

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра електронних приладів та пристроїв

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри

Л.Д. Писаренко  
“ ” червня 2019 р.

## Дипломний проект

освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр»

(назва ОКР)

з спеціальності :

**6.050802- Електроніка**

Спеціалізація:

**Електронні прилади та пристрої**

на тему: Газорозрядна електронна гармата для плавлення металів

### Виконав:

студент IV курсу, гр. ДЕ-51

Мокрицький Ян Артемович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник професор д.т.н. Мельник І.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

### Консультанти:

Нормоконтроль доцент к.т.н. Чадюк В.О.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному  
проекті немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних  
посилань.

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Київ – 2019

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет                    Е л е к т р о н і к и  
Кафедра                    Електронні прилади та пристрої  
Освітньо-кваліфікаційний рівень: Бакалавр  
Спеціальність: 6.050802 – Електроніка  
Спеціалізація : Електронні прилади та пристрої

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри, проф.,  
Д.Т.Н.

\_\_\_\_\_Л.Д.Писаренко  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ**

на дипломний проект студенту

**Мокрицькому Яну Артемовичу**

- 1. Тема проекту «Газорозрядна електронна гармата для плавлення металів»**  
і керівник проекту **Мельник Ігор Віталійович, доцент.**  
затверджені наказом по університету від «27» травня 2019 р., № 1405-с
- 2. Строк подання студентом проекту «4» червня 2019 р.**
- 3. Вихідні дані до проекту:** потужність – 10 кВт, прискорювальна напруга – 15кВ.
- 4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:** Анотація; вступ; огляд науково-технічної літератури по схемо-технічним принципам побудови та функціонування електронної гармати; розробка схем: структурної, функціональної, електричної принципової схеми джерела живлення електромагнітної лінзи; розробка конструкторської документації на пристрій: складальне креслення на пристрій та на друковану плату; висновки; перелік використаної науково-технічної літератури.
- 5. Перелік графічного матеріалу:** Структурна, функціональна, електрична принципова схеми пристрою та складальне креслення газорозрядної електронної гармати; плакати з рисунками.
- 7. Дата видачі завдання 20.02.2019**

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Огляд науково-технічної літератури та існуючих рішень на тему газорозрядних електронних гармат	20.03.2019– 01.04.2019	
2	Розробка алгоритму функціонування системи та розробка структурної схеми	01.04.2019– 20.04.2019	
3	Огляд сучасної елементної бази	20.04.2019– 25.04.2019	
4	Розробка схем функціональної та електричної принципової	25.04.2019– 10.05.2019	
5	Розробка конструкторської документації , складального креслення	10.05.2019– 20.05.2019	
6	Оформлення пояснювальної записки. Підготовка доповіді	20.05.2019– 10.05.2019	

Студент гр. ДЕ-51

Керівник проекту

\_\_\_\_\_ **Я.А.Мокрицький**

\_\_\_\_\_ **І.В.Мельник**

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**  
**до дипломного проекту**

**на тему: «Газорозрядна електронна гармата для  
плавлення металів»**

Київ – 2019

# Зміст

РЕФЕРАТ .....	7
SUMMARY .....	8
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....	9
ВСТУП .....	10
<b>1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ТИПІВ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИХ ГАРМАТ .....</b>	<b>12</b>
1.1. ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ГАРМАТИ.....	12
1.1.1. Загальна інформація .....	12
1.1.2. Газорозрядні електронно-променеві гармати ВТР .....	17
1.2. ГАЗОРОЗРЯДНІ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ГАРМАТИ ВТР .....	20
1.2.1 Конструкція і принцип дії газорозрядних електронно-променевих гармат ВТР.....	20
1.2.2. Технічні характеристики газорозрядних електронно-променевих гармат ВТР [3] ....	22
Таблиця 1.11.2.3. Системи забезпечення газорозрядних електронно-променевих гармат ВТР .....	22
1.2.4. Принцип роботи ГРЕГ ВТР .....	24
1.2.5 Енергоблок на основі електронної гармати .....	26
1.3. ПРО ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИЙ ПЕРЕПЛАВ .....	27
1.3.1 Загальні відомості .....	27
1.3.2 Призначення електронно-променевих плавильних печей .....	28
1.3.3 Конструкція електронно-променевих плавильних печей .....	30
1.4. ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВА ПЛАВКА З ПРОМІЖНОЮ ЄМНІСТІО .....	37
1.4.1. Вимоги, що подаються до гармат для плавлення. Обґрунтування вибору типу гармати для розробки.....	39
<b>2. РОЗРОБКА ГАЗОРАЗРЯДНОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ ГАРМАТИ З ПРИАНОДНОЮ ПЛАЗМОЮ. ....</b>	<b>41</b>
2.1. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ РОЗРОБКИ ГРЕГ ДЛЯ ПЛАВЛЕННЯ.....	41
2.2. РОЗРОБКА ІОННО-ЕЛЕКТРОННОЇ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ГРЕГ .....	44
2.2.1. Розрахунок геометрії катоду.....	45
2.2.2. Розрахунок геометрії аноду.....	46
2.3. РОЗРАХУНОК МАГНІТНОЇ ЛІНЗИ. ....	48
2.4. РОЗРОБКА ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЛІНЗИ .....	51
2.5 ВАКУУМНА УСТАНОВКА ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБОТИ ГРЕГ .....	56
2.5. КОНСТРУКЦІЯ РОЗРОБЛЕНОЇ ГРЕГ .....	56
<b>3. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК І ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ ГРЕГ ДЛЯ ПЛАВЛЕННЯ МЕТАЛІВ .....</b>	<b>58</b>

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ГРЕГ. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА	
ДОСЛІДЖЕНЬ .....	58
3.2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРЕГ .....	60
3.2.1. Оптичні характеристики .....	60
3.2.2. Вольт-амперні характеристики .....	60
3.2.3. ККД гармати.....	61
3.2.4. Вимірювання характеристик джерела живлення лінзи.....	61
3.3. ПОХИБКИ ВИМІРЮВАНЬ.....	62
3.3.1. Загальні положення .....	62
3.3.2. Похибки вимірювання ВАХ ГРЕГ.....	68
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>71</b>
<b>ЛІТЕРАТУРА.....</b>	<b>72</b>

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

## Реферат

Пояснювальна записка виконана на\_\_листах і включає\_\_ілюстрацій та \_\_використаних джерел.

Ключові слова: газорозрядна електронна гармата, високовольтний тліючий розряд, прианодна плазма, електронно-променева плавка, енергетичні характеристики, конструкція, магнітна лінза, струмопроходження, регулювання тиску, плавлення, холодний катод, газове середовище.

Ціллю роботи була розробка газорозрядної електронної гармати на основі висовольтного тліючого розряду з прианодною плазмою, що призначена для плавлення металів. Розглянуті основні принципи електронно-променевих плавильних установок, представлені результати розробки та дослідження ГРЕГ, що формує електронний пучок потужністю до 10 кВт при прискорюючій напрузі до 15 кВ та робочому тиску в розрядній камері до 12 Па. К.к.д., визначений калометричним методом склав не менше 65%. Розроблена електрична схема блока живлення магнітної лінзи, що допускає віхилення струму не більше 1%. Описана система живлення та керування ГРЕГ.

Створено дослідний зразок ГРЕГ, призначений для впровадження його у виробництво.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Summary

The explanatory note is made on\_\_pages and includes\_\_illustrations and \_\_used sources.

Keywords: gas discharge electron gun, high-voltage glow discharge, near-anode plasma, energy characteristics, design, magnetic lens, conduction, pressure control, melting, cold cathode, gaseous medium.

The aim of the work was to develop a gas-discharge electron gun based on a high-voltage glow discharge with an anode plasma, which is intended for melting metals. The basic principles of electron-beam smelting are considered, the results of Greg's development and research are presented, which forms a square-beam with a power up to 10 kW at an accelerating voltage up to 15 kV and an operating pressure in the discharge chamber up to 12 Pa. The efficiency determined by the calorimetric method was not less than 65%. The electrical circuit of the power supply unit of the magnetic lens has been developed; it allows for a current of at most 1%. The described power supply and control system Greg.

Created a prototype of Greg, designed to introduce it into production.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Перелік умовних позначень, скорочень і термінів

ВТР – високовольтний тліючий розряд;

ГРЕГ – газорозрядна електронна гармата;

ЕПП – електронно-променева плавка;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ВАХ – вольт-амперна характеристика;

ЕПУ – електронно-променева установка.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Вступ

За останні десятиріччя сформувалась самостійна науково-технічна область - електронно-променева технологія. В цій області електронні промені безпосередньо використовуються для здійснення технологічних процесів. Можливі застосування електронно-променевої технологій поширюються від отримання субмікроскопічних структур в мікроелектроніці до виплавки великих зливків в металургії. це пов'язано з широкими можливостями та характерними перевагами електронного променя як технологічного інструменту. Можна виділити наступні характерні особливості електронно-променевої технології:

- процес обробки проходить в вакуумі, що виключає потрапляння в область обробки різних забруднювачів;
- діаметр променя може досягати дуже малої величини (долей мікрон), що дозволяє вести прецизійну обробку;
- щільність енергії в пучку може досягати  $10^8 \div 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>, що дозволяє обробляти найбільш тугоплавкі матеріали;
- легкість та безінерційність керування електронним променем дозволяє здійснювати автоматизацію та програмування майже усіх технологічних процесів;
- універсальність використання електронного променя, що полягає в можливості проведення самих різних технологічних операцій;
- висока продуктивність процесів та великий к.к.д.

Для виконання технологічних операцій створена велика кількість різноманітних установок, як спеціалізованих, так і універсальних. Основним вузлом технологічної установки є електронно-променева гармата, що створює електронний промінь та керує його параметрами.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В дійсний час розроблено багато різних типів технологічних електронно-променевих гармат. Найбільше розповсюдження отримали термокатодні гармати, що базуються на електронній оптиці Пірса, довгофокусні гармати для отримання променя мінімального діаметра, гармати з кільцевим потоком електронів та інші. Електронні гармати з термокатадами потребують для нормальної їх роботи утворення вакууму не нижче ніж  $10^{-2}$  Па. Однак більшість технологічних операцій, що виконуються електронним променем, можна виконувати при більш низькому вакуумі, а такі операції як обробка і отримання сплавів легколетючими компонентами, синтез тугоплавких з'єднань і т. п. можуть проводитися лише при підвищеному тиску. Крім того застосування термокатодних гармат зустрічає певні труднощі, пов'язані з високою робочою температурою катода і складністю умов його роботи. В зв'язку з цим являє практичний інтерес використання в технологічних установках електронних гармат з холодним катодом, що є більш стійкими до несприятливих вакуумних умов. Одними з таких гармат є газорозрядні електронні гармати (ГРЕГ) з прианодною плазмою.

В цьому дипломному проекті розглядаються питання, пов'язані з розробкою та дослідженнями ГРЕГ для плавлення металів. В першій главі дано огляд існуючих типів електронно-променевих гармат і обгрунтовано вибор ГРЕГ для плавлення металів. Друга та третя глава присвячені питанням розрахунку параметрів гармати та дослідженням енергетичних та електронно-оптичних характеристик.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

# 1. Огляд існуючих типів електронно-променевих гармат

## 1.1. Електронно-променеві гармати

### 1.1.1. Загальна інформація

Метод використання високовольтного тліючого розряду для створення електронних гармат з холодним катодом відомий вже понад три десятиліття. Такі електронні гармати володіють серйозними перевагами – надійністю, простотою виготовлення і великим експлуатаційним ресурсом (особливо у складних вакуумних умовах), завдяки використанню технології високовольтного тліючого розряду стало можливим реалізувати технології, недоступні для традиційних електронних гармат, робота яких базується на методі вакуумної дуги, та чутливо знизити витрати на створення і експлуатацію електронно-променевих установок.

В таких гарматах (рис. 1.1.) використовується щільний розряд, що горить, при малому значенні добутку тиску на відстань між електродами  $D \times d$ . В такому розряді напруга горіння зростає зі збільшенням струму. При постійній силі струму напруга горіння зменшується із зростанням  $p \times d$ , розряд заповнює весь перетин разрядного проміжку.

За областю катодного падіння є плазма негативного світіння, різко обмежена з боку катода. В області, укладеної між катодом і межею плазми, відбувається направлений рух електронів і іонів. Електричне поле в ній визначається доданою напругою, положенням кордону плазми і просторовим зарядом позитивних іонів, емітуємих плазмою. Емісія електронів з поверхні холодного катода відбувається в результаті бомбардування його поверхні потоком іонів і швидких нейтральних атомів, що утворюються при перезарядці прямуючих до катода іонів з плазми.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для забезпечення необхідної щільності струму в пучку вимагається компресія електронного потоку, емітуємого холодним катодом. Тому в ГРЕГ з прианодною плазмою звичайно використовується увігнутий катод.

Прианодна плазма, що поставляє іони на катод, утворюється в результаті іонізації газу електронами з катода, а також електронами, розсіяними на молекулах газу і відбитими від стінок аноду. Потенціал плазми несуттєво відрізняється від потенціалу аноду, внаслідок чого її межа в області катодного падіння являє собою прозорий анод, конфігурація якого сильно залежить від форми катода.

