

На правах рукопису

УДК 621.325:537.525

МЕЛЬНИК Ігор Віталійович

Мельник

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ
ГАЗОРОЗРЯДНИХ ЕЛЕКТРОННИХ ГАРМАТ
З ХОЛОДНИМ КАТОДОМ**

**Спеціальність 05.13.12 — Системи автоматизації
проекткування**

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук



00801668 (Т)

...ї ЕП та П Київського політехнічного інституту.

Науковий керівник — доктор технічних наук, професор,
ДЕНБНОВЕЦЬКИЙ С. В.

Офіційні опоненти: — доктор технічних наук, професор,
АБАКУМОВ В. Г.,

— кандидат технічних наук, доцент,
НОВІКОВ А. О.

Ведуча організація: — **ВО «Завод Арсенал».**

Захист відбудеться « 18 » квітня 1994 р. о
15 год. ___ хв. в ауд. 412, корп. 12, на засіданні спеціалізованої Ради К068.14.17 при Київському політехнічному інституті за адресою: 252056, м. Київ-56, пр. Перемоги, 37, корпус 12.

Відгук на автореферат у двох примірниках, які завірюються печаткою, просимо надсилати за вказаною адресою на ім'я вченого секретаря спеціалізованої Ради.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці інституту.

Автореферат розісланий « 17 » березня 1994 р.

Вчений секретар спеціалізованої Ради
кандидат технічних наук, доцент

КОБЦЕВ Ю. Д.

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

1. АНОТАЦІЯ

1.1 Мета роботи

МЕТОД дисертаційної роботи є розробка комплексної фізико-топологічної моделі газорозрядної електронно-променевої гармати, її програмна реалізація та розробка методики інженерного проектування газорозрядних електронних гармат.

1.2 Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі вирішуються такі **ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ**:

1. Формування комплексної фізико-топологічної моделі газорозрядної гармати.

2. Розробка програмного комплексу, призначеного для моделювання газорозрядних гармат.

3. Проведення експериментальних досліджень для визначення меж застосування розробленої моделі та необхідних для моделювання параметрів, а також для верифікації даних моделювання.

4. Розробка на основі даних моделювання та експерименту методики інженерного проектування газорозрядних гармат.

5. Розробка за запропонованих методик гармат з покращеними характеристиками.

1.3 На захист виносяться такі **ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ**:

1. При моделюванні електронно-оптичних систем високівольтного тліючого розряду використання методу трубок струму дозволяє врахувати вплив порцесів розсіяння та перезарядження на вихідні параметри електронного пучка шляхом ітераційного змінювання струму трубки при перетині кожної елементарної комірки сітки та за рахунок використання апроксимаційних співвідношень для перетинів колективних взаємодій та для електродних процесів, що значно підвищує адекватність моделі та точність моделювання.

2. Використання для опису геометрії електронно-оптичних систем газорозрядних гармат системи вхідних геометричних параметрів, яка відповідає вимогам зімкнутості, несуперечності, повноти та однозначності опису, дозволяє збільшити використання мовних засобів геометричного моделювання та підвищити надійність розроблених програмних засобів.

3. Використання при моделюванні процесу транспортування короткофокусного електронного пучка, формованого газорозрядною електронною гарматою, в низького у високий вакуум для визначення енергетичних втрат чисельного алгоритму, оснований на переході від геометричних

та енергетичних характеристик пучка до параметрів розподілу Гауса дозволяє досягти необхідної точності розрахунку вихідних параметрів без використання чисельних методів траєкторного аналізу.

4. В електронно-оптичних системах високовольного тліючого розряду з анодною плазмою та розвинутим холодним катодом, який має форму сфери, при максимальних струмах розряду довжина області катодного падіння не перевищує поперечних розмірів проміжку, а поверхня плазмової межі концентрична поверхні катоду, що дозволяє при моделюванні розглядати її як анод відповідної конфігурації.

5. Використання при транспортуванні короткофокусних електронних пучків, формуємих газорозрядною електронною гарматою, трубопроводу змінного перетину з мінімальним діаметром біля кросоверу пучка дозволяє отримати максимальний перепад тиску 2-3 порядки при мінімальних втратах потужності.

6. Розроблена методика інженерного проектування газорозрядних електронних гармат, яка містить приблизний розрахунок енергетичних характеристик гармати, її чисельне моделювання та експериментальну доробку з використанням засобів чисельного моделювання. Методика дозволяє визначити вихідні параметри електронного пучка засобами чисельного моделювання з урахуванням впливу процесів колективної взаємодії часток.

2. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

2.1. Актуальність роботи

У електроніці, приладобудуванні та інших галузях промисловості знаходять широке впровадження електронно-променеві засоби термічної обробки матеріалів. Це потребує розробки та впровадження технологічних електронних джерел, які використовуються для виконання різноманітних технологічних операцій. Поряд з удосконаленням традиційних термокатодних гармат для вирішення цих науково-технічних задач розробляються та впроваджуються у виробництво електронні джерела на базі нових фізичних принципів.

