

Фізико-топологічне моделювання електронних пристроїв з індукційним нагріванням емітерів частинок

Шинкаренко Н. В., ORCID [0000-0003-1650-4783](https://orcid.org/0000-0003-1650-4783)

Майкут С. О., ORCID [0000-0002-0913-4190](https://orcid.org/0000-0002-0913-4190)

Цибульський Л. Ю., к.т.н. доц., ORCID [0000-0002-7431-6417](https://orcid.org/0000-0002-7431-6417)

Кузьмичев А. І., д.т.н. проф., ORCID [0000-0003-0087-275X](https://orcid.org/0000-0003-0087-275X)

Кафедра електронних пристроїв та систем, Факультет електроніки

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)

Київ, Україна

Анотація—Розглянуто принципи фізико-топологічного моделювання пристроїв з індукційним нагріванням функціональних елементів до температур термоелектронної емісії та/або випаровування робочої речовини. Це моделювання базується на розв'язанні системи фундаментальних рівнянь з урахуванням конструкції і топології функціональних елементів. Визначені ієрархія пов'язаних елементарних процесів і зв'язок моделей нижнього рівня з моделями вищого рівня. На прикладі індукційного випарника з концентратором магнітного поля наведені деконпозиція загального процесу і ієрархія елементарних процесів. Розглянуто моделі пристроїв з індукційним нагріванням емітерів частинок – термоіонного випарника для осадження покриття з іонізацією пара електронами, які емітує вставка на тиглі, і рентгенівської трубки з індуктивно-розжарюваним термокато́дом. Розраховані електромагнітні поля і струми, теплообмін та емісійні потоки частинок. Оптимізовані конструкції цих пристроїв шляхом аналізу траєкторій термоелектронів.

Ключові слова — фізико-топологічне моделювання; індукційний нагрів; термоелектронна емісія; випаровування металів; концентратор змінного магнітного поля; термоіонний випарник; осадження покриття

I. ВСТУП

В електронних пристроях для генерації та управління потоками заряджених частинок поширене використання вихрового електричного поля (ВЕП). Робочим середовищем може бути конденсована (тобто тверда або рідка) речовина або газ і вакуум.

У першому випадку ВЕП забезпечує індукційне нагрівання конденсованої речовини електронним струмом Фуко; воно широко застосовується в технологіях термообробки матеріалів, паянні, зварюванні та плавки [1]–[4]. За відповідної температури нагрівання можна отримати термоемісію електронів та нейтральних випарених атомів [5]–[9]. У разі газового або парового середовища вільні електрони, отримавши енергію від ВЕП, здатні іонізувати атоми/молекули і переводити середовище в плазмовий стан, тобто підтримувати індукційний електричний розряд (у англійській літературі — *inductive coupled plasma, ICP*) [10], [11]. Відомі пристрої, в яких ВЕП використовується для нагрівання речовини з метою випаровування та іонізації пари для осадження покриттів з одночасним бомбардуванням

покриття власними іонами для покращення якості покриттів [6]–[8].

Слід зазначити відсутність гальванічного контакту індуктора з робочим середовищем при індукційному нагріванні та можливості передачі електромагнітної енергії через герметичні оболонки. Це полегшує конструювання пристроїв з емітерами частинок, що знаходяться під високим потенціалом або ізольовані від індуктора герметичними оболонками. Таку ж властивість мають пристрої з лазерним нагріванням емітера [12], але вони складніші та менш універсальні.

Для аналізу та моделювання фізичних процесів в індукційних пристроях застосовують різні підходи, які досить добре розроблені для пристроїв у температурних режимах до випаровування та термоелектронної емісії речовини при нагріванні [1]–[4]. Пристрої з термоемісією одночасно атомів і електронів представлені переважно експериментальними роботами [5]–[9], що потребує ліквідації зазначеної прогалини. У зв'язку з цим мета даної роботи полягає у розробці методики моделювання електронних пристроїв



з індукційним нагріванням для термоємності нейтральних атомів і електронів та іонізації газу і пари термоелектронами із зони випаровування. Як методологію моделювання вибрані фізико-топологічні моделі (ФТМ).

II. ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ФІЗИКО-ТОПОЛОГІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА АЛГОРИТМИ РОЗРАХУНКІВ

Фізико-топологічне моделювання є ключовим етапом автоматизованого проектування електронних приладів та пристроїв [13], [14]. Після ескізного етапу, первинного розрахунку елементів та їх характеристик виконуються фізико-топологічне моделювання приладу в цілому, розрахунок параметрів процесів у ньому, оптимізація конструкції і аналіз результатів.

ФТМ є одним з типів математичних моделей, які, внаслідок розвитку чисельних методів, набули можливість деталізованого аналізу пов'язаних фізичних процесів у приладах, з урахуванням впливу на них конструктивних і топологічних (тобто геометричних) параметрів [13]–[15]. Використання потужних комп'ютерів та програм фізичного моделювання дозволяє оптимізувати конструкцію будь-якої складності на основі деталізованого ієрархічного аналізу параметрів фізичних процесів у приладі та оточуючому середовищі [4], [5]. Розвиток комп'ютерних технологій надає можливість достовірного та візуалізованого 3D аналізу фізичних процесів у приладах з реальними розмірами, тому вони стали універсальним засобом при конструюванні у всіх галузях фізики, електроніки та хімії.

Вихідні дані можуть бути: табличними, аналітичними або алгоритмічними описами властивостей елементів приладу (наприклад: емітера, катода або аноду). В процесі розрахунків і дослідження вихідні дані редагуються на основі проміжних (ітераційних) результатів — статичних і динамічних характеристик, оцінок точності, параметрів еквівалентних електричних або інших апроксимаційних моделей елементів.

На цьому тлі наочно постали декілька задач фізико-топологічного моделювання:

- 1) Розробка алгоритму комплексного розрахунку, адекватного пов'язаним процесам у пристрої;
- 2) Використання адекватних математичних моделей фізичних процесів;
- 3) Визначення початкових та граничних умов розрахунку пов'язаних фізичних задач.

Побудова алгоритму роботи ФТМ будується на основі ієрархії процесів у пристрої та впливу параметрів його елементів на ці процеси. Створення алгоритму включає вибір:

- номенклатури параметрів пристрою і значень, які визначають його характеристики; здебільшого, це геометричні розміри та фізичні влас-

тивості функціональних елементів, наприклад, діаметр катода та струм емісії, відстань між електродами та тиск робочого газу. Такі параметрами є вихідними у моделі;

- послідовності розрахунків;
- зв'язку між результатом розрахунку первинного процесу і початковими умовами пов'язаного процесу;
- критеріїв оцінки результату розрахунків;
- параметрів зворотного зв'язку розрахунку — вектор зміни початкових умов ФТМ.

Ідентифікація параметрів моделей проводиться за принципом відтворення зовнішніх характеристик, отриманих на етапі проектування та в результаті вимірювання тестових зразків приладів.

Результати отримують з розв'язку системи рівнянь, зазвичай заснованій на рівняннях Максвелла, законах збереження частинок, заряду, енергії і кількості руху, а також включають в себе матеріальні рівняння, крайові та початкові умови. Набір рівнянь визначається кількістю процесів, які впливають на роботу приладу.