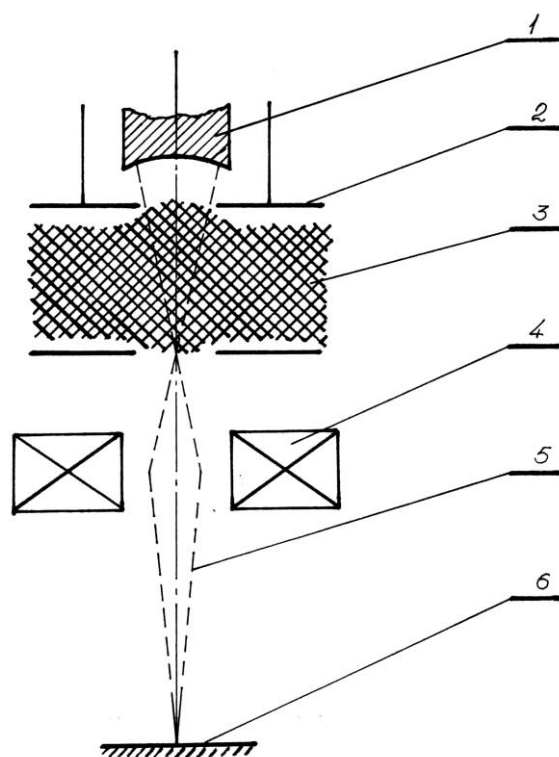


Рис. 1.1. Модель гармати на основі ВТР з прианодною плазмою.

1 - холодний катод; 2 - анод; 3 - плазма; 4 - магнітна лінза; 5 - електронний пучок; 6 - зразок.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В якості матеріалу холодного катоду використовуються чисті метали, сплави або металокераміка. Внаслідок невеликої величини коефіцієнта іонно-електронної емісії холодного катоду щільність струму емісії не перевищує  $0,1 \text{ а/см}^2$ . Величина струмів, що забезпечуються гарматами з такими катодами, складає сотні міліампер при прискорюючих напругах до  $10 \div 15 \text{ кВ}$ . На рис. 1.2. показані типові вольт-амперні характеристики гармати, що формує електронний пучок з цяточним фокусом. Загальна потужність цих гармат не перевищує  $5 \div 15 \text{ кВт}$ , питома потужність променя біля  $105 \text{ Вт/см}^2$ , ККД гармат складає  $60 \div 80\%$  [1]. Кут сходимості електронних пучків, що формуються гарматами з розвиненою поверхнею катоду, складає біля  $10^{-1}$  рад. Транспортування таких пучків з гармати в технологічну камеру зумовлює застосування для їх фокусування несиметричних магнітних лінз, що забезпечують отримання довгофокусних пучків. При цьому можливо магнітне відхилення пучків в технологічній камері на кут до  $180^0$ .

Управління режимом роботи гармати з природної плазмою може здійснюватися зміною прискорюючої напруги або щільності плазми. Останнє робиться або регулюванням тиску в гарматі, або електрично, з допомогою допоміжного розряду, для чого в плазмі розташовують керуючий електрод, що є невисоким позитивним або негативним потенціалом відносно аноду.

Газорозрядні електронно-променеві гармати на основі високовольтного розряду з прианодною плазмою відрізняються такими перевагами, як можливість працювати в середньому та низькому вакуумі, нечутливість до складу газового середовища, надійність і довговічність холодного катоду, можливість формування профільних пучків (здійснюється зміною конфігурації катоду), гнучкість управління, порівняльна простота виготовлення.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

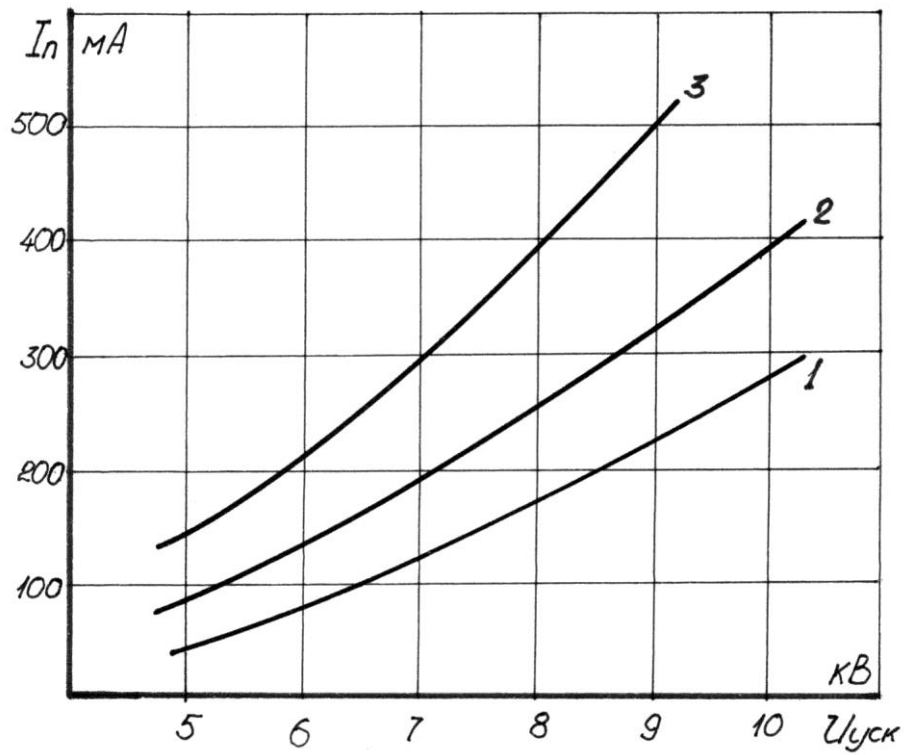


Рис. 1.2. Вольт-амперні характеристики ГРЕГ при різних тисках

1 - 3 Па; 2 - 5 Па; 3 - 10 Па. Газ - повітря.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

При бомбардуванні поверхні катода іонами плазми, яка виникає у високовольтному тліючому розряді між катодом і анодом, у газорозрядних електронно-променевих гарматах відбувається емісія електронів. Завдяки сферичній поверхні катода і конструкції анодного вузла відбувається початкове формування електронного пучка. Для фокусування променя на поверхні, що нагрівається і подальшого переміщення по ній із заданою траєкторією і частотою , використовується фокусуюча і відхиляюча система, яку складають електромагнітні лінзи.

Головні переваги газорозрядних електронно-променевих гармат:

- відсутність необхідності використання спеціальних високовакуумних насосів для створення високого вакууму у робочій камері електронної гармати. Оптимальний діапазон тисків роботи газорозрядної електронно-променевої гармати 10 ... 0,01 Па;

- невеликий вплив на роботу гармати зміни тиску у технологічній камері , та слабка чутливість до парів і навіть бризок металів під час ведення процесу плавки, завдяки чому підтримується висока якість плавки газонасиченої шихти активних металів (губчастого титану);

- Простота конструкції , висока надійність, невелика вага , компактні габаритні розміри, простота в експлуатації;

- строк служби катода до 1000 годин;

- завдяки простоті конструкції і використанню доступних компонентів створення і обслуговування гармати не є дорогим.

У наш час газорозрядні електронно-променеві гармати успішно експлуатуються в Україні, Росії, Китаї, країнах Європи та США для зварювання, нанесення покриттів, виготовлення складних деталей та переплавки тугоплавких матеріалів, таких як титан, ніобій, тантал та ін [2].

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 1.1.2. Газорозрядні електронно-променеві гармати ВТР

На рис.1.3 представлені газорозрядні електронно-променеві гармати ВТР.



Рис. 1.3. Газорозрядні електронно-променеві гармати ВТР-100 (100 кВт), ВТР-300 (300 кВт) і ВТР-450 (450 кВт) .

На протязі багатьох років використання ГРЕГ ВТР відбувалося дослідження їх характеристик в різноманітних промислових умовах, завдяки чому були визначені можливості для вдосконалення електронних гармат з метою покращення їх технологічних характеристик і комерційної привабливості.

Основними напрямками дослідних і конструкторських робіт стали покращення стабільності роботи газорозрядних електронно-променевих гармат в умовах динамічної зміни залишкового тиску в робочій камері, підвищення загальної надійності, збільшення терміну служби гармат і їх

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

окремих частин, скорочення простоїв обладнання за рахунок зниження особливих вимог до регламентного обслуговування.

Для покращення робочих показників газорозрядних електронно-променевих гармат високовольтного тліючого розряду в різних робочих умовах були проведені наступні дослідження [3]:

- аналіз роботи холодного катода при різних характеристиках високовольтного тліючого розряду в широкому діапазоні тисків і складу газового середовища;
- розрахунки і експериментальна перевірка граничних енергетичних параметрів електродних систем;
- оптимізація геометричних характеристик електродної системи і її електронно-оптичних параметрів;
- розробка системи транспортування променя від розрядної камери гармати до робочої камери з великим кутом сходження.

Технічні характеристики газорозрядних електронно-променевих гармат ВТР вказані у таблиці 1.1.

Зазвичай для виготовлення холодних катодів, які використовуються у газорозрядних електронно-променевих гарматах типу ВТР встановлюються низьколеговані сплави алюмінію, оскільки завдяки оксидній плівці вони мають відносно високий коефіцієнт іонно-електронної емісії (щільність струму більше  $0,1 \text{ A / cm}^2$ ) [4] і добре проводять тепло. Після оптимізації геометричних форм катодного вузла, до якого підведена висока негативна напруга, був досягнутий рівномірний розподіл електричного поля в ізолюючому вакуумному проміжку, завдяки чому було істотно зменшено ймовірність виникнення пробоїв. Вдосконалена конструкція відрізняється від попередніх тим, що катод кріпиться безпосередньо до нижньої площини високовольтного ізолятора без ущільнюючої прокладки, яка розділяла вакуумний простір гармати і внутрішню порожнину катода, куди подається вода для

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

охолодження системи, таким чином значно зменшена ймовірність попадання водяних парів в розрядний простір гармати.

Також було оптимізовано геометрію анодного диска, що зробило фокусну відстань електронного променя набагато стабільнішою при різних значеннях струму розряду, завдяки чому транспортування променя через анодний отвір відбувається з дуже малим значенням втрат енергії що сприяє кращому охолодженню цього вузла системи.

Правильний вибір матеріалу і геометрії холодного катода, а також порожнистого анода забезпечує необхідні граничні енергетичні параметри електродних систем газорозрядних електронно-променевих гармат типу ВТР, враховуючи максимально допустиме виділення енергії в розрядній камері гармати. Щільність потужності, яка необхідна для роботи, залежить від граничної потужності електродів при їх робочій температурі, а гранична щільність струму - від кількості енергії, яка може бути відведена від катода під час іонного бомбардування та його емісійних властивостей.

Різниця між тисками робочої камери і розрядної камери забезпечується діаметром внутрішнього просвіту променевода, за умови, що вакуумна система задовольняє потужносним потребам гармати. Завдяки цьому стало можливим використовувати лише одну відкачну систему для регулювання тиску у внутрішньому просторі газорозрядної електронно-променевої гармати разом з робочою камерою і розширювати діапазон тисків під роботи електронної гармати.

Фокусування і проходження електронного променя від розрядної камери гармати до робочої камери установки через променепровід відбувається завдяки двом фокусним лінзам.

Для відхилення електронного променя від осі руху пучка на виході з променепровода використовується система відхилення пучка, яка

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

конструктивно складається торіодальних лінз, певна кількість яких розміщена на кільцевому магніті навколо променепровода.

## **1.2. Газорозрядні електронно-променеві гармати ВТР**

### 1.2.1 Конструкція і принцип дії газорозрядних електронно-променевих гармат ВТР

Конструктивно газорозрядна електронно-променева гармата складається з наступних основних вузлів і частин [4]:

- катодний вузол (в т.ч. катод);
- анодний вузол;
- ізолятор;
- променепровід (в т.ч. дві фокусні котушки та одна відхиляюча котушка).

