

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

**ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ**

«До захисту допущено»

Завідувачка кафедри

_____ **Юлія ЯМНЕНКО**
(підпис) (ініціали, прізвище)

«_____» _____ 2021р.

**Дипломний проект
на здобуття ступеня бакалавра**

з спеціальності 171 Електроніка
(код та назва напрямку підготовки або спеціальності)

Освітня програма: Електронні прилади та пристрої
на тему: Гармата високовольтного тліючого розряду

Виконав : студент IV курсу, групи ДЕ-71

<u>Микола СУРЖИКОВ</u> (прізвище, ім'я, по батькові)	_____ (підпис)
Керівник <u>професор д.т.н. Ігор МЕЛЬНИК</u> (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)	_____ (підпис)
Консультант _____ (назва розділу) (вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали)	_____ (підпис)
Рецензент <u>доцент к.т.н. Олександр МАЧУЛЯНСЬКИЙ</u> (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)	_____ (підпис)
Консультант по нормоконтролю <u>доцент к.т.н Павло САФРОНОВ</u> (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)

**Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”**

Факультет Електроніки
(повна назва)

Кафедра Електронних пристроїв та систем
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 171 Електроніка
(шифр і назва)

Освітня програма Електронні прилади та пристрої

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Юлія ЯМНЕНКО
(підпис) (прізвище ініціали)

« » 2021 року

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ СТУДЕНТУ**

Суржикову Миколі Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту «Гармата високовольтного тліючого розряду»

Керівник проекту професор, д.т.н., Мельник Ігор Віталійович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «24» травня 2021 року № 1316-с

2. Термін подання студентом проекту 5 червня 2021р.

3. Вихідні дані до проекту струм розряду - до 10 А, прискорююча напруга – 30 кВт

4. Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити)

Анотація; вступ; огляд науково-технічної літератури по конструкції катодів газорозрядної гармати, принципам та особливостям їх роботи; розрахунок теплового режиму катоду гармати ВТР-100; розробка 3д-моделей конструктивних елементів катодного вузла та складання їх у зборку; моделювання теплового навантаження на катодний вузол; розробка конструкторської документації; висновки; перелік використаної науково-технічної літератури

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) складальне креслення катодного вузла гармати; специфікація; плакати з рисунками

6.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Технічний			

Ко

нс

ул

ьта

нт

и розділів проекту

7. Дата видачі завдання 20.05.2021

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строки виконання етапів проекту	Примітка
1	Огляд науково-технічної літератури та існуючих рішень відносно розрахунку і оптимізації теплового режиму катоду	10.04.2021–01.05.2021	
2	Розрахунок температурного режиму катоду гармати ВТР-100	10.04.2021–01.05.2021	
3	Розробка 3д-моделей складових катодного вузла	10.04.2021–01.05.2021	
4	Моделювання теплового режиму катоду у SolidWorks Flow Simulation	10.04.2021–01.05.2021	
5	Розробка конструкторської документації: складального креслення та специфікації	10.04.2021–01.05.2021	
6	Оформлення пояснювальної записки. Підготовка доповіді	10.04.2021–01.05.2021	

Студент

(підпис)

Микола СУРЖИКОВ

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

(підпис)

Ігор МЕЛЬНИК

(ініціали, прізвище)

[illegible]

АНОТАЦІЯ

Метою даного дипломного проектування є розрахунок теплового балансу та системи охолодження катоду газорозрядної електронної гармати з холодним катодом.

При використанні електронних гармат у процесах зварювання, рафінування та плавки металів необхідне охолодження катоду, з метою запобігання його деструкції внаслідок перегріву. На практиці, в залежності від потужності гармати, охолодження може бути трьох типів: з масивною основою без примусового охолодження, з примусовим рідинним охолодженням через основу та з безпосереднім охолодженням катоду. Розрахунки теплового балансу катоду виконувалися для застосування третього типу охолодження. За результатами розрахунків було складене креслення катодного вузла гармати та створення його 3д-моделі у САПР SolidWorks.

Ключові слова: електронно-променева гармата, високовольтний тліючий розряд, катод, тепловий баланс, примусове рідинне охолодження.

ANNOTATION

The aim is to develop graduate calculate the heat balance and cooling system of the cathode of a gas-discharge electron beam gun with a cold cathode.

When using electron beam guns in the processes of welding, refining and smelting of metals, the cathode must be cooled in order to prevent its destruction due to overheating. In practice, depending on the power of the gun, cooling can be of three types: with a solid base without forced cooling, with forced liquid cooling through the base and with direct cooling of the cathode. Calculations of the heat balance of the cathode were performed for the application of the third type of cooling. Based on the results of the calculations, a drawing of the cathode assembly of the gun was made and its 3D model was created in SolidWorks CAD.

Key words: electron beam gun, high-voltage glow discharge, cathode, heat balance, forced liquid cooling.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
------------	---

1. ЗАГАЛЬНИЙ ОГЛЯД ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИХ ГАРМАТ ВИСОКОВОЛЬНОГО ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ	7
--	----------

1.1 Класифікація гармат високовольтного тліючого розряду.....	7
1.2 Конструкція газорозрядних гармат.....	10
1.3 Принцип роботи газорозрядних гармат ВТР	12
1.4 Призначення та технологічне застосування гармат ВТР	14
1.5 Технічні характеристики газорозрядних гармат ВТР	17

2. ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОНІВ У ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИХ ГАРМАТАХ ВИСОКОВОЛЬНОГО ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ	18
---	-----------

2.1 Фізичні процеси, що протікають на поверхні катоду	18
2.2 Види катодів та особливості їх роботи	22
2.2.1 Матеріали для виготовлення катодів	22
2.2.2 Види катодів за формою емісійної поверхні	23
2.3 Системи охолодження катодного вузла.....	24

					ДЕ71.712115.001.ПЗ			
Зм.	Арк	П.І.Б.	Підп.	Дата				
Розроб.	Суржиков				Зміст	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірів	Мельник						3	
						«КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕЛ, ЕПС, гр. ДЕ-71		
Н.контр.								
Затверд.								

**4. РОЗРОБКА 3Д-МОДЕЛІ КАТОДНОГО ВУЗЛА У СЕРЕДОВИЩІ САПР
SOLIDWORKS ТА МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ КАТОДУ
ГАРМАТИ ВТР-100.....34**

4.1. Створення деталей катодного вузла гармати ВТР-100 та складання
зборки 34

4.2. Симуляція теплового режиму катодного вузла ВТР-100 за допомогою
SolidWorks Flow Simulation 45

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ..... 54

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ВТР – високовольтний тліючий розряд;

САПР – система автоматичного проектування;

P_a – потужність що поглинається;

P_t – потужність, що використовується на теплопровідність;

T_s – температура поверхні катода;

T_w – температура охолоджуючої рідини;

$r(T)$ – тепловий опір;

l_c – товщина основи;

λ_c – теплопровідність матеріалу основи;

W_k – потужність, що виділяється на катоді,

R_k – радіус сфери катода,

l_k – товщина катода,

$m_{\text{осн}}$ – маса основи,

m_k – маса катода;

$\rho_{\text{осн}}$ – густина матеріалу основи;

$c_{\text{осн}}$ – його теплоємність;

ρ_k – густина матеріалу катода;

c_k – теплоємність матеріалу катода;

T_0 – початкова температура рідини;

γ – коефіцієнт вторинної іонно-електронної емісії;

l_b – середня ширина вакуумного проміжку між катодом і основою;

λ_b – теплопровідність вакуумного проміжку.

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Концепція електронної газорозрядної гармати була створена ще в минулому столітті, однак цей винахід ще й досі не втратив популярності і на нинішній час широко використовується. Спектр застосування даного пристрою досить широкий: зварювання металів, в тому числі тугоплавких і активних, плавка та рафінування матеріалів, очищення поверхонь від забруднень. Гармати між собою поділяються на два класи. Перший – з катодом розжарювання, прямим або непрямым підігрівом. Другий має холодний катод. Іншими системами газорозрядні гармати принципово не відрізняються між собою. Газорозрядна гармата з термокатодом має декілька суттєвих недоліків, серед яких висока температура катоду і високі вимоги до якості вакууму, які не вдається виконати в умовах технологічного процесу через випаровування матеріалу під час обробки. На відміну від попередньої, газорозрядна гармата з холодним катодом має значно більший діапазон робочого тиску, що може доходити до одиниць Па [1,2]. Саме тому такі гармати знаходять широке застосування у промисловості. Катод є джерелом електронів, тому від його коректної роботи напряму залежить функціонування всього пристрою. Під час роботи катод нагрівається, внаслідок чого його геометричні параметри змінюються, змінюються також і процеси, що протікають на його поверхні. Все це призводить до коливань параметрів пучка, а також може викликати деструкцію, тобто проплавлення катоду або оплавлення його робочої поверхні. З ростом потужності гармат проблема набирає більшого розмаху та може призвести до дуже неприємних наслідків, через високий потенціал на приладі відносно потенціалу землі. Тому дуже важливо відводити зайву енергію від катоду, який серед усіх елементів приладу нагрівається найсильніше. Для цього використовуються різні способи охолодження, використання яких напряму залежить від максимальної потужності гармати.

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

1. ЗАГАЛЬНИЙ ОГЛЯД ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИХ ГАРМАТ ВИСОКОВОЛЬНОГО ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ

1.1 Класифікація гармат високовольтного тліючого розряду

Газорозрядна електронно-променева гармата – пристрій, за допомогою якого отримують пучок електронів із заданими кінетичною енергією та конфігурацією.

Зважаючи на те, що гармати мають різне застосування, вони різняться між собою геометричними розмірами, електронно-оптичними параметрами фокусуючих систем, конструктивними особливостями, та, перед усім, енергетичними характеристиками. Однак, якщо розглядати джерело отримання електронного пучка, гармати можна поділити на два класи.

До першого класу відносяться гармати з катодом, що нагрівається, тобто з термокатодом. В середині першого класу пристроїв існує два підкласи: з прямим та непрямым накалом катоду. При прямому накалі енергія підводиться безпосереднім приєднанням катоду до елемента нагріву. У другому випадку катод має порожнину, в яку поміщається спіраль нагрівача. Під час нагрівання катоду з нього емітуються вільні електрони, які відбираються полем для формування пучка. Такий процес має назву *термоелектронна емісія*.

Другий клас складають гармати ВТР з холодним катодом. Цей катод не має підігріву і працює завдяки використанню променевої форми високовольтного тліючого розряду, що існує в умовах пониженого тиску. У прикатодній області знаходиться технологічний газ, при іонізації якого утворюються позитивні іони, які під дією поля спрямовуються до катоду і вибиває з нього електрони внаслідок зіткнення. Такий процес має назву *вторинна іонно-електронна емісія*.

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Вимоги, що пред'являються до газорозрядних гармат:

1) Електронна гармата працює в умовах дуже низького тиску, досить високих температур (у випадку з термокатодом), та активного електронного та іонного бомбардування. Зважаючи на це, матеріали повинні мати низький коефіцієнт температурного розширення, високу температуру плавлення та енергію виходу електронів з матеріалу, щоб убезпечитися від розпилення небажаних конструкційних елементів .

2) Область формування електронного пучка має різний тиск і склад газового середовища в порівнянні з зоною технологічного використання пучка. Тому необхідно використовувати окремі системи відкачування та електроживлення для обох областей. Електронно- та іонно-оптична системи електронної гармати повинні забезпечувати формування необхідного потоку електронів і захист катода при нерівномірному інтенсивному бомбардуванню іонами та атомами оброблюваного матеріалу і газу.

3) Під час горіння тліючого розряду та обробки матеріалу утворюється багато вільних електронів та іонів. Під дією полів всередині гармати електрони та іони можуть нерівномірно потрапляти на стінки та катод, що призводить до їх перегріву чи оплавлення. Щоб запобігти цьому, необхідно, щоб електронно-оптична система була спроектована правильно. Це дозволить рівномірно розподіляти іонний потік по поверхні катода та знеможливіть розсіяння електронного пучка на анод або променепровід.

4) Також важливо, щоб гармата ВТР мала гнучку систему керування основними параметрами для коректного застосування її у технологічному процесі. Електронний промінь має регулюватися як по інтенсивності, так і по площі поперечного перерізу, що дозволить своєчасно змінити параметри пучка в залежності від стану оброблюваного матеріалу чи деталі.

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Також необхідно позначити і недоліки двох типів катодів у гарматах ВТР . Системи з термокатодом за рахунок його високої температури перегріваються, що спричиняє геометричні зміни конфігурації катоду і зміну параметрів пучка. Також термокатодні гармати працюють лише при дуже високому вакуумі, а при обробці матеріалу і потраплянні електронів, які не вдалося сфокусувати, на поверхні конструктивних елементів, утворюються іони та пари речовини, і якість вакууму погіршується [3].

Системи з холодним катодом також мають свої недоліки. При виході електронів з катоду вони мають значний розкид по швидкостям, що спричиняє значні труднощі у фокусуванні пучка. Тому отримання пучка високої інтенсивності у таких системах є досить проблематичною задачею.

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Конструкція електронних гармат високовольтного тліючого розряду

Незалежно від типу електронно-променевої газорозрядної гармати високовольтного тліючого розряду конструкція має стандартний набір складових, які повторюються від однієї гармати до іншої. На рис. 1.1 показана конструктивна схема газорозрядної гармати, де 1 – катодний вузол; 2 – анодний вузол; 3 – ізолятор; 4 – променепровід; 5 – фокусуючі котушки; 6 – котушка відхилення.