Перспективними для використання при проведенні технологічних операцій у низькому та середньому вакуумі є газорозрядні електронно-променеві гармати з холодним катодом, у яких для формування електронного пучка використовується високовольний тліючий розряд з анодною плазмою. Однак фізичні явища, які мають місце у високовольному тліючому розряді, дуже складні та різноманітні, для більшості з них не існують методів аналітичного опису, а постановка задачі чисельного моделюван-

ня високовольтних газорозрядних пристроїв пов'язана зі значними труднощами обчислювального характеру.

Існують пакети прикладних програм, такі як ЕРА та ТАУ, що дозволяють моделювати електронно-оптичні системи з різноманітною геометрією електродів. Однак безпосереднє використання цих програмних засобів для моделювання газорозрядних електронно-променевих гармат неможливе, оскільки в них не враховані усі головні фізичні явища, які мають місце у високовольтному тлічному розряді. У зв'язку з цим розробка комплексної фізико-топологічної моделі газорозрядної гармати, її програмна реалізація, створення методики інженерного проектування газорозрядних гармат та розробка за запропонованою методикою гармат з покращеними характеристиками та їх впровадження у виробництво складають **АКТУАЛЬНУ** науково-технічну задачу.

2.2 Методи дослідження

Під час вирішення поставлених у роботі задач використано математичний апарат кінцево-різничних методів, інтегрального та диференціального обчислювань, електродинаміки, термодинаміки, фізики газового розряду та фізики плазми, теоретичної механіки. Експериментальні дослідження проводилися на сучасному вакуумному електронно-променевому обладнанні. Обробка результатів моделювання та експерименту проводилася з використанням методів математичної статистики.

2.3. Наукова новизна

1. На основі використання чисельних методів траєкторного аналізу та методів розв'язування алгебро-диференціальних рівнянь розроблена фізико-топологічна модель газорозрядних електронно-променевих гармат з холодним катодом, яка містить модель електронно-оптичних систем високовольтного тлічного розряду, у якій врахований вплив розсіювання та перезарядження на параметри формуемого електронного пучка, модель транспортування електронного пучка та модель теплових процесів для основних вузлів гармати, що дозволяє підвищити точність моделювання та розробити на основі запропонованої моделі з урахуванням експериментальних досліджень параметрів розряду методику інженерного проектування технологічних газорозрядних електронних гармат з холодним катодом.

2. Запропоновано та реалізовано ефективний засіб чисельного визначення просторового заряду у вузлах кінцево-різничної сітки з урахуванням впливу взаємодій заряджених часток, оснований на методі трубок струму, при чому значення струму ітераційно змінюється, коли тру-

бка перетинає кожен елементарну комірку сітки. Реалізація алгоритму дозволила скоротити час розрахунку самоубгодженої задачі на ЕОМ та зменшити витрати її оперативної пам'яті порівнянно з використанням широко розповсюдженого методу макрочасток.

3. Запропонована модель транспортування електронного пучка, формуючого газорозрядних електронних гармат, з низького у високий вакуум у еквіпотенціальному каналі. Модель, яка враховує магнітне поле фокусувальної лінзи та вплив залишкового газу, дозволяє визначити втрати струму пучка при його транспортуванні з використанням переходу від геометричних та енергетичних характеристик до параметрів розподілу Гауса, що дає можливість досягти необхідної точності розрахунку без використання чисельних методів траєкторного аналізу.

4. Експериментально визначена залежність положення та форми плазмової межі, що є прозорим анодом електронно-оптичної системи, від режимів розряду та від геометрії електродів. Встановлено, що при максимальних струмах розряду, коли відстань плазма-катод стає меншою, ніж поперечний розмір проміжку, плазмова межа подібна поверхні катоду та забезпечує формування електронного пучка з фокусом віддаллю, близькою до радіуса сфери катоду, що використовується при моделюванні розрядного проміжку та дозволяє підвищити точність моделювання.

5. Визначена залежність діаметра електронного пучка, формуючого газорозрядних гармат, від геометричних параметрів електродної системи та електричних параметрів розряду. Мінімальний діаметр пучка досягається при зменшенні радіуса сфери катоду, при збільшенні прискорювальної напруги, та при оптимальному струмі розряду, коли випукла плазмова межа забезпечує найкраще фокусування електронного пучка. Отримані результати дозволяють проводити оптимізацію електронно-оптичних систем газорозрядних гармат при чисельному моделюванні.

6. Методика інженерного проектування електронних гармат має ітераційний характер та містить три основних етапи: розрахунок основних параметрів гармати на основі одномірної моделі розряду, чисельне моделювання гармати з використанням програмних засобів, та експериментальну доробку конструкції гармати з використанням засобів чисельного моделювання. Методика дозволяє на другому та третьому етапах проводити комплексне моделювання гармати з урахуванням впливу процесів розсіювання та перезарядження на формуваний електронний пучок.