Суттєвою відмінністю ФТМ є пов'язаність при розрахунку всіх процесів через початкові умови відповідно до ієрархії процесів. Початкові умови кожного процесу ФТМ визначаються результатом розрахунку характеристик попереднього процесу. Результат кінцевого в ієрархії процесу порівнюють з задовільним відповідно до вибраного критерію і, при необхідності, змінюють початкові умови первинного процесу.

III. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Математична модель — це математичні рівняння, пов'язані аргументами, функціями та параметрами. Якщо вони характеризують фізичні процеси в фізичному середовищі, то такі системи рівнянь називають ФТМ, яку супроводжує рішення рівнянь і аналіз отриманих результатів. Рівняння записуються в частинних похідних, і так як простір і час вважаються безперервними, ФТМ відносяться до класу розподілених математичних моделей. Спосіб розв'язання системи рівнянь може бути аналітичним або чисельним. Тому і моделі поділяють на аналітичні або чисельні.

Аналітичне рішення диференціальних рівнянь можливе лише при суттєвому спрощенні рівнянь і введенні ідеалізованих припущень. Це призводить до того, що реальні аналітичні моделі приладів та пристроїв мають малу точність, але вони дозволяють швидко і легко визначити приблизну область робочих параметрів. Застосування чисельних методів та розробка ефективних алгоритмів розв'язання диференціальних рівнянь дозволяє значно підвищити точність моделювання [16]–[19].

Результати фізико-топологічного моделювання включають в себе: одно-, дво- і тривимірні описання



розподілу електричного потенціалу, об'ємного заряду, розподілу струмів, напруженості електричного та магнітного полів в робочому просторі, концентрацій носіїв заряду і їх фізичні характеристики, траєкторії частинок, температурні поля, тощо.

Наприклад, у вакуумному випарнику металів з концентратором ВЧ магнітного поля (рис. 1) протікають наступні пов'язані процеси [6]:

- проходження електричного струму по індуктору з урахуванням скін-ефекту;
- індукція магнітного поля навколо провідників індуктора;
- індукція електричного струму в зовнішній поверхні концентратора;
- протікання струму по концентратору;
- індукція струму у тиглі та в його навантаженні;
- нагрівання електричним струмом;
- теплове випромінювання з всіх поверхонь;
- емісія електронів з усіх нагрітих поверхонь;

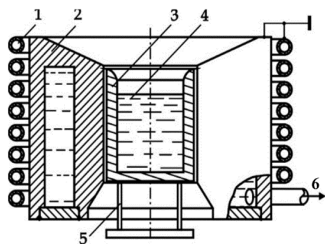


Рис.1 Вакуумний випарник з індукційним живленням [6]: 1 – індуктор; 2 – концентратор; 3 – тигель; 4 – завантаження (розплав); 5 – стійка; 6 – вода охолодження індуктора

ТАБЛИЦЯ 1. СПРОЩЕНА ДЕКОМПОЗИЦІЯ ЗАГАЛЬНОГО ФІЗИЧНОГО ПРОЦЕСУ

Фізичний процес	Результат розрахунку	Параметр, який вибирається
Індукція ВЧ струмами	Електромагнітне поле, поле струмів	число витків індуктора, частота струму, напруга індуктора
Нагрівання тигля і його завантаження	температура поверхні випаровування	Положення тигля в індукторі, діаметр і матеріал тигля
Випаровування з тигля	Направленість і інтенсивність потоку часток	діаметр поверхні випаровування
Емісія електронів	струм термоемісії	потенціал тигля
Іонізація парових часток	ступінь іонізації, струм іонів	частота струму, напруга індуктора

- емісія парових частинок з дзеркала розплаву в тиглі для нанесення покриття на підкладки;
- рух електронів у схрещених електромагнітних полях;
- рух парових частинок з поверхні випаровування;
- виникнення плазмового електричного розряду в потоці пару.

Першим етапом моделювання є декомпозиція загального процесу у випарнику і з'ясування ієрархії елементарних процесів. У табл.1 наведено приклад декомпозиції процесів у спрощеному варіанті.

IV. ВИЗНАЧЕННЯ ПОЧАТКОВИХ ТА ГРАНИЧНИХ УМОВ РОЗРАХУНКУ ПОВ'ЯЗАНИХ ФІЗИЧНИХ ЗАДАЧ

ВЧ пристрої з індукційним нагріванням зазвичай включають до свого складу елементи, які виготовлені з металів, а ізолятором виступає вакуумне середовище, яке оточує металічні елементи. До крайових умов в моделях цих пристроїв відносяться геометричні розміри елементів та їх взаємне розміщення. Для електромагнітних ФТМ початковими умовами є також електричні потенціали на деяких поверхнях (або в точках) або струми через поверхні (або точки). Для моделі теплопровідності, яка визначає температурне поле в компонентах, спочатку задають розподіл джерел тепла та анізотропію теплових властивостей елементів.

Окрім геометричних параметрів, до вихідних розрахункових умов при фізико-топологічному моделюванні відносяться електричні, теплофізичні, гідродинамічні, емісійні, інерційні та інші властивості матеріалів і середовищ. До вихідних розрахункових умов відносяться також електричні потенціали, частота струму джерела живлення, напруженості електричного та магнітного полів, температура елементів пристрою, тощо. Також для рішення задач за ФТМ необхідно при розв'язанні теплофізичної задачі задавати у якості граничних умов теплові потоки з поверхонь на рахунок випромінювання і випаровування.

Приклади початкових та граничних умов для дослідження процесів у пристроях з індукційним нагріванням емітерів частинок наведено в табл. 2.

При дослідженні процесів у пристроях з індукційним нагріванням використовують всі три типи граничних умов [20]:

$$1) \text{ Граничні умови першого роду: } u(x, y)|_{\Gamma} = u_0$$

— задається значення функції $u(x, y)$ на границі.

$$2) \text{ Граничні умови другого роду: } \frac{\partial u}{\partial n}|_{\Gamma} = u_0$$

— задається градієнт функції $u(x, y)$ на границі.



ТАБЛИЦЯ 2. ГРАНИЧНІ ТА ПОЧАТКОВІ УМОВИ

Вид фізико-математичної задачі	Початкові умови (вихідні розрахункові)	Граничні умови
Електромагнітна	потенціали на поверхні, струми через них	потенціали на границі дослідження
Теплопровідності	розподіл джерел струму, анізотропія властивості речовин	температура поверхонь, теплові потоки через поверхні
Гідродинамічна	розподіл температури на оточуючих поверхнях, розподіл пандеромоторних сил	потік тепла з відкритої поверхні, тиск молекул випару
Емісійна	розподіл температури на поверхні, емісійні властивості речовин	задача не обмежена границями
Трекінг заряджених часток	розподіл напруженості магнітного та електричного полів	час розрахунку або енергія часток
Виникнення електричного розряду	енергія електронів, щільність парового потоку, щільність потоку електронів, енергія іонізація парових часток	задача не обмежена границями

3) Граничні умови третього роду:

$$\left(\alpha u + \beta \frac{\partial u}{\partial \bar{n}} \right) \Big|_{\Gamma} = u_0.$$

У всіх випадках границею може бути границя області дослідження поля, або границя поверхні елемента пристрою.