Катодний вузол складається з катоду та його основи. Остання має порожнину в площині контакту з катодом і два штуцера вгорі для підключення системи примусового рідинного охолодження. Катод знаходиться під великим потенціалом відносно землі. Анодний вузол складається з аноду та допоміжного електроду, що розташований між анодом і катодом і спрощує підпал розряду в проміжку анод-катод. Анодний вузол нагрівається менше за катод, тому потребує меншого охолодження. Ізолятор виконує дуже важливу функцію – він ізолює катодний вузол від інших елементів системи. Так як потенціал катоду складає десятки кіловольт, матеріал ізолятора повинен бути гарним діелектриком, у той же час мати велику міцність, бо градієнт тиску всередині і зовні ізолятора складає 10^5 . Зазвичай таким матеріалом виступає полімер капролон. Променепровід слугує каналом між областю розрядного проміжку та технологічною зоною. Фокусуючі котушки задають пучку форму та стримують його від потрапляння на променепровід. Друга котушка формує кросовер – схрещення променя для завдання йому необхідної площі перерізу. Котушка відхилення є кінцевим елементом системи, що взаємодіє з пучком: вона виконує розгортку променя по поверхні, що обробляється [1].

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

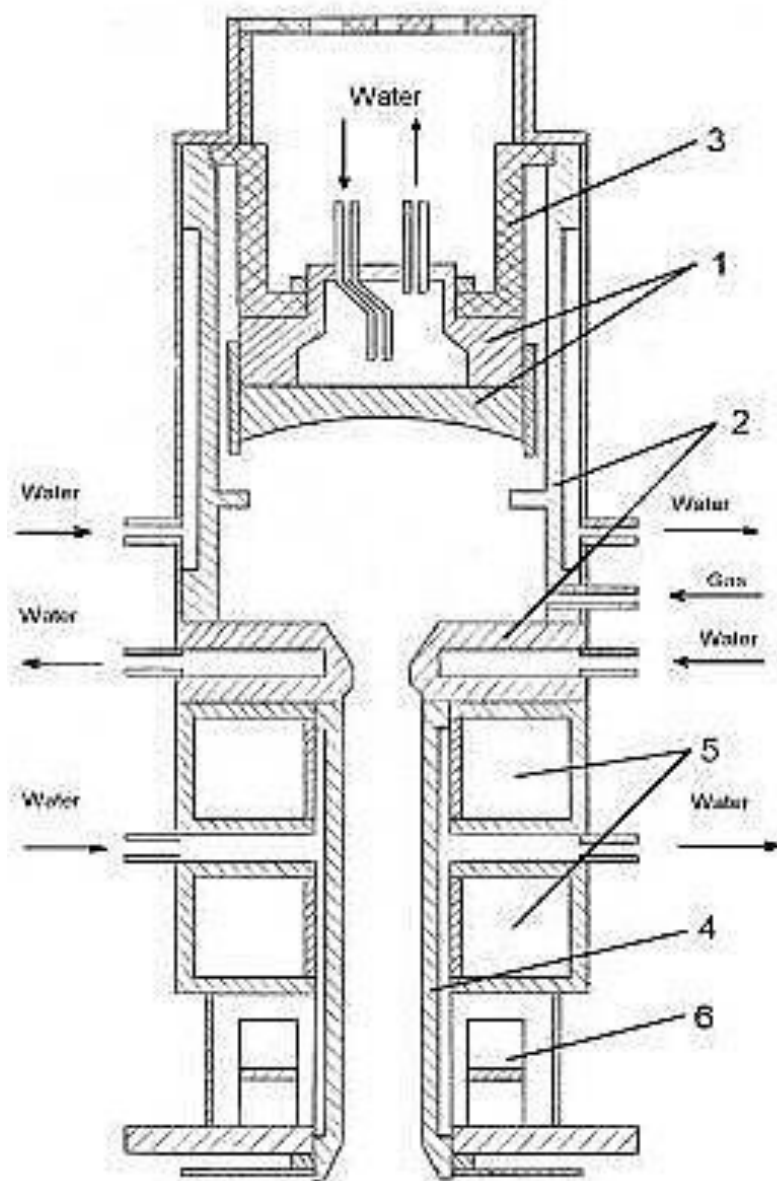


Рис. 1.1 Конструктивна схема газорозрядної електронно-променевої гармати високовольтного тліючого розряду

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДЕ71.712115.001.ПЗ

Арк.

11

1.3 Принцип роботи газорозрядних гармат ВТР

Як видно з назви, робота газорозрядної гармати базується на різновидності газового розряду, а саме на тліючому розряді. *Тліючий газовий розряд* – це самостійний електричний розряд у газі з холодними електродами при струмах порядку $10^{-5} - 1$ А, що має характерну структуру у вигляді проміжків, рис. 1.3, що мають різну інтенсивність випромінювання та різний колір. Графік вольт-амперної характеристики газового розряду представлений на рис. 1.2. Також для даного виду розряду характерним є велике значення катодного падіння потенціалу, що для даних гармат складає кіловольти. Катодне падіння потенціалу – це перепад потенціалу в прикатодній області, так як катод має високий від’ємний потенціал, а в розрядному проміжку локалізується хмара позитивно заряджених іонів об’ємного заряду [4].

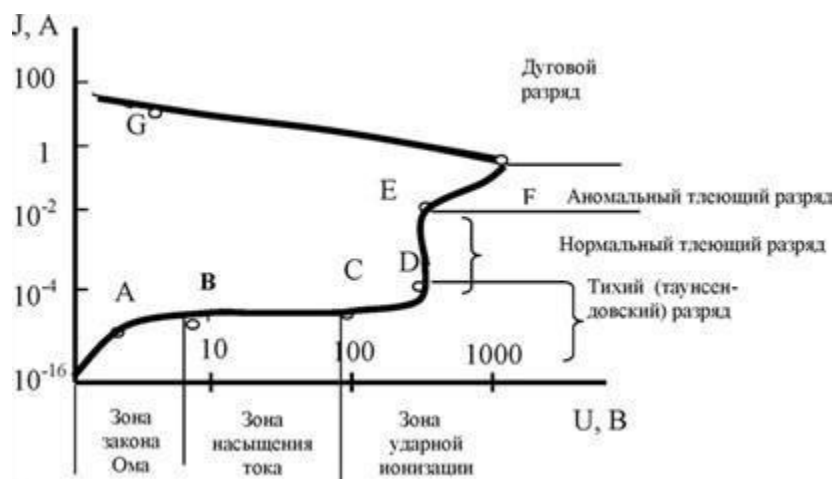


Рис. 1.2 Загальний вигляд вольт-амперної характеристики газового розряду з позначенням основних його видів

У нормальному тліючому розряді не весь катод покривається розрядом, а лише частина, яка називається робочою поверхнею. Робоча поверхня змінюється зі зміною сили струму розряду, це дозволяє підтримувати постійну густину струму.

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

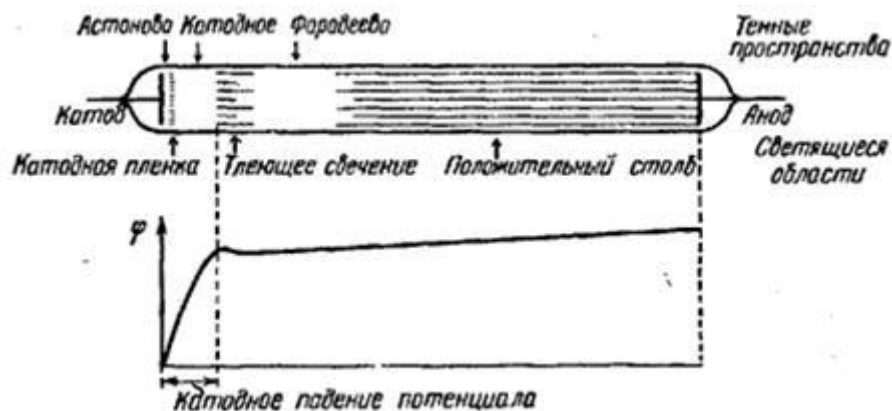


Рис. 1.3 Структура тліючого розряду

В якості робочого газу до розрядного проміжку вводиться кисень, водень або їх суміш у певній пропорції. Розряд запалюється за рахунок електричного поля, що утворене різницею потенціалів між катодом і анодом. В деяких гарматах конструктивно може бути передбачений додатковий електрод між катодом і анодом. Він дозволяє загорітися розряду при меншій напруженості поля. Під час запалення розряду іонізується робочий газ і утворюється хмара позитивно заряджених іонів. Під дією поля вони на високій швидкості стикаються з катодом і вибивають з нього електрони. Таким чином реалізується процес вторинної іонно-електронної емісії. Вибиті електрони рухаються у протилежному напрямку, попутно іонізуючи робочий газ. Поле аноду, взаємодіючи з електронною хмарою, формує електронний пучок на виході з анодного вузла.

Перша котушка фокусуючої системи тримає електронний пучок у межах променепроводу, не даючи йому розсіюватися на його стінках, що означало б великі втрати енергії. Друга котушка завершує фокусування пучка, зводячи його в кросовер під гострим кутом. Від її налаштувань залежить площа поперечного перерізу пучка в технологічній області. Останньої взаємодії з електронами відхиляюча котушка. Вона дозволяє зміщувати пучок у площині його падіння [1].

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

1.4 Призначення та технологічне застосування гармат ВТР

Електронні пучки, генеровані електронними гарматами мають широке застосування у різних галузях. Їх використовують для плавки, зварювання, та пайки матеріалів [3,5]. Вони також успішно зарекомендували себе у рафінуванні металів та нанесенні покриттів різних типів. В основному електронні гармати знайшли найбільш широкого використання в технологічних процесах поверхневої обробки металів [6]. Для того, щоб просто з'єднати між собою два шматки металу досить і звичайного дугового зварювання, але іноді необхідно зробити прецизійний шов на дуже тонких поверхнях, або ж отримати матеріал високої чистоти, чого неможливо досягти стандартними і звичними нам засобами [7]. Обробка металів за допомогою електронних гармат не складає надзвичайної важкості. Для їх роботи потрібен середній вакуум, який легко отримати при нинішньому обладнанні навіть у промислових масштабах. Звичайний паро-масляний насос вільно створює необхідні умови для роботи гармати ВТР. Наявність широкого спектру потужності гармат, що варіюється від одиниць до сотень кВт майже не обмежує їх технологічне застосування. Для пайки і зварювання тонкостінних елементів використовуються гармати малої потужності. Для зварювання більш масивних конструкцій, або для очистки матеріалів використовуються гармати середньої потужності. Якщо потужність гармати прямує до сотні ватт, вона з легкістю може плавити такі метали як титан, вольфрам і молібден. Якщо максимально сфокусувати промінь такої гармати, то можна різати відносно товстий метал із задовільною якістю.

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Схема технологічної установки для плавлення металів показана на рис. 1.4, де 1 – камера для плавки; 2 – камера для електронно-променевих гармат; 3 – механізм для подачі шихти або заготовки; 4 – електронно-променеві гармати; 5 – проміжна ємність; 6 – рольганг; 7 – механізм горизонтального переміщення заготовки; 8 – кристалізатор; 9 – механізм для витягування відливки.

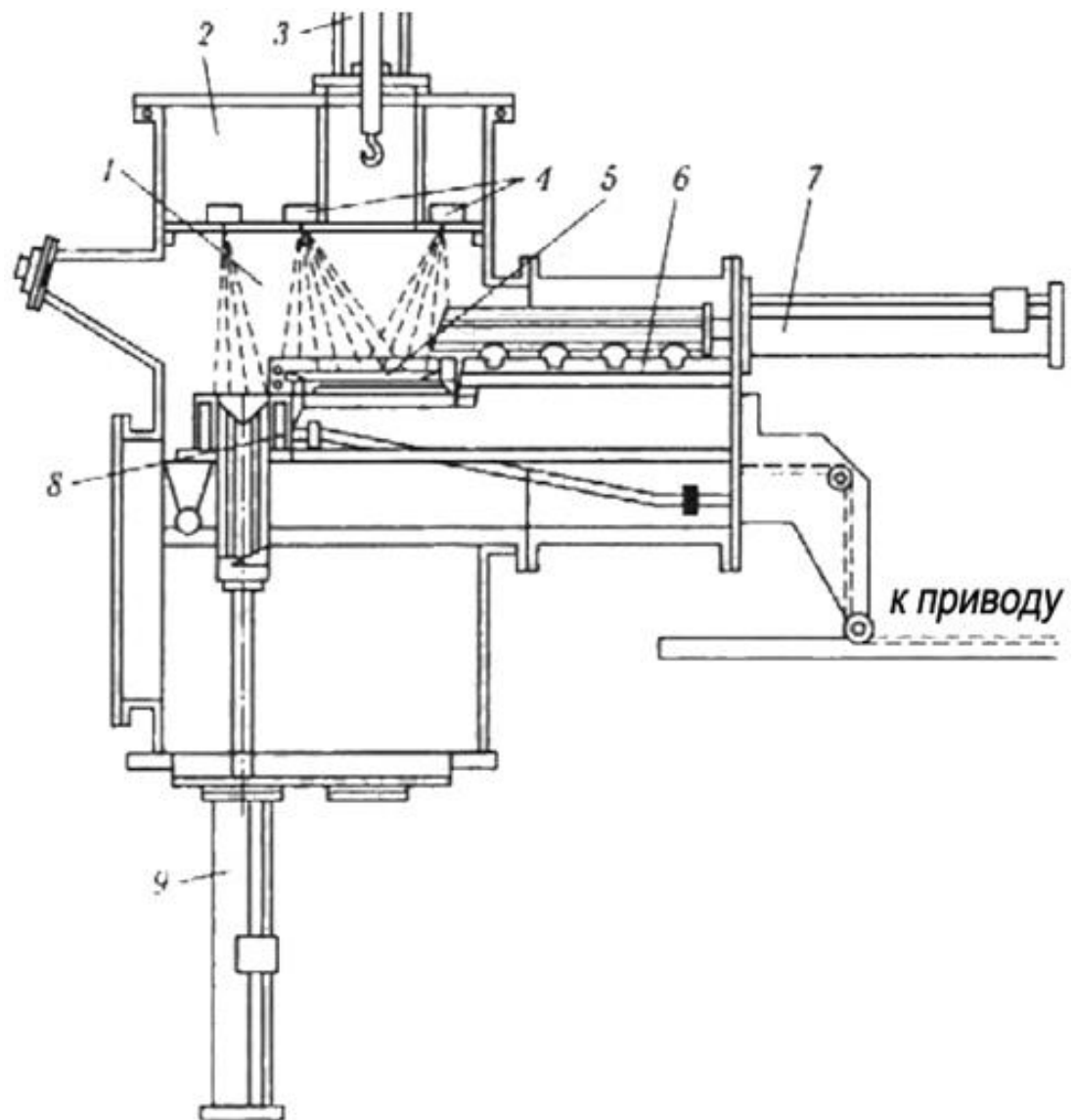


Рис.1.4 Схема промислової технологічної установки для плавки металів

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДЕ71.712115.001.ПЗ

Арк.