2.4 Практична цінність та впровадження результатів роботи

У дисертаційній роботі здобувачем отримані такі важливі практич-

ні результати:

1. Розроблена система вхідних геометричних параметрів моделі газорозрядної гармати, яка дозволяє описувати геометрію досліджуваних електронно-оптичних систем високовольтного тліючого розряду, та відповідає вимогам повноти, зімкнутості, несуперечності та однозначності опису. Введення запропонованої системи параметрів у пакет прикладних програм, призначений для моделювання газорозрядних електронних гармат, дозволяє збігти використання мовних засобів геометричного моделювання для опису геометрії реальних електродних систем.

2. Розроблено пакет прикладних програм, призначений для моделювання газорозрядних електронних гармат. Необхідна точність моделювання при незначних витратах машинного часу та пам'яті досягнута завдяки урахуванню основних фізичних процесів, які мають місце у високовольтному тліючому розряді, використання ефективних алгоритмів чисельного аналізу та шляхом вибору відповідних лінгвістичних, програмних та системних засобів.

3. Встановлено, що при використанні циліндричного аноду з півсферичною основою плазмова межа концентрична поверхні катода майже у всьому діапазоні параметрів розряду, а кросовер електронного пучка майже співпадає з центром сфери катода, що значно спрощує моделювання гармати у режимі малих струмів та розширює можливості аналізу реальних електронно-оптичних систем.

4. Встановлено, що при транспортуванні електронного пучка, формуючого газорозрядною гарматою, у високий вакуум найменші втрати потужності досягаються при використанні трубопроводу змінного поперечного перетину з найменшим діаметром біля кросоверу пучка. При струмах електронного пучка 0,1-1 А та при перепаді тиску 2-3 порядки втрати потужності при транспортуванні складають 3-5 %.

5. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень за запропованою методикою розроблені та впроваджені у виробництво технологічні газорозрядні електронні гармати:

- гармата для зварювання у низькому вакуумі потужністю 3 кВт при прискорюючій напрузі 30 кВ;

- гармати для нанесення покриттів складного хімічного складу потужністю 5 та 10 кВт при прискорюючій напрузі 10 та 15 кВ;

- газорозрядні електронно-променеві випарники потужністю 10 кВт для нанесення металевих покриттів у високому вакуумі на великогабаритні вироби та на ленту, що рухається.

6. Розроблені електронно-променеві гармати реалізовані у промисловості, де вони використовуються для електронно-променевого зварювання та для реакційного осадження діелектричних, оптичних та зміцнюючих покриттів складного хімічного складу.

Результати роботи використані під час виконання науково-дослідних держбюджетних та госпдоговірних робіт кафедри ЕП та П КПІ у 1989-1993 роках та впроваджені у таких установах: ВО "Завод Арсенал", м. Київ, НВО "Сатурн", м. Київ, НВО "Катіон", м. Хмельницький.

2.5 Апробація роботи

Результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на Всесоюзній науково-технічній конференції "Создание комплексов электротехнического оборудования, высоковольтной, преобразовательной и полупроводниковой техники", м. Москва, 1989 р.; VIII Всесоюзному симпозіумі по сильнотрумній електроніці, м. Свердловськ, 1990 р.; науково-технічній конференції "Ионно-плазменные технологии получения тонких пленок и покрытий", м. Полтава, 1991 р.; науково-технічному міжгалузевому семінарі "Физические основы и новые направления плазменной технологии в микроэлектронике", м. Харків, 1991 р.; республіканській науково-технічній конференції "Проблемы автоматизированного моделирования в электронике", м. Київ, 1993 р.

2.6 Публікації

Матеріали дисертаційної роботи відображені у 14 друкованих працях (5 статей у науково-технічних журналах, 5 авторських свідоцтв та 4 публікації тезисів доповідей на науково-технічних семінарах та конференціях).

2.7 Структура та розмір роботи

Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти глав, висновку, переліку літератури та трьох додатків, основний її текст викладено на 184 машинописних сторінках, ілюстровано 53 малюнками та 5 таблицями. Список цитованої літератури містить 152 назви.

3. ГОЛОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступній частині роботи розглянуто переваги електронно-променевих технологій перед традиційними методами обробки речовин та матеріалів, відзначається перспективність використання газорозрядних електронних гармат для проведення технологічних операцій у низькому та середньому вакуумі, але зауважується на те, що автоматизація проектування газорозрядних гармат та їх втілення у виробництво стримується відсутністю їх комплексної фізико-топологічної моделі та методики їх

проекування.