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

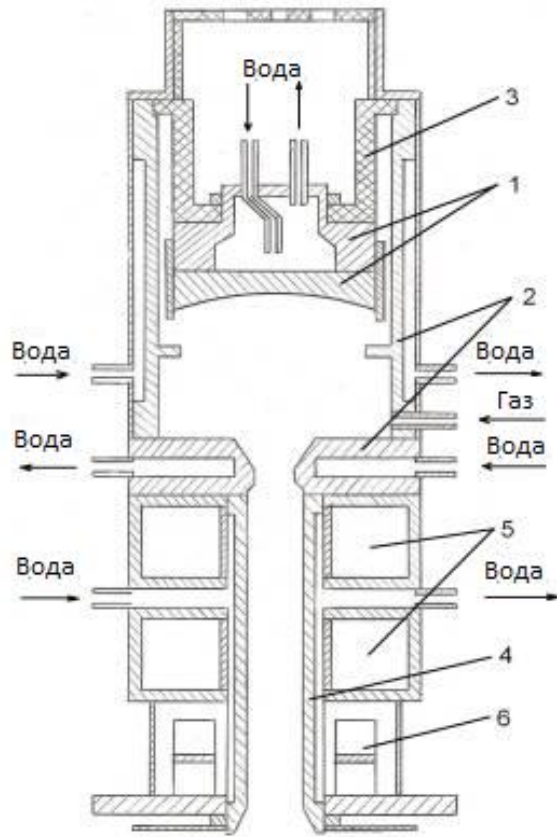


Рис. 1.4. Конструктивна схема газорозрядної електронно-променевої гармати ВТР

(1 - катодний вузол; 2 - анодний вузол; 3 - ізолятор; 4 - променепровід; 5 - фокусні котушки; 6 – відхиляюча котушка)

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

### 1.2.2. Технічні характеристики газорозрядних електронно-променевих гармат ВТР [3]

	ВТР-100	ВТР-300	ВТР-450	ВТР-600
Максимальна потужність, кВт	100	300	450	600
Границі регулювання потужності, кВт	0...100	0...300	0...450	0...600
Максимальна прискорююча напруга, кВ	30			
Кут відхилення електронного променя від осі гармати, не більше	30 <sup>0</sup>			
Діапазон робочого тиску гармати, Па	10...0,01			
Максимальна витрата робочого газу (водню технічного) при тиску 0,1 МПа, л/сек	3•10 <sup>-3</sup>	8•10 <sup>-3</sup>	11•10 <sup>-3</sup>	14•10 <sup>-3</sup>
Час роботи катода, не менше, годин	300			
Витрата води для охолодження, л/сек	0.1 5	0.5	0.7 5	1.0
Висота, мм	460	480	550	650
Маса, кг	22	40	55	80

Таблиця 1.1

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

### 1.2.3. Системи забезпечення газорозрядних електронно-променевих гармат ВТР

Для забезпечення роботи газорозрядної електронної гармати необхідна наявність ряду систем, а саме:

- високовольтне джерело живлення;
- система підготовки та подачі робочого газу;
- система управління гарматою;
- система охолодження гармати;
- контрольно-вимірювальна апаратура.

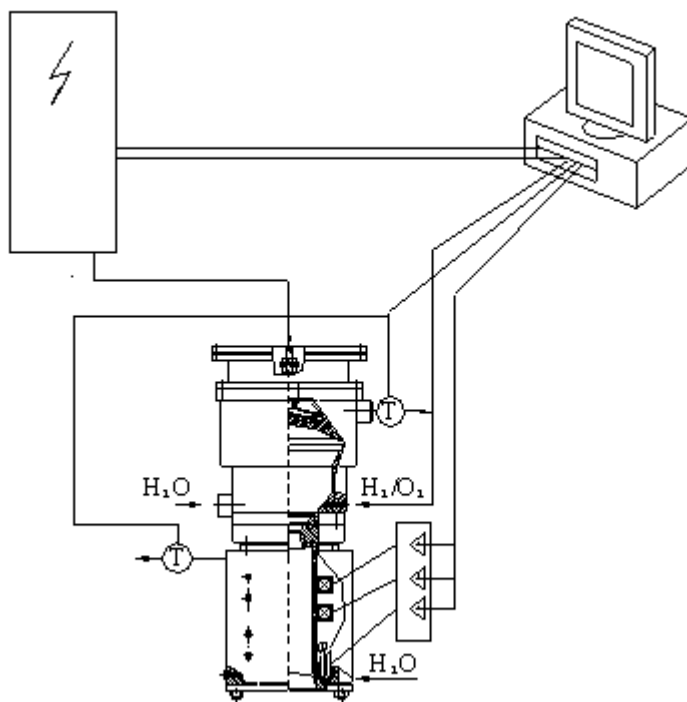


Рис. 1.5. Схема комплексу забезпечення роботи газорозрядної електронно-променевої гармати серії ВТР.

Системи підготовки і подачі робочого газу у гармату та її система охолодження комплектуються серійним промисловим обладнанням, яке призначене для виконання технічних завдань такого роду.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

В якості високовольтного джерела живлення гармати може бути використане будь-яке, що забезпечує максимальний захист від короткого замикання. Окрім цього, в разі розряду в електронній гарматі, воно має гарантувати швидке відновлення параметрів вихідного струму і напруги.

Головною задачею системи керування гарматою є управління фокусуванням і контроль траєкторій переміщення електронних променів, прийняття та обробка результатів вимірювання та контролю параметрів гармати, а також контроль витрати робочих газів (фактично - керування потужністю променя).

#### 1.2.4. Принцип роботи ГРЕГ ВТР

Робота ГРЕГ ВТР починається з подачі в її розрядну камеру робочої газової суміші, яку складають водень і кисень в певній пропорції. Після цього під дією прискорювальної напруги між катодом і анодом загоряється високовольтний тліючий розряд у плазмі, яка знаходиться в порожнині катодним та анодним вузлами та відокремлена від катода областю катодного падіння потенціалу.

Емісія електронів відбувається через бомбардування катоду позитивними іонами, які емітує плазма, прискорені полем в області катодного падіння потенціалу. У цьому ж полі електрони прискорюються і формуються у електронний пучок, форма якого залежить від площі сферичної поверхні катоду. Кросовер пучка знаходиться в площині отвору дна анода. На рис. 1.5. показаний кросовер електронного пучка під час роботи електронної гармати.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис.1.5. Кросовер електронного пучка.

Перша фокусуєча котушка створює магнітне поле, завдяки якому формується електронний промінь, який у перерізі являється циліндричним, внаслідок чого він проходить через променепровід в технологічну камеру практично без витрати енергії. Фокусування електронного променя на поверхні, яка піддається нагріву, відбувається за допомогою другої фокусуєчої котушки, а програмна розгортка променя здійснюється за допомогою відхиляючої котушки.

За допомогою зміни тиску газу в розрядній камері електронної гармати здійснюється керування струмом променя. В останніх розробках ГРЕГ ефективно управління струмом променя і стабілізація режиму роботи гармати відбувається з використанням малоінерційної системи напуску газу, в якій регулювання потоку газу здійснюється електромагнітним регулятором витрати.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 1.2.5 Енергоблок на основі електронної гармати

Для забезпечення функціонування ГРЕГ необхідний ряд систем електроживлення, охолодження, відкачування та подачі робочого газу у камери, а також системи блокування високої напруги при різних аварійних і нерозрахованих режимах та прилади вимірювання параметрів гармати під час її роботи.

Система електроживлення ГРЕГ може бути зібрана на основі будь-якої схеми регульованого або нерегульованого випрямляча з максимальним захистом і кратністю струму короткого замикання не більше 2 - 3.

З одного боку, через наявність газорозрядного проміжку в катодно-анодному вузлі гармати істотно збільшується вірогідність пробоїв, з іншого боку, завдяки малому часу відновлення електричної міцності після відключення джерела живлення дає змогу сильно зменшити тривалість паузи при автоматичному включенні повторно.

У випадку використання джерела живлення з тиристорним контактором оптимальний час паузи при автоматичному повторному включенні буде складати 5 - 10 мсек, при цьому тривалість режиму короткого замикання зазвичай не перевищує 35 мсек. Навіть при частоті пробоїв один в 1 хв. зниження середньої потужності гармати при веденні технологічного процесу не перевищує 1% [5,6].

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### **1.3. Про електронно-променевий переплав**

#### **1.3.1 Загальні відомості**

Першим, хто продемонстрував можливість плавити метал електронним променем був У.Крукс в 1879р., розплавивши платиновий катод в катодній трубці. Вперше злитки тугоплавких металів були отримані за допомогою методу електронно-променевої плавки на початку ХХ століття М. Пірані, якому в 1907 році було надано перший патент на цей винахід. Однак на практиці цей метод плавки було запроваджено в промисловому масштабі тільки в кінці 50-х років ХХ століття, коли нові конструктивні елементи з особливо чистих металів стали необхідними для задоволення зростаючої потреби у атомній та аерокосмічній техніці.

Перші електронно-променеві гармати, що входили до дослідно-промислових установок, що використовувалися для отримання високоякісних злитків тугоплавких металів та потужністю 30-50 кВт і більше, були створені в Німеччині (фірма "Геркус"), США (фірми "Стауфер", "Темескал"), і СРСР (інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона).

Причиною підвищення попиту на технологію ЕПП є дуже висока якість переплавленого металу, яку зазвичай неможливо досягти іншими способами плавки. Саме технологія ЕПП дає можливість найбільш ефективно одержати особливо чисті злитки танталу, ніобію, міді, ванадію, цирконію і багатьох інших металів.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

### 1.3.2 Призначення електронно-променевих плавильних печей

Електронно-променеві плавильні печі призначені для виробництва ультрачистих литих заготовок з хімічно активних і тугоплавких металів.

Процес ЕПП забезпечує:

1. переплавку литих і деформованих заготовок (металобрухту) і шихти хімічно активних металів будь-якого виду;
2. отримання в водоохолоджуваному мідному кристалізаторі злитків і формових виливків;
3. рафінування металу - витримку рідкого металу у проміжній ємності при низькому тиску тривалий час при заданій температурі.

Завдяки конструкції печей та відповідним технологічним режимам роботи для ЕПП можна використовувати для переплаву можна використовувати будь-які види шихти: злитки, стрижні, зварні шихтові заготовки, брикети, гранули, губчастий метал, а також різні відходи металургійних виробництв і механічної обробки.

Залежно від того, якого розміру злитки потребує виробництво, використовуються один або два горизонтальних пристрої бокової подачі шихти. Конструктивно проміжна ємність із зливним носком і кристалізатор об'єднані в єдиний технологічний модуль, завдяки чому його монтаж та демонтаж в технологічній камері не є складним, що дозволяє швидко переналагоджувати піч з одного типу та розміру литої заготовки на інший, а також спрощує обслуговування печі [7].

Проміжна ємність забезпечує процес дегазації та рафінування розплавленого металу від неметалічних включень і газових домішок, а також не допускає потрапляння шматочків нерозплавленої шихти в кристалізатор.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У печах застосовуються від 1 до 7 газорозрядних електронно-променевих гармат серії ВТР потужністю від 100 до 600 кВт. Гармати такого типу не вимагають використання індивідуальних високовакуумних насосів, та працюють в діапазоні тисків 10 ... 0,01 Па.

Для забезпечення роботи печей використовуються високовольтні джерела живлення серії ВЧП, в яких застосовано високочастотне перетворення енергії за допомогою IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor - біполярний транзистор з ізольованим затвором). Мікропроцесорне управління з застосуванням сучасних цифрових сигнальних процесорів DSP дозволяє реалізувати гнучкий алгоритм поведінки джерела при пробої в гарматі, що забезпечує безперервність процесу плавки, без застосування додаткових пристроїв дозволяє погодити роботу системи управління джерелом з центральним комп'ютерним управлінням, підвищити надійність системи управління та електронно-променевої плавильної печі в цілому [8]. Джерела такого типу компактні, конструктивно прості і можуть бути встановлені безпосередньо поряд з електронно-променевою плавильною піччю, що дозволяє скоротити витрати на електроенергію і загальнобудівельні роботи.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 1.3.3 Конструкція електронно-променевої плавильної печі

Конструктивно будь-яка електронно-променева установка складається з наступних основних частин (рис. 1.6) :

- 1) вакуумна камера;
- 2) електронно-променеві гармати;
- 3) джерело високої напруги і система управління розгортки променів;
- 4) вакуумна система;
- 5) система завантаження сплавлюваної заготовки, яка подається в зону плавки;
- 6) технологічне оснащення установки, що у випадку прямого переплаву включає в себе кристалізатор з піддоном;
- 7) механізм витягування злитка.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

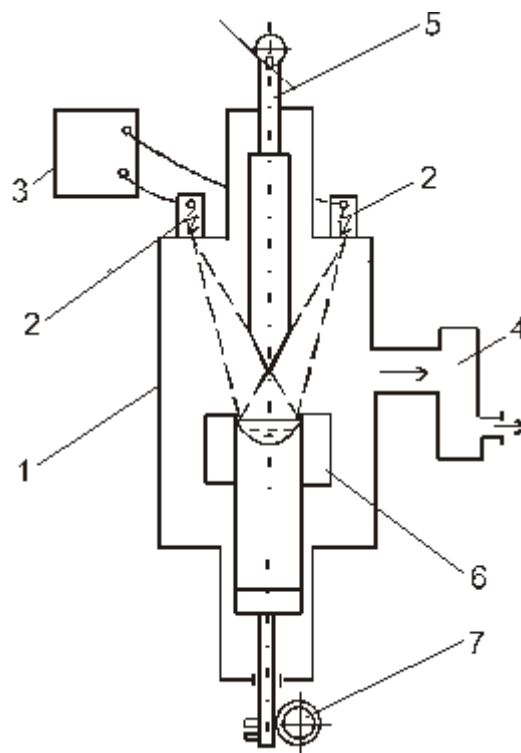


Рис. 1.6. Принципова схема електронно-променевої установки.

Оскільки температура рідкого металу дуже висока і відбувається інтенсивне випромінювання тепла, для охолодження та захисту від перегріву стінок вакуумної камери і технологічних вузлів установки використовується система охолодження проточною водою.