15

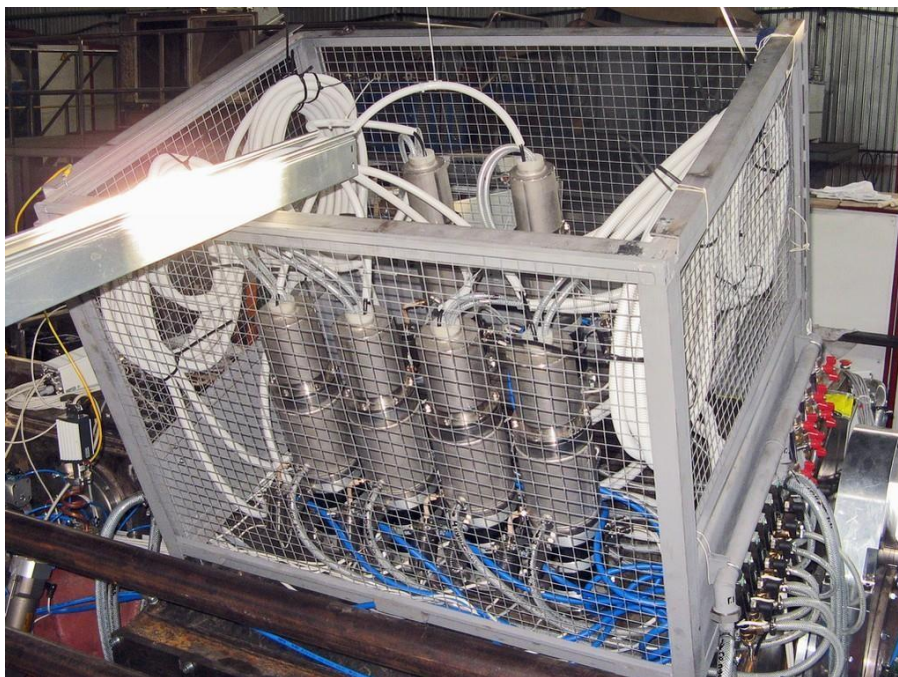


Рис. 1.4 Газорозрядні електронно-променеві гармати ВТР-100 у складі установки для нанесення теплозахисних покриттів



Рис. 1.5 Газорозрядні електронно-променеві гармати ВТР-100 у складі плавильної установки

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДЕ71.712115.001.ПЗ

Арк.

16

Технологічні операції, що виконуються за допомогою гармат ВТР мають в основі одне фізичне явище. Через різке гальмування електронного пучка об поверхню оброблюваного металу, кінетична енергія електронів переходить у теплову, що спричиняє нагрів області. Чим більша енергія променя, тим глибше він проникає до моменту повної зупинки. Тому гармата великої потужності має змогу проплавляти метал значної товщини.

Обробка металів установками з використанням газорозрядних гармат є вигідною через відносну простоту конструкції, високу економічну і виробничу ефективність та зручність керування [5]. Також даний метод має значну перевагу перед конкурентами, електронна гармата дозволяє невідривно від процесу регулювати площу перерізу, інтенсивність та розташування пучка.

1.5 Технічні характеристики газорозрядних гармат ВТР

Основні технічні характеристики існуючих газорозрядних електронно-променевих гармат різної потужності наведені в табл. 1.1

Таблиця.1.1

Потужність, кВт	Прискорююча напруга, кВ	Струм променя, А	Діаметр пучка на мішені, мм	Діапазон тиску у робочій камері, Па	Робочі гази	Технології використання
1...10	10...40	0,1...1,0	0,5...4,0	$10...10^{-2}$	Повітря Кисень Аргон Гелій	Зварювання тонкостінних деталей, пайка, поверхнева термообробка, адитивне виробництво
30...100	25...30	1...4	5...8	$10...10^{-3}$	Водень Кисень	Зварювання пресованих матеріалів, Напилення покриттів, вирощування монокристалів
100...450	30	3,3...15	8...20	$5...10^{-2}$	Водень з добавками кисню	Плавка та рафінування тугоплавких і активних металів та сплавів
600	40	15	15...20	$5...10^{-2}$	Водень з добавками кисню	Плавка та рафінування тугоплавких і активних металів та сплавів

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

2. ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОНІВ У ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИХ ГАРМАТАХ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ

2.1 Фізичні процеси, що протікають на поверхні катоду

Джерелом електронів в газорозрядних гарматах є катод, який емітує електрони зі своєї поверхні. Електрони, взаємодіючи з полем, утвореним різницею потенціалів між катодом і анодом, формуються в пучок, який в подальшому фокусується і використовується в технологічних цілях. Розглянемо фізичні та хімічні процеси, за виникнення яких можливе функціонування пристрою. Основним елементом катоду є його робоча поверхня. Вона піддається бомбардуванню іонами і має найбільшу температуру серед усіх конструкційних складових гармати. Принцип отримання електронів з поверхні катоду пояснити неважко. Катод має великий потенціал відносно землі, від одиниць до сотні кіловольт. Потенціал аноду менший за потенціал землі, щоб електрони не потрапляли на анод і прилад не вийшов з ладу. Однак різниця потенціалів анод – катод є достатньою для утворення сильного електричного поля, що в свою чергу дозволяє запалити тліючий розряд. Для запалення розряду в розрядний проміжок подається технологічний газ: повітря, кисень або водень, рідше-аргон і гелій. Після іонізації газу виникає тліючий розряд і іони спрямовуються до катоду. За рахунок великої напруженості прискорюючого поля іони набувають великої енергії. Загальмувавши об катод, вони віддають енергію атомам матеріалу катоду. Електрони, отримавши енергію, що перевищує їх енергію виходу з матеріалу катоду, покидають катод і під дією поля спрямовуються у фокусуючий отвір аноду [8].

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рис. 2.1 зображена схематична картина положень електродів і напрямків руху частинок у розрядному проміжку, що утворилися внаслідок іонізації газу і вторинної електронно-іонної емісії.

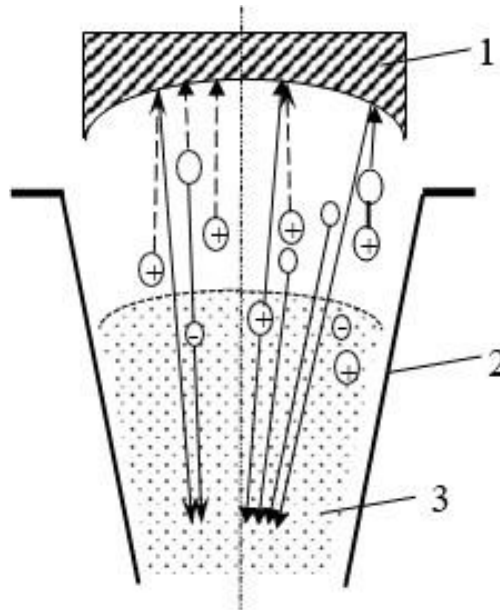


Рис. 2.1 Схема електронно-іонної електрооптичної системи ВТР

1. катод;

2. анод;

3. плазма;

(+) - іони, (-) - електрони, (о) - нейтральні частинки.

Для кожного матеріалу характерний свій коефіцієнт вторинної емісії. Загалом, для металів цей коефіцієнт не перевищує значення 1- 1,5 , як видно з табл. 2.1. Це не дуже гарні показники- з такого катоду буде майже неможливо отримати необхідну густину струму. Вирішити проблему можна використовуючи катоди, виготовлені з сплавів та окислів металів. Показники вторинної емісії для таких матеріалів більше на порядок, див. табл. 2.2. Це означає, що на один іон, що потрапляє на катод, приходить 10-20 вибитих електронів.

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Таблиця 2.1

Елемент	Атомний номер	$\sigma_{\text{макс}}$
Mg	12	0,95
Al	13	1,0
Fe	26	1,32
Ni	28	1,25
Cu	29	1,35
Mo	42	1,22
Ag	47	1,47
Ta	73	1,35
W	74	1,43
Pt	78	1,78
Au	79	1,5
Pb	82	1,08

Таблиця 2.2

Хімічна сполука	$\sigma_{\text{макс}}$	Особливості
Ag-Cs ₂ O-Cs	8-10	-
Cu-Al-MgO	12-15	Допустима температура до +450 °C
Ag-MgO	8	-
Ni-BeO	12	Допустима температура до +600 °C
Ni-ZrO	4	Підвищена термостійкість
Al-MgO	11-12	Підвищена термостійкість

Іони газу, потрапляючи на катод не всю енергію віддають електронам, які емітуються. Частина енергії, якої недостатньо для виходу електрона з матеріалу, використовується на те. Щоб перевести електрон на вищий енергетичний рівень. Це означає, що катод почне нагріватися. За рахунок того, що ділянка робочої поверхні не покриває всю емісійну площу, а локалізується в центральній частині, нагрів катоду відбувається нерівномірно.

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При низьких температурах периферійної частини катоду, потенціально можлива сорбція іонів робочого газу, що призведе до зміни хімічного складу катоду, збільшенням струму, запаленням дуг та вцілому нестабільного горіння розряду. Перегрів центральної частини катоду також погіршує генерацію електронного променя. При перевищенні температури в 400К емісійні властивості катоду погіршуються [9]. Це необхідно враховувати при проектуванні системи охолодження. Також важливим моментом є склад газового середовища в розрядному проміжку. Газу, які використовуються, повинні мати мінімальний іонізаційний потенціал, тобто енергію, яка потрібна для того, щоб електрон вийшов з атомної орбіталі. Нижче приведений графік розподілу іонізаційного потенціалу газів рис. 2.2. Якщо катод має оксидну плівку – необхідно використовувати кисень або суміш з його вмістом. На практиці в основному застосовуються O_2 і H_2 , бо вони мають низький потенціал іонізації і легко добуваються і скраплюються.

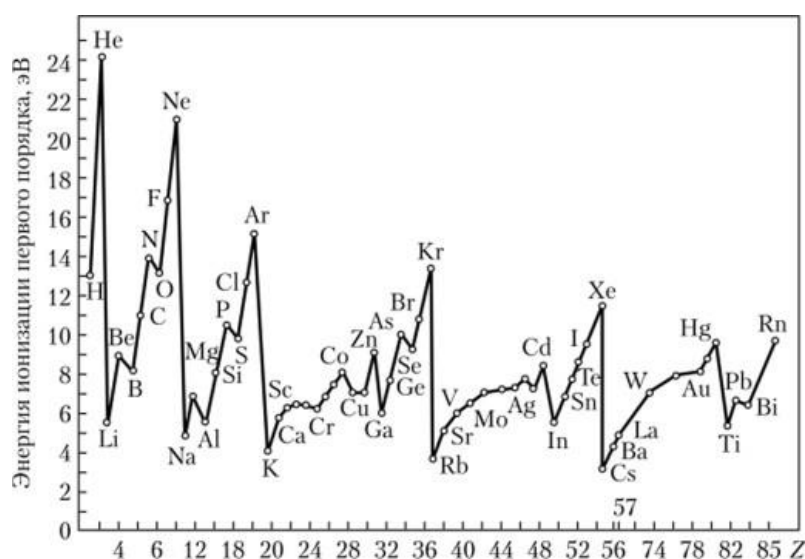


Рис. 2.2 Енергія іонізації першого порядку для газів

2.2 Види катодів та особливості їх роботи

2.2.1 Матеріали для виготовлення катодів

При виборі матеріалу катоду важливо враховувати не лише його емісійні властивості, а й теплопровідність, простоту обробки та доступність і вартість. Можна зробити платиновий або аргентум-цезієвий оксидний катод, який матиме прекрасні емісійні властивості, але вартість такого катоду буде співставною з вартістю всього приладу разом з блоком живлення та управління. До того ж ці катоди мають середні показники довговічності, що робить їх застосування економічно не вигідними. Тому треба орієнтуватись на правило «золотої середини», тобто обирати матеріал який мав би непогані показники коефіцієнта вторинної емісії та теплопровідності. Таким матеріалом є оксид алюмінію, точніше сплав АД-31, в який окрім алюмінію входять такі метали як Fe, Ti, Cu, Mg, Zn у відсотковому співвідношенні не більше 2,75% сумарно, як видно з рис. 2.3 . Теплопровідність цього сплаву також задовільна – вона складає 188 ($\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$), при температурі 373К, що є максимально наближеною до робочої температури.