Для коректної постановки задачі про знаходження температури в будь-якій точці тіла в кожен момент часу слід до рівняння теплопровідності додати початкові та граничні умови, які будуть визначати початковий розподіл температури всередині тіла і тепловий режим на границях. Початкові умови матимуть вигляд:

$$u|_{t=0} = \varphi(x, y, z). \quad (1)$$

Граничні теплофізичні умови можуть задаватися декількома різними способами, наприклад:

1) У кожній точці поверхні $M(x, y, z, t) \in S$ задається температура

$$u|_S = \mu_1(M, t). \quad (2)$$

2) На поверхні тіла задається тепловий потік

$$q = -k \frac{\partial u}{\partial \bar{n}}, \text{ який визначає граничні умови виду}$$

$$\frac{\partial u}{\partial \bar{n}} \Big|_S = \mu_2(M, t). \quad (3)$$

У загальному випадку задача про поширення тепла в ізотропному тілі є коректною, коли необхідно знайти рішення рівняння теплопровідності, що задовольнить початковій умові (1) і граничній умові (2) або (3).

V. ПРИКЛАДНІ ПАКЕТИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ФІЗИКО-ТОПОЛОГІЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Серед понад 500 програмних продуктів, які пропонують вирішувати диференціальні рівняння у приватних похідних чисельним методом скінчених елементів, найбільш універсальними та поширеними є американський ANSYS та європейський COMSOL Multiphysics [21], [22]. Вони орієнтовані в основному на організації, які фінансово спроможні обслуговувати пакети. Однак розроблені методи моделювання, і в тому числі розглянутий метод [23], дозволяють створювати власні програмні продукти, орієнтовані на рішення спеціалізованих задач методом скінчених елементів у програмах з відкритим кодом.

IV. СТРУКТУРА ТА СКЛАД ФІЗИКО-ТОПОЛОГІЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРИСТРОЇВ З ІНДУКЦІЙНИМ НАГРІВАННЯМ ЕМІТЕРІВ ЧАСТИНОК

A. Загальні ознаки структури та складу ФТМ пристроїв з індукційним нагріванням емітерів частинок

Робота пристроїв з індукційним нагріванням емітерів частинок пов'язана з певною кількістю фізичних процесів зміни стану речовини елементів пристрою під впливом електромагнітного поля. Для аналізу пов'язаних фізичних процесів використовують комбіновані ФТМ. Електромагнітне поле описується розподілом напруженості магнітного та електричного поля в оточенні компонентів. Це наочно видно на ієрархічній структурі ФТМ трансмісійної рентгеновської трубки (рис. 2). Результати розрахунку комбінованої ФТМ електромагнітного поля та поля струмів використовуються як початкові умови для розрахунку залежних від них процесів.

Для визначення теплових полів використовують індукційно-теплові моделі, пов'язані з чисельними рішеннями диференціальних рівнянь Максвелла для електромагнітного поля та рівняння Фур'є для теплового поля [24]. В результаті визначають температурне поле в обраному просторі в певний момент процесу.

Особливістю визначення температурного поля є необхідність вирішення двох комплексних пов'язаних задач різного типу:

- 1) Пряма задача — визначення електромагнітного поля, індукованого ВЧ струмами індуктора і концентратора, та струмів в елементах пристрою, індукованих електромагнітним полем.
- 2) Зворотна задача — визначення струмів в емітері частинок, необхідних для нагрівання його до заданої температури.



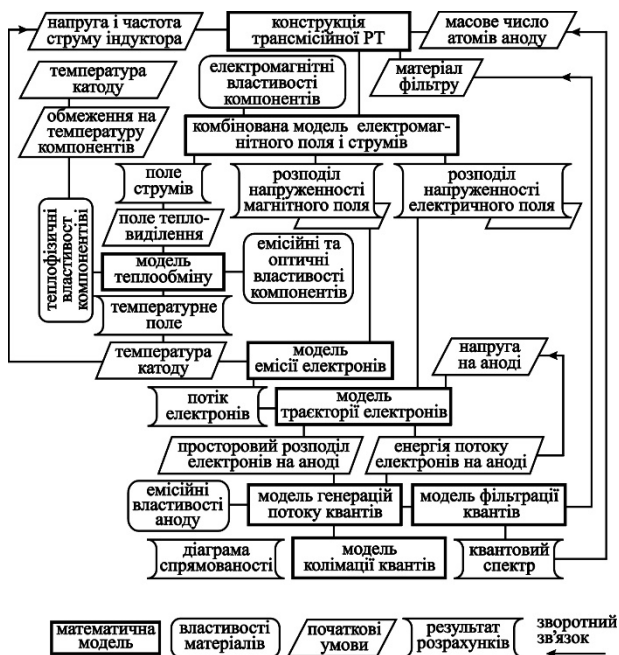


Рис. 2 ФТМ трансмісійної рентгенівської трубки

Це передбачає алгоритм вирішення задачі розрахунком:

- електромагнітного поля в просторі емітера частинок і розподілу струмів в елементах при обраній частоті та напрузі на індукторі;
- розподілу джерел тепла в емітері частинок, індукторі та концентраторі;
- температурного поля в усіх елементах.
- температури поверхні емітерів частинок.

Якщо обчислена температура не відповідає контрольованому значенню, розрахунок повторюється для скорегованих напруги або частоти струму індуктора, або конструкції пристрою.

В. Фізико-математична комбінована модель електромагнітного поля і поля струмів

Комбінована модель електромагнітного поля та поля струмів заснована на чисельному розрахунку рівнянь Максвелла [24], [25] для електромагнітного поля в компонентах пристрою і в їх вакуумному оточенні. З урахуванням осової симетрії конструкцій доцільно проводити моделювання та дослідження в циліндричних координатах.

Постановка задачі полягає у визначенні характеристик елементів моделі: властивості середовищ; джерела поля; граничних умов. Аналіз спрощується, якщо величини, які змінюються гармонійно, представити у вигляді комплексних чисел: $z = z_0 e^{i(\omega t + \varphi z)}$, де дійсна й уявна частини мають зсув по фазі на 90^0 , так що їх лінійна комбінація представляє довільний фазовий кут. З комплексної величини отримуємо миттєві, діючі та амплітудні значення:

- миттєве значення при даній фазі $\varphi_0 = -\omega t_0$
- $z_{\varphi_0} = \text{Re} [z_0 e^{i(\varphi z - \varphi_0)}] = z_0 \cos(\varphi z - \varphi_0);$
- максимальне значення z_0 ;
- діюче значення $z_R = \frac{\sqrt{2}}{2} z_0.$

Струм в індукторі та концентраторі розглядається як сума стороннього струму, порушеного зовнішнім електричним ланцюгом, і вихрового струму, індукovanого змінним магнітним полем:

$$\mathbf{j} = \mathbf{j}_{\text{стор}} + \mathbf{j}_{\text{вихр}} \tag{4}$$

Опис електромагнітного поля представляється диференціальним рівнянням в часткових похідних щодо комплексної амплітуди векторного магнітного потенціалу \mathbf{A} ($\mathbf{B} = \text{rot}(\mathbf{A})$, \mathbf{B} — вектор магнітної індукції) [27]. Вважається, що вектор магнітної індукції \mathbf{B} лежить в площині моделі ($z0r$), а вектор щільності електричного струму \mathbf{j} і векторний магнітний потенціал \mathbf{A} — ортогональні до нього.

Тільки компоненти змінних полів — j_θ і A_θ відмінні від нуля. Будемо використовувати позначення j і A , тоді з урахуванням:

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(rA)}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A}{\partial z} \right); B_r = -\frac{\partial A}{\partial z}.$$

для симетричної відносно осі моделі маємо:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r\mu_z} \frac{\partial(rA)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - i\omega\gamma A = -j_{\text{стор}}, \tag{5}$$

де електропровідність γ і компоненти тензора магнітної проникності μ_z і μ_r постійні в межах області, що відноситься до кожного елемента моделі. Складова струму $j_{\text{стор}}$ приймається обернено пропорційною радіусу ($\sim 1/r$).

