \quad (2)$$

Проте розв’язування термодинамічних задач з використанням рівнянь (1, 2) є досить складним та потребує використання спеціальних аналітичних [3, 11] та чисельних [12] методів. Такі способи аналізу параметрів зварювального шва є вкрай складними з обчислювальної точки зору та потребують використання потужних обчислювальних ресурсів [1]. Недолік такої узагальненої постановки завдання моделювання геометрії зварювального шва також полягає у тому, що аналіз отриманої функції

$$h_{\text{шв}} = f(I_{\text{п}}, U_{\text{пр}}, p_{\text{г}}), \quad (3)$$

де  $h_{шв}$  – глибина зварювального шва,  $I_{п}$  – струм електронного пучка,  $U_{пр}$  – прискорювальна напруга,  $p_{г}$  – робочий тиск у гарматі ВТР, можливий лише через аналіз отриманих графічних залежностей [1]. Тобто, до функції (3), у разі використання складних методів комп'ютерних розрахунків, не може бути застосований ефективний сучасний математичний апарат функціонального аналізу з метою визначення її загальних властивостей [13].

Тому для комплексного аналізу залежності параметрів зварювального шва від термодинамічних властивостей металу, який зварюється, а також від енергетичних та геометричних параметрів електронного пучка, більш зручно та ефективно використовувати добре відомі спрощені аналітичні розв'язки рівняння (1), отримані з урахуванням особливостей протікання процесу зварювання та відповідних граничних умов [1, 3]. Загальний недолік цих співвідношень, з точки зору можливості їх використання для проведення реальних інженерних розрахунків, полягає у тому, що в них функція для визначення параметрів зварювального шва (3) записана як залежність від задалегідь відомих енергетичних та геометричних параметрів електронного пучка, а саме:

$$h_{шв} = f_1(I_{п}, U_{пр}, d_{п}), \quad (4)$$

де  $d_{п}$  – діаметр електронного пучка.

Цілком зрозуміло, що узагальнене співвідношення (4) безпосередньо не може бути використано для проведення аналітичних та числових оцінок глибини зварюваного шва з наступних причин.

1. У співвідношенні (4) не враховується залежність діаметра електронного пучка від його струму  $d_{п}(I_{п})$ .

2. У співвідношенні (4) не враховується залежність струму гармати ВТР від тиску в розрядній камері  $I_{п}(p_{г})$ .

Аналітичні співвідношення, які описують залежність  $d_{п}(I_{п})$ , у загальному вигляді наведені в роботах [14, 15], а аналітичне співвідношення  $I_{п}(p_{г})$ , безпосередньо для умов горіння ВТР, було отримане у роботі [8]. Узагальнені оцінки енергетичних та геометричних параметрів електронних пучків, які формуються джерелами електронів ВТР, а також питомої потужності таких електронних пучків, були отримані та описані у роботі [10].

Тому метою даної роботи є отримання та подальший аналіз простих аналітичних співвідношень для оцінки параметрів зварювального шва у разі використання технологічних електронних гармат ВТР. Такі співвідношення можна отримати через аналіз функціональних залежностей, записаних у вигляді (4) та наведених у монографії [1], підставляючи в них відомі залежності  $d_{п}(I_{п})$ , наведені в роботах [8, 14, 15], та залежність  $I_{п}(p_{г})$ , наведену у роботі [8]. Аналіз отриманих аналітичних функцій, записаних у вигляді (3), а також побудованих на їхній основі графічних залежностей, дозволить провести узагальнену теоретичну оцінку технологічних можливостей зварювальних електронних гармат ВТР. Така оцінка має вельми велике практичне значення для проектувальників електронно-променевого зварювального технологічного обладнання.

### **Порівняльний аналіз аналітичних співвідношень, призначених для оцінки глибини проплавлення зварювального шва**

Узагальнений розгляд різних методів розрахунку глибини проплавлення зварювального шва наведений у монографіях [1, 3]. Загалом, головними способами розрахунку геометричних параметрів зварювального шва є наступні [1, 3].

1. Розв'язування рівняння теплопровідності (1) для визначених граничних умов з використанням чисельних методів [1, 3].

2. Аналітичне розв'язування рівняння теплопровідності (1) для заданих граничних умов через аналіз особливостей його загального рішення, заданого функцією (2). Зазвичай результатом таких аналітичних перетворень є складні нелінійні рівняння, які розв'язуються з використанням чисельних методів [12].

3. Пошук, з урахуванням заданих граничних умов, простих аналітичних співвідношень, записаних у вигляді (4).