При бомбардуванні прискореними електронами заготовка нагрівається та плавиться, а розплавлений метал стікає у водоохолоджуваний мідний кристалізатор, де створюється ванна рідкого металу, що підігрівається електронними променями. Під час плавлення заготовки здійснюється витягування злитка з кристалізатора з відповідною швидкістю, яка забезпечує підтримання постійного рівня рідкої ванни в кристалізаторі.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Важливою складовою частиною електронно-променевої установки є вакуумна система, яка напряму впливає на ефективність роботи електронно-променевих гармат.

Структурна схема вакуумної установки показана на рис. 1.7.

В склад установки входять газорозрядна електронна гармата для плавлення, автоматичний регулятор струму, форвакуумний та дифузійний насоси, високовольтне джерело живлення, вакуумметри, вентилі.

Камера електронної гармати та технологічна камера відкачуються до тисків  $4 \text{ Па}$  та  $10^{-2} \text{ Па}$  відповідно.

Датчиком в колі зворотнього зв'язку автоматичної системи керування струмом слугує опір  $R_d$ . Тиск газу в камері гармати та технологічній камері вимірюються термопарними вакуумметрами.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

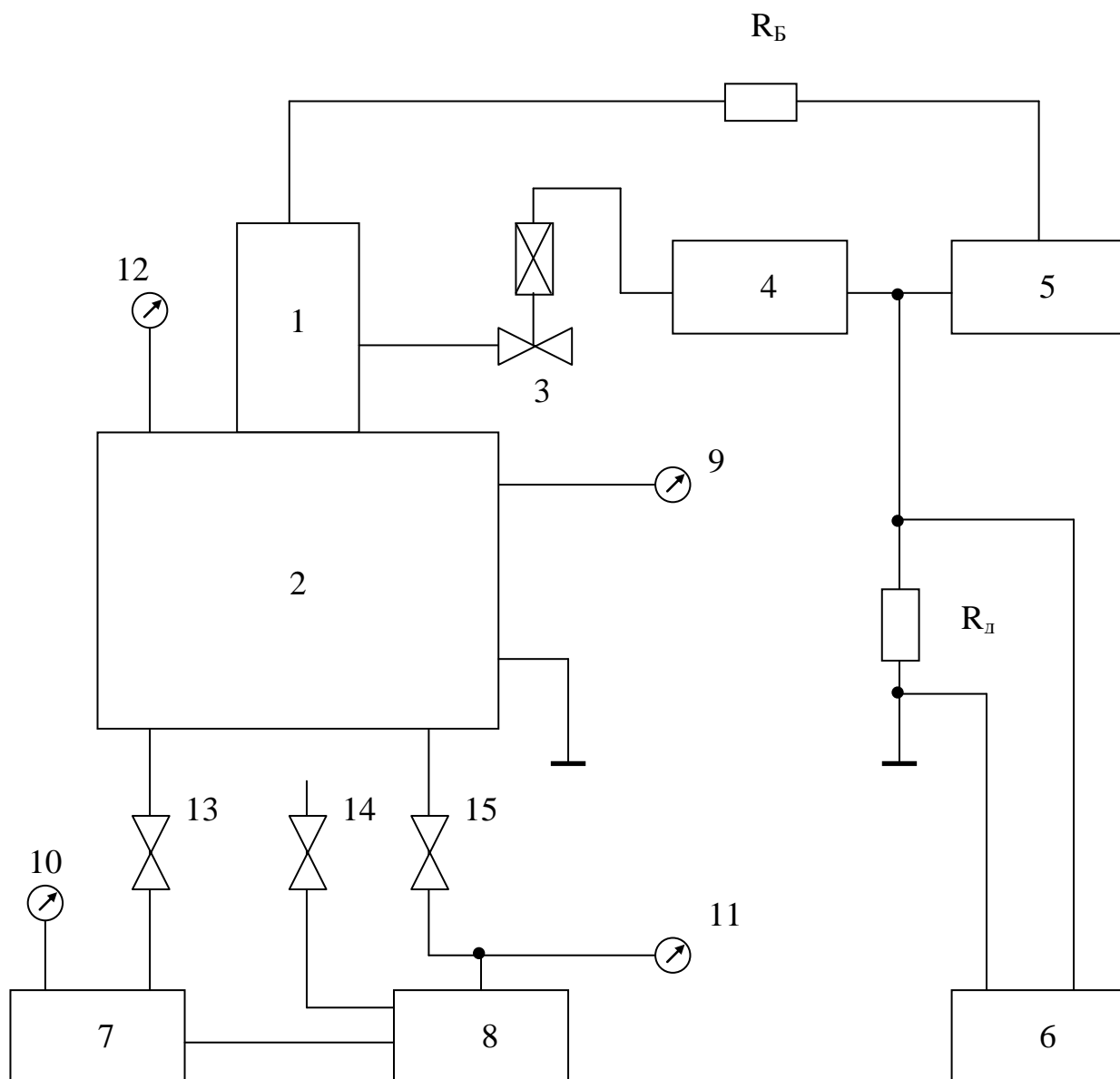


Рис. 1.7. Схема вакуумної установки.

1 - ГРЕГ; 2 - технологічна камера; 3 - натікач; 4 - електронний блок; 5 - високовольне джерело живлення; 6 - осцилограф С8-13; 7 - дифузійний насос; 8 - форвакуумний насос; 9÷12 - вакуумметри; 13÷15 - вентилі.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Електронні плавильні установки мають різні конструкції випромінювальних пристроїв. Використовуються печі з гарматами на основі кільцевого катоду, з радіальною гарматою або аксіальною гарматою. У гарматах з кільцевим катодом (рис. 1.8, а) електрони емітуються за допомогою кільця з вольфрамового дроту, через яке пропускають змінний струм. Потік електронів, що випромінюється, формують за допомогою фокуруючої системи в електронний промінь, який за допомогою відхиляючої системи направляють на поверхню металу, що переплавляється і на рідку ванну в кристалізаторі для недопущення її затвердіння. Установки з кільцевим катодом мають декілька переваг: вони прості у виготовленні, мають меншу (на 10-15%) питому витрату електроенергії і досить високий к.к.д. Однак вони не отримали широкого поширення на виробництві через те, що катод близько розташований до поверхні нагріваемого металу, оскільки по причині підвищеного газовиділення виникає більша вірогідність перетворення тліючого розряду в дуговий, що виводить катод з ладу, а також потрапляння на катод парів рідкого металу значно знижує його емісійну здатність.

В наш час все більше застосування в металургічній промисловості знаходять ГРЕГ високовольтного тліючого розряду з холодним катодом, в процес емісії електронів забезпечується завдяки бомбардуванню поверхні катоду позитивними іонами плазми. Перевагою цих гармат є простота та надійність конструкції і відсутність необхідності роботи у високому вакуумі – гармати такого типу працюють в діапазоні тисків 0,1 - 10 Па.

Переважною властивістю нагріву за допомогою електронно-променевих гармат є можливість незалежно від процесу плавлення плавно і в широких межах змінювати потужність і конфігурацію зони нагріву металу.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Класичним способом ЕПП являється крапельна плавка, при якій шихта металу переплавляється безпосередньо в мідний водоохолоджуваній кристалізатор, де після цього метал охолоджується і твердіє.

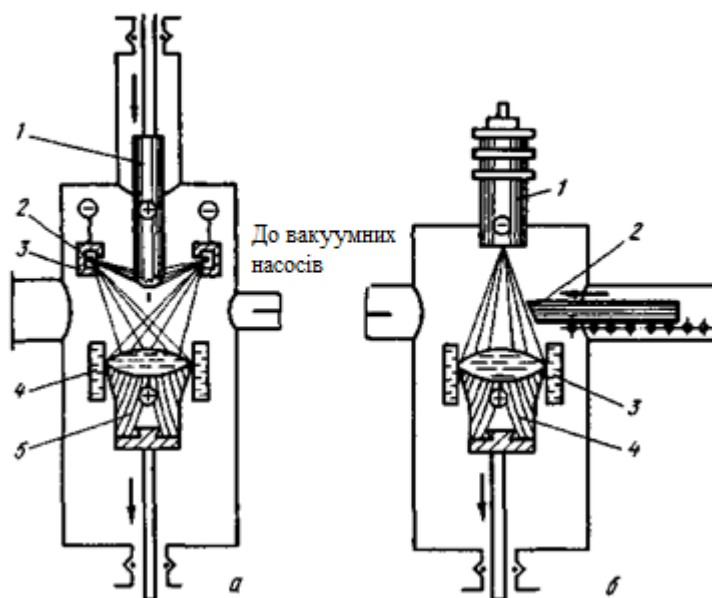


Рис.1.8. Схема електронно-променевої гармати.

а – з кільцевим катодом (1- використовуваний електрод , 2 – кільцевий катод,

3 – екран, 4 – водоохолоджуваній кристалізатор, 5 – витягуваний злиток)

б – з аксіальною гарматою (1 – аксіальна гармата, 2 - переплавлюваний метал,

3 – водоохолоджуваній кристалізатор, 4 – витягуваний злиток)

Для перешкоджання попадання газів у камеру формування електронного променя використовується відмежування катода від робочої камери вузькою щілиною анода, завдяки чому підвищується термін служби катода. Ще більша відмежованість ГРЕГ від робочої камери ЕПП досягнута

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

в печах на основі аксіальних гармат, в яких електронний промінь формується конусоподібним (рис. 1.8,б).

У таких гарматах робоча поверхня катода має вигляд увігнутої лінзи, завдяки чому сходження електронного пучка відбувається самостійно. Поворот променя забезпечується роботою електромагнітної системи відхилення, яка розташована на виході з променепровода. У промислових печах на основі аксіальних гармат довжина електронного променя може досягати 1-2 м [9].

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

#### 1.4. Електронно-променева плавка з проміжною ємністю

Значний прогрес у розвитку був досягнутий в 80-х роках минулого століття, коли промислове застосування знайшли технологічні схеми електронно-променевої плавки з проміжною ємністю (рис. 1.9).

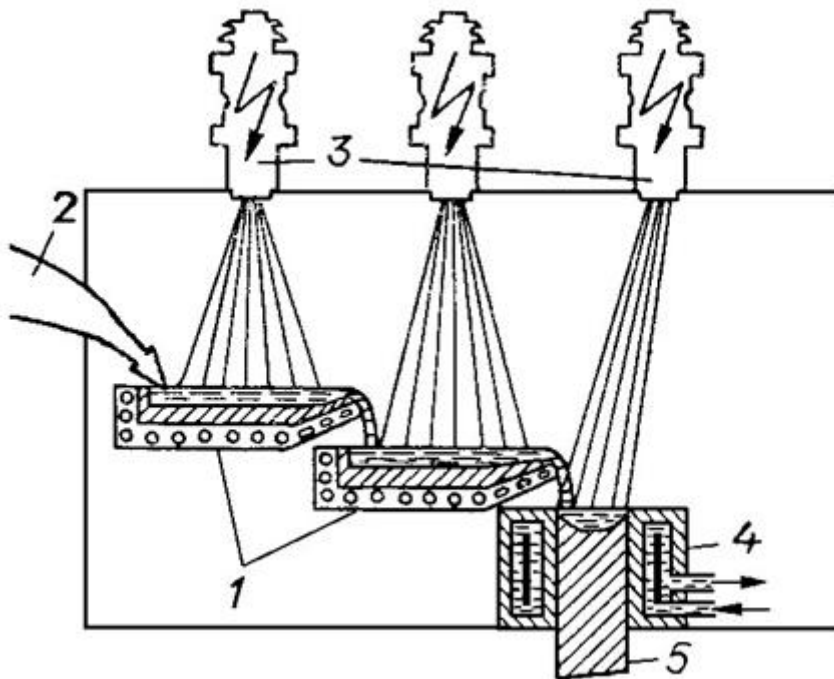


Рис. 1.9. Схема електронно-променевої установки.

1 - проміжні ємності; 2 - вихідна шихта; 3 - електронні гармати; 4 - водоохолоджуваний кристалізатор; 5 - витягуваний злиток.

За данним способом плавлення металу спочатку здійснюється в окрему ємність, яка називається проміжною. Відстоюючись в ній при заданій температурі з металом відбувається рафінація і видалення домішок, а потім рідкий метал зливають в водоохолоджуваний кристалізатор, де відбувається формування злитка. Завдяки проміжній ємності процеси плавлення, рафінування і затвердіння відбуваються окремо і практично повністю незалежні один від одного.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Завдяки цьому з'явилася можливість більш повно використовувати гнучкість і керованість ГРЕГ ,а також керувати процесами кристалізації злитка, використовуючи температурні поля необхідного профілю. Ще одною перевагою електронно-променевого переплаву з проміжною ємністю є те, що в якості шихти може використовуватися майже будь-яка форма заготовки. Через свої переваги технологія ЕПП з проміжною ємністю широко застосовується на підприємствах при виплавці титанових злитків.

В наш час основним вектором розвитку обладнання для електронно-променевої плавки є робота над створенням великих багатофункціональних ЕПУ мегаватного класу, які розраховані на створення великогабаритних злитків вагою більше 8 тонн. ЕПУ останнього покоління дають змогу за рахунок досить простих операцій заміни технологічного обладнання застосовувати електронно-променеву установку для самих різноманітних операцій.

З появою можливості програмного сканування електронним променем поверхні металевої ванни форми кристалізатора стало можливим робити злитки різної, навіть складної форми.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.4.1. Вимоги, що подаються до гармат для плавлення. Обґрунтування вибору типу гармати для розробки.