До частот зміни поля порядку мегагерц щільність струму зміщення не впливає на електромагнітні процеси. Тому у законі Ампера $\text{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ не враховуємо складову $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$, тобто щільністю струму зміщення нехтуємо. Тобто маємо: $\text{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j}$.

Магнітні властивості матеріалів розглядаємо, як лінійні — магнітне поле змінюються в часі синусоїдально. Електропровідність металів не залежить від напрямку та напруженості електричного поля, вони пов'язані законом Ома: $j = \sigma E$. Це дозволяє враховувати інтегральні значення магнітної проникності та електропровідності елементів.



С. Граничні умови моделі

Відсутність нормальної складової індукції на осі симетрії і на границях області розрахунку задається через умову Діріхле, яка задає певне значення векторного магнітного потенціалу A_0 [25]. Ця умова визначає нормальну компоненту вектора магнітної індукції. Для осесиметричної задачі умова Діріхле задається у функції координат: $rA_0 = a + b zr + cr^2/2$, де a , b і c — постійні, які визначаються для кожної поверхні. Тоді зовнішнє однорідне поле задається ненульовою нормальною компонентою магнітної індукції на гладкій ділянці границі елементів. При розрахунках приймається напрям вектора позитивної нормалі правим. На осях симетрії моделі пристроїв задається однорідна гранична умова Діріхле, тобто значення нормальної складової індукції дорівнює нулю ($B_n = 0$).

Якщо α — кут нахилу поверхні до осі z , то нормальна компонента індукції $B_x = c \sin \alpha + b \cos \alpha$. Значення константи α на різних поверхнях підбирається узгодженням умов Діріхле, при дотриманні умови безперервності функції A_0 на границях середовищ (дотичних поверхонь). На площинах магнітної антисиметрії, якщо явно не вказані інші види граничних умов, задаються граничні умови Неймана. До площин магнітної антисиметрії відносяться зовнішні та внутрішні границі досліджуваної області. Однорідна умова Неймана: на зовнішніх границях $H_t = \sigma$; на внутрішніх границях $H_t^+ - H_t^- = \sigma$, де H_t — тангенціальна складова напруженості магнітного поля. Індекси "+" і "-" позначають значення ліворуч і праворуч від поверхні, а σ — лінійна щільність поверхневого струму, яка визначається під час розрахунків.

Д. Електрофізичні властивості речовини елементів пристрою

В розрахунках необхідно враховувати значення електрофізичних та теплофізичних параметрів елементів пристрою при робочій температурі. У табл. 3 для прикладу наведено електропровідність деяких металів при температурі емісії частинок. Дані про властивості речовин отримані з експериментальних даних лінійною інтерполяцією найближчих вимірних значень в діапазоні температур.

Таблиця 3. Фізичні властивості металів при температурі випаровування

Метал	Температура випаровування,		Питомий електроопір,	
	К		$\times 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$	
Алюміній	1480	1490	32,822	31,6913
Золото	1605	1670	34,83	34,444
Мідь	1545	1530	22,86	20,45
Джерела	[24]	[26]	[27]	[28]

* Дані лівих стовпчиків використовувалися в розрахунках

У науковій літературі наведені різні значення для температури емісії частинок металів [26], [28], а для деяких речовин дані відсутні. Майже для всіх речовин є формули апроксимації [27], але для обмеженого діапазону температур.

Індуктори та концентратори виготовляються з немагнітного матеріалу з найбільшою електропровідністю — міді (зазвичай з мідних трубок для охолодження водою). Робоча температура індукторів з охолодженням зазвичай не перевищує 320 К.

V. РОЗРАХУНКОВІ ВЕЛИЧИНИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ

У дослідженні пристроїв з індукційним нагріванням емітерів частинок визначаються:

- 1) Величина та розподіл струмів у емітері частинок.
- 2) Розподіл напруженості магнітного і електричного полів в околиці елементів пристрою.
- 3) Омичні втрати в якості джерел тепла при визначенні температурного поля в емітері частинок (комбінована термоелектрична задача);
- 4) Власна та взаємна індуктивність індуктора та концентратора, й імпеданс провідників (повний комплексний опір змінному струму) для порівняння к.к.д. різних режимів експлуатації і конструкцій.

На рис. 3 наведено приклади розрахунку індукції магнітного поля в околиці елементів випарника з іонізацією пари термоелектронами [8] (рис. 3а) та рентгенівської трубки з індукційним нагріванням термодатою (рис. 3б).

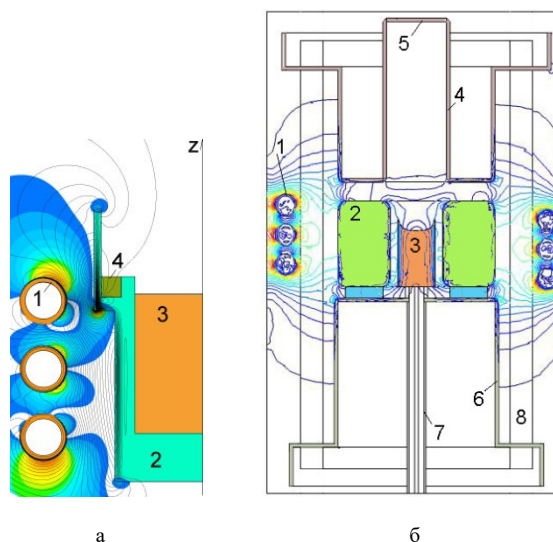


Рис.3. Силові лінії та тонова карта напруженості магнітного поля в околиці елементів а) випарника: 1 – індуктор; 2 – тигель; 3 – розплав речовини випару; 4 – термодатод; б) рентгенівської трубки: 1 – індуктор; 2 – концентратор; 3 – катод; 4 – анод; 5 – та вихідне вікно на аноді; 6 – держатель і вивід катоду; 7 – штенгель; 8 – керамічна оболонка



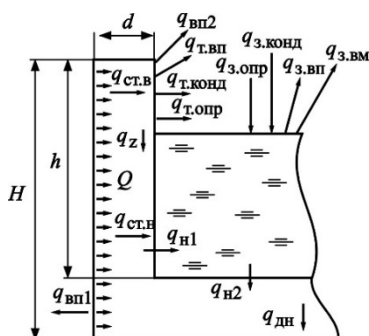


Рис. 4 Теплові потоки, які визначають вихідні та граничні умови при рішенні моделі теплопередачі в тиглі з розплавом

А. Фізико-математична модель теплообміну у емітері частинок

Стабільна робоча температура поверхні емітера частинок вимагає стаціонарного режиму роботи пристрою. Це дозволяє досліджувати моделі теплообміну рішенням стаціонарного рівняння теплопровідності, а граничними умовами виступає радіаційний теплообмін на всіх поверхнях і потік тепла з поверхні емісії.