Головною перевагою першого та другого способів розрахунку геометричних параметрів зварювального шва є висока точність та можливість врахування різних фізичних та технологічних факторів, які можуть суттєво впливати на процес зварювання [1, 3]. Проте головним недоліком цих способів є їх складність з обчислювальної точки зору [1, 3], а точність таких розрахунків суттєво залежить від правильності описання граничних умов [1, 3] та обчислювальних особливостей використовуваних чисельних методів [12]. Крім цього, час проведення таких розрахунків, навіть за умови використання сучасних комп'ютерних систем з великою обчислювальною потужністю, може не задовольняти вимогам промислового виробництва. Ці вимоги мають особливо велике значення у разі проведення розрахунків геометричних параметрів шва у реальному часі, тобто, безпосередньо в ході виконання процесу зварювання з метою автоматизації контролю якості зварювальних виробів [1]. Крім цього, оцінки геометрії зварювального шва, проведені першим та другим способом, можна проводити лише з використанням отриманих графічних залежностей, без аналізу особливостей поведінки аналітичної функції (4) у разі зміни параметрів процесу зварювання. Тому на практиці, для проведення теоретичних оцінок з метою пошуку способів поліпшення якості зварюваного з'єднання, часто використовують методи інтерполяції отриманих чисельних розрахунків або методи апроксимації експериментальних даних [1, 16 – 18].

У зв'язку з цим, в інженерній практиці, для попереднього оцінювання глибини зварювального з'єднання на етапі визначення параметрів технологічного процесу зварювання, часто використовують більш прості аналітичні співвідношення. Тобто, з практичної точки зору, найбільш цікавим, серед перелічених вище, є третій спосіб розрахунку [1]. Проте головним недоліком цього способу є суттєві обмеження з точки зору врахування всіх впливових факторів та фізичних закономірностей, притаманних процесу електронно-променевого зварювання [1]. Тобто, точність розрахунків відносно експериментальних даних у даному разі може бути невисокою, але безперечними перевагами використання третього способу оцінювання параметрів зварювального з'єднання є висока швидкість розрахунків та можливість безпосереднього оцінювання впливу головних параметрів технологічного процесу зварювання на геометрію шва через аналіз особливостей аналітичної функції (4).

У монографії [1] наведені наступні аналітичні співвідношення для наближеної оцінки глибини зварюваного шва.

1. Універсальна оцінка за співвідношенням Хабланіана [1, 19]:

$$h_{шв} = 0,2 \sqrt{\frac{2a_T}{v_{св} r_{п}}} \cdot \frac{U_{пр} I_{п}}{4\lambda_T T_{пл} \left(1 + \frac{L_{пл}}{c T_{пл}}\right)}, \quad (5)$$

де  $a_T$  – коефіцієнт температуропровідності,  $v_{св}$  – швидкість зварювання,  $r_{п}$  – радіус електронного пучка,  $U_{пр}$  – прискорювальна напруга,  $I_{п}$  – струм пучка,  $\lambda_T$  – коефіцієнт теплопровідності металу,  $T_{пл}$  – температура плавлення металу,  $L_{пл}$  – питома теплота плавлення металу,  $c$  – теплоємність металу.

2. Уточнена оцінка для зварювальних з'єднань з глибоким проплавленням за співвідношенням Лопатко, Карташова та Ткачова [1, 20]:

$$h_{\text{шв}} = \frac{0,132 U_{\text{пр}} I_{\text{п}}}{\lambda_{\text{T}} T_{\text{пл}} \left( \left( \frac{2v_{\text{св}} r_{\text{п}}}{a_{\text{T}}} \right) \left( 1 + \frac{L_{\text{пл}}}{c T_{\text{пл}}} \right) \right)^{0,815}}. \quad (6)$$

Перепишемо співвідношення (5, 6) у вигляді зворотної залежності:

$$I_{\text{п}} = f_2(h_{\text{шв}}, U_{\text{пр}}, d_{\text{п}}). \quad (7)$$

Перевага записаного співвідношення (7) над співвідношенням (4), з точки зору розв'язування практичних завдань технології електронно-променевого зварювання, полягає у тому, що зазвичай товщина шва  $h_{\text{шв}}$  є відомим параметром, який забезпечує високу якість зварювальних виробів. Тому розробникам технології зварювання завжди важливо знати, за умови якої потужності електронного пучка досягається необхідна товщина шва [1 – 3]. Враховуючи те, що в промисловому зварювальному електронно-променевому обладнанні прискорювальна напруга  $U_{\text{пр}}$  зазвичай є стабільною величиною [1, 2], важливим інженерним завданням для визначення та стабілізації параметрів технологічного процесу зварювання є пошук аналітичної залежності струму електронного пучка  $I_{\text{п}}$  від глибини шва  $h_{\text{шв}}$ , прискорювальної напруги  $U_{\text{пр}}$  та діаметра пучка  $d_{\text{п}}$ , записаної у вигляді (7).