Хімічний склад у % сплаву АД-31

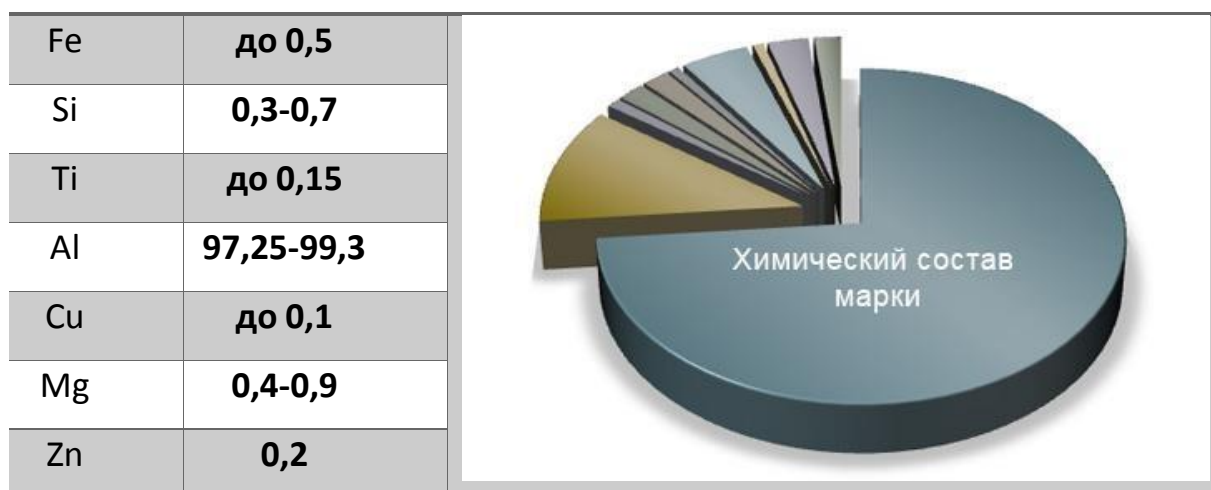


Рис. 2.3 Хімічний склад алюмінієвого сплаву АД-31

2.2.2 Види катодів за формою емісійної поверхні

Зазвичай катоди мають чітко визначену геометричну форму емісійної поверхні. Завдяки їй вдається попередньо визначити напрямок руху електронів з катоду. Звичайно, не всі електрони будуть вилітати перпендикулярно до поверхні, але таких буде переважна більшість. Тому поверхня катоду обирається сферичною, з центром у площині аноду рис.2.4, де 1 – катод; 2 – анод; 3 – плазма; 4 – електронний пучок. Завдяки такому розташуванню потрібні мінімальні затрати енергії для фокусування електронного пучка [10].

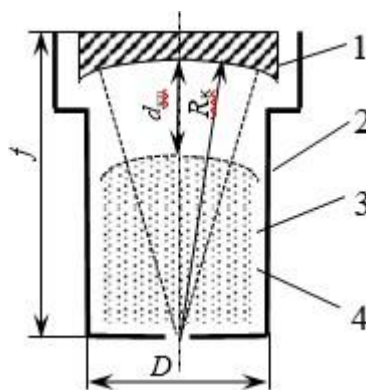


Рис. 2.4 Система з увігнутим катодом

Значно менше поширені катоди плоскої, рис. 2.6 (а), та опуклої форми рис. 2.6 (б), де 1 – катод; 2 – анод; 3 – фокусувальна лінза; 4 – плазма; 5 – електронний пучок. Невелика їх розповсюдженість обумовлена тим, що для їх коректної роботи необхідна додаткова фокусувальна магнітна лінза. Через те, що електрони, вилетівши з катоду, самостійно не фокусуються в отвір аноду, їх необхідно додатково стиснути. Компресія електронного пучка відбувається за рахунок взаємодії з магнітними полями магнітної лінзи. Проте використання катодів такої форми не позбавлено переваг. Змінюючи струм у магнітній лінзі можна змінювати фокусну відстань пучка.

При збільшенні струму пучка збільшується площа робочої області на катоді, і, відповідно, збільшується кут сходження, що призводить до зміни фокусу.

За допомогою коригування компресійних полів можна тримати точку фокусу незмінною і збільшувати інтенсивність пучка не змінюючи його геометрії.

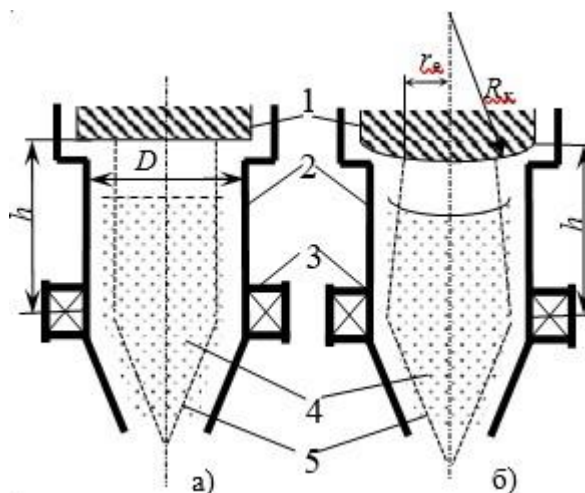


Рис. 2.5 Системи ВТР з магнітним фокусуванням пучків, що формуються.

2.3 Системи охолодження катодного вузла

В процесі роботи катод гармати гріється по причинам, описаним у попередньому пункті. Тому закономірно виникає питання охолодження катодного вузла. Нагрів катода напряму залежить від потужності приладу, тому охолоджуючі системи диференціюються в першу чергу по потужності гармат, на які вони встановлюються [11]. При невеликій потужності приладу, в межах 100Вт – 1кВт використовується система з масивною основою катода без примусового охолодження. Зазвичай ця основа виготовляється з міді і представляє собою товстий циліндричний стрижень, як видно на рис. 2.6, де 1 – основа; 2 – катод; 3 – прикатодний електрод.

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

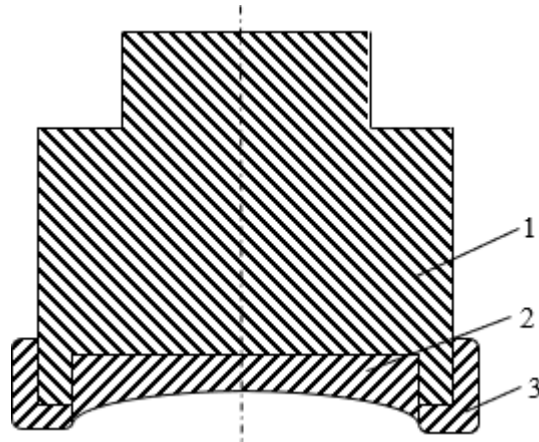


Рис. 2.6 Схема з розсіюванням тепла на масивну основу, що тримає катод

Мідь, з якої виготовляється основа, має гарну теплопровідність, до того ж цей матеріал доступний і легко обробляється.

Якщо потужність гармати знаходиться в межах від 1кВт до 10кВт, система з масивною основою без примусового охолодження вже не може забезпечити підтримання належної температури. Щоб вирішити цю проблему, використовується основа з примусовим рідинним охолодженням. Конструктивно система виглядає як мідний циліндр з порожниною певної форми всередині, зверху якого є два отвори, в яких на різьбовому з'єднанні закріплені штуцери для фіксації шлангів водяної арматури, що зображена на рис. 2.7, де 1 – основа; 2 – катод; 3 – прикатодний електрод. Насос прокачує воду через систему з розширювальним бачком та радіатором, внаслідок чого тепло від катода відводиться у навколишнє середовище. Важливо правильно підібрати матеріал масивної основи, бо на відміну від першого випадку він буде контактувати з гарячою водою. Метал повинен мати високу корозійну стійкість, щоб не руйнуватися і не окислюватися. Мідь загалом підходить, бо має високу теплопровідність і непогану стійкість до корозії. Також необхідно забезпечити якісний контакт між основою катодом. Це досягається завдяки високій якості обробки контактуючих поверхонь.

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

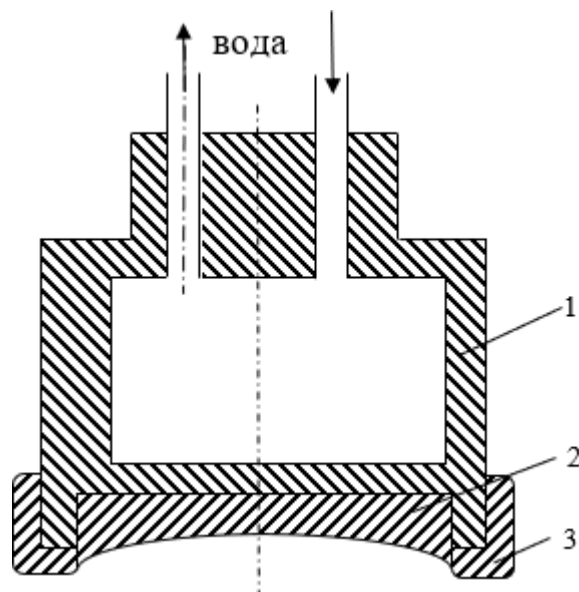


Рис.2.7 Схема з основою, оснащеною примусовим рідинним охолодженням

Такий метод охолодження зручний ще й тим, що для заміни катоду немає необхідності розгерметизації рідинного резервуару.

Гармати ВТР, які використовуються для плавки і зварювання металів мають потужність до сотні кВт, тому потребують ще більш інтенсивного охолодження. Чим ближче до робочої поверхні катоду буде рідина, тим ефективніше буде відводитися тепло. Тому в такому випадку використовується безпосереднє охолодження рідиною катоду рис.2.8, де 1 – основа; 2 – катод; 3 – прикатодний електрод; 4 – ущільнююча прокладка. Така система має наступну технічну реалізацію: у катоді робиться невелика циліндрична порожнина, з розрахунків необхідної товщини металу між поверхнею, що охолоджується, та робочою поверхнею; через ущільнюючу прокладку до катоду кріпиться основа, що має стаканоподібну форму зі штуцерами для підводу рідини. У результаті утворюється герметичний резервуар, нижньою основою якого є катод. Завдяки такій конструкції охолодження відведення тепла від катоду є максимально ефективним, порівняно з попередніми способами.

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

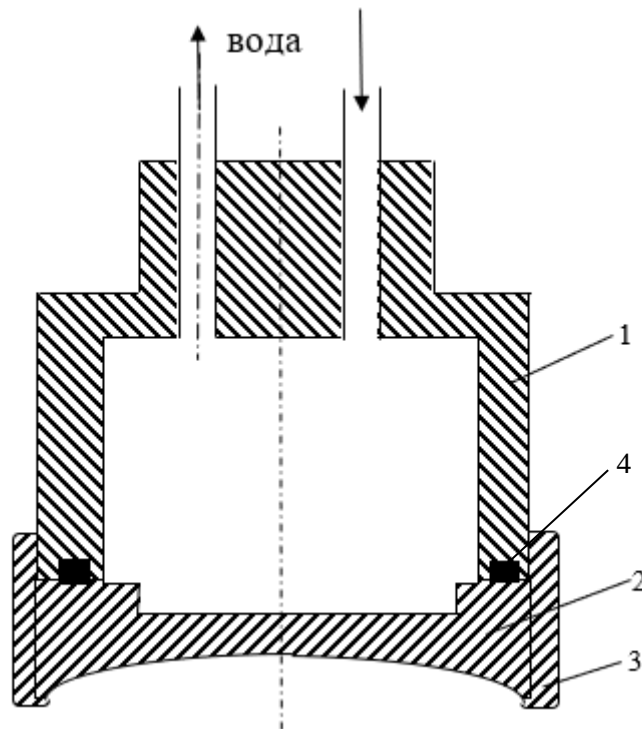


Рис.2.8 Схема з безпосереднім примусовим рідинним охолодженням катоду

Варто зазначити ще кілька переваг такої конструкції. Через відкриту порожнину у тримачі катоду його значно легше виготовити, ніж основу з примусовим рідинним охолодженням. А в порівнянні з масивною основою – потрібно використовувати менше матеріалу, до того ж це трохи зменшить загальну вагу приладу. Також серед вимог до характеристик матеріалу зникає пункт високої теплопровідності: у цій системі між катодом і рідиною безпосередній контакт. Це розширює можливість вибору матеріалу і дозволяє використовувати такі метали та сплави, які категорично не можна було застосовувати у двох попередніх випадках. Одним з кращих варіантів буде використання нержавіючої сталі. Але не обходиться і без недоліків. Основним недоліком є неможливість заміни катоду, у випадку його виходу з ладу, без розгерметизації системи охолодження.

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

3. РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ КАТОДНОГО ВУЗЛА ГАРМАТИ ВТР ДЛЯ РІЗНИХ КОНСТРУКЦІЙ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ

3.1 Розрахунок температури поверхні катоду для різних систем його охолодження

3.1.1 Огляд методики розрахунку температури поверхні катоду

Для проектування системи тепловідводу перш за все необхідно знати температуру поверхні катоду. Дуже важко теоретично оцінити реальну температуру катоду в процесі роботи через те, що енергію він отримує в основному від іонів, що його бомбардують. В такому випадку можна записати залежність температури поверхні катоду від потужності, що він отримує, використовуючи рівняння теплового балансу [12].

$$P_a = c_c m_c \frac{dT_s}{dt} + P_t, \quad P_t = \frac{S_c(T_s - T_w)}{r(T)}, \quad r(T) = \frac{l_c(T)}{\lambda_c(T)}, \quad (3.1)$$

де P_a – потужність що поглинається, P_t – потужність, що використовується на теплопровідність, T_s – температура поверхні катоду, T_w – температура охолоджуючої рідини, c_c – теплопровідність матеріалу катоду, m_c – його маса, $r(T)$ – тепловий опір, l_c – товщина основи, λ_c – теплопровідність матеріалу основи.

Плазма не є стаціонарним середовищем, вона весь час змінює свої параметри, тому температура як самої плазми, так і катоду варіюється в часі. Проте можна з деяким наближенням усереднити значення потужності, що розсіюється на катоді. Це значення дорівнює 5% від потужності приладу.

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Якщо розглянути потік іонів як стаціонарну величину, то температура буде незмінною в часі і можна спростити систему рівнянь (1) до вигляду:

$$P_a = P_t = \frac{S_c(T_s - T_w)\lambda_c(T)}{l_c(T)}. \quad (3.2)$$

Через введення допусків та спрощень, точність оцінки температури знаходиться в межах 50%, однак навіть цього достатньо для вибору конструкції системи охолодження.