Фізико-математична модель температурного поля визначається чисельним розрахунком нелінійного рівняння теплопровідності в циліндричних координатах[29]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(T) r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q(T) - c(T) \rho \frac{\partial T}{\partial t}$$

де T – температура; t – час; $\lambda(T)$ – ізотропна теплопровідність; q – питома потужність тепловиділення; $c(T)$ – теплоємність; ρ – щільність речовини.

$$\text{Для стаціонарної задачі } c(T) \rho \frac{\partial T}{\partial t} = 0.$$

Тоді рівняння теплопровідності набуває вигляду:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(T) r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q(T) \quad (6)$$

На рис. 4, для прикладу, наведені процеси теплообміну у тиглі з розплавом металу, які впливають на встановлення температурного поля [16].

Температурне поле стінки тигля (висотою h) над розплавом встановлюється в результаті теплообміну на відкритих (оточених вакуумом) поверхнях і на границі між тиглем і розплавом. Джерелом теплоти виступає нагрівання ВЧ струмами Фуко (джоулеве тепло) зовнішньої циліндричної поверхні металевого тигля або циліндричної поверхні розплаву в діелектричному тиглі. У вакуумі відсутній конвективний теплообмін, і він не враховується.

В. Визначення граничних умов моделі

Теплообмін на поверхнях металевого емітера здійснюється при теплопередачі (рис. 3):

- з зовнішньої стінки тигля до внутрішньої $q_{ст}$;
- від стінки тигля до завантаження (розплавленого металу) $q_{з1}$;
- від завантаження на дно тигля $q_{з2}$;
- від внутрішньої поверхні дна до зовнішньої для розплаву $q_{дн}$;
- випромінюванням з зовнішньої $q_{вп1}$ і внутрішньої вільної стінок $q_{вп2}$, і дна тигля $q_{вп3}$;
- випромінюванням з вільної поверхні завантаження (дзеркала розплаву) $q_{з.вп}$;
- випаровуванням з дзеркала розплаву $q_{з.пар}$;
- випаровуванням з внутрішньої стінки тигля $q_{т.пар}$;
- конденсації молекул на стінці тигля $q_{т.конт}$;
- конденсації молекул на поверхні завантаження $q_{з.конт}$;
- опромінення стінки тигля дзеркалом розплаву і стінкою тигля $q_{т.опр}$;
- опромінення дзеркала розплаву стінкою тигля $q_{з.опр}$;
- потік q_z в стінці уздовж осі Oz .

Теплові втрати, пов'язані з емісією молекул, спостерігаються тільки на поверхні випаровування і представлені виразом $q_{исп} = W \cdot L$, де W – швидкість випаровування, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$; L – прихована теплота випаровування, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

Граничні умови, які визначають тепловий потік (граничні умова другого роду), залежать від температури поверхонь T :

$$q_{вип} = k_{сб} \cdot \alpha (T^4 - T_0^4), \quad (7)$$

де $k_{сб} = 5,6704 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{град}^4 \cdot \text{м}^2}$ $k_{сб}$ – константа Стефана-Больцмана, α – коефіцієнт поглинання поверхні, T_0 – температура поверхонь навколишнього обладнання.

Поверхню емісії частинок можна прирівнювати за ступенем чорноти до полірованої поверхні.

С. Теплофізичні властивості елементів

Теплофізичні властивості тугоплавких металів при робочій температурі наведені в табл. 5.



ТАБЛИЦЯ 5. ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТИГЛІВ ПРИ 1545 К (ТЕМПЕРАТУРІ ВИПАРОВУВАННЯ МІДІ)

Фізичні властивості	Молибден	
Щільність, кг/м ³	9973,5	
Теплоємність, Дж/(кг · К)	331,925	331,77
Теплопровідність, Вт/(м · К)	96,602	
Джерела	[30]	[31]

ТАБЛИЦЯ 6. ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛІВ ПРИ ТЕМПЕРАТУРІ ВИПАРОВУВАННЯ [30]

Метал	щільність	теплоємність	температуропровідність	теплопровідність
	г/см ³	Дж/(кг · К)	м ² /с	Вт/(м · К)
Алюміній	2,199 [27]	1176,73 [31]	43,36	117,6*
Мідь	7,965	513,9	22,625	181,48
Нікель	7,8*	735	12,1*	69,5*

* — дані отримані лінійною екстраполяцією вимірних значень температурного діапазону. Інші — отримані лінійною інтерполяцією даних.

ТАБЛИЦЯ 7. КОЕФІЦІЄНТ ОПТИЧНОГО ПОГЛИНАННЯ

МЕТАЛ	T, К	α	ДЖЕРЕЛО	РОЗРАХУНОК
Молибден полірований	811-1647	0,1-0,18	[32]	0,17* (1545 К)
Молибден полірований	1400-1600	0,142-0,166	[28]	0,16 (1545 К)
Мідь розплавлена	1348-1547	0,16-0,13	[33]	0,13 (1545 К)
Алюміній розплавлений	477-866	0,038-0,06	[34]	0,13 (1480 К)

* — дані наведені для порівняння і визначення ймовірної похибки.

У табл. 6 наведені теплофізичні властивості металів при температурі випаровування.

В табл. 7 наведені значення коефіцієнтів оптичного поглинання елементів випарника. Для алюмінію значення отримано екстраполяцією даних, для інших речовин — інтерполяцією.

На рис. 5 приведено приклад розрахунку температурного поля в деталях рентгенівської трубки у вигляді температурної карти.

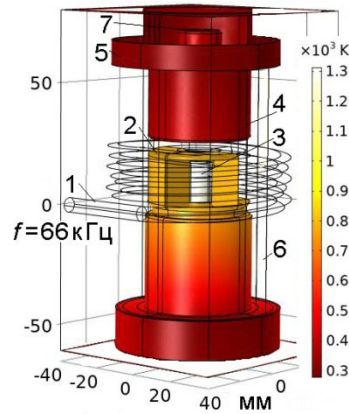


Рис.5. Розподіл температури в елементах рентгенівської трубки з індукційним нагріванням катоду: 1 – індуктор; 2 – концентратор; 3 – катод; 4 – анод; 5 – вивід аноду; 6 – керамічна оболонка трубчастої форми (не показана)

VI. ФІЗИКО МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

Розподіл електричного потенціалу в пристрої з індукційним живленням визначається з рівняння відносно електричного потенціалу ϕ :

$$\nabla \cdot \left(\left[\varepsilon - \frac{ig}{\omega} \right] \nabla \phi \right) = 0 \quad (8)$$

де g – електропровідність, ε – діелектрична проникність. Рівняння (8) отримано спільним рішенням рівняння Пуассона для електростатичного поля ($\nabla \cdot \varepsilon \vec{E} = \rho$) і рівняння розтікання струмів в електропровідному середовищі ($\nabla \cdot \vec{j} = -i\omega\rho$) при врахуванні закону Ома ($\vec{j} = g\vec{E}$) [20].

У випадку осесиметричних досліджень використовують двовимірні моделі на основі рівняння (8):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\varepsilon_r r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial}{\partial z} \right) = -\rho \quad (9)$$

де r і z – радіальна і осьова координати моделі пристрою.

А. Граничні умови

Для дослідження електричного поля приладу за моделлю задаються граничні умови у вигляді потенціалів струмопровідних поверхонь (умова Діріхле):

- на границях розрахункової області потенціали приймається рівними нулю ($\phi_0 = 0$), внаслідок заземлення оточуючого обладнання;
- потенціал на верхньому витку індуктора и на концентраторі визначається з рішення задачі моделі теплообміну для заданої температури завантаження; або моделі траєкторії електронів;
- потенціал на нижньому витку індуктора приймається рівним нулю $\phi_i = 0$.