Якість злитків, одержуваних шляхом електронно-променевого плавлення в вакуумі, в значній мірі залежать від типу і конструкції гармати. Вимоги до електронної гармати для плавлення визначаються особливостями застосовуваного технологічного процесу і умовами її роботи. Крім того, на характеристики гармати виявляють вплив властивості матеріалів, що плавляться, необхідна швидкість плавлення, кількість речовини, переплавленої за один цикл, вхідна форма речовини, що плавиться, а також ряд інших чинників процесу плавлення у вакуумі.

Виходячи з цього, сформульовані наступні вимоги, яким повинна задовольняти електронна гармата для плавлення :

- Гармата повинна тривко працювати в різноманітних газових середовищах, включаючи активні, в діапазоні тисків в робочій технологічній камері десятки – тисячні частки Па;
- Гармата повинна забезпечувати високу стабільність енергетичних і геометричних параметрів електронного пучку;
- Гармата повинна забезпечувати достатню загальну і питому потужність електронного пучку в зоні матеріалу, що плавиться;
- Гармата повинна мати достатньо великий термін служби без заміни катоду, в перебігу якого вона в стані забезпечити в заданих межах режими плавлення;
- При роботі гармати не повинні утворюватися летючі речовини, здатні забруднити метал, або повинні бути прийняті спеціальні заходи, що ускладнять їхнє проникнення в технологічну камеру, а також матеріалу, що плавиться, в гармату;
- Гармата повинна займати по можливості мінімальний робочий простір в камері устаткування і бути зручною в роботі;

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Гармата повинна працювати при понижених прискорюючих напругах, що не перевищують застосовувані в промислових устаткуваннях для плавлення.

З наведеного вище огляду цим вимогам найбільш повно може задовольняти ГРЕГ на основі ВТР з прианодною плазмою.

Застосування холодного катоду в таких гарматах забезпечує можливість їхньої роботи в різноманітних газових середовищах, включаючи кисневу. Гармати відрізняються простотою конструкції, більшим терміном служби без заміни катоду, широким діапазоном робочих струмів і напруг в діапазоні тисків одиниці – сотні Па.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

## 2. Розробка газоразрядної електронної гармати з прианодною плазмою.

### 2.1. Загальні питання розробки ГРЕГ для плавлення.

Створення ГРЕГ для плавлення металів полягає в розробці іонно-електронної оптичної системи, що забезпечує променеву форму горіння ВТР і мінімальну залежність геометрії електронного пучка від параметрів розряду. Крім того, система, що розробляється, повинна забезпечувати необхідну загальну і питому потужність в пучку, що залежить від режимів роботи гармати, а також геометрії і матеріалів її електродів. При рішенні цих питань ГРЕГ з прианодною плазмою можна розглядати як нееквіпотенціальну систему з певними параметрами, граничні значення яких визначаються фізичними кордонами існування ВТР.

Для отримання достатньої сили струму електронів використовується тиск газу у разрядному проміжку вище 0,1 Па, що забезпечує утворення інтенсивної прианодної плазми. Умови її існування і визначають співвідношення між тиском і геометричними розмірами гармати. Верхній кордон тиску визначається конструкцією гармати, щільністю струму розряду і звичайно не перевищує  $10 \div 100$  Па.

Щільність струму розряду в ГРЕГ обмежується емісійними властивостями холодного катоду, відводимою від електродів потужністю і виникненням східцевої іонізації, що може призвести до нестійкості розряду. В стаціонарному режимі вона не перевищує  $0,1 \text{ A/cm}^2$  [10].

Щільність струму на поверхні холодного катоду залежить від геометрії електродної системи і при увігнутому катоді складає десятки – сотні  $\text{mA/cm}^2$ , тому достатньо більші струми можна отримати лише з розвиненої поверхні катоду. Параметри пучка в фокусі визначаються

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

геометрією електродної системи гармати, тиском газу і прискорюючою напругою.

Явища, що протікають в газовому розряді, складні і багатопланові, багато з них сильно залежать від умов роботи гармати, якості матеріалів, технології і ін. Тому розробка ГРЕГ проводилася шляхом поєднання розрахункової і експериментальної роботи. При розрахунку гармати була задана загальна потужність. Рід газу визначається вимогами технологічного процесу. Основною вимогою при виборі матеріалу катоду є високий коефіцієнт іонно-електронної емісії.

Розрахунковим шляхом визначаються основні геометричні розміри електродів (катоду і аноду) при заданому тиску, струмі і напрузі розряду, потужності на електродах і ККД, виходячи з загальної потужності розряду. Основою розрахунку є рівняння, що висловлюють зв'язок між основними характеристиками гармати (електричними, енергетичними, експлуатаційними). Ефективна площа катоду визначається, виходячи з заданої потужності пучку і допустимої щільності струму для заданої форми розряду і з урахуванням необхідної конфігурації електронного пучку. Радіус увігнутого катоду і конфігурація аноду визначається в залежності від типу іонно-електронної оптичної системи гармати. Розміри аноду знаходяться, виходячи з розмірів катоду і ізолюючого проміжку.

На підставі отриманих розрахункових даних розробляється і виготовляється експериментальний макет ГРЕГ, на якому в процесі доводки уточнюються всі параметри і режими роботи ГРЕГ, а також відпрацьовується остаточна її конструкція і тривалість в роботі. Експериментальна доводка включає:

- Створення діючого макету ГРЕГ;
- Дослідження роботи макету і визначення його основних параметрів;
- Корекція електронної системи;

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Розробка остаточного варіанту ГРЕГ і визначення її вихідних параметрів.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## **2.2. Розробка іонно-електронної оптичної системи ГРЕГ**

Схема-електронної оптичної системи, що розробляється, іонно показана на рис. 2.1. Вона повинна задовольняти двом основним вимогам:

Забезпечувати провідність пучку на відстань не менше 200÷300мм від зрізу гармати;

Профіль пучку повинен бути таким, щоб поперечний перетин променеводу забезпечував перепад тисків між гарматою і технологічною камерою приблизно на 1÷2 порядку;

Густина струму не повинна перевищувати 0.1 А/см<sup>2</sup>.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

### 2.2.1. Розрахунок геометрії катоду.

Алюмінієвий катод являє собою сферичний сегмент. На підставі вищезазначених вимог до ІЕОС вибираємо радіус сфери катоду в межах 65÷70мм. Дана межа для  $R_{сф}$  вибрана з наступних міркувань:

Емітований пучок, що формується, повинен бути достатньо довгофокусним;

Подальше збільшення радіусу сфери призводить до помітного погіршення фокусування пучку.

Для розробляемого ГРЕГ розміри катоду визначалися з умови, що щільність струму з поверхні холодного катоду складає  $0,03 \text{ А/см}^2$ , а при цьому радіус сфери взятий величиною 65мм. Тоді площа поверхні:

$$S_{em} = \frac{I}{j} = \frac{P}{Uj} = \frac{10}{15 \cdot 0.03} = 22, (2) [\text{см}^2]$$

Радіус катоду при цих умовах складе:

$$R_k = \frac{\sqrt{4\pi R^2 c \varphi S_{em} - S_{em}^2}}{2\pi R c \varphi} = \frac{\sqrt{4\pi \cdot 6,5^2 \cdot 22, (2) - 22, (2)^2}}{2\pi \cdot 6,5} = 26 \text{ [ мм ]}$$

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

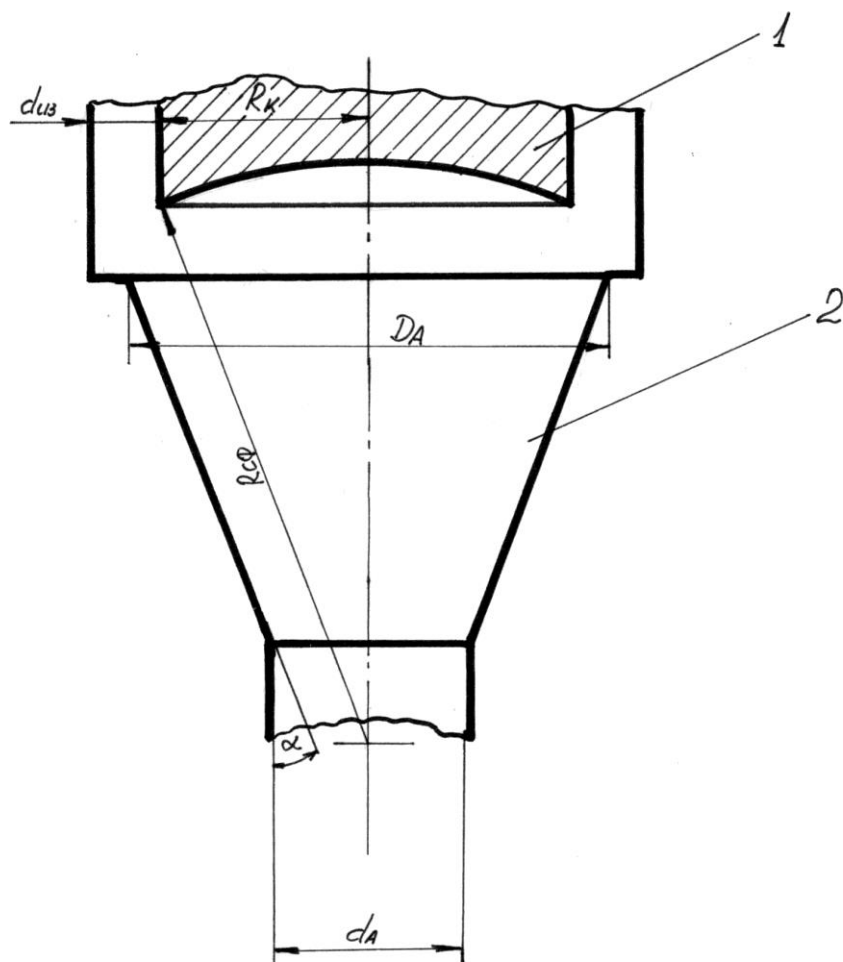


Рис. 2.1. Схема розробляємої іонно-електронної оптичної системи ГРЕГ.

1 - катод; 2 - анод.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

### 2.2.2. Розрахунок геометрії аноду.

Діаметр верхнього вікна аноду вибирається на підставі розміру катоду і проміжку, що ізолює, і забезпечення рівномірного бомбардування всієї робочої поверхні катоду:

$$D_A = 10 [\text{мм}]$$

Кут  $\alpha$  визначається по умовній траєкторії пучку (стінки аноду повинні бути паралельні до крайньої траєкторії). Кут  $\alpha$  визначається по формулі

$$\alpha = \frac{1}{2} \text{arcCos} \left[ 1 - \frac{d_k^2}{2Rc^2\varphi} \right] = \frac{1}{2} \text{ArcCos} \left[ 1 - \frac{52^2}{2 \cdot 65^2} \right] = 24^0$$

З метою підвищення якості фокусування величина куту  $\alpha$  вибирається менше розрахункової:

$$\alpha = 20^0.$$

Діаметр нижнього вікна визначається, виходячи з умов максимальної розв'язки по тиску з урахуванням  $D_A$  і  $\alpha$ :

$$d_A = 24 [\text{мм}]$$

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 2.3. Розрахунок магнітної лінзи.

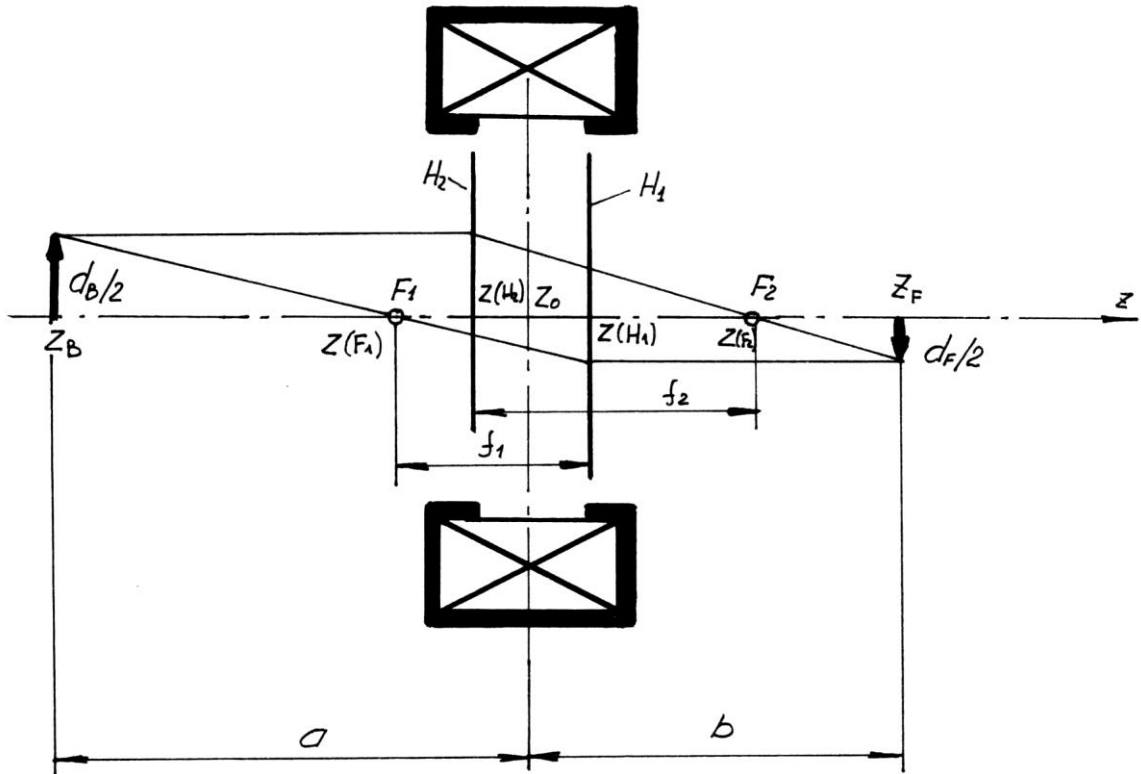


Рис. 2.2. Створення електронно-оптичного зображення магнітною лінзою.