З урахуванням наведених вище практичних міркувань, наведені співвідношення (5, 6) можна переписати наступним чином:

$$I_{\text{п}} = \frac{20 h_{\text{шв}} \lambda_{\text{T}} T_{\text{пл}} \left( 1 + \frac{L_{\text{пл}}}{c T_{\text{пл}}} \right) \sqrt{\frac{v_{\text{св}} r_{\text{п}}}{2 a_{\text{T}}}}}{U_{\text{пр}}}. \quad (8)$$

$$I_{\text{п}} = \frac{7,576 h_{\text{шв}} \lambda_{\text{T}} T_{\text{пл}} \left( \left( \frac{2v_{\text{св}} r_{\text{п}}}{a_{\text{T}}} \right) \left( 1 + \frac{L_{\text{пл}}}{c T_{\text{пл}}} \right) \right)^{0,815}}{U_{\text{пр}}}. \quad (9)$$

Залежності  $I_{\text{п}}(h_{\text{шв}}, U_{\text{пр}}, d_{\text{п}})$ , отримані з використанням співвідношень (8, 9), наведені на рис. 2. З аналізу співвідношень (8, 9) зрозуміло, що залежність  $I_{\text{п}}(h_{\text{шв}})$  має лінійний характер. Слід відзначити, що залежність (8) є більш універсальною, ніж формула (9), та не містить складної для аналізу та проведення точних розрахунків степеневі функції з раціональним показником степені. Головна перевага залежності (9) над залежністю (8) полягає у тому, що вона дозволяє точніше оцінювати значення струму електронного пучка для зварювальних з'єднань з глибоким проплавленням на металевих виробах великої товщини [1, 20]. Проте для виконання цієї вкрай складної технологічної операції зварювання зазвичай використовуються інтенсивні електронні пучки з великим струмом, великою кінетичною енергією електронів та малим кутом збіжності [1, 3]. Джерела електронів ВТР, для яких будуть проводитись подальші аналітичні оцінки, не відповідають цим вимогам. Зазвичай електронні пучки, сформовані гарматами ВТР, використовуються для зварювання металевих виробів невеликої товщини [5, 8 – 10]. Тому надалі, для оцінювання значення струму електронного пучка, необхідного для забезпечення заданої глибини проплавлення зварювального шва, а також відповідного значення тиску у розрядній камері гармати ВТР, будемо використовувати співвідношення (8).

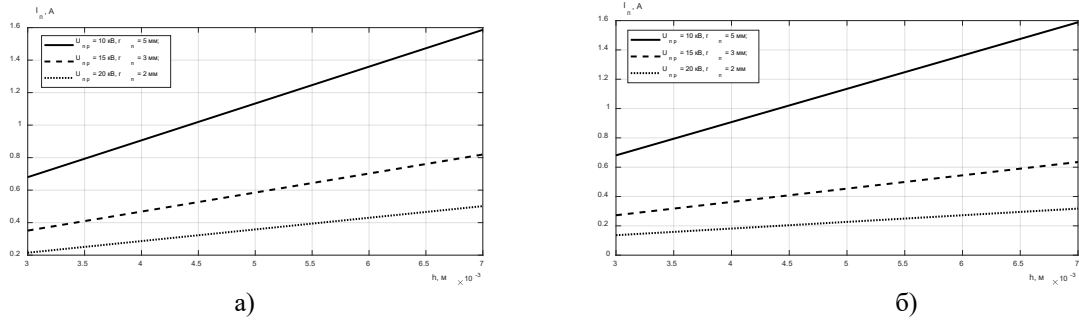


Рис. 2. Залежності глибини зварювального шва від струму електронного пучка, його радіусу та прискорювальної напруги, отримані з використанням співвідношень (8) (а) та (9) (б)

Загальний недолік наведених співвідношень (8, 9) полягає у тому, що, згідно з загальновідомими фізичними особливостями формування потужних електронних пучків, діаметр пучка  $d_p$  безпосередньо залежить від його струму  $I_p$  та прискорювальної напруги  $U_{пр}$ . Тому метою подальших досліджень має бути пошук аналітичних залежностей  $d_p(I_p, U_{пр})$  [8, 14, 15]. Враховуючи те, що в діодних джерелах електронів ВТР струм електронного пучка визначається тиском у розрядній камері та використовуваним робочим газом, тобто, параметр  $I_p$  безпосередньо залежить від тиску. З точки зору ефективності подальшого практичного використання, зручніше аналізувати функціональну залежність для тиску газу у розрядній камері гарматою  $p_r$  від наперед заданих незалежних параметрів, а саме, прискорювальної напруги  $U_{пр}$  та необхідної глибини проплавлення зварюваного шва  $h_{шв}$ . Аналітичні залежності струму електронного пучка ВТР від тиску робочого газу відповідають вольт-амперним характеристикам ВТР та були наведені та проаналізовані в роботах [8, 16]. Узагальнені теоретичні оцінки розподілу струму електронного пучка ВТР в його фокусі були проведені в роботі [10, 17]. Тобто, узагальненим завданням подальших досліджень є пошук функціональної залежності, зворотної до формули (3):

$$p_r = f_4(U_{пр}, h_{шв}). \quad (10)$$

**Аналітична залежність тиску в розрядній камері від необхідної глибини зварювального шва та прискорювальної напруги та результати тестових розрахунків для титанових виробів**