Структура поля не змінюється при зміні фази або частоти струму індуктора і визначається виключно конструкцією елементів приладів. На структуру поля впливають тільки електричні заряди.

Просторова щільність заряду враховується правою частиною рівняння Пуассона, тому для моделювання електричного поля розробляють алгоритм обчислення щільності заряду в вузлах розрахункової сітки з трикутних елементів, якщо на компонентах приладу можуть накопичуватись заряди: діелектричні ізолятори в конструкціях.

В. Фізико-математична модель емісії електронів

Кількість термоелектронів залежить від температури та роботи виходу матеріалу й описується рівнянням Річардсона-Дешмана [26]:

$$j_T = A_0 (1 - \bar{R}) T^2 e^{-\frac{\phi_T}{kT}} \quad (10)$$

де $A_0 = \frac{4\pi e m k^2}{h^3} = 120,14 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2 \cdot \text{К}$ – універсальна емісійна стала, ϕ_T – термоелектронна робота виходу, \bar{R} – усереднений коефіцієнт відбиття електронів від потенційного бар'єру поверхні емітера, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ еВ} \cdot \text{К}^{-1}$ – постійна Больцмана, e і m – заряд та маса електрона, h – стала Планка.

В табл.8 наведені термоелектронні властивості металів, з яких виготовляються компоненти приладів з індукційним живленням. За емпіричними даними визначалися значення струмів емісії для вихідних даних моделі.

Значення емісії в табл. 8 отримані при $\bar{R} = 0,5555$ для збігу з емпіричними значеннями в контрольованих точках.

С. Розрахунок траєкторії електронів в електромагнітному полі у проміжку між електродами

Для з'ясування величини енергії електронів і ймовірності їх зіткнення з атомами парового потоку (у випадку моделювання випарника) необхідно аналізувати характер руху електронів в просторі парового потоку. За величиною та структурою електричного поля встановлювалися траєкторії електронів при різних початкових умовах з наступними обмеженнями:

- релятивістські ефекти через малі напруги прискорення не враховуються;
- електричне поле не змінюється в часі (стаціонарний режим). Використовується розподіл потенціалу при амплітудному значенні поля;
- всередині кінцевого елемента розрахункової сітки електричне поле змінюється лінійно;

ТАБЛИЦЯ 8. РОБОТА ВИХОДУ І ПИТОМИЙ СТРУМ ТЕРМОЕМИСІЇ МЕТАЛІВ ДЛЯ КАТОДА

метал	ϕ_T , еВ	j_T , А/м ² при T випаровування *	Площа емітера, мм ²	i_T , мкА розрахунок
W	4,54	$5,6 \times 10^{-4}$ (1480 К)	97,4	0,0545
Mo	4,2	$9,0 \times 10^{-3}$ (1545 К)	97,4	0,877
Al	4,25	$4,14 \times 10^{-3}$ (1480 К)	943	3,90
Cu	4,40	$5,70 \times 10^{-3}$ (1545 К)	943	5,38

* — дані отримані інтерполяцією з графіків [31]

- вплив просторового заряду емітованих електронів в рівнянні руху не враховується у випадку режиму з малим струмом, оскільки заряд електронів створює поле нехтовно мале в порівнянні з ВЕП індуктора;
- у випадку моделювання вакуумного приладу не має зіткнень електронів з атомами пари та іонізації між електродами;
- для всіх емітованих електронів прийнята початкова кінетична енергія, яка дорівнює середній енергії електронів за розподілом Максвелла при температурі випаровування.

У відповідності зі зробленими припущеннями траєкторія електрона в тривимірному електростатичному полі описується системою диференціальних рівнянь Ньютона:

$$\begin{cases} \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{q}{m} E_x(x, y, z); \\ \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{q}{m} E_y(x, y, z); \\ \frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{q}{m} E_z(x, y, z). \end{cases} \quad (11)$$

Рівняння, що визначає довжину $l(t)$ траєкторії в момент часу t :

$$\frac{dl}{dt} = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}$$

Інтегрування системи рівнянь (11) проводиться числовим методом Мерсона-Рунге-Кутта: автоматичний вибір кроку, чисельне інтегрування припиняється безпосередньо перед границею кінцевого елемента; в останній точці всередині елемента проводиться екстраполяція траєкторії за допомогою перших трьох членів розкладання Тейлора відносно часу. Отримане рівняння вирішується за допомогою формули Тартагілья-Кордано та враховує зменшення порядку рівняння в однорідних або нульових полях.



Для знаходження траєкторії електрона в неоднорідному електричному полі необхідно задати його масу m , заряд q , початкову швидкість \bar{v} і напрямок вильоту з поверхні. Середня енергія емісії термоелектронів з розподілом Максвелла [26] при робочій температурі катоду T :

$$\frac{1}{2} m \bar{v}^2 = 2kT.$$

При температурі 1480 К (алюміній) середня швидкість таких електронів:

$$\bar{v} = 2\sqrt{\frac{kT}{m}};$$

$$\bar{v} = 2\sqrt{\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1480}{9,11 \cdot 10^{-31}}} \approx 2,995 \cdot 10^5 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right)$$

За такої швидкості електрон в вакуумі пролетить відстань 5 см (покине простір приладу) за час

$$t = \frac{s}{\bar{v}}; \quad t \approx 1,67 \cdot 10^{-7} \text{ с.}$$

Півперіод синусоїди електромагнітного поля при частоті коливань 66 кГц становить:

$$\tau = \frac{1}{2f}; \quad \tau = \frac{1}{132 \cdot 10^3} \approx 7,58 \text{ (мкс)}$$

Протягом позитивного півперіоду електричного поля на електрон діє сила, яка прискорює його. В негативний півперіод електрони обмежені в області об'ємного заряду у поверхні емітера.

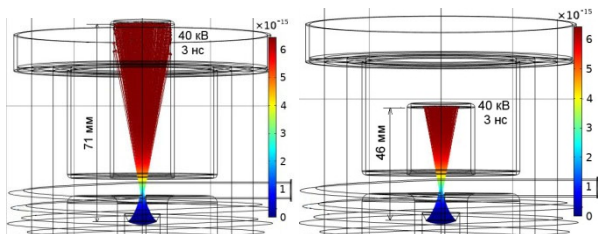


Рис.6 Форма пучків електронів при різній відстані від катода до мішені на аноді рентгенівської трубки

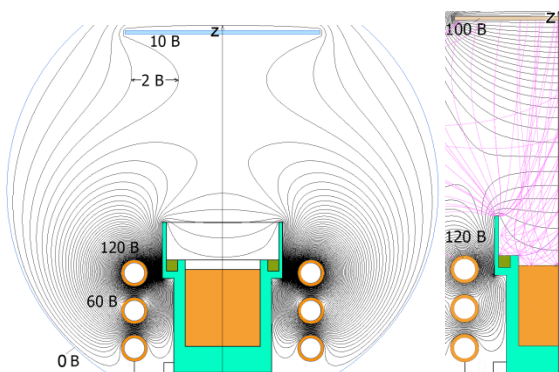


Рис. 7 Лінії напруженості електричного поля в околиці випарника (а) та траєкторії емітованих електронів (б)

В результаті визначається довжина траєкторії, загальний час польоту, швидкість електрона в розрахунковій точці траєкторії

На рис.6 наведено приклади розрахунку траєкторії електронів при різній відстані від емітера електронів (катода) до мішені та вихідного вікна на аноді рентгенівської трубки, конструкція якої показана на рис. 3 Як бачимо, відстань до мішені впливає на розмір плями електронного бомбардування на мішені.