Як було зазначено раніше, широкого використання отримали три системи [12].

1. Система пасивного охолодження через масивну основу.
2. Система з рідинним охолодженням основи.
3. Система з безпосереднім рідинним охолодженням катоду.

Для системи з охолодженням через масивну основу з матеріалу, що має високу теплопровідність рис. 3.1, де 1 – катод; 2 – основа; 3 – проміжок між катодом і основою, з урахуванням геометричних параметрів, формулу для розрахунку температури катоду можна записати у вигляді [4]:

$$T_k = \frac{\gamma W_k \left(\left(\frac{r_k + l_k - \sqrt{R_k^2 - R^2}}{\lambda_k} \right) + \frac{l_b}{\lambda_b} + \frac{l_{\text{осн}}}{\lambda_{\text{осн}}} \right)}{R_k^2 (1 + \gamma) \left(\arcsin \left(\frac{R}{2R_k} \right) - \frac{R}{2R_k} \right) \left(1 - \frac{m_{\text{осн}} c_{\text{осн}}}{m_k c_k} \right)} + T_0,$$

$$m_{\text{осн}} = \pi \rho_{\text{осн}} l_{\text{осн}} R^2,$$

$$m_k = \pi \rho_k \left(R_k - \sqrt{R_k^2 - R^2} \right)^2 \frac{3R - R_k - \sqrt{R_k^2 - R^2}}{3}, \quad (3.3)$$

де W_k – потужність, що виділяється на катоді, R_k – радіус сфери катоду, l_k – його товщина, $m_{\text{осн}}$ – маса основи, m_k – маса катоду,

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$\rho_{\text{осн}}$ – густина матеріалу основи, $c_{\text{осн}}$ – його теплоємність, ρ_k – густина матеріалу катоду, c_k – теплоємність матеріалу катоду, T_0 – температура навколишнього середовища, γ – коефіцієнт вторинної іонно-електронної емісії, l_b – середня ширина вакуумного проміжку між катодом і основою, λ_b – теплопровідність вакуумного проміжку.

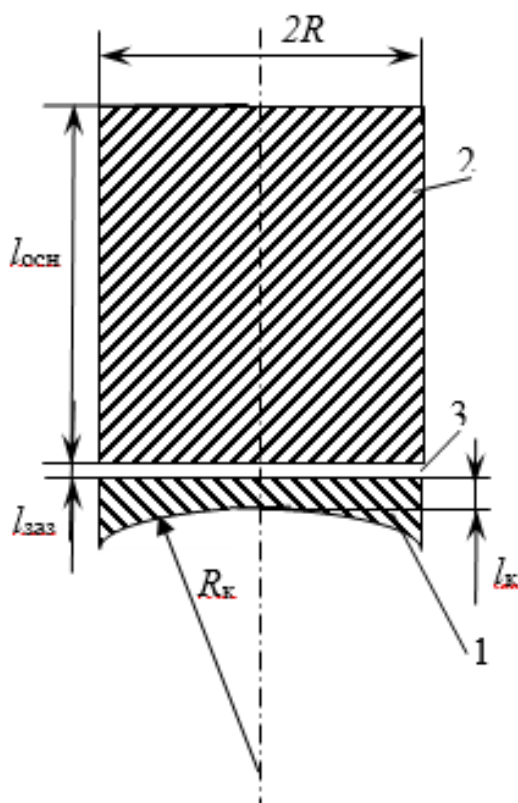


Рис. 3.1 Система з охолодженням через масивну основу

Для гармат середньої потужності доцільно використовувати другу систему охолодження, рис. 3.2, де 1 – катод; 2 – основа; 3 – проміжок між катодом і основою; 4 – охолоджуюча рідина, для неї температуру поверхні катоду можна записати у вигляді:

$$T_k = \frac{\gamma W_k \left(\left(\frac{r_k + l_k - \sqrt{R_k^2 - R^2}}{\lambda_k} \right) + \frac{l_b}{\lambda_b} + \frac{l_{\text{осн}}}{\lambda_{\text{осн}}} \right)}{a_p R_k^2 (1 + \gamma) \left(\arcsin \left(\frac{R}{2R_k} \right) - \frac{R}{2R_k} \right)} + T_{\text{охл}}$$

$$a_p = k_1 + k_2 \sqrt{v_p}, \quad (3.4)$$

де a_p – коефіцієнт тепловіддачі рідини через основу, $T_{\text{охл}}$ – температура охолоджуючої рідини, v_p – швидкість протікання рідини у м/с, k_1 і k_2 – емпіричні коефіцієнти. Для води за нормальних умов $k_1 \approx 350$, $k_2 \approx 21000$.

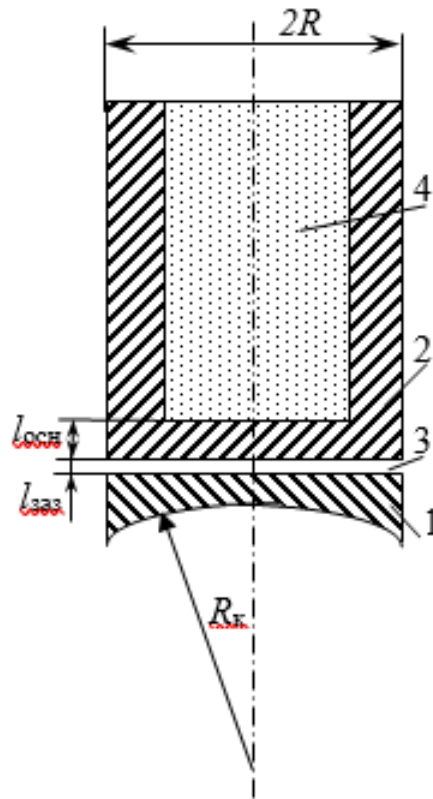


Рис. 3.2 Система з рідинним охолодженням основи

Для найпотужніших зразків гармат ВТР, що використовуються у промисловості, застосовується конструкція з безпосереднім примусовим рідинним охолодженням катоду рис. 3.3, де 1 – катод; 2 – охолоджуюча рідина. Температура катоду при використанні такої системи обчислюється за формулою.

$$T_k = \frac{\gamma W_k \left(R_k + l_k - \sqrt{R_k^2 - R^2} \right)}{\lambda_k R_k^2 (1 + \gamma) (k_1 + k_2 \sqrt{v_p}) \left(\arcsin \left(\frac{R}{2R_k} \right) - \frac{R}{2R_k} \right)} + T_{\text{охл}}. \quad (3.5)$$

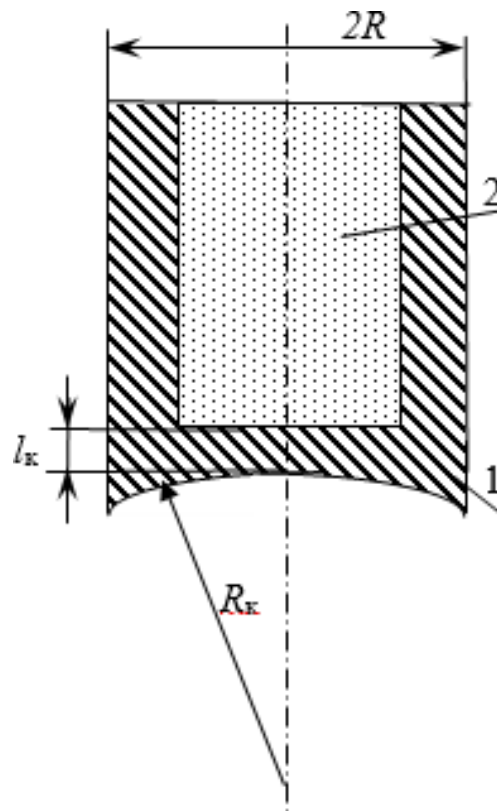


Рис. 3.3 Система з безпосереднім рідинним охолодженням катоду

3.1.2 Розрахунок теплового режиму для катоду гармати ВТР-100 з безпосереднім рідинним охолодженням

Катод гармати ВТР-100 виготовлений з алюмінієвого сплаву АД-31 та має геометричні розміри, вказані на рис. 3.4

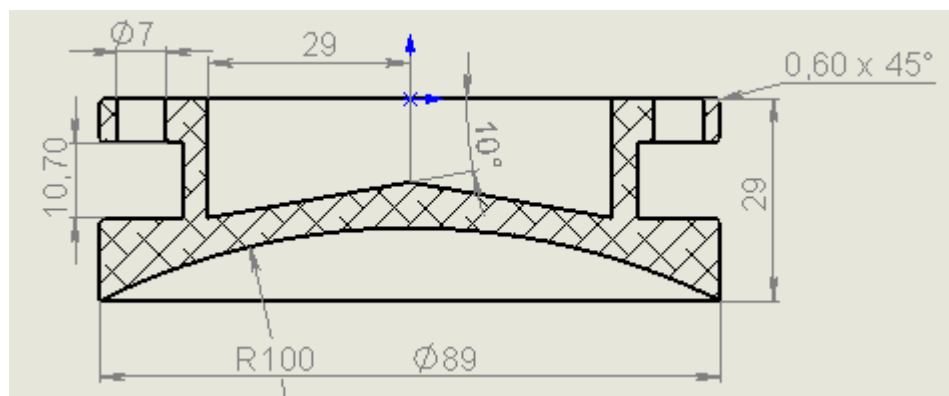


Рис. 3.4 Креслення з габаритними розмірами катоду гармати ВТР-100

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДЕ71.712115.001.ПЗ

Арк.

32

Для розрахунку залежності температури катоду від швидкості прокачки охолоджуючої рідини використаємо формулу (3.5). Проведемо розрахунки для значень: $W_k = 5 \text{ кВт}$, $\gamma = 10$, $R_k = 0,1 \text{ м}$, $R = 0,0445 \text{ м}$, $\lambda_k = 188 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$, $T_{\text{охл.}} = 20 \text{ С}$. Результати проведених розрахунків відображені на графіку рис. 3.5, у вигляді залежності температури приповерхневого шару катоду в залежності від швидкості потоку рідини. Також на графіку проведена пряма оптимальної температури катоду під час роботи.

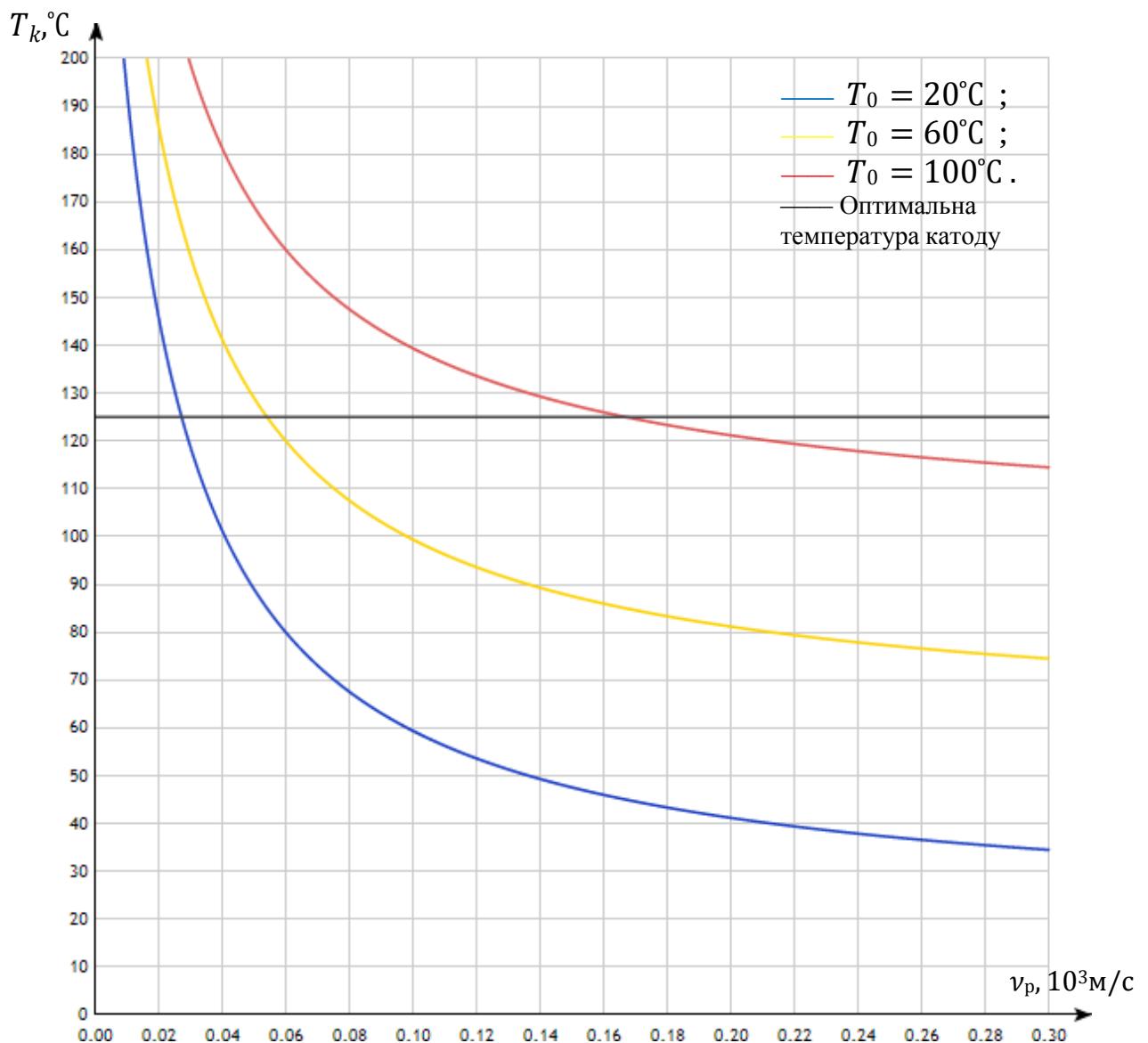


Рис. 3.5 Графік залежності температури поверхні катоду від швидкості прокачування рідини при різних значеннях її температури

4. РОЗРОБКА 3Д-МОДЕЛІ КАТОДНОГО ВУЗЛА У СЕРЕДОВИЩІ САПР SOLIDWORKS ТА МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ КАТОДУ ГАРМАТИ ВТР-100

4.1. Створення деталей катодного вузла гармати ВТР-100 та складання зборки

Система автоматичного проектування SolidWorks є дуже відомим і поширеним пакетом, який дозволяє створювати 3д-моделі деталей на основі креслень або примітивів. Також система має потужний алгоритм розрахунків навантажень різної природи. На основі фізичних параметрів матеріалів, що є в базі програми, серед яких є майже всі широкоживані метали, сплави, неметали та рідини, розраховуються механічні навантаження і деформації, теплові навантаження. Можна дослідити аеродинаміку або гідродинаміку об'єкта у потоці рідини або газу. У середовищі SolidWorks можна проектувати навіть друковані плати, для чого є спеціальний внутрішній додаток SolidWorks PSB.