Об'єкт  $d_B/2$  при  $Z = Z_B$ ; зображення  $d_F/2$  при  $Z = Z_F$ ;  $F_1$  - фокус з боку об'єкта з фокусною відстанню  $f_1 = Z(F_1) + \Delta Z_1$ ;  $F_2$  - фокус з боку зображення з фокусною відстанню  $f_2 = Z(F_2) + \Delta Z_2$ ;  $H_1, H_2$  - головні площини (значення  $Z$  - відстані від площини симетрії  $Z_0=0$ ) [14].

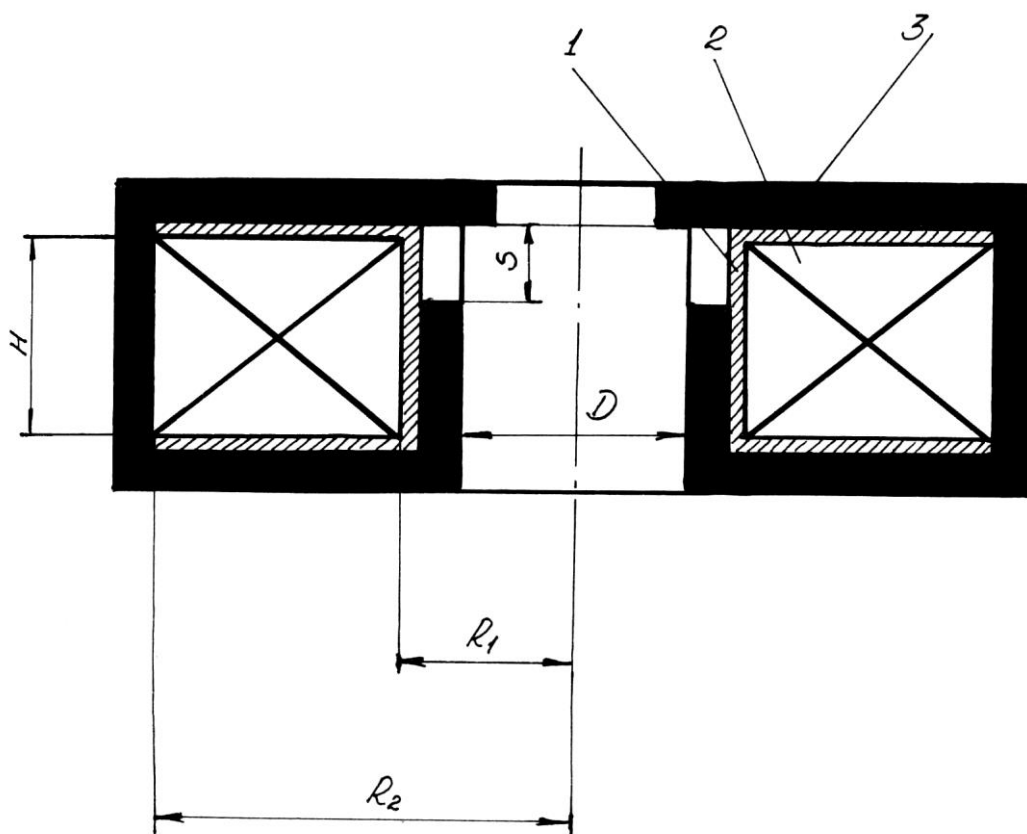


Рис. 2.3. Схема розраховуємої магнітної лінзи.

$S$  - ширина зазору - 12 мм;  $D$  - внутрішній діаметр магнітопроводу - 24 мм;  $H$  - ширина намотки - 27 мм;  $R_1$  - внутрішній радіус намотки - 20 мм;  $R_2$  - зовнішній радіус намотки - 45мм.

1 - каркас катушки; 2 - дріт; 3 - магнітопровід.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР.6.050802.051.015 ПЗ

Арк.

49

### Параметри магнітної лінзи

$P = 100\text{кВт}$  – вхідна потужність

$R_{\text{вн}} = 64\text{мм}$  – внутрішній радіус котушки

$R_{\text{зовн}} = 114\text{мм}$  – зовнішній радіус котушки

$D = 0.68\text{мм}$  – довжина дроту в діаметрі з ізоляцією

$D = 0.63\text{мм}$  – довжина дроту в діаметрі без ізоляції

$J = 2\text{ А/мм}^2$  – допустимий струм для дроту (мідь)

$H = 25\text{мм}$  – висота намотки

$R_{1\text{м пров.}} = 0.0690\text{Ом}$  – Опір провідника

$I_{\text{мах навант}} = 0.62\text{ А}$  – Струм навантаження

### Розрахунок параметрів по вхідним даним

$N = \frac{25 \cdot 30}{0.68} = 110$  – кількість витків

$L = \frac{114+64}{2} \cdot 3.14 = 282,2\text{ мм}$  – середня довжина витка

$L_{\text{обм}} = 110 \cdot 282,8 = 311\text{м}$  – довжина обмотки

$R_{\text{обм.}} = 311\text{м} \cdot 0.0690\text{Ом} = 21.40\text{Ом}$  – опір обмотки

$U = 21.4 \cdot 0.62 = 13,26\text{В}$  – Напруга системи

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

## 2.4. Розробка джерела живлення електромагнітної лінзи

Висока якість та повторюємість характеристик параметрів залежить від стабільності параметрів електронних пучків, формуємих газорозрядними електронно-променевими випарниками. Коливання струму електромагнітної лінзи, яке може відбуватись внаслідок коливання напруги в силовій мережі, зміні опору обмотки лінзи при її нагріванні, пульсацій електричної напруги, що подається на обмотку лінзи та ін., викликає зміну положення фокуса електронного пучка, а отже і густини потужності пучка на поверхні матеріалу, що плавиться. Із залежності відносної зміни положення фокуса пучка від відносної зміни струму катушки та прискорюючої напруги на гарматі

$$\frac{\Delta I_{\phi}}{I_{\phi}} = -\frac{\Delta u_{\text{уск}}}{u_{\text{уск}}} + \frac{\Delta I_{\text{л}}}{I_{\text{л}}}$$

слідуює, що при коливанні прискорюючої напруги на  $+5 \div (-10)\%$  переміщення фокуса пучка відбувається на  $(-2,5) \div (+5)\%$ , а відхилення струму лінзи на  $10\%$  викликає зміну відносного переміщення положення фокусу пучка теж на  $10\%$ .

Виходячи з вимог до стабільності параметрів електронних гармат відхилення струму джерел живлення фокусуючих лінз від заданого значення при максимальних збуреннях, дія яких може мати місце в реальних фізичних системах не повинно перевищувати  $1\%$ .

Розроблюване джерело живлення електромагнітної лінзи повинно мати автономний характер у вигляді моноблока, з можливістю використання його на різних вакуумних установках.

Враховуючи сказане, блок живлення лінзи складається з джерела живлення мікросхем та транзисторного каскаду з постійною напругою відповідно  $\pm 15\text{В}$  та  $+10\text{В}$ , стабілізатора струму лінзи, блоку вимірювання стру-

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

му лінзи, та блоку світлової сигналізації про наявність струму в електричному колі лінзи.

Джерело живлення мікросхем та транзисторного каскаду містить в собі трансформатор, випрямляч, ємнісний фільтр та параметричний стабілізатор напруги  $\pm 15\text{В}$ . Стабілізатор струму лінзи складається з датчика струму, джерела опорної напруги, суматора сигналів, підсилювача сигналу керуючої дії та регулюючий каскад УМ. Блок вимірювання містить в собі амперметр з шунтом, а також блок світлової сигналізації, що складається з компаратора та світлодіоду.

При роботі сигнал негативного зворотного зв'язку з датчика струму поступає на інвертуючий вхід суматора, де складається з опорним сигналом, що поступає на неінвертуючий вхід суматора. Далі різниця цих сигналів підсилюється по напрузі та поступає на регулюючий каскад, який забезпечує величину струму через лінзу таку, що наближається до заданої.

В розробленій схемі джерело живлення зібрано на накальному трансформаторі ТНЗ6 з струмом допустимого навантаження  $I_{\text{н доп}} = 1,2\text{А}$ . Випрямляч виконаний по мостовій схемі на діодному мосту КЦ401А, Фільтрова ємність вибиралась з умови, що коефіцієнт пульсацій  $K_{\text{п}}$  джерела живлення регулюючого транзистору повинен бути:

$$K_{\text{п}} = \frac{H}{r_{\text{T}} \cdot C_{\text{ф}}} < 0,3$$

тоді

$$C_{\text{ф}} = \frac{H}{r_{\text{T}} \cdot K_{\text{п}}} = \frac{1200}{0,5 \cdot 0,3} = 8000\text{мф}$$

Візьмемо фільтруючу ємність  $C_{\text{ф}}=1000\text{мф}$ , що виробляється в промисловості.

Визначимо величину напруги на виході випрямляча з фільтром  $u_{\text{фвих}}$

$$U_{\text{тр.вих}} \cdot 1,4 = u_{\text{фвих}}$$

Тоді

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$u_{\text{фвих}}=12,6\text{В}\cdot 1,4=17,64\text{В}$$

Визначимо параметри стабілітронів VD2 та VD3 та баластних опорів R17, R16.

Стабілізатори, які забезпечують напругу 15В можуть бути D814D з током стабілізації 3÷30 mA. Тоді величину баластних опорів визначають із співвідношення

$$R_6 = \frac{u_{\text{вх}} - u_{\text{н}}}{I_{\text{н}} + \frac{I_{\text{ст.мак}} - I_{\text{ст.мін}}}{2}} = \frac{17,64 - 15}{10 + \frac{30 - 3}{2}} = 112,3 \text{ Ом}$$

Тоді візьмемо  $R14=R15=R_6=120 \text{ ом}$

Величину баластного опору R3 параметричного стабілізатора джерела опорної напруги визначаємо із співвідношення

$$R_3 = \frac{u_{\text{н}} - u_{\text{оп}}}{I_{\text{н}} + \frac{I_{\text{ст.мак}} - I_{\text{ст.мін}}}{2}} ;$$

$$I_{\text{ст}} = \frac{u_{\text{ст}}}{R1 + R2} ;$$

Для джерела опорної напруги вибираємо стабілітрон D814B з  $I_{\text{ст.мін}}=3\text{мА}$ ,  $I_{\text{ст.мак}}=1\text{мА}$ , тоді

$$R_3 = \frac{u_{\text{н}} - u_{\text{оп}}}{\frac{u_{\text{оп}}}{R1 + R2} + \frac{I_{\text{ст.мак}} - I_{\text{ст.мін}}}{2}} = \frac{15 - 10}{\frac{10}{(1,5 + 4,3) \cdot 10^3} + \frac{40 - 3}{2}} = 240 \text{ Ом}$$

$R1=1,5\text{К}$ ;  $R2=4,3\text{К}$

Для розрахунку параметрів безпосередньо стабілізатора струму визначимо збуджуючу дію, що можлива в реальній фізичній системі. Зміна температури лінзи  $50^{\circ}\text{C}$ , що можлива при її нагріванні в процесі роботи від внутрішніх та зовнішніх факторів, викликає зміну її струму на 20%. Врахуємо також, що при цьому може змінитись напруга в мережі на  $-10\%$ , що є максимально допустимою величиною. Допустимо, також, що за рахунок нагріву елементів стабілізатора коефіцієнт його підсилення  $k_y$  також зменши-

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

вся на 10%. Тоді величина збуджуючої дії  $I_{зб}$  складає 40% номінальної величини струму лінзи

Визначимо необхідний загальний коефіцієнт підсилення стабілізатора  $k_y$  з виразу

$$\Delta I_{ст} = \frac{I_{зб}}{1 + k_{03} \cdot k_y},$$

де  $\Delta I_{ст}$  - максимально допустима величина відхилення струму лінзи;

$k_{03}$  - коефіцієнт передачі лінії головного зворотного зв'язку стабілізатора.