У монографії [8] була наведена наступна аналітична залежність для мінімального радіусу електронного пучка, який формується гарматою ВТР, від параметрів горіння розряду та геометрії електронної системи:

$$r_e = \frac{r_k}{\alpha} \sqrt{\frac{\Delta U}{U_{пр}}}, \quad (11)$$

де  $r_k$  – радіус робочої поверхні катоду,  $\alpha$  – кут збіжності електронного пучка,  $\Delta U$  – розкид електронів пучка за швидкостями, який для фізичних умов горіння ВТР складає близько  $\Delta U = 30$  В [8]. З урахуванням співвідношення (11) та залежності (8), записаної у вигляді функції (7), залежність струму електронного пучка  $I_p$  від глибини зварювального шва  $h_{шв}$  та прискорювальної напруги можна  $U_{пр}$  записати у вигляді наступного аналітичного виразу:

$$I_p(h_{шв}, U_{пр}) = \frac{20h_{шв}\lambda_T T_{пл} \left(1 + \frac{L_{пл}}{cT_{пл}}\right) \sqrt{\frac{v_{св} r_e}{2a_T}}}{U_{пр}} = \frac{20h_{шв}\lambda_T T_{пл} \left(1 + \frac{L_{пл}}{cT_{пл}}\right) \sqrt{\frac{v_{св} r_k}{\alpha} \sqrt{\frac{\Delta U}{U_{пр}}}}}{U_{пр} \sqrt{2a_T}}. \quad (12)$$



Залежність струму електронного пучка, який формується гарматою ВТР, від тиску газу у розрядній камері та прискорювальної напруги, яка описує вольт-амперну характеристику ВТР, записується в наступному вигляді [8, 16]

$$I_{\text{п}} = AU_{\text{пр}}^k p_{\Gamma}^m, \quad (13)$$

де  $A$ ,  $k$ ,  $m$  – напівемпіричні коефіцієнти, які зазвичай обчислюються через апроксимацію експериментальних даних. У роботах [8, 16, 18] було відмічено, що коефіцієнти  $k$  та  $m$  для фізичних умов горіння ВТР лежать в числовому діапазоні [1; 2]. Чітке визначення числового діапазону дозволяє спростити завдання пошуку цих коефіцієнтів під час вирішення задачі апроксимації з використанням відомих чисельних методів розв’язування оптимізаційних задач [12, 21]. Для пошуку коефіцієнтів співвідношення (13) за відомими експериментальними даними можуть бути використані програмні засоби та функції системи науково-технічних розрахунків MatLab, зокрема функції аналітичного процесора [16, 18].

Підставляючи аналітичний вираз (13) до отриманого співвідношення (12), можна записати аналітичну залежність  $p_{\Gamma}(h_{\text{шв}}, U_{\text{пр}})$  у вигляді явної функції (10) наступним чином:

$$p_{\Gamma}(h_{\text{шв}}, U_{\text{пр}}) = \left( \frac{20h_{\text{шв}}\lambda_{\Gamma}T_{\text{пл}}(\Delta U)^{0,25} \left(1 + \frac{L_{\text{пл}}}{cT_{\text{пл}}}\right) \sqrt{\frac{v_{\text{св}}r_{\text{к}}}{2a_{\Gamma}\alpha}}}{AU_{\text{пр}}^{1,25+k}} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (14)$$

Розрахунки тиску в розрядній камері за співвідношенням (14) проводились для виробів з титану та для гелію як робочого газу гармати ВТР. Параметри моделі були наступними:  $a_{\Gamma} \approx 25 \cdot 10^6 \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ,  $v_{\text{св}} = 2 \frac{\text{м}}{\text{хв}}$ ,  $U_{\text{пр}} = 10 - 20$  кВ,  $\lambda_{\Gamma} = 15 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ,  $T_{\text{пл}} = 1668^{\circ}\text{C}$ ,  $L_{\text{пл}} \approx 18,8 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$ ,  $c \approx 600 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ,  $r_{\text{к}} = 0,035$  м,  $\alpha = 15^{\circ}$ ,  $A = 97 \frac{\text{А}}{\text{В} \cdot \text{Па}}$ ,  $k = 1,4$ ,  $m = 1,5$ . Невідомі емпіричні коефіцієнти вольт-амперної характеристики ВТР  $A$ ,  $k$  та  $m$  визначалися в ході проведення експериментальних досліджень, які були виконані на експериментальному електронно-променевому обладнанні кафедри електронних пристроїв та систем факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та Приватного Акціонерного Товариства НВО «Червона хвиля». Результати розрахунків, виконаних з використанням співвідношення (14), наведені на рис. 3.