Для початку роботи потрібно відкрити програму і створити новий проект (рис. 4.1).

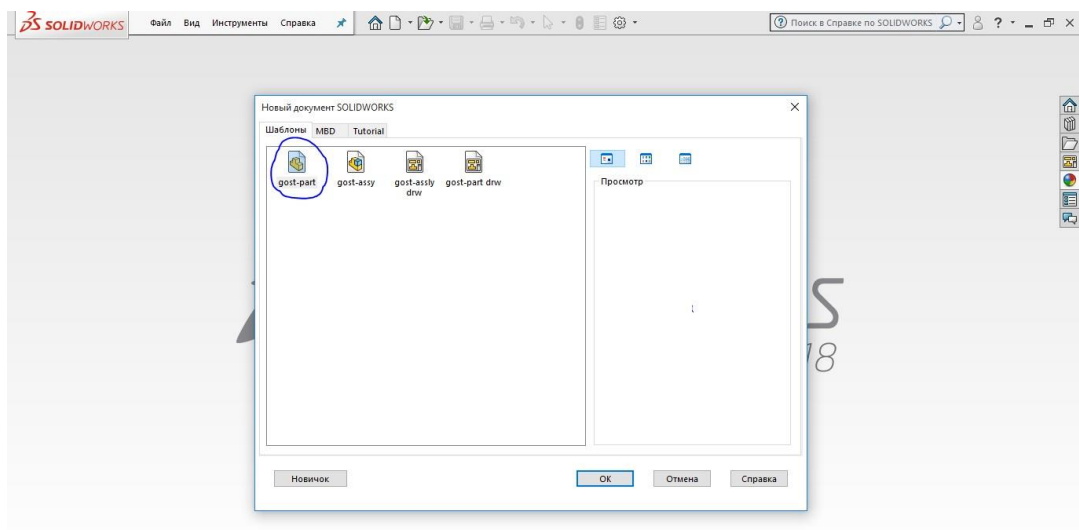


Рис. 4.1 Створення нового проекту

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Потрібно натиснути на файл “ghost part”, для створення моделі окремої деталі, яку потім можна буде додати до зборки. У вікні, що відкрилося, потрібно обрати початкову площину і створити на ній ескіз (рис. 4.2).

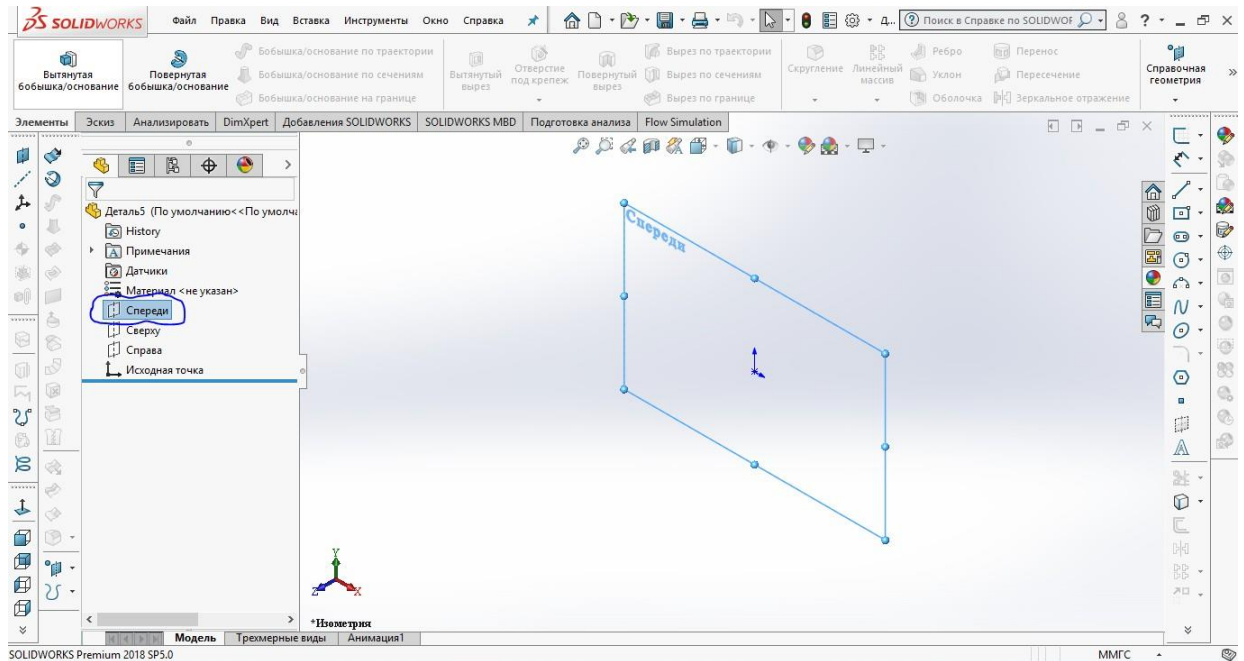


Рис. 4.2 Вибір площини для створення ескизу

Наступним кроком потрібно створити ескіз необхідної деталі, у даному випадку – штуцера з зовнішньою різьбою. Принцип побудови 3д-моделі деталі буде розглянутий на прикладі одного елемента, інші деталі конструкції будуть представлені без покрокового опису. Попередньо проаналізувавши форму деталі, приходимо до висновку, що це деталь обертання, з зовнішньою різьбою і шестигранним шліцом. Тому треба побудувати ескіз осьового перерізу штуцера (рис. 4.3). Всі необхідні розміри позначені, тому наступним кроком треба повернути ескіз навколо осі, натиснувши на команду “повернутая бобышка/основание”. У діалоговому вікні необхідно обрати вісь, замкнуту область та кут повороту. Програма продемонструє попередній огляд тіла, що утвориться (рис. 4.4).

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

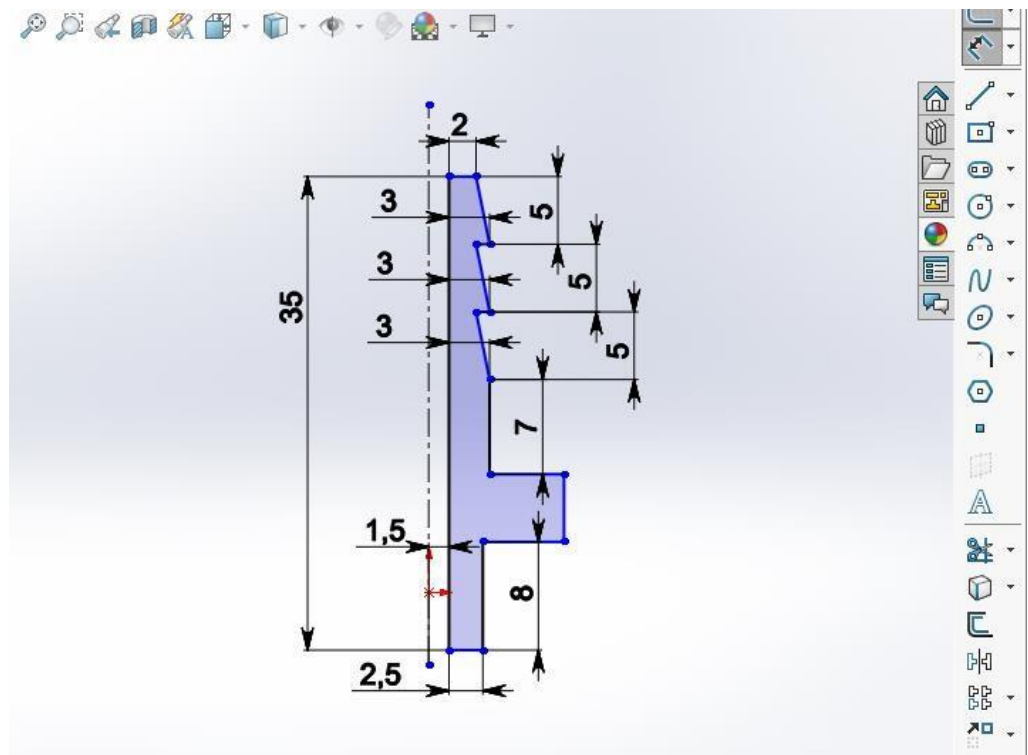


Рис. 4.3 Вибір площини для створення ескізу

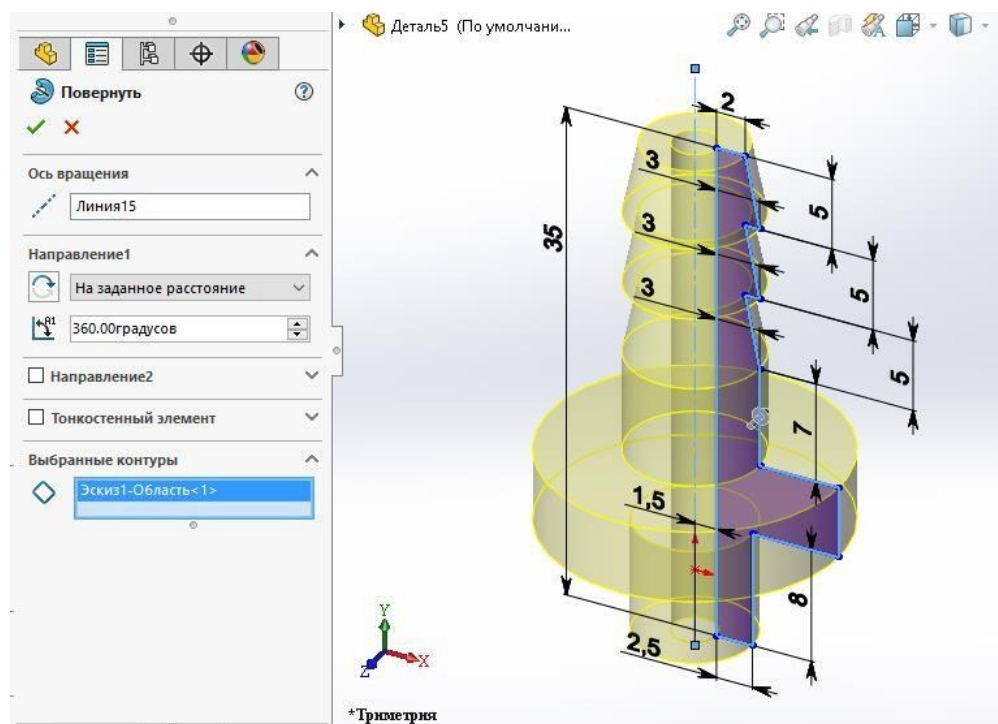


Рис. 4.4 Обертання ескізу навколо осі для створення тіла

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДЕ71.712115.001.ПЗ

Арк.

36

Підтвердивши операцію отримуємо заготовку для виконання подальших операцій (рис. 4.5).

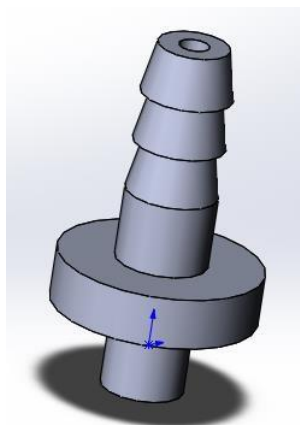


Рис. 4.5 Заготовка деталі

Наступним кроком потрібно зробити ескіз шліців під гайковий ключ. Для цього обираємо площину ескізу і створюємо його. Натиснувши на команду “многоугольник” обираємо кількість кутів та інші необхідні параметри (рис. 4.6).

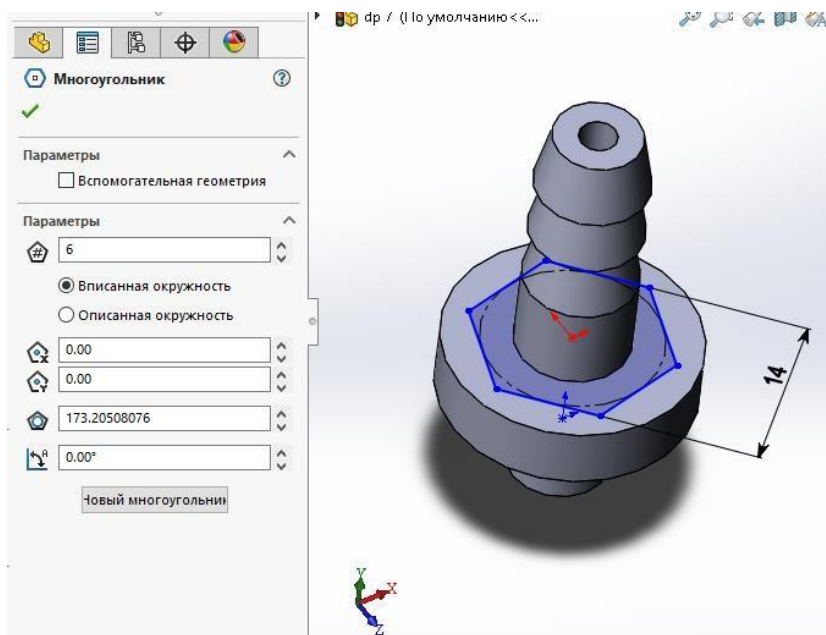


Рис. 4.5 Створення ескізу шестикутника

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Після створення ескізу необхідно натиснути “вытянутый вырез”, обрати площину ескізу та натиснути “переставить сторону для выреза”, щоб прибрати зовнішню область (рис. 4.6). Підтвердивши операцію отримаємо необхідну форму шліців (рис. 4.7).