Згідно технічного завдання  $\Delta I_{ст}$  не повинна перевищувати 1% від заданої величини струму лінзи. Тоді за умови, що величина струму лінзи задана на рівні  $I_{л}=1A$ , а величина опору датчика становила 0,1A запишемо мінімально допустиму величину коефіцієнту підсилення стабілізатора

$$k_y = \frac{\frac{I_{зб}}{I_{л}} - 1}{k_{03}} = 320$$

В якості регулюючого транзистора виберемо транзистор КТ817А, що має коефіцієнт передачі струму  $>20$  та максимально допустимий струм колектора 3А. Враховуючи загальний коефіцієнт підсилення стабілізатора в розімкненому вигляді становить

$$k_y = k_m \cdot k_{тр},$$

де  $k_m$  - коефіцієнт підсилення каскаду на операційному підсилювачі;

$k_{тр}$  - коефіцієнт підсилення каскаду на транзисторі.

Виберемо  $k_m=100$ . При цьому  $R_7=1,5K$ ;  $R_8=150Ком$ .

Компаратор напруги на мікросхемі Д2, є призначений для світової сигналізації про наявність току в лінзі, вибирався однопороговим, в якому

$u_{пор}=u_{оп}$ . При цьому мінімально допустимий рівень струму в лінзі який забезпечує безаварійну роботу системи фокусування пучка, встановлюється за допомогою компенсатора R10.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розроблений пристрій відповідає технічним вимогам, може застосовуватись для стабілізації струму електронної лінзи газорозрядної електропроменевої гармати для плавлення металів.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## **2.5 Вакуумна установка для забезпечення роботи ГРЕГ**

### **2.5. Конструкція розробленої ГРЕГ**

Складальне креслення гармати надане на демонстраційному листі №1

Електродна система гармати змонтована в циліндричному водоохолоджуваному корпусі. В верхній частині корпусу встановлений катодний вузол, нижня частина корпусу є розрядною камерою. Катодний вузол гармати виконаний, виходячи з умов електричної міцності і необхідності відведення тепла від катоду, що нагрівається в результаті іонного бомбардування. Високовольтний ізолятор має чашеподібну форму. Водоохолоджуваний удержувач катоду закріплений на ізоляторі за допомогою гайки. Алюмінієвий катод, робоча поверхня якого виконана у вигляді частини сфери, закріплений на удержувачі за допомогою нагвинчуваного на удержувач прикатодного електроду.

Анод гармати з метою підвищення якості фокусування електронного пучку і стабільності його геометричних параметрів виконаний конічним. Поперечний розмір аноду вибраний таким, щоб забезпечувалося рівномірне бомбардування всієї робочої поверхні катоду. В стінці аноду виконані щілини для надходження газу при роботі гармати. Для забезпечення високої точності розташування відносно осі електродної системи анод у верхній і нижній частині зафіксований по ковзній посадці на корпусі і основі корпусу.

Знизу до корпусу кріпиться водоохолоджувана мідна основа з променеводом. Променевід в нижній частині має приварену порожнину для подачі води, що зв'язане з великим тепловим навантаженням в цьому місці внаслідок осідання периферійних електронів пучка в процесі роботи. На променеводі розміщена несиметрична магнітна лінза, що складається з котушки, корпусу, кришки і втулки.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відкачка гармати здійснюється через променепровід спільно з технологічною камерою. Робочий газ надходить в розрядну камеру через штуцер в стінці корпусу. Гармата приєднується до технологічної камери через фланець, встановлений на зрізі гармати (променевода). Більш прийнятне розташування гармати вертикальне.

При виготовленні і збиранні гармати подаються високі вимоги до точності взаємного розташування катоду, аноду, променепроводу та лінзи. Всі посадочні поверхні повинні виконуватися з високою точністю. Вузли, що є зварними сполученнями, подаються на остаточну обробку тільки після виконання зварювання.

Система охолодження вузлів гармати (катодного, розрядної камери, променевода) забезпечує можливість безперервної роботи гармати без перегрівання практично необмежений час.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

### 3. Дослідження характеристик і особливостей роботи ГРЕГ для плавлення металів

#### 3.1. Експериментальне устаткування для дослідження ГРЕГ. Загальна методика досліджень

Експериментальне дослідження параметрів ГРЕГ проводилось на устаткуванні, що містить в собі власне ГРЕГ, систему стабілізації тиску в гарматі, систему калориметрування катод, високовольтне джерело живлення, блок управління струмом пучку, джерело живлення магнітних лінз, систему калориметрування потужності пучку, технологічну камеру, відкачну систему, що складається з форвакуумного, високовакуумного насосов і вентилів.

Метою дослідження ГРЕГ було визначення енергетичних параметрів гармати в діапазоні потужності розряду до 10 кВт і корекція електродної системи з метою забезпечення стабільної роботи гармати. В процесі досліджень визначалися залежності енергетичних параметрів розряду і електронного пучка від прискорювальної напруги і тиску в розрядній камері, положення фокусу і кута сходимості пучка, проводилося калориметрування потужності, що виділяється пучком на колекторі. В процесі виміру параметрів тиск в камері підтримувався постійним. Вимір тиску в розрядній і технологічній камерах вимірювався термопарними вакуумметрами типу ВІТ-2. Вимір швидкості протікання води в системі охолодження здійснювався за допомогою ротаметра, а вимір температури води – з допомогою термометрів з ціною ділення  $0,2^{\circ}\text{C}$ .

Видаток води в калориметрі підтримувався постійним. Вимір електричних величин виконувався за допомогою стандартної вимірювальної апаратури з класом точності не нижче 1,5. Положення фокусу реєструвалося візуально за допомогою лінійки.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Витрачена потужність визначалася як:

$$P_{затр} = U_{приск} \cdot I_{розр} \quad (3.1)$$

Потужність пучку, що виділяється на колекторі, визначається по відомому співвідношенню для калориметрування:

$$P_{кол} = 10V_{в}(t_2^0 - t_1^0) = [Вт] \quad (3.2)$$

де  $V_{в}$  – швидкість протікання води в калориметрі;

$t_2^0, t_1^0$  - температура води на виході і вході калориметра;

ККД гармати визначається як:

$$\eta = \frac{P_{кол}}{P_{витр}} \quad (3.3)$$

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

## **3.2. Експериментальні характеристики ГРЕГ**

### **3.2.1. Оптичні характеристики**

Вимірювання положення фокуса пучка в електроно-променевій газорозрядній гарматі здійснювалось при різних тисках, виходячи з необхідності перевірки стабільності його положення. На рис.3.1 приведена характеристика залежності фокусної відстані від струму розряда. Як видно з графіка, фокусна відстань практично не змінюється у всьому діапазоні робочих струмів (тисків) гармати. Однак кут зходимості пучка збільшується, досягаючи максимального значення при максимальному струмі розряда, що враховувалось при конструюванні гармати.

### **3.2.2. Вольт-амперні характеристики**

В ході експеримента було знято сімейство вольт-амперних характеристик гармати при різних тисках в розрядній камері. Криві, побудовані по результатам експеримента, приведені на рис.3.2. Струм пучка росте з підвищенням прискорюючої напруги та тиску в розрядній камері гармати. Максимальна величина напруги обмежена умовами роботи гармати на промисловій установці для плавлення. Максимальний струм пучка обмежений ростом втрат потужності в розрядному проміжку та променепроводі гармати.

С ціллю більшої наглядності характера залежності струму розряду від тиску в робочій та технологічній камері побудовані відповідні криві (рис. 3.3).

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

### 3.2.3. ККД гармати

Коефіцієнт корисної дії ГРЕГ ( $\eta$ ) визначається калориметричним методом по формулам (3.1) - (3.3) [15]. В загальному випадку  $\eta$  залежить від прискорюючої напруги, струму розряду, тиску в розрядній камері та складу газового середовища. В ході експеримента проводилось дослідження залежності ККД від прискорюючої напруги при різних струмах розряду. Дані експерименту приведені в таблиці 3.1, а криві, побудовані по його результатам, на рис. 3.4.

### 3.2.4. Вимірювання характеристик джерела живлення лінзи

Вимірювання характеристик джерела живлення лінзи проводилось шляхом зміни навантажень. Діапазон регулюємих струмів при навантаженні  $R_{л} = 12$  Ом складає  $0 \div 1$  А. Відхилення регулюємого струму від заданного значення при зміні навантаження з 12 Ом на 6 Ом не перевищує 1%.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3.3. Похибки вимірювань

#### 3.3.1. Загальні положення

Якщо через  $X_{00}$  позначити дійсне значення вимірюємого сигналу, то при ідеальному перетворенні результат вимірюємого сигналу може бути представлений у вигляді [16]:

$$Y_{00} = k_H \cdot X_{00}$$

де  $k_H$  - коефіцієнт перетворення.

В реальних умовах вихідний сигнал  $Y$  відрізняється від  $Y_{00}$  за рахунок непостійності  $k_H$ , характеризуємого величиною  $\Delta k$ , і за рахунок зовнішніх та внутрішніх перешкод  $\Delta Y_1$ , приведених до вихода. Тому реальне рівняння перетворення має вигляд:

$$Y = (k_H + \Delta k)Y_{00} = k_H X_{00} + \Delta k X_{00} + \Delta Y_1 = Y_{00} + \Delta Y_1 + \Delta Y_2 = Y_{00} + \Delta Y$$

Тоді похибка  $\Delta X$  у визначенні вимірюємої величини може бути визначена з співвідношення:

$$X = X_{00} + \Delta X \Leftrightarrow \Delta X = X - X_{00}.$$

Оскільки дійсне значення величини невідоме, то й визначити точно похибку вимірювання неможливо. Можна лише оцінити похибку вимірювання, якщо за  $X_{00}$  взяти деяке значення  $X_0$  настільки наближаючогося до дійсного, що для даної цілі воно може бути використано замість нього.

Таблиця 3.1. Значення ККД при різних струмах розряда.

$U_{\text{уск}}, \text{КВ}$	$I_{\text{разр}}, \text{МА}$	$V_{\text{води}}$	$t_{\text{вх}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{вых}}, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{каль}}, \text{Вт}$	$\eta$
5	100	1,5	10,2	19	924	0,67
10			10	20,4	1092	0,715
15			9,8	22,2	302	0,735

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

20			9,7	23,7	1470	0,75
25			9,6	25	1617	0,78
30			9,2	26,4	1806	0,785
5	150	1,52	8,8	20,8	1277	0,625
10			8,8	23,2	1532	0,67
15			8,7	25,6	1798	0,71
20			8,6	28,8	2149	0,73
25			8,6	31,8	2468	0,76
30			8,5	34,2	2734	0,77
5	200	1,51	8,5	20,2	1245	0,36
10			8,5	23,8	1628	0,52
15			8,4	29,6	2256	0,59
20			8,4	33,4	2660	0,615
25			8,4	38,6	3213	0,64
30			8,4	43,4	3724	0,66
5	250	1,52	8,3	18,2	1046	0,28
10			8,3	24,4	1701	0,45
15			8,2	29,2	2219	0,55
20			8,2	40,4	3403	0,6
25			8,2	45,2	3911	0,63
30			8,2	51,4	4567	0,65

Це значення  $X_0$  вимірюваної величини називається діючим значенням.

Тоді оцінка похибки вимірювання:

$$\Delta = X - X_0$$

Похибка вимірювання визначається:

- похибками вимірювальної апаратури;
- похибкою метода (при непрямих вимірюваннях);

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

- похибками, викликаними неузгодженністю вхідних параметрів вимірювальної апаратури та вихідних параметрів вимірююмого сигнала;
- динамічною похибкою;
- похибками від неврахованого впливу зовнішніх факторів.