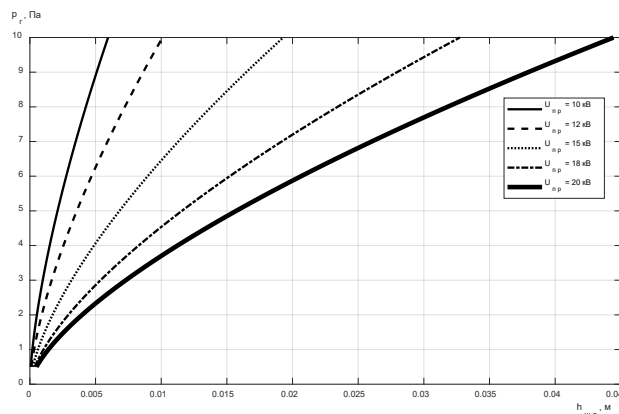


Рис. 3. Залежності тиску у розрядній камері гармати ВТР від необхідної глибини зварювального шва від та прискорювальної напруги, отриманої з використанням співвідношення (14)

Головний недолік використання співвідношення (11) для оцінювання радіуса електронного пучка в фокусі полягає в тому, що в ньому не врахована залежність радіуса пучка від його струму, яка обумовлена просторовим зарядом електронів та є однією із головних закономірностей щодо формування електронних пучків. Тому залежності, наведені на рис. 2, можна використовувати лише для малих струмів електронного пучка за умови компенсації просторового заряду електронів позитивними іонами залишкового газу.

### Залежність фокального радіуса електронного пучка від його струму та визначення необхідного тиску в камері гармати з урахуванням цієї залежності

З теорії формування електронних пучків загальновідомою є наступна аналітична залежність, яка дозволяє визначити значення мінімального радіусу електронного пучка в фокусі  $r_{\min}$  за умови відомих значень струму пучка, прискорювальної напруги, кута збіжності пучка та радіусу робочої поверхні катоду [14, 15]:

$$\ln\left(\frac{r_k}{r_{\min}}\right) = 1,04 \cdot 10^{-3} \frac{U_{\text{пр}}^{1,5}}{I_{\text{п}}} \text{tg}(\alpha). \quad (15)$$

Перепишемо рівняння (15) у вигляді явної функціональної залежності мінімального радіусу електронного пучка від його електричних та геометричних параметрів, тобто як функцію  $r_{\min}(I_{\text{п}}, U_{\text{пр}}, \alpha, r_k)$ :

$$r_{\min} = r_k \exp\left(-1,04 \cdot 10^{-3} \frac{U_{\text{пр}}^{1,5}}{I_{\text{п}}} \text{tg}(\alpha)\right) \quad (16)$$

Підставляючи співвідношення (16) до співвідношення (8), отримуємо наступний результат:

$$I_{\text{п}} = \frac{20h_{\text{шв}}\lambda_{\text{T}}T_{\text{пл}}\left(1 + \frac{L_{\text{пл}}}{cT_{\text{пл}}}\right) \sqrt{\frac{v_{\text{св}}r_k}{2a_{\text{T}}\exp\left(\frac{1,04 \cdot 10^{-3} \text{tg}(\alpha)U_{\text{пр}}^{1,5}}{I_{\text{п}}}\right)}}}{U_{\text{пр}}}. \quad (17)$$

Після підстановки до отриманого рівняння (17) співвідношення (13), яке описує залежність струму електронного пучка від тиску в технологічній камері гармати ВТР, та відповідних аналітичних перетворень, отримуємо наступний алгебраїчний вираз:

$$f(p_{\text{Г}}, h_{\text{шв}}, U_{\text{пр}}) = \frac{20h_{\text{шв}}\lambda_{\text{T}}T_{\text{пл}}\left(1 + \frac{L_{\text{пл}}}{cT_{\text{пл}}}\right) \sqrt{\frac{v_{\text{св}}r_k}{2a_{\text{T}}\exp\left(\frac{1,04 \cdot 10^{-3} \text{tg}(\alpha)U_{\text{пр}}^{1,5}}{AU_{\text{пр}}^k p_{\text{Г}}^m}\right)}}}{U_{\text{пр}}} - AU_{\text{пр}}^k p_{\text{Г}}^m = 0. \quad (18)$$

Отримане рівняння (18) є нелінійним відносно  $p_{\text{Г}}$  та його можна розв'язати з використанням чисельних методів [12, 21]. Дослідження функції (18) показали, що нелінійне рівняння  $f(p_{\text{Г}}) = 0$  має розв'язок в досліджуваному діапазоні прискорювальної напруги  $U_{\text{пр}} = 10 - 30$  кВ та глибини зварювального шва  $h_{\text{шв}} = 0,002 - 0,01$  м. Отримані графічні залежності для функції  $f(p_{\text{Г}})$  для прискорювальної напруги  $U_{\text{пр}} = 20$  кВ та різних значень глибини зварювального шва  $h_{\text{шв}}$  наведені на рис. 4, а.