На рис.7 показані еквіпотенціальні карти розподілу електричного поля в околиці індукційного випарника з термокатодом (див. рис.3) [8].

ВИСНОВКИ

- 1) Виконаний огляд загальних принципів фізико-топологічного моделювання та побудови алгоритмів розрахунків електронних пристроїв та приладів з індукційним нагріванням функціональних елементів до температур, за яких має місце термоелектронна емісія та/або випаровування робочої речовини в атомізованому стані. Показано, що даний напрямок математичного моделювання, який базується на використанні фундаментальних законів фізики дає можливість детального аналізу фізичних процесів у пристроях з урахуванням впливу на них фізичних властивостей функціональних елементів та їх конструктивних і топологічних параметрів.
- 2) Показано, що загальна фізико-топологічна модель електронних пристроїв з індукційним нагріванням повинна представляти ієрархію пов'язаних моделей для окремих фізичних процесів, які забезпечують функціонування пристроїв (електромагнітних, теплофізичних, емісійних з виходом електронів, атомних частинок і фотонів з тіл функціональних елементів і зміну агрегатного становища робочої речовини). Відповідно, побудова загальної моделі потребує декомпозиції загального фізичного процесу на окремі пов'язані фізичні процеси. Подібна декомпозиція була виконана до випарника металів з індуктором для нагріву тигля у вигляді концентратора змінного магнітного поля як понижуючого ВЧ-трансформатора, це дозволило розрахувати параметри і характеристики цього пристрою.
- 3) Розроблено фізико-топологічних моделей двох пристроїв з індукційним нагріванням емітерів частинок. Перший пристрій є термоіонним випарником металів з іонізацією пари електронами, що емітує термокатод зі сплаву з малою роботою виходу електронів, катод виконаний у вигляді вставки на верхньому торці тигля; пристрій призначений для нанесення металевого покриття з іонним бомбардуванням поверхні підкладки. Другий прилад є вакуумною рентгенівською трубкою з термокатодом, що розжарюється індуктором. Аналіз результатів



розрахунків електромагнітного поля та розподілу струмів, теплообміну в емітерах пари та електронів та їх емісійних потоків, а також траєкторій електронів дозволили оптимізувати топологію та конструкцію зазначених пристроїв.

- 4) Таким чином, можна зробити висновок, що розроблений і представлений в даній статті

підхід до фізико-топологічного 3D моделювання та розрахунків електронних пристроїв та приладів з індукційним нагріванням функціональних елементів успішно апробований і може бути рекомендований для використання при майбутніх розробках різних електронних пристроїв з індукційним нагрівачем.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1]. S. Grundas, *Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials*. InTech, 2011, ISBN: 978-953-307-522-8.
- [2]. O. Lucia, P. Maussion, E. Dede, and J. Burdio, "Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges," *IEEE Trans. Ind. Electron.* vol. 60, no. 5, pp. 2509–2520, 2013, DOI: [10.1109/TIE.2013.2281162](https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2281162).
- [3]. "Vacuum Induction Melting," in *ASM Handbook*, 2008, pp. 1–8.
- [4]. B. N. P. Vishnuram, G. Ramachandiran, T. Sudhakar Babu, "Induction Heating in Domestic Cooking and Industrial Melting," *Energies*. vol. 14, no. 20, pp. 1–34, 2021, DOI: [10.3390/en14206634](https://doi.org/10.3390/en14206634).
- [5]. D. R. Gibson, D. Yates, J. O'Driscoll, and J. Allen, "A Versatile Plasma Source for Thin Film Processing Applications", 43rd Annual Conference Proceedings of the Society of Vacuum Coaters, ISSN: 0757-5921, 2000. pp. 203–206.
- [6]. A. Kuzmichev and L. Tsybul'skiy, "Evaporators with Induction Heating and Their Applications," in *Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials*. 2010, pp. 269–302, DOI: [10.5772/13934](https://doi.org/10.5772/13934).
- [7]. D. Child, D. Gibson, F. Placido, and E. Waddell, "Enhanced hollow cathode plasma source for assisted low pressure electron beam deposition processes," *Surf. Coat. Technol.* vol. 267, pp. 105–110, 2015. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2014.12.030](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.12.030).
- [8]. A. I. Kuz'michov, L. YU. Tsybul'skiy, S. YU. Sidorenko, "Termoemissionnyi ionizator parov metallov [Thermoemission ionizer of metal vapour]," *Bulletin of Khmelnytsky National University. Technical sciences*. vol. 231, no. 6, pp. 217–224, 2015. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2015_6_47.
- [9]. A. I. Kuz'michov, L. YU. Tsybul'skiy, S. A. Maykut, I. M. Drozd "Induktionno-termicheskiy metod polucheniya mikro- i nanochastits [Inductive-thermal method of obtaining micro- and nanoparticles]," *Nanosistemi Nanomater. Nanotekhnologii [Nanosystems, Nanomater. nanotechnologies]*. vol. 15, no. 1, pp. 141–162, 2017, URL: https://www.imp.kiev.ua/nanosys/media/pdf/2017/1/nano_vol15_iss1_p0141p0162_2017.pdf.
- [10]. G. Herdrich and M. Auweter-Kurtz, "Inductively heated plasma sources for technical applications," *Vacuum*. vol. 80, pp. 1138–1143, 2006. DOI: [10.1016/j.vacuum.2006.01.044](https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2006.01.044).
- [11]. Ye. Berlin, V. Grigor'yev, L. Seydman, *Induktivnye istochniki vysokoplotnoi plazmy i ih technologicheskie primeneniya [Inductive sources of high density plasma and their application]*. 2018, ISBN: 978-5-94836-519-0.
- [12]. P. K. Roy, A. Moon, K. Mima, S. Nakai, M. Fujita, K. Imasaki, C. Yamanaka, E. Yasuda, T. Watanabe, N. Ohigashi, Y. Okuda and Y. Tsunawaki, "Study of a laser heated electron gun," *Rev. Sci. Instruments*. vol. 67, no. 12, pp. 4098–4102, 1996. DOI: [10.1063/1.1147577](https://doi.org/10.1063/1.1147577).
- [13]. J. R. Nosov, K. O. Petrosjanc, and V. A. Shilin, *Matematicheskie modeli jelementov integral'noj jelektroniki [Mathematical models of integrated electronics elements]*. Moscow: Soviet radio, 1976, URL: <https://www.libex.ru/detail/book792792.html>.
- [14]. I. P. Norenkov and V. B. Manichev, *Osnovy teorii i proektirovaniya SAPR [Fundamentals of CAD theory and design]*. Moscow: High school, 1990, ISBN: 5-06-000730-8.
- [15]. L. Yu. Tsybul'skiy, "Physical-topological modelling techniques of metal induction evaporator," *Visnyk NTUU KPI Serii A - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*. no. 63, pp. 107-118, 2015, URL: <http://radap.kpi.ua/radiotechnique/article/view/1160>. DOI: [10.20535/RADAP.2015.63.107-118](https://doi.org/10.20535/RADAP.2015.63.107-118).
- [16]. L. Tsybul'skiy, "Numerical calculation of temperature distribution in crucible of induction evaporator with magnetic field concentrator", *Bull. Kyiv Polytech. Inst. Ser. Instrum. Mak.*, no. 50(2), pp. 92–100, Dec. 2015. URL: <http://visnykpb.kpi.ua/article/view/57766>. DOI: [10.20535/1970.50\(2\).2015.57766](https://doi.org/10.20535/1970.50(2).2015.57766).
- [17]. E. Ryndin and I. Pisarenko, "Study of transient processes in a p-i-n photodetector using the nonstationary physical-topological model," *Russ. Microelectron.* vol. 46, no. 3, pp. 186–191, 2017, DOI: [10.1134/S1063739717030064](https://doi.org/10.1134/S1063739717030064).
- [18]. V. S. Boldasov, B. I. Volkov, A. G. Sveshnikov, and H. N. Semashko, "Matematicheskie metody modelirovaniya formirovaniya i transportirovki ionnyh puchkov [Mathematical methods for modeling the formation and transport of ion beams]," *Vestn. Mosk. Univ. Ser. Vychislitel' naja Mat. i Kibern.* no. 1, pp. 3–14, 1978.
- [19]. J. R. Nosov, K. O. Petrosjanc, and V. A. Shilin, *Matematicheskie modeli jelementov integral'noj jelektroniki [Mathematical models of integrated electronics elements]*. 1976, URL: <https://www.libex.ru/detail/book792792.html>.
- [20]. V. P. Sigorskij, *Matematicheskij apparat inzhenera [Mathematical apparatus of an engineer]*. Kiev: Technika, 1977.
- [21]. "ANSYS, Inc." [Online]. Available: <https://www.ansys.com/>.
- [22]. "COMSOL inc." [Online]. Available: <https://www.comsol.com/>.
- [23]. I. S. Duff, A. M. Erisman, and J. K. Reid, *Direct Methods for Sparse Matrices*. 2017, ISBN: 9780198508380.
- [24]. A. E. Sluhockij and S. E. Ryskin, *Induktory dlja indukcionnogo nagreva [Inductors for induction heating]*. Leningrad: Energiya, 1974, URL: http://ccimlab-leti.ru/pubs/A.E.Sluhockij-Induktory_dlja_indukcionnogo_nagreva-1974.pdf.
- [25]. V. S. Nemkov and V. B. Demidovich, *Teoriya i raschet ustrojstv indukcionnogo nagreva [Theory and calculation of induction heating devices]*. Leningrad: Energoatomizdat, 1988, URL: https://www.studmed.ru/nemkov-vs-demidovich-vb-teoriya-i-raschet-ustanovok-indukcionnogo-nagreva_8e2732b1107.html.
- [26]. S. Deshman, *Nauchnye osnovy vakuumnoj tehniki [Scientific foundations of vacuum technology]*. Moscow: Mir, 1964.
- [27]. J. Shackelford and W. Alexander, *Materials Science and Engineering Handbook*. Boca Raton: CRC Press LLC, 2011.