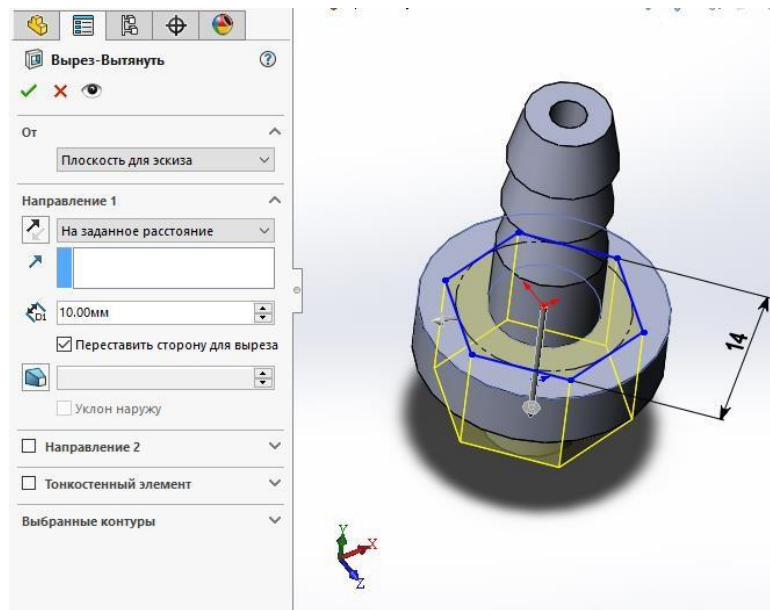


Рис. 4.6 Видалення зайвої області операцією “вытянутый вырез”

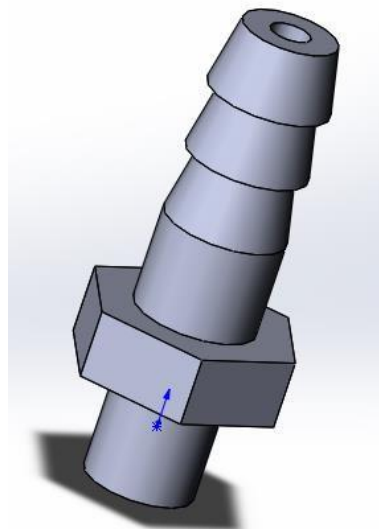


Рис. 4.6 Модель з шліцами під ключ

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Останнім кроком у створенні геометрії моделі є нарізання різьби на нижній циліндричній частині. Для цього потрібно натиснути “отверстие под крепеж,- резьба” і обрати параметри різьби.

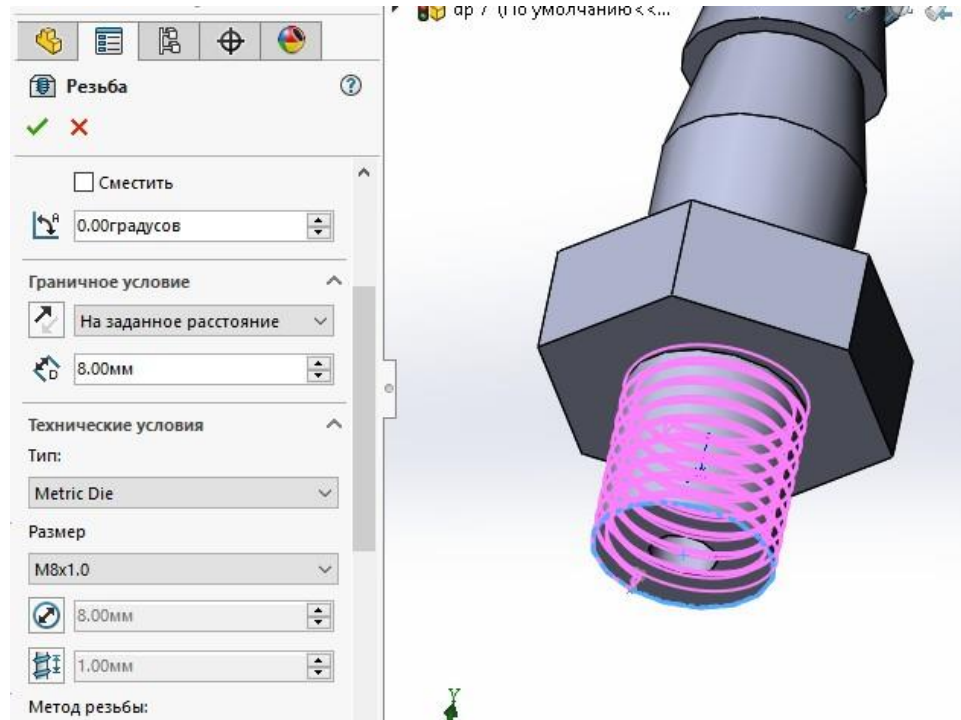


Рис. 4.7 Задання параметрів та попередній огляд різьби

На рис. 4.7 зображена готова 3д-модель штуцера.

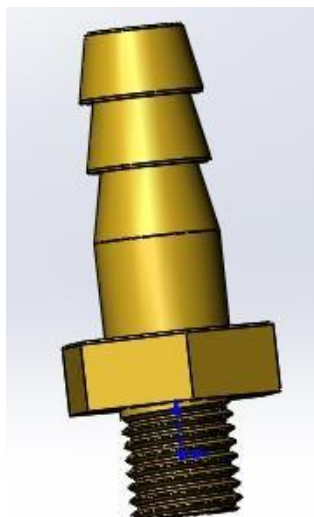


Рис. 4.7 Кінцева модель

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для подальшого моделювання необхідно вказати матеріал для деталі. Штуцер контактує з водою, тому матеріал для його виготовлення варто взяти корозійностійкий і легкий в обробці. Деталь не піддається великим тепловим і механічним навантаженням, тому оптимальним варіантом буде сплав міді і цинку – латунь.

Наступна деталь – катод. Його матеріал був зазначений раніше, це сплав алюмінію АД-31. Він має ввігнуту поверхню, що є сегментом сфери радіусом 100мм. З протилежного боку катод має вигляд фланця з шістьма отворами під гвинтове кріплення до основи катоду (рис. 4.8)

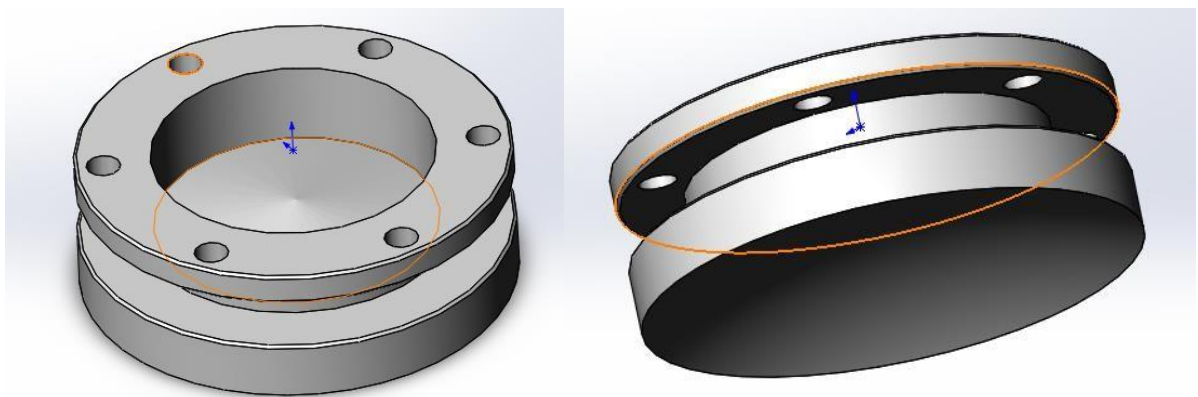


Рис. 4.8 Катод

Катод закріплюється на тримачі катоду. Разом з катодом він утворює замкнену порожнину з двома виходами для прокачки рідини. Для кращого перерозподілу і циркуляції рідини біля поверхні катоду іноді використовують розподільники, які кріпляться до тримача. На відміну від штуцерів, навантаження на які є мінімальними, утримувач катоду піддається більшим навантаженням і також контактує з водою, тому матеріалом для його виготовлення доречно обрати нержавіючу сталь. Тримач має складну геометрію, і його зовнішній вигляд показаний на рис. 4.9.

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

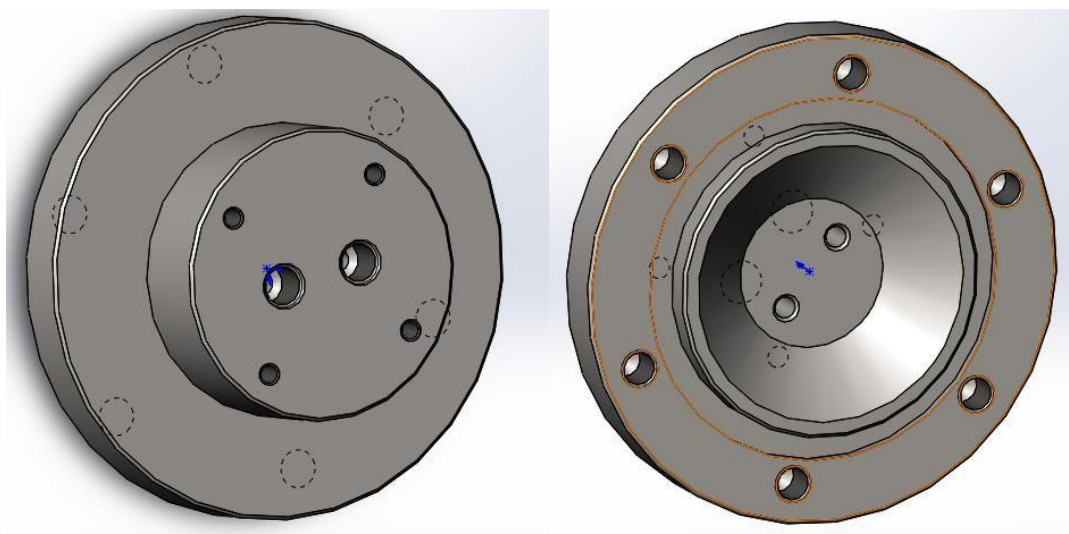


Рис. 4.8 Утримувач катоду

Зовнішню циліндричну поверхню катоду і тримача прикриває прикатодний електрод. Він виготовлений з нержавіючої сталі і його зовнішній вигляд зображений на рис. 4.9.

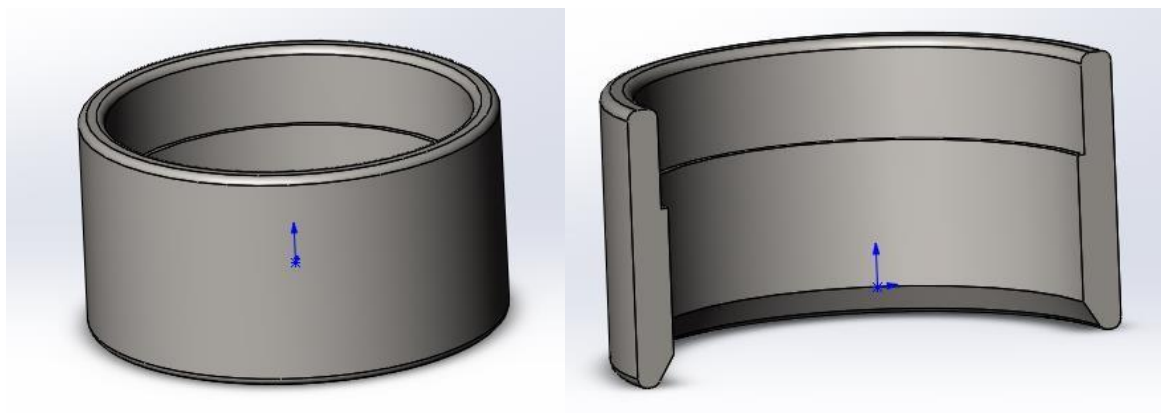


Рис. 4.9 Прикатодний електрод

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Одним з важливих елементів катодного вузла є ізолятор. Його задача – не допустити пробоя між катодом, що має дуже високий потенціал, та суміжними з ним деталями. Тому матеріалом ізолятора має бути діелектрик. На практиці використовують капролон, полімер з дуже незвичними характеристиками. Не дивлячись на те, що це пластмаса, капролон має надзвичайну міцність, з нього виготовляють навіть шестерні, для чого не кожна сталь згодиться. До того ж він має перевагу у своїй унікальній особливості – він не потребує мастила, бо є самозмащуваним матеріалом. В даному випадку ця особливість ні до чого, але велика міцність необхідна через градієнт тиску всередині і зовні ізолятора. Він має складну профільовану геометричну поверхню, зовнішній вигляд якої представлений на рис. 4.10.