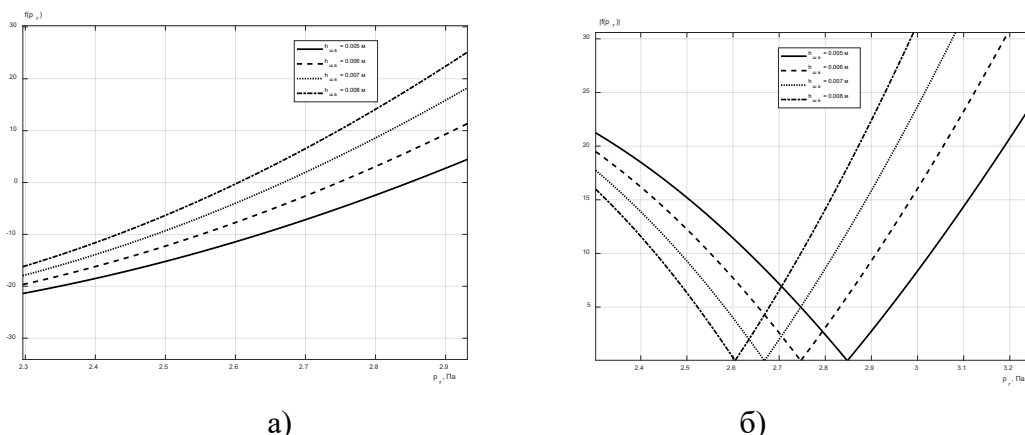


Рис. 4. Дослідження поведінки функції  $f(p_r)$ , заданої співвідношенням (18) (а), та модуля цієї функції  $|f(p_r)|$  (б) для різних значень глибини зварювального шва  $h_{шв}$ . Прискорювальна напруга –  $U_{пр} = 20$  кВ

Чисельне розв’язування рівняння (18) у визначеному діапазоні значень прискорювальної напруги  $U_{пр}$  та глибини зварювального шва  $h_{шв}$  проводилось через пошук мінімального значення модуля дослідженої функції  $f(p_r)$ . Тобто вважалось, що розв’язок нелінійного рівняння (18) відповідає умові [12, 18, 21]:

$$p_r = \arg(\min(|f(p_r)|)). \quad (19)$$

Відповідні графічні залежності для функції  $|f(p_r)|$  наведені на рис. 4, б.

Графічні залежності для функції  $p_r(h_{шв}, U_{пр})$ , отримані як результат чисельного розв’язку нелінійного рівняння (18) з використанням співвідношення (19), наведені на рис. 5.

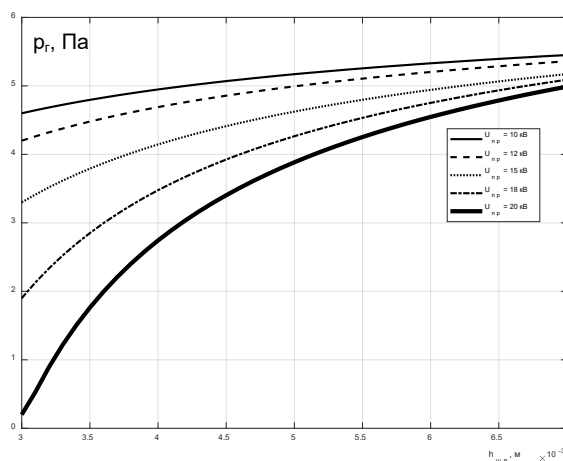


Рис. 5. Залежності  $p_r(U_{пр}, h_{шв})$ , отримані як результат чисельного розв’язування нелінійного рівняння (18)

### Обговорення отриманих результатів

Із графічних залежностей  $p_r(h_{шв}, U_{пр})$ , наведених на рис. 3 та рис. 5, зрозуміло, що розрахунки з використанням співвідношень (14) та (19) дають дещо різні результати. На залежностях, які наведені на рис. 5, значення тисків для невеликих величин глибини шва є більшими, а для великих величин – меншими. Таку розбіжність отриманих розрахункових результатів можна пояснити тим, що в аналітичному співвідношенні (14) не врахована залежність фокального радіуса електронного пучка від його струму  $r_{\min}(I_n)$ , задана

співвідношенням (16). З іншого боку, ця аналітична залежність отримана для умов генерації електронного пучка в вакуумі без урахування компенсації просторового заряду електронів позитивними іонами залишкового газу, тобто, оцінка збільшення мінімального радіуса електронного пучка із зростанням його струму, зроблена з використанням співвідношення (18), може бути дещо завищеною [8 – 10]. Для більш точних оцінок значення тиску у розрядній камері необхідно знайти аналітичну залежність, яка точніше описує умов генерації електронного пучка в ВТР. У будь-якому разі, теоретичні дослідження, описані у даній статті, можуть бути вкрай цікавими для проектувальників електронно-променевого зварювального обладнання.