У першій частині роботи проведено огляд літератури по вопросах, пов'язаних з моделюванням електронних потоків та електронних джерел. Зауважується на існування двох різних засобів вирішення цієї задачі - методів аналізу та методів синтезу. Приведена класифікація моделей електронних гармат та послідовність їх використання на різних рівнях проектування. Відмічається, що методи синтезу не знайшли широкого розповсюдження у зв'язку з тим, що не розроблені ефективні алгоритми їх чисельної реалізації. Розглядається метод інтегральних рівнянь та метод кінцевих різниць як можливі варіанти вирішення задачі аналізу. Показано, що при аналізі аксіально-симетричних електродних систем з замкнутою межею найбільш ефективним є метод кінцевих різниць.

При розгляденні методик розрахунку просторового заряду зауважується на те, що найбільш придатним для аналізу електронної та іонної оптики при однородності потоків є метод трубок струму. Відмічено, що аналіз електронно-іонної оптики високовольтного тліючого розряду ускладнюється присутністю рухомої межі анодної плазми, положення та форма якої залежать від режимів розряду. У зв'язку з тим, що вирішення самоузгодженої задачі визначення розподілу електричного поля та положення плазмової межі пов'язано зі значними обчислювальними труднощами, поставлена задача створення комплексної методики проектування газорозрядних гармат з використанням засобів моделювання та експериментальних досліджень. У кінці першої частини робиться висновок про необхідність створення програмного комплексу, призначеного для моделювання газорозрядних гармат, який мусить відповідати сучасним стандартам на програмне забезпечення для персональних ЕОМ.

У другій частині роботи приводиться фізико-топологічна модель електронно-оптичних систем газорозрядних гармат, яка базується на рівняннях електрофізики та може бути записана таким чином:

$$\frac{\sigma_s}{\sigma} + \bar{v}_s \operatorname{grad} f_s + \frac{q_s \bar{E}}{m_s} \operatorname{grad}_{v_s} f_s = \left[\frac{\sigma_s}{\sigma} \right]_{cr}$$

$$J_s = q_s \int_0^{\infty} \bar{v}_s f_s(\bar{v}_s) dv_s ; \quad \rho_s = q_s \int_0^{\infty} f_s(\bar{v}_s) dv_s ; \quad (1)$$

$$\rho_{\Sigma} = \rho_+ - \rho_e ; \quad \bar{E} = - \operatorname{grad} \phi ; \quad \operatorname{div} \operatorname{grad} \phi = - \rho_{\Sigma} / \epsilon_0$$

де f_s - функція розподілу часток, s - сорт часток, q_s - заряд однієї

частки, m_s - її маса, \bar{v}_s - швидкість, J_s - густина струму, ρ_Σ - густина просторового заряду. При розв'язуванні системи (1) вирішення польової задачі проводилося методом Вейделя, що є однією з модифікацій методу кінцевих різниць. Оскільки при дискретизації області вводилася кінцево-різницева сітка з різними кроками по осях r та z , були використані найбільш повні форми кінцево-різницевих співвідношень з параметром релаксації, рівним 1,15.

Для визначення розподілу просторового заряду був використаний метод трубок струму. При цьому з урахуванням обсягу кінцево-різницевої комірки, а також вхідного та вихідного струму, можна визначити заряд, скоплений у комірці, з урахуванням процесу перезарядження іонів. Відповідні чисельні співвідношення запишуться у вигляді:

$$\rho_1^S = \frac{I_s}{2\pi r_T \Delta r} \sqrt{\frac{m_s}{2q_s}} \left[\frac{1}{\sqrt{U_{r1}}} + \frac{1}{\sqrt{U_{r2}}} \right]; \quad \Delta r = r_2 - r_1;$$

$$U_r = U_{k,l} + \frac{U_{k,l} - U_{k-1,l}}{h_r} (lh_r - r); \quad \Delta N_1 = 2\pi N_1 (1 - \xi) r_T^2 \frac{\Delta r l h_r}{\Delta z} f(U_0);$$

$$U_C = \frac{U_{k,l} + U_{k-1,l} + U_{k,l-1} + U_{k-1,l-1}}{4}; \quad \rho_1^1 = \frac{(\rho_1^S)^2}{\rho_1^1 - 2\pi N_1 r_T^2 \frac{\Delta r l h_r}{\Delta z} f(U_C)}; \quad (2)$$

$$I_1^2 = \frac{I_1^1 \rho_1^1}{\rho_1^1 - 2\pi N_1 r_T^2 \frac{\Delta r l h_r}{\Delta z} f(U_{cp})}; \quad \rho_2^S = \sum_{N=1}^{N_{TP}} \rho_1^S; \quad \rho_\Sigma = \rho_1 - \rho_e;$$

$$\rho_{k,l}^1 = \frac{\rho_\Sigma(k,l,k+1,l+1) + \rho_\Sigma(k,l,k-1,l-1) + \rho_\Sigma(k,l,k-1,l+1) + \rho_\Sigma(k,l,k+1,l-1)}{4}$$