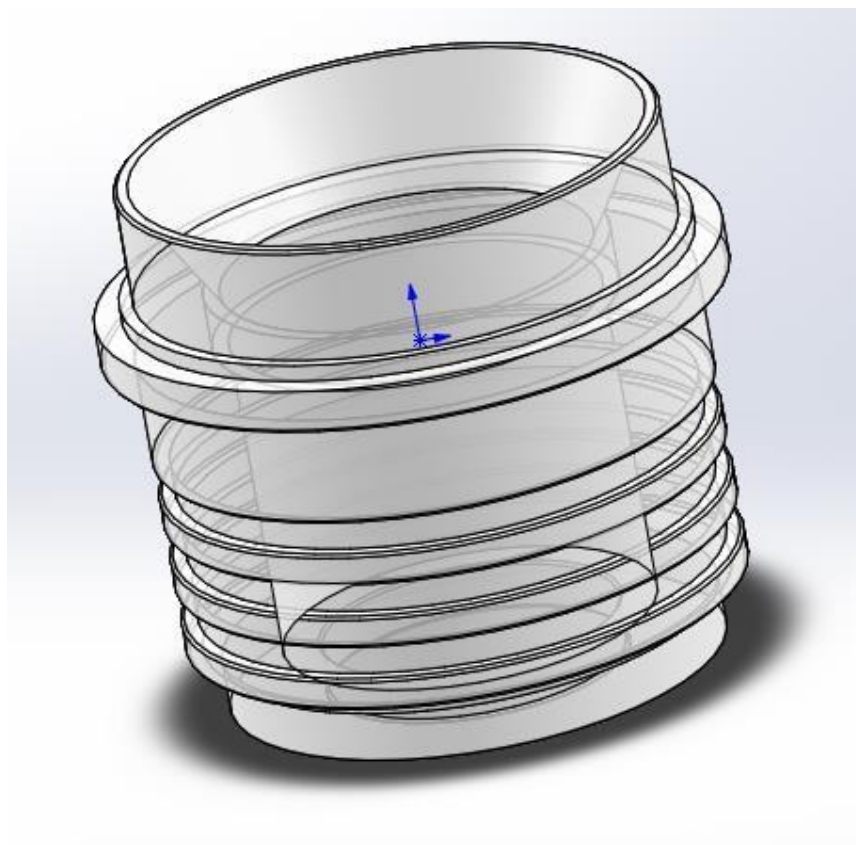


Рис. 4.10 3д-модель ізолятора

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Утримувач катоду фіксується на ізоляторі за допомогою прижимної шайби, під яку підкладена гумова ущільнювальна прокладка. Зовнішній вигляд прижимної шайби зображений на рис. 4.11.

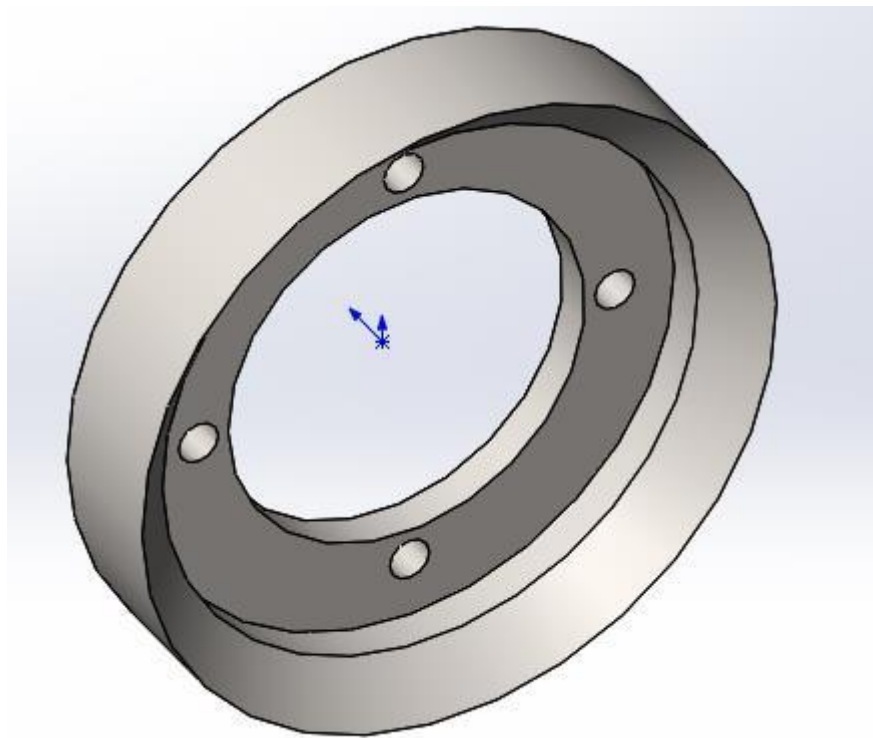


Рис. 4.11 Прижимна шайба

У конструкції передбачено дві гумові ущільнювальні прокладки: між катодом та тримачем катода, і між тримачем та ізолятором (рис. 4.12).

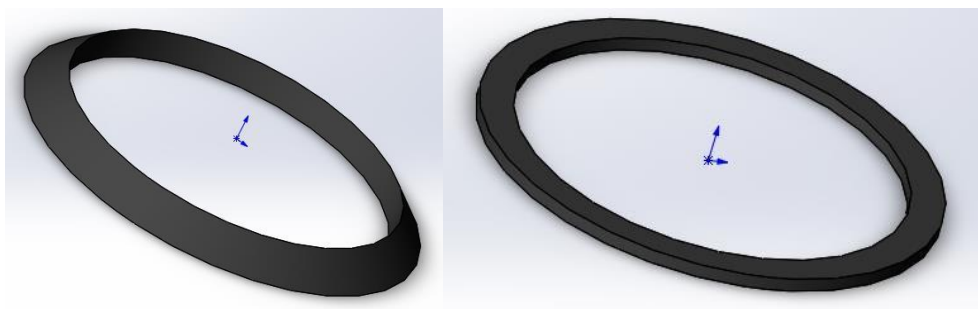


Рис. 4.12 Ущільнювальні гумові прокладки

Наступним кроком потрібно об'єднати всі конструктивні елементи в збірку і переходити до моделювання. Зовнішній вигляд зібраного катодного вузла зображений на рис. 4.13.

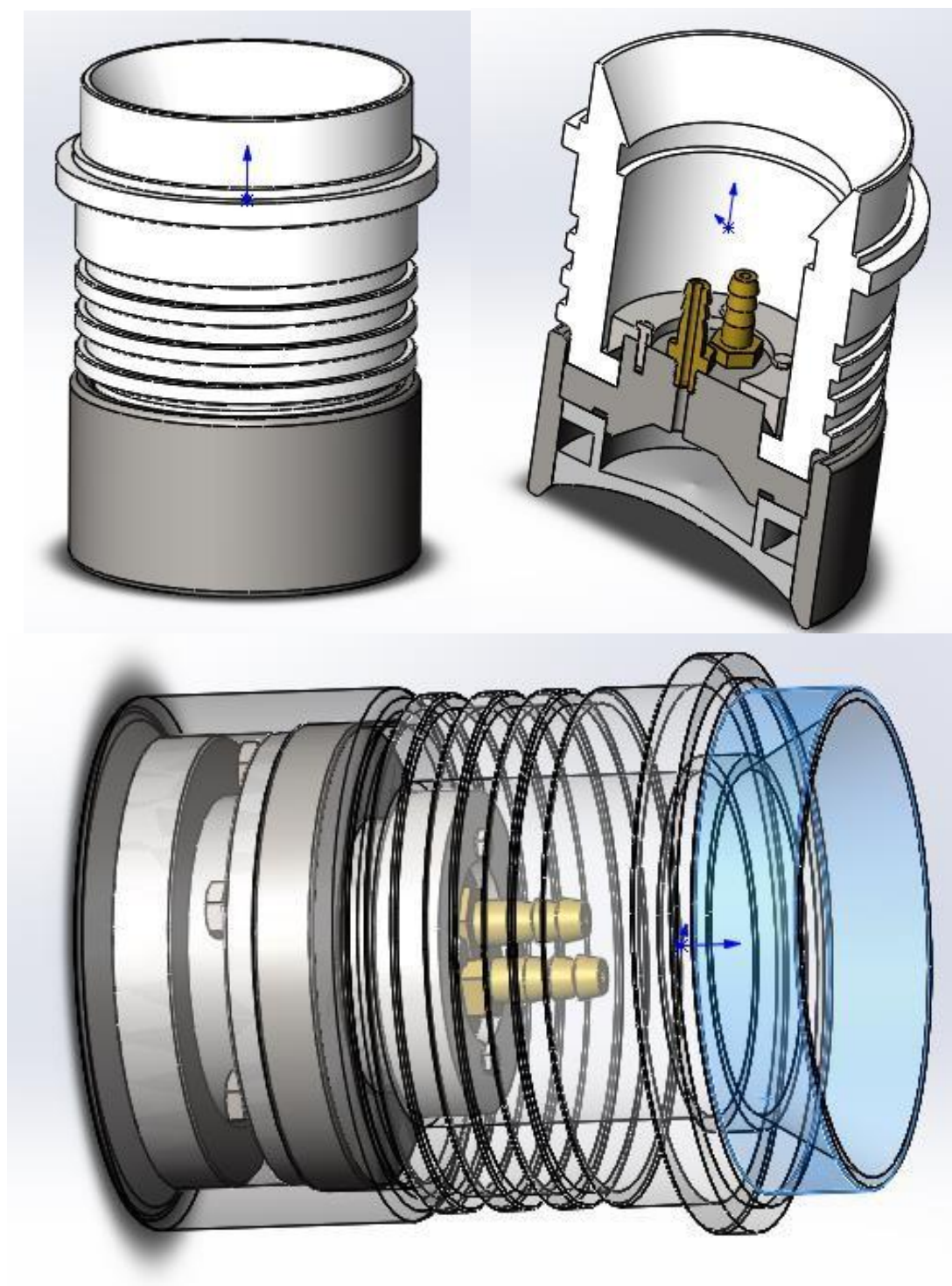


Рис. 4.13 Катодний вузол у зборі

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДЕ71.712115.001.ПЗ

Арк.

44

4.2. Симуляція теплового режиму катодного вузла ВТР-100 за допомогою SolidWorks Flow Simulation

Створення будь-якого пристрою не обходиться без попередньої симуляції. Ряд приладів при виході з ладу в процесі тестування становлять значну небезпеку, тому значно ефективніше і безпечніше робити попереднє моделювання і прорахунок. Сучасні системи автоматичного проектування дозволяють з достатньою точністю імітувати умови і навантаження, яким буде піддаватися реальна модель. Як згадувалося раніше, система SolidWorks має кілька внутрішніх додатків для симуляції навантажень різної природи. Для даного моделювання буде використовуватися додаток Flow Simulation. Ця програма дозволяє симулювати потоки рідин або газів в певних геометричних межах, враховуючи теплообмін між тілами, рідинами і газами що взаємодіють. Так як дана програма перш за все орієнтована на розробку 3д-моделей, розрахунки фізичних параметрів вона проводить з певною похибкою, що не дозволяє отримати абсолютно точний результат. Проте точності розрахунків достатньо, щоб зробити загальні висновки відносно коректності роботи системи, що досліджується.

Для моделювання потрібно мати збірку або деталь у вигляді 3д-моделі. В даній роботі буде використана збірка, яку було створено раніше. Необхідно відкрити файл збірки та натиснути на вкладку “Flow Simulation” (рис. 4.14). Наступним кроком потрібно створити новий проект із заданням фізичних величин, матеріалів і початкових умов для моделювання. Вказуємо необхідні дані, та переходимо до наступного пункту (рис. 4.15).

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

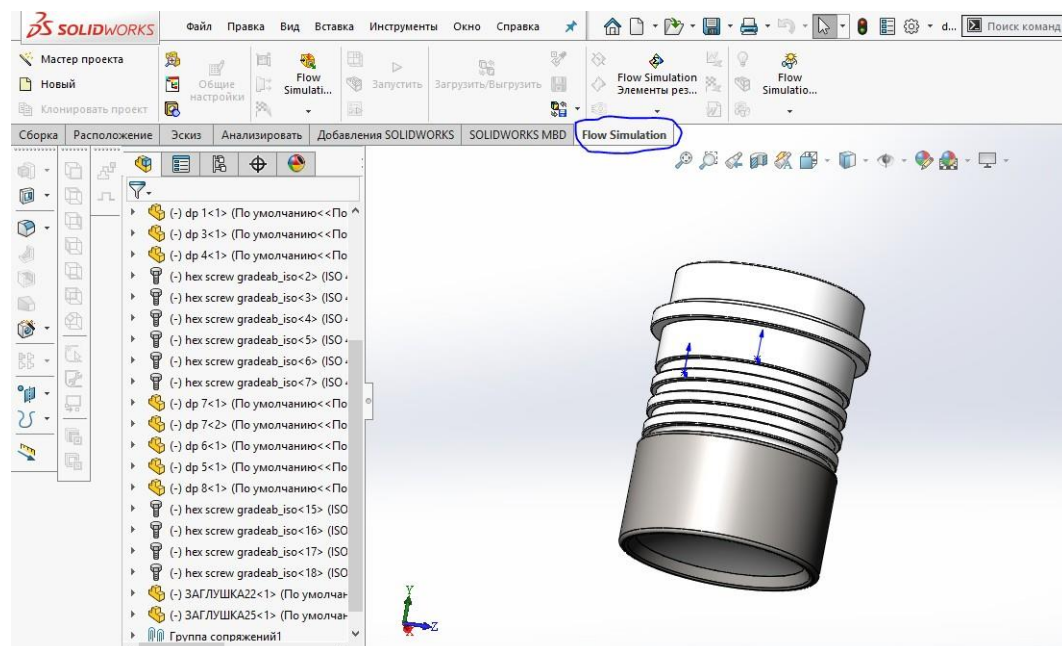


Рис. 4.13 Створення нового проекту симуляції