### Висновки

У статті наведено аналітичні залежності, які дозволяють проводити попередню наближену оцінку значення тиску у розрядній камері електронної гармати ВТР для технологічного процесу електронно-променевого зварювання за умови відомої прискорювальної напруги, термодинамічних властивостей зварюваних металів та необхідної глибини зварювального з'єднання. Аналітичне співвідношення (14) відповідає узагальненому вигляду функції (10) та дозволяє проводити безпосередні розрахунки, а співвідношення (18) неможливо записати у вигляді функції (10), тому залежність  $p_r(U_{пр}, h_{шв})$  можна отримати лише як чисельний розв'язок рівняння (18). Проте несумнівна перевага співвідношення (18) полягає в тому, що в ньому врахована залежність мінімального радіуса електронного пучка від його струму та прискорювальної напруги  $r_{\min}(I_{пр}, U_{пр})$ , задана рівнянням (16). Тестові розрахунки, проведені для виробів із титану з використанням співвідношення (18), дозволили правильно оцінити технологічні можливості електронних гармат ВТР та необхідне значення тиску у розрядній камері гармати. Стаття може бути цікавою для спеціалістів в області технології електронно-променевого зварювання та для проектувальників зварювального електронно-променевого обладнання.

### Список використаної літератури

1. Электронно-лучевая сварка/ под общей редакцией Б.Е. Патона Киев: Наукова думка, 1987. 256 с.
2. Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология. Москва: Энергия, 1980. 528 с.
3. Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. Москва: Машиностроение, 1978. 239 с.
4. Завьялов М.А., Крейнделъ Ю.Е., Новиков А.А., Шантурин Л.П. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. Москва: Атомиздат, 1989. 256 с.
5. Krasik Y.E., Gleizer J.Z., Krokhmal A., Chirko K. et al. High-current electron sources based on gaseous discharges. *Vacuum*. 2003. Vol. 77. no 4. P. 391–398.
6. Gruzdev V.A., Zalesski V.G., Antonovich D.A., Golubev V.P. Universal plasma electron source. *Vacuum*. 2003. Vol. 77. no 4. P. 399–406.
7. Коваленко В.С. Лазерная технология: учебник. Киев: Вища школа, 1989. 280.
8. Новиков А.А. Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 96 с.
9. Denbnovetskiy S., Melnyk V., Melnyk I., Tugai B., Tuhai S., Wojcik W., Lawicki T., Assambay A., Luganskaya S. Principles of operation of high voltage glow discharge electron guns and particularities of its technological application. *Proceedings of SPIE. The International Society of Optical Engineering*. 2017. P. 10445–10455.

10. Melnyk I., Tyhai S., Pochynok A. Universal complex model for estimation the beam current density of high voltage glow discharge electron guns. *Lecture Notes in Networks and Systems: manual book* / Edited by Ilchenko M. Yu. Springer, 2021. 152. P. 319–341.
11. Исаченко В.П, Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопроводность. Москва: Энергоатомиздат, 1981. 417 с.
12. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы: учеб. пособие для вузов. Москва: Наука, 1989. 432 с.
13. Березанский Ю.М., Ус Г.Ф., Шефтель З.Г. Функциональный анализ: курс лекций. Киев: Высшая школа, 1990. 600 с.
14. Молоковский С.И., Сушков Д.И. Интенсивные электронные и ионные пучки. Москва: Энергоатомиздат, 1991. 304 с.
15. Силадьи М. Электронная и ионная оптика. Москва: Мир, 1990. 640 с.
16. Мельник И.В. Аппроксимация вольт-амперных характеристик технологических источников электронов высоковольтного тлеющего разряда с использованием средств системы MatLab. *Вестник Херсонского национального технического университета*. 2009. Вып. 2 (35). С. 299–305.
17. Мельник І.В., Починок А.В. Дослідження класу алгебраїчних функцій для інтерполяції межових траєкторій короткофокусних електронних пучків. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2020. №3. С. 23–39.
18. Мельник І.В. Система науково-технічних розрахунків MatLab та її використання для розв'язання задач із електроніки: навчальний посібник у 2-х томах. Т. 2. Основи програмування та розв'язання прикладних задач. Київ: Університет «Україна», 2009. 327 с.
19. Hablani M.H. A correlation of welding variables. *Proceedings of IV Symposium of Electron Beam Technologies*. Bosotn, 1962. P. 262–268.
20. Лопатко В.А., Карташов Г.В., Ткачев Л.Г. и др. Определение глубины проплавления при электронно-лучевой сварке металлов большой толщины. *V Всесоюзная конференция по электронно-лучевой сварке*. Киев: Наукова думка, 1977. С. 16–19.
21. Василев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач: учебное пособие для вузов. Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1988. 552 с.