де I_s - струм трубки, r_T - радіус її поперечного перетину, r_1, r_2 - радіуси входу та виходу трубки відносно осі симетрії, U_{r1}, U_{r2} - апроксимовані значення потенціалу, ξ - ступень іонізації газу, $f(U)$ - функція залежності перетину перезаряджень від потенціалу, N_{TP} - кількість трубок струму, що перетинають комірку кінцево-різницевої сітки,

Для реальних електронно-оптичних систем газорозрядних електронних гармат зі сферичною формою катоду та анодами, виконаними у вигляді циліндру, конусу, або циліндру з півсферичною основою, розроблена система геометричних параметрів, яка відповідає вимогам несуперечності, замкнутості, повноти та однозначності опису і дозволяє проектувальнику збігти при заданні геометрії електродної системи використання мовних засобів геометричного моделювання. Для забезпечення однозначності та несуперечності опису на вхідні геометричні параметри накладалися обмеження, які були для кожного типу електродних систем записані у вигляді математичних нерівностей та внесені у програму контролю вхідних параметрів. Це дозволило забезпечити надійність роботи програмного комплексу, призначеного для моделювання електронних гармат.

Розроблена та впроваджена у програмному комплексі методика обчислення фокальних параметрів пучка, яку можна представити у вигляді співвідношень:

$$\operatorname{tg}(0,5 \theta_{\min}) = \frac{10^{-4} Z^{4/3}}{2 \gamma \beta^2}; \quad \operatorname{tg}(0,5 \theta_{\max}) = \frac{e^2 Z}{\pi v^2 r_n(j)};$$

$$v = \sqrt{\frac{2eU_k}{m}}; \quad dL = h v \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\varphi)}; \quad d\theta = \frac{4Z(Z+1)r_e^2 \gamma^2}{(\gamma^2 - 1)^2} n_0 dL \ln \left(\frac{\theta_{\max}}{\theta_{\min}} \right); \quad (3)$$

$$dz = R_k - d_{kp} - \sqrt{(R_k - d_{kp})^2 - r_0(l)^2};$$

$$\varphi(l, k) = \varphi(l, k-1) + d\theta; \quad r(l, k) = r(l, k-1) - dz \operatorname{tg}(\varphi(l, k));$$

$$J_n^{\max}(k) = \max_{l=0}^k (J_n(l, k)); \quad r_n(k) = \arg(0,7 J_n^{\max}(k));$$

$$d_n = 2 \min_{k=0}^k (r_n(k)); \quad F = d_{kp} + h_2 \operatorname{argmin}(r_n(k)),$$

де l, k - параметри дискретизації по осях r та z відповідно, r_n - радіус пучка, J_n - густина струму, d_{kp} - відстань плазма-катод, R_k - радіус сфери катоду, θ - кут розсіяння електронів відповідно з моделлю Розерфорда, Z - заряд ядра, φ - кут вльоту електронів, r_e - класичний радіус електрону, γ - релятивістський фактор.

На основі аналізу даних моделювання з використанням феноменологічної теорії високовольтного тлівого розряду досліджується вплив різноманітних фізичних процесів та явищ на параметри формуемого пучка.

Доведено, що у аналізуємих системах екранування електричного поля просторовим зарядом іонів з урахуванням процесу перезарядження настає при значно меншій параметрах розряду, ніж дефокусування електронного променя під впливом власного просторового заряду. Проте при обчисленні траєкторій часток у більшості випадків не можна використовувати концепцію компенсованого пучка, необхідно враховувати сумарний вплив просторового заряду на розподіл електричного поля. Аналіз процесів, що мають місце у анодній плазмі при її взаємодії з електронним пучком, дозволив зробити висновок, що при максимальних струмах розряду температуру власних електронів плазми можна брати відповідно до енергії іонізації атомів газу, а концентрацію іонів відповідно до тиску та ступені іонізації. Це дозволяє визначити густину іонного струму з поверхні плазмової межі згідно зі співвідношенням Бому:

$$J_1 = 0,4eN_1 \sqrt{2kT_e/m_1} \quad (4)$$

Положення плазмової межі відносно катоду на першому етапі проектування визначалося згідно з одномірною моделлю розрядного проміжку та перераховувалося згідно з реальною геометрією електродної системи, а на наступних етапах уточнювалося на основі даних експерименту.