По характеру зміни похибки бувають:

- систематичні;
- випадкові.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

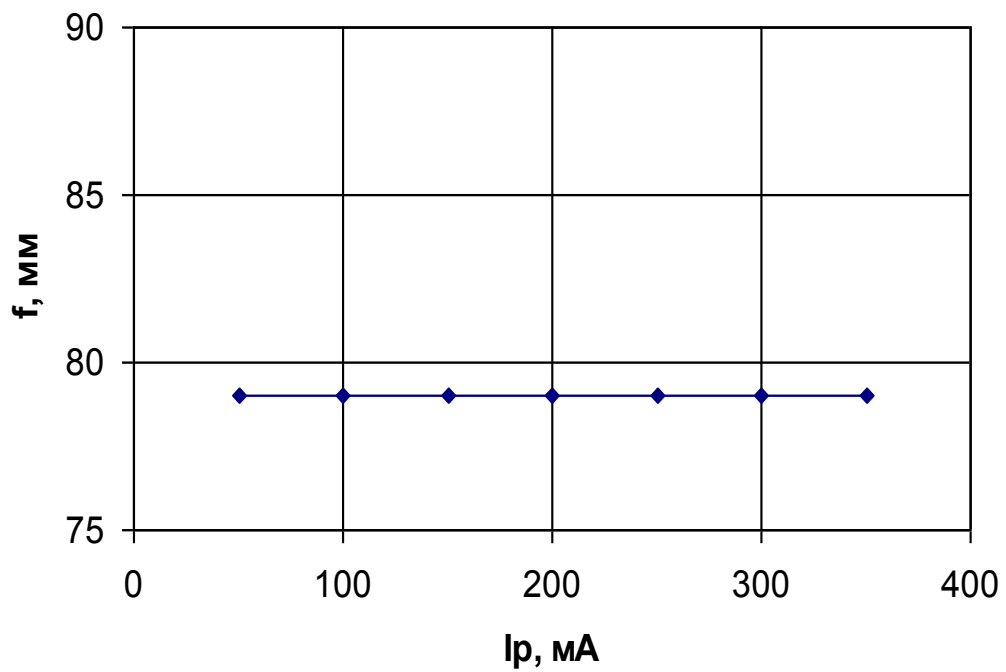


Рис. 3.1. Залежність фокусної відстані електронного пучка від струму розряда

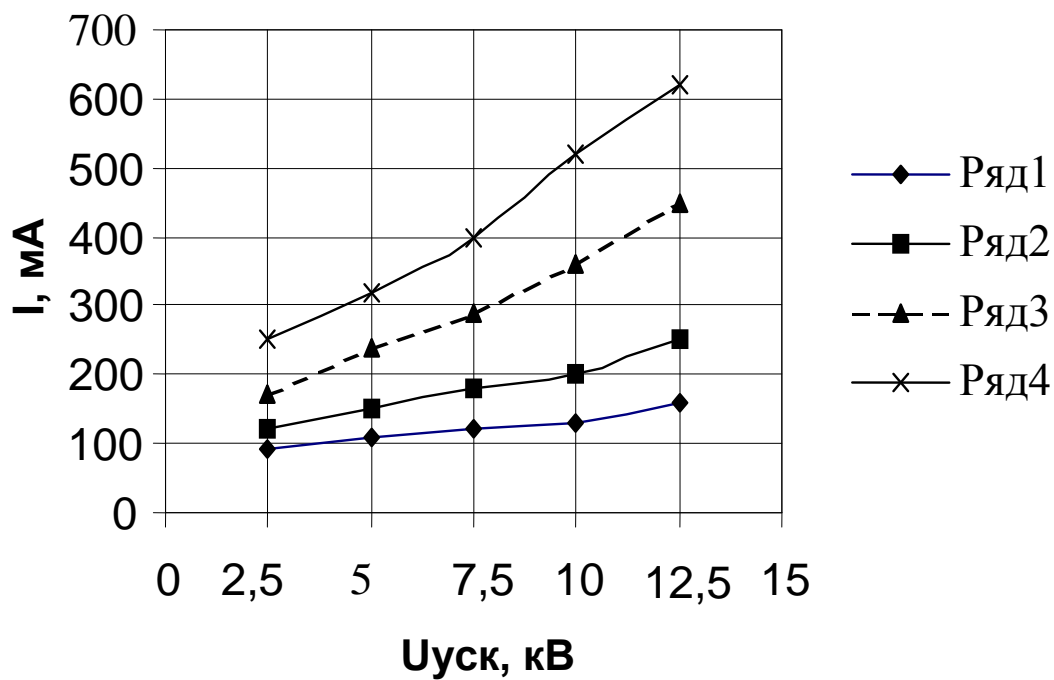


Рис. 3.2. Вольт-амперні характеристики

ряд1 - 3Па ряд2- 4Па  
 ряд3 - 6Па ряд4 - 8Па

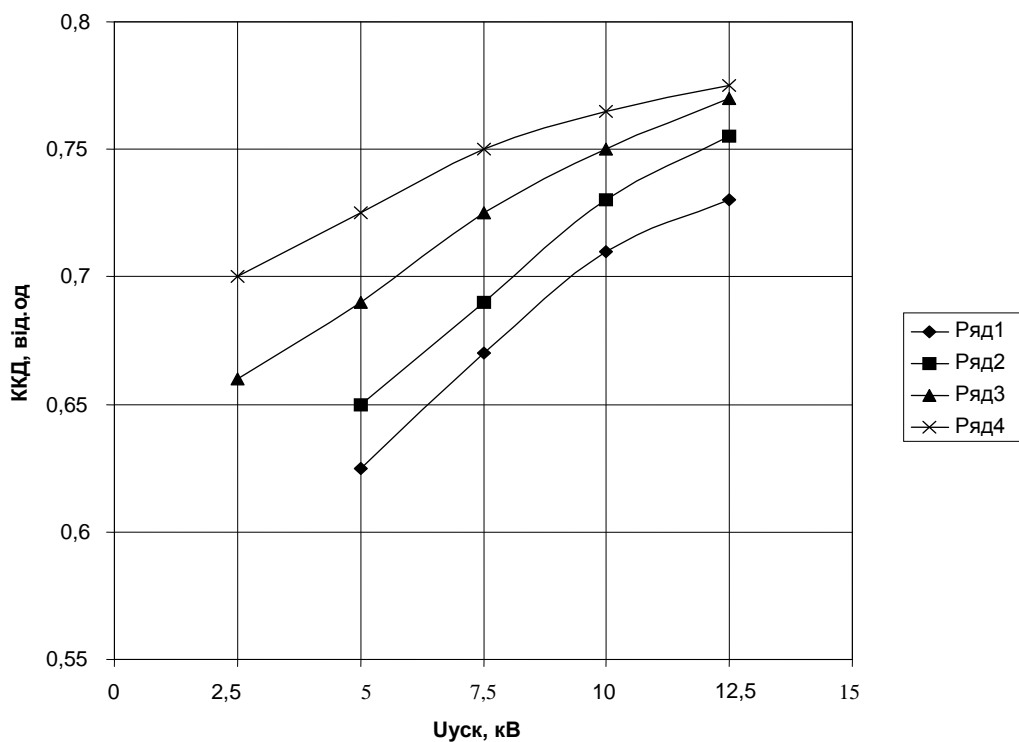


Рис.3.3. Залежність ККД від прискорюючої напруги при різних тисках  
ряд 1 – 3Па, ряд 2 - 4Па, ряд3 – 6Па, ряд 4-8Па

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР.6.050802.051.015 ПЗ

Арк.

67

При постановці експеримента джерела систематичних похибок повинні бути по можливості виключені. Випадкові похибки характеризують точність вимірювань. Визначити її можна двома шляхами: аналітично або експериментально на основі статистичних даних. Найбільш повно випадкові процеси можуть бути описані з допомогою закона розподілення. Зокрема інтегральної функції розподілення. Однак не завжди зручно та необхідно характеризувати випадкову похибку таким вичерпним чином. Зазвичай вказують деякі числові характеристики випадкових похибок, достатньо повно характеризуючі точність оцінки.

### 3.3.2. Похибки вимірювання ВАХ ГРЕГ

Оцінка точності розподілення ВАХ проводилась на основі методики, запропонованій в роботі.

Було проведено 10 вимірювань ВАХ при тиску 8 Па. Результати приведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 Статистичні дані вимірювання ВАХ.

U <sub>уск</sub> В	I <sub>p</sub> , Ма									
	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	I <sub>4</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>6</sub>	I <sub>7</sub>	I <sub>8</sub>	I <sub>9</sub>	I <sub>10</sub>
5	125	130	120	120	130	125	125	130	120	125
10	160	155	160	155	165	160	160	165	155	160
15	195	200	200	195	205	205	200	200	205	200
20	260	255	255	265	260	260	255	265	260	265
25	305	305	305	310	315	310	305	310	310	315

Результат вимірювання I<sub>p</sub> при відомій U<sub>уск</sub> може бути представлений у виуляді:

$$X = m_x \mp \varepsilon \quad (3.4)$$

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

де  $m_x$  - математичне очікування випадкової величини;  
 $\varepsilon$  - величина, характеризує межі довірчого інтервала з вірогідністю  $\alpha$ .

Величина  $m_x$  визначається по формулі:

$$m_x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.5)$$

де  $x_i$  - значення, прийняті  $x$  в досліді,  $n$  - число дослідів.

Величина  $\varepsilon$  визначається по формулі:

$$\varepsilon = t_\alpha \sigma^* \quad (3.6)$$

де  $t_\alpha$  - межа інтегрування в розподілі Стюдента,  $\sigma^*$  - середнє квадратичне відхилення похибки результату.

$\sigma^*$  визначається на основі статистичного середнього квадратного відхилення  $\sigma$  випадкової величини  $X$  від її математичного очікування  $m_x$ .

Величини  $\sigma$  та  $\sigma^*$  визначаються по формулам:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2}}{n} \quad (3.7)$$

де  $x_i$  - значення  $X$  в досліді,

$m_x$  - математичне очікування,

$n$  - число дослідів.

Величина  $t_\alpha$  визначається по таблицям розподілення Стюдента на основі числа дослідів  $n$  та заданої довірчої вірогідності. Нехай  $\alpha = 0,9$ . Тоді по таблицям

$$t_\alpha = 1,83$$

Результати розрахунку інших величин, що характеризують похибку, представлені в табл. 3.3.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оцінка похибки вимірювання ВАХ в цілому проводиться таким чином:

- визначається  $\sigma_{\Sigma}^* = \sqrt{\sum \sigma_i^{*2}}$  ;

- по  $\sigma_{\Sigma}^*$  та  $t_{\alpha}$  визначаємо  $\varepsilon_{\Sigma}$

Для  $\alpha = 0,9$  величина  $\varepsilon_{\Sigma}$  склала:

$$\varepsilon_{\Sigma} = 5$$

Графічна інтерпретація вищесказанного представлена на рис 3.5.

Таблиця 3.3. Числові характеристики похибок.

$m_x$	$\sigma$	$\sigma^*$	$\varepsilon$
125	3.87	1.29	2.39
159.5	3.5	1.17	2.14
200.5	3.54	1.17	2.14
260	3.87	1.29	2.39
309	3.74	1.24	2.27

## Висновки

В ході зробленої роботи була розроблена та досліджена газорозрядна електронна гармата з прианодною плазмою, що призначена для плавлення металів. Технічні характеристики розробленої ГРЕГ наступні:

1. Прискорююча напруга - до 12,5 кВ;
2. Струм пучка - до 0,8 А;
3. Робочий тиск в розрядній камері -  $2 \div 8$  Па;
4. К.К.Д. - 0,75
5. Діаметр електронного пучка в фокусі -  $5 \div 8$  мм.

Отримані в ході досліджень експериментальні залежності відповідають теоритичним.

Встановлено, що к.к.д. гармати значно підвищується з збільшенням прискорюючої напруги. Тому доцільно здійснювати роботу ГРЕГ при максимально допустимій прискорюючій напрузі, яка залежить не тільки від конструкції гармати, але й від умов проводимого технологічного процесу. Показано, що граничні значення струму пучка обмежені зниженням к.к.д. в результаті роста енергетичних втрат в розрядному проміжку та променепроводі гармати. Запропонована система живлення та керування ГРЕГ забезпечує великий час стабільної роботи гармати з автоматичним підтриманням параметрів електронного пучка.

Визначені границі оптимальних параметрів роботи гармати:

$$U_{\text{приск.}} = 10 \div 12,5 \text{ кВ};$$

$$I_{\text{розр.}} = 0,3 \div 0,8 \text{ А.}$$

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Література

1. З. Шиллер, У. Гайзиг, З. Панцер, Электронно-лучевая технология. Энергия, М., 1980.
2. Ю. Е. Крейндель, Плазменные источники электронов. Атомиздат, М., 1977.
3. <http://chervonahvilya.com>
4. В.И. Мельник, А.А. Новиков, О разработке газоразрядных источников электронов с прианодной плазмой. Вестник КПИ, сер. радиоэлектроники, 1975 №12.
5. Попов В. Ф., Горин Ю. Н. Процессы и установки электронно-ионной технологии. Москва, 1988
6. Месяц Г. А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. Москва, 2000
7. Б.Е. Патон, Н.П. Тригуб, С.В. Ахонин, Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокореакционных металлов
8. О. К. Назаренко, Схемотехника управления током сварочного пучка электронов, г. КИЕВ – 2013
9. Попов В. Ф., Горин Ю. Н. Процессы и установки электронно-ионной технологии. Москва, 1988
10. И.В. Мельник, д-р техн. наук, С.Б. Тугай, Исследование пропускной способности дозирующего устройства натекаателя газа для газоразрядной электронной пушки, УДК 533.9.07:537.533
11. Кравец П.И., к.т.н., доцент, Тугай С.Б., аспирант, Прецизионное управление параметрами импульсных газоразрядных источников электронов, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", факультет электроники, кафедра электронных приборов и устройств, Киев.

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

12. В.И. Мельник, А.А. Новиков, Газоразрядные источники электронов с прианодной плазмой и применение их в электронно-лучевой технологии. Электронная обработка материалов, 1973, №1.

13. А.А. Новиков. В.И. Мельник, Приближённый анализ энергетической характеристики ВТР. Вестник КПИ, сер. радиоэлектроники, 1971, №8.

14. Б.Э. Бонштедт, М.Г. Маркович. Фокусировка и отклонение пучков в ЭЛП, М., 1967.

15. Н.С. Шиманская, Калориметрия ионизирующих излучений, Атомиздат, М., 1973.

16. Е.И. Сурикова, Погрешности приборов и измерений, Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1975.

17. О. К. Назаренко, Схемотехника управления током сварочного пучка электронов, г. КИЕВ – 2013

18. Мовчан Б. А., Тихоновский А. Л., Курапов Ю. А. Электронно-лучевая плавка и рафинирование металлов и сплавов. К., 1973;

19. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Козлитин Д. А. и др. Электронно-лучевая плавка. К., 1997

					БР.6.050802.051.015 ПЗ	Арк.
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		