- [28]. V. N. Andronov, B. V. Chekin, and S. V. Nesterenko, *Zhidkie metally i shlaki : spravochnik [Liquid metals and slags: a reference book]*. Moscow: Metallurgija, 1977.
- [29]. V. P. Isachenko, V. A. Osipova, and A. S. Sukomel, *Teploperedacha: uchebnik dlja vuzov [Heat transfer: a textbook for universities]*. Moscow: Jenergija, 1975.
- [30]. V. Zinov'ev, *Teplofizicheskie svojstva metallov pri vysokoj temperature spravochnoe izdanie [Thermophysical properties of metals at high temperature reference book]*. Moscow: Metallurgija, 1989.
- [31]. V. P. Glushko, *Termodinamicheskie svojstva individual'nyh veshhestv : spravochnoe izdanie [Thermodynamic properties of individual substances: reference book]*. Moscow: Nauka, 1981.
- [32]. D. H. Zigel', *Teploobmen izlucheniem [Heat transfer by radiation]*. Moscow: Mir, 1975.
- [33]. M. A. Miheev and I. M. Miheeva, *Osnovy teploperedachi [Fundamentals of heat transfer]*. Moscow: Jenergija, 1977.
- [34]. F. N. Sarapulov, *Raschet moshhnostej i jelektromagnitnyh sil v ustanovkah indukcionnogo nagreva: uchebnoe posobie [Calculation of powers and electromagnetic forces in induction heating installations: tutorial]*. Yekaterinburg: UGTU, 1998.

Надійшла до редакції 12 лютого 2022 р.

Прийнята до друку 27 квітня 2022 р.

UDC 621.365.5

Physical-Topological Modeling of Electronic Devices with Induction Heating of Particle Emitters

N. V. Shynkarenko, ORCID [0000-0003-1650-4783](https://orcid.org/0000-0003-1650-4783)

S. O. Maikut, ORCID [0000-0002-0913-4190](https://orcid.org/0000-0002-0913-4190)

L. Yu. Tsybul'skyi, PhD Assoc.Prof., ORCID [0000-0002-7431-6417](https://orcid.org/0000-0002-7431-6417)

A. I. Kuzmichiev, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0003-0087-275X](https://orcid.org/0000-0003-0087-275X)

Department of Electronic Devices and Systems, Faculty of Electronics

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)

Kyiv, Ukraine

Abstract—The general principles of physical and topological modeling and construction of algorithms for calculations of a wide range of electronic devices with induction heating of functional elements up to temperatures at which thermoelectronic emission and/or evaporation of the working substance in the atomized state are considered. The direction of physical-topological modeling was chosen due to the possibility of detailed analysis, based on the primary principles for related physical processes in devices, taking into account the impact of physical properties of functional elements and their design and topological (i.e. geometric) parameters. Thus, the results are obtained by solving a system of fundamental equations, which usually include Newton's and Maxwell's equations, the conservation laws of particles, charge, energy and momentum, as well as material properties, boundary and initial conditions. The set of equations is determined by the number of processes that significantly affect the operation of devices. The construction of the device model is based on the consistent hierarchy of elementary physical processes with the sequential transfer of the results of calculations for lower-level models to higher-level models in the form of initial conditions. The original mathematical models of elementary processes are represented by systems of integral-differential equations with partial derivatives in continuous space and continuous time and belong to the class of distributed mathematical models. Methods for solving the system of equations are considered. On the example of a vacuum metal evaporator with induction heating for thermovacuum coating deposition, the procedure of decomposition of the general physical process in the evaporator with a concentrator as a step-down transformer is given and the hierarchy of elementary processes is clarified. Typical initial and boundary conditions for calculating related physical processes are determined. The available application computer soft packages for the calculation of physical and topological models of various induction devices are considered. In the final part of the article it is considered the structure and structure of physical-topological models of devices with induction heating of particle emitters: i) the thermoionic metal evaporator with ionization of vapor by electrons emitted by a thermocathode from an alloy with low electron output, the cathode is made in the form of an insert on the upper end of the crucible, and ii) the X-ray tube with an inductively heated thermoelectron cathode. Calculation results of the electromagnetic field and current distribution, heat exchange in vapor and electron emitters and their emission fluxes, as well as the trajectories of emitted electrons are presented. Analysis of electron trajectories allowed to optimize the topology and design of these devices.

Keywords — physical-topological modeling; induction heating; thermoelectron emission; metal evaporation; alternating magnetic field concentrator; thermoionic evaporator; coating deposition.



Copyright (c) 2021 Шинкаренко Н. В., Майкут С. О., Цибульський Л. Ю.

Кузмічев А. І.

за матеріалами конференції STEE-2021