У третій частині роботи відображені результати моделювання транспортування електронного пучка, теплових процесів на електродах та процесу електронно-променевого випарювання. При моделюванні транспортування електронного пучка з низького у високий вакуум у циліндричному, конічному та нелінійному трубопроводі розглядалися процеси іонного фокусування, розсіяння електронів на атомах остатнього газу та пінч-ефекту. Аналіз процесу транспортування електронного пучка проводився через вирішення системи алгебро-диференціальних рівнянь, у яку входили рівняння вакуумної техніки для визначення значення тиску та рівняння межової траєкторії електронів пучка. Система вирішувалась чисельно методом Рунге-Кутта четвертого порядку. Були отримані графічні залежності тиску від відстані, струму від відстані та струмових втрат від відстані, а також межові траєкторії електронів формуемого променя. При визначенні струмових втрат був застасований ефективний алгоритм, оснований на переході від енергетичних та геометричних характеристик пучка до параметрів розподілу Гауса, який дозволяє досягти необхідної точності розрахунку без використання чисельних методів траєкторного аналізу. Результати моделювання показали, що найбільш

великі втрати струму пучка при його транспортуванні у циліндричному трубопроводі мають місце або на вході, або на виході, що дає можливість оптимізувати геометрію трубопроводу з ціллю досягнення максимального перепаду тиску при мінімальних втратах потужності. Найменші втрати були досягнені при використанні трубопроводу змінного перетину з мінімальним діаметром біля кросоверу пучка.

Аналіз термодинамічної задачі електронно-променевого випарювання металів проводився на основі чисельного вирішення рівняння теплового балансу для охолоджуємого волюм тігельного вузла при розогріві нависки дефокусованим електронним пучком. При цьому враховувалися процеси теплового випромінювання, тепловіддачі, теплопередачі, емісії вторинних електронів з поверхні металу. Вирішення задачі плавлення та випарювання металу проводилося через чисельне інтегрування рівняння теплового балансу методом Рунге-Кутта четвертого порядку відповідно з розробленим алгоритмом, який для кожного кроку інтегрування містив чотири основних ітераційних етапи:

1. Моделювання нагріву електронним променем рідинної фази металу.
2. Моделювання процесу тепловіддачі теплової енергії від рідинної до твердої фази металу.
3. Обчислення нового значення температури поверхні металу з врахуванням результатів другого етапу.
4. Обчислення маси випарюємого металу.

Чисельний аналіз показав, що у дослідженому діапазоні потужностей час попереднього розігріву металу не сильно залежить від потужності променя, а швидкість випарювання майже у всьому діапазоні температур змінюється незначно. Отримані залежності для швидкості випарювання та енергетичної ефективності випарника дають змогу підібрати оптимальний режим роботи згідно з необхідними параметрами. Порівняння результатів моделювання та експерименту показало, що точність розрахунку у дослідженому діапазоні потужностей не перевищує 10%, що дозволяє зробити висновок про адекватність розробленої моделі.

Аналіз процесу охолодження катоду показав, що при великих та середніх потужностях гармати посередній контакт його поверхні з охолоджуючою рідиною у багатьох випадках може бути неефективним, оскільки нагрів катоду веде до різького спаду ефективності роботи гармати. Отримано співвідношення для робочої температури катоду:

$$T(\tau) = \frac{P_{\Pi} \left(\frac{\gamma}{1+\gamma} \right) \left[\frac{R_K + l_K - \sqrt{R_K^2 - \Gamma_K^2}}{\lambda_K} + \frac{l_{\text{осн}}}{\lambda_{\text{осн}}} + \frac{l_B}{\lambda_B} + \frac{1}{\alpha_P} \right] + T_D}{R_K^2 \left[\frac{\pi \arcsin \left[\frac{\Gamma_K}{R_K} \right]}{180} - \frac{\Gamma_K \left[R_K - \sqrt{R_K^2 - \Gamma_K^2} \right]}{R_K^2} \right]} \quad (5)$$

де P_{Π} - потужність формуемого пучка, γ - коефіцієнт вторинної іонно-електронної емісії, R_K - радіус сфери катоду, Γ_K - його поперечний розмір, l_K - його товщина, T_D - температура охолоджувачої рідини, α_P - коефіцієнт теплопередачі, λ_B , l_B , $\lambda_{\text{осн}}$, $l_{\text{осн}}$ - теплопровідність та довжини вакуумного зазору та основи для установлення катоду відповідно. Приведене співвідношення дає змогу провести оцінку ефективності охолодження. Більш точний аналіз теплового режиму катоду проводився через визначення втрат енергії на його поверхні на основі чисельних даних аналізу електронної оптики. Таким же чином розглядалася ефективність охолодження анодного вузла.