#### References

1. Paton, B.E. (Ed.). (1987). *Elektronno-luchevaya svarka*. Kiev: Naukova dumka.
2. Shiller, Z., Gayzig, U., & Pantser, Z. (1980). *Elektronno-luchevaya tehnologiya*. Moskva: Energiya.
3. Ryikalin, N.N., Zuev, I.V., & Uglov, A.A. (1978). *Osnovyi elektronno-luchevoy obrabotki materialov*. Moskva: Mashinostroenie.
4. Zavyalov, M.A., Kreyndel, Yu.E., Novikov, A.A., & Shanturin, L.P. (1989). *Plazmennyye protsessyi v tehnologicheskikh elektronnyih pushkah*. Moskva: Atomizdat.
5. Krasik, Y.E., Gleizer, J.Z., Krokhmal, A., Chirko, K. et al (2003). High-current electron sources based on gaseous discharges. *Vacuum*. 77, 4, 391–398.
6. Gruzdev, V.A., Zalesski, V.G., Antonovich, D.A., & Golubev V.P. (2003). Universal plasma electron source. *Vacuum*. 77, 4, 399–406.
7. Kovalenko, V.S. (1989). *Lazeranya tehnologiu*. Kyiv: Vyscha Shkola.
8. Novikov, A.A. (1983). *Istochniki elektronov vysokovol'tnogo tleyushego razryada s anodnoi plazmoi*. Moskva: Energoatomizdat.
9. Denbnovetskiy, S., Melnyk, V., Melnyk, I., Tugai, B., Tyhai, S., Wojcik, W., Lawicki, T., Assambay, A., & Luganskaya, S. (2017). Principles of operation of high voltage glow

- discharge electron guns and particularities of its technological application. *Proceedings of SPIE. The International Society of Optical Engineering*, pp. 10445– 10455.
10. Melnyk, I., Tyhai, S., & Pochynok, A. (2021) Universal complex model for estimation the beam current density of high voltage glow discharge electron guns. *Lecture Notes in Networks and Systems: manual book* / Edited by Ilchenko M. Yu. Springer, **152**. pp. 319–341.
  11. Isachenko, V.P., Osipova, V.A., & Sukomel, A.S. (1981). *Теплопроводность*. Moskva: Energoatomizdat.
  12. Samarskiy, A.A., & Gulin, A.V. (1989). *Численные методы: учеб. пособие для вузов*. Moskva: Nauka.
  13. Berezanskiy, Yu. M., Us, G.F., & Sheftel Z.G. (1990) *Функциональный анализ: курс лекций*. Kyiv: Vyscha Shkola.
  14. Molokovskiy, S.I., & Sushkov, D.I. (1991). *Интенсивные электронные и ионные пучки*. Moskva: Energoatomizdat.
  15. Siladi, M. (1990). *Elektronnaya i ionnaya optika*. Moskva: Mir.
  16. Melnyk, I.V. (2009) *Апроксимация вольт-амперных характеристик технологических источников электронов высоковольтного разряда с использованием средств системы MatLab*. *Vestnik Khersonskogo natsional'nogo etnicheskogo universiteta*. **2(35)**, 299–305.
  17. Melnyk, I.V., & Pochynok, A.V. (2020) *Дослідження класу алгебраїчних функцій для інтерполяції міжових траєкторій електронних пучків*. *Systemni doslidzhennia ta informatsiini technologii*. **3**. 23–39.
  18. Melnyk, I.V. (2009) *Система науково-технічних розрахунків MatLab та її використання для розв'язання задач із електроніки*. Т. 2. *Основи програмування та розв'язання прикладних задач*. Kyiv: Universytet 'Ukraina'.
  19. Hablanian, M.H. (1962) *A correlation of welding variables*. *Proceedings of IV Symposium of Electron Beam Technologies*. Bosotn. pp. 262–268.
  20. Lopatko, V.A., Kartashov, G.V., Tkachov, L.G. at all (1977). *Определение глубины проплавления при электронно-лучевой сварке металлов большой толщины*. *V Vsesoyuznaia konferencia po elektronno-luchevoi svarke*. Kiev: Naukova dumka. pp. 16–19.
  21. Vasilev, F.P. (1988). *Численные методы решения экстремальных задач: Учебное пособие для вузов*. Moskva: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury.

МЕЛЬНИК Ігор Віталійович – д. т. н., професор кафедри електронних пристроїв та систем факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». E-mail: imelnik@phbme.kpi.ua, ORCID: [0000-0003-0220-0615](https://orcid.org/0000-0003-0220-0615).

ТУГАЙ Сергій Борисович, к. т. н., доцент кафедри електронних пристроїв та систем факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». E-mail: sbtuhai@gmail.com, ORCID: [0000-0001-7646-1979](https://orcid.org/0000-0001-7646-1979).

КИРИК Володимир Олександрович, магістр кафедри електронних пристроїв та систем факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», e-mail: vova.kirik1975@gmail.com

КОВАЛЬЧУК Дмитро Вікторович, директор Приватного Акціонерного Товариства НВО «Червона Хвиля», e-mail: dv\_kovalchuk@yahoo.com.