У четвертій частині роботи описана структура розроблених програмних засобів та методи програмної реалізації описаних у попередніх розділах чисельних алгоритмів. Розглянуто принципи побудови розробленого пакету, інформаційні та структурні зв'язки, а також використані програмні та системні засоби. Зауважується, що для підтримки діалогового режиму роботи пакет має розгорнуту систему звичайних та ієрархічних меню, передбачена можливість представлення результатів моделювання у графічному вигляді з використанням засобів інтерактивної графіки. Описані програмні модулі, призначені для вирішення цих задач. Розглядається ієрархічна структура пакету та основні лінгвістичні, програмні та системні засоби, які дозволили при вирішенні модельних задач досягти оптимального використання ресурсів ЕОМ при покращенні експлуатаційних характеристик програмного комплексу. Приведені блок-схеми алгоритмів аналізу розподілу електричного поля, траєкторної задачі та задачі визначення просторового заряду. Розглянуто програмні та системні засоби, які були використані для підвищення стабільності роботи програмного комплексу, зокрема аналізується структура файлу обробки та контролю вхідної інформації, у якому проводиться перевірка

ка вектору вхідних даних на їх відповідність вимогам несуперечності та однозначності завдання початкових та межових умов з боку як фізичних, так і суто математичних обмежень.

Особливістю розробленого пакета прикладних програм є реалізація окремими модулями блоків розрахунку польової та траєкторної задачі, що дозволяє прискорити виконання самоузгодженої задачі розрахунку потенціалів та траєкторій часток за рахунок ефективного розподілу оперативної пам'яті ЕОМ. Але при виконанні ітераційної процедури по просторовому заряду такий підхід потребує формування проектно-залежних чисельних файлів, у яких треба записувати значення просторового заряду та потенціалів, обчислені на даній ітерації.

При комплексному моделюванні електронної гармати обчислені при моделюванні електронної оптики значення струму електронного променя та його фокального діаметру на наступному етапі можуть бути використані як початкові умови для задачі транспортування електронного променя, при цьому вони записуються до відповідного файлу вхідних даних. Результати моделювання представляються у вигляді графічних залежностей, які можуть бути записані до відповідних файлів шляхом безпосередньої копії екрану та архівації записаних даних. Для роботи з бібліотекою проектних рішень були створені спеціальні файли для обробки, запису та зчитування відповідної графічної інформації. Розроблений пакет був реалізований на алгоритмічній мові Turbo-Pascal 6.0 та використовувався для аналізу та оптимізації конструкцій газорозрядних електронних гармат.

У п'ятій частині роботи, приведені результати експериментальних досліджень електронно-оптичних систем високовольного тліючого розряду, на основі статистичного аналізу порівнюються теоретичні та експериментальні дані, розглядається розроблена методика проектування газорозрядних гармат, представлені варіанти розроблених конструкцій, їх технічні характеристики та можливості використання у промисловості. З електронно-оптичних параметрів найбільш важливим є положення плазмової межі відносно катода. Це пов'язано з тим, що плазмова межа при моделюванні розглядається як прозорий анод електронно-оптичної системи та її розташування впливає на характеристики гармати. Експериментальні дослідження показали, що при максимальних струмах розряду плазмова межа стає концентричною поверхні катода та майже не змінює свого положення, що використовувалося при комп'ютерному моделюванні електронної оптики гармати. Досліджувалися також залежності фо-

кальних параметрів електронного променя від режимів розряду. Результати цих досліджень показали, що фокусна відстань при максимальних струмах розряду стабілізується і стає близькою до радіусу сфери катоду, а найменший діаметр електронного променя досягається при зменшенні радіусу сфери катоду, при збільшенні прискорючої напруги, та при оптимальному струмі розряду, коли поверхня плазмової межі, маючи пікообразну форму, забезпечує найкраще фокусування електронного пучка. Ці експериментально встановлені залежності були використані при оптимізації конструкції газорозрядних гармат з використанням засобів чисельного моделювання. Точність моделювання залежала від режимів роботи гармати та для максимальних струмів розряду складала 20-25%. У зв'язку з цим була розроблена комплексна теоретико-експериментальна інженерна методика проектування електронних гармат.

Методика містить три послідовних ітераційних етапи:

1. Розрахунок на основі одномірної моделі високовольтного тліючого розряду основних параметрів гармати.
2. Комплексне моделювання гармати з використанням розроблених програмних засобів.
3. Експериментальна доробка конструкції гармати з використанням для визначення розподілу електричного поля та траєкторій часток засобів чисельного моделювання.

Запропонована методика відрізняється від існуючих тим, що дозволяє на початковому етапі проектування приблизно визначати основні характеристики газорозрядних гармат та проводити комплексне моделювання гармати з використанням розроблених програмних засобів, що веде до скорочення термінів проектування газорозрядних гармат та до підвищення його якості.

Приведені конструкції зварювальної гармати потужністю 3 кВт та гармат для випарювання потужністю 5 та 15 кВт, які розроблені за запропонованою методикою з використанням створених програмних засобів, впроваджені на ряді підприємств електронної промисловості, приладобудування та машинобудування та мають порівняно з існуючими гарматами покращені експлуатаційні характеристики при виконанні відповідних технологічних операцій.

4. ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Запропонована комплексна фізико-топологічна модель газорозрядних електронних джерел з холодним катодом, яка враховує специфіку головних фізичних процесів та явищ, що мають місце у високовольтному

тліючому розряді, та містить модель електронно-іонної оптики, модель транспортування електронного пучка, модель теплових режимів електродів та модель технологічного процесу електронно-променевого випарювання металів.

2. Запропонований ефективний алгоритм визначення просторового вяряду у вузлах кінцево-різницевої сітки, оснований на методі трубок струму, який дозволяє врахувати вплив процесів розсіяння та перезарядження на параметри електронного пучка.

3. Розроблено чисельний алгоритм вирішення задачі транспортування електронного пучка, оснований на переході від його енергетичних та геометричних характеристик до параметрів розподілу Гауса, який дозволяє визначити енергетичні втрати при транспортуванні без використання чисельних методів траекторного аналізу.

4. Розроблено пакет прикладних програм, який дозволяє проводити комплексне моделювання газорозрядних гармат та визначати їх основні технологічні параметри засобами чисельного моделювання.

5. На основі експериментальних досліджень високовольтного тліючого розряду показано, що при максимальних струмах розряду довжина області катодного падіння не перевищує поперечних розмірів проміжку, а плазмова межа паралельна поверхні катоду.

6. Розроблена методика інженерного проектування газорозрядних гармат, яка дозволяє визначати їх основні параметри методами чисельного моделювання та проводити експериментальну доробку конструкцій гармат з використанням засобів моделювання.

5. ГОЛОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА МАТЕРІАЛАМИ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Тагиль А.Г., Корсун Л.М., Мельник И.В. "Экспериментальная установка вакуумного напыления с газоразрядной электронной пушкой. - Вестник Киевского политехнического института. Радиозлектроника, - Вып. 26; 1989. - С. 101-103.

2. Мельник В.И.; Мельник И.В., Тагиль А.Г., Тугай Б.А. Авт. свид. N 1501830 (СССР). Кл. H01J 37/077. Газоразрядная электронная пушка, 1989.

3. Кузьмичев А.И., Мельник В.И., Мельник И.В. Авт. свид. N 1529764 (СССР). Кл. C23C 14/30. - Электронно-лучевой испаритель, 1989.

4. Мельник В.И., Мельник И.В. Авт. свид. N 1566872 (СССР). Кл. C23C 14/30. Электронно-лучевой испаритель, 1989.

5. Денбовецкий С.В., Мельник В.И., Мельник И.В. Авт. свид.

№ 1579323 (СССР). Кл. Н01J 37-06. Газоразрядная электронная пушка, 1989.

6. Мельник И.В. Авт. свид. № 1658779 (СССР). Кл. Н01J 37-077. Газоразрядная электронная пушка, 1990.

7. Мельник И.В. Машинный анализ распределения электрического поля в газоразрядной электронной пушке. - Вестник Киевского политехнического института. Радиоэлектроника. - Вып. 27, 1990. - С. 101-104.

8. Денбновецкий С.В., Мельник В.И., Мельник И.В., Тугай Б.А. Оптимизация параметров электронной пушки высоковольтного тлеющего разряда. - Тезисы докладов VIII Всесоюзного симпозиума по сильноточной электронике. Часть 1. - Свердловск, 1990. - С. 251-253.

9. Мельник В.И., Мельник И.В., Тагиль А.Г., Тугай Б.А. Газоразрядный электронно-лучевой испаритель. - Физические основы и новые направления плазменной технологии в микроэлектронике. Сборник тезисов докладов научно-технического межотраслевого семинара, октябрь, 1991, Харьков. - М.: 1991, С. 50.

10. Мельник В.И., Мельник И.В., Тагиль А.Г., Тугай Б.А. Электронно-лучевой испаритель для ионно-плазменного осаждения покрытий. - Ионно-плазменные технологии получения тонких пленок и покрытий. Сборник тезисов докладов научно-технической конференции, 17-20 сентября, 1991, Полтава. - Киев, 1991. - С. 10-11.

11. Мельник И.В. Проектирование газоразрядной электронной пушки. - Вестник Киевского политехнического института. Радиоэлектроника. Вып. 28, 1991. - С. 75-77.

12. Денбновецкий С.В., Мельник В.И., Мельник И.В. Численное моделирование основных физических процессов, протекающих в области катодного падения газоразрядной электронной пушки. // Автоматизация проектирования в электронике. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. - 1991, вып. 43. - С. 46-54.

13. Мельник И.В. Определение параметров газоразрядной электронной пушки методами численного моделирования. - Вестник Киевского политехнического института. Радиоэлектроника. - Вып. 29, 1992. - С. 74-78.

14. Денбновецкий С.В., Мельник В.И., Мельник И.В. Физико-топологическое моделирование газоразрядных электронных пушек. - Проблемы автоматизированного моделирования в электронике. Тезисы докладов республиканской научно-технической конференции, 2-4 февраля 1993 г. - Киев, 1993. - С. 34.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Шмельов

АВ 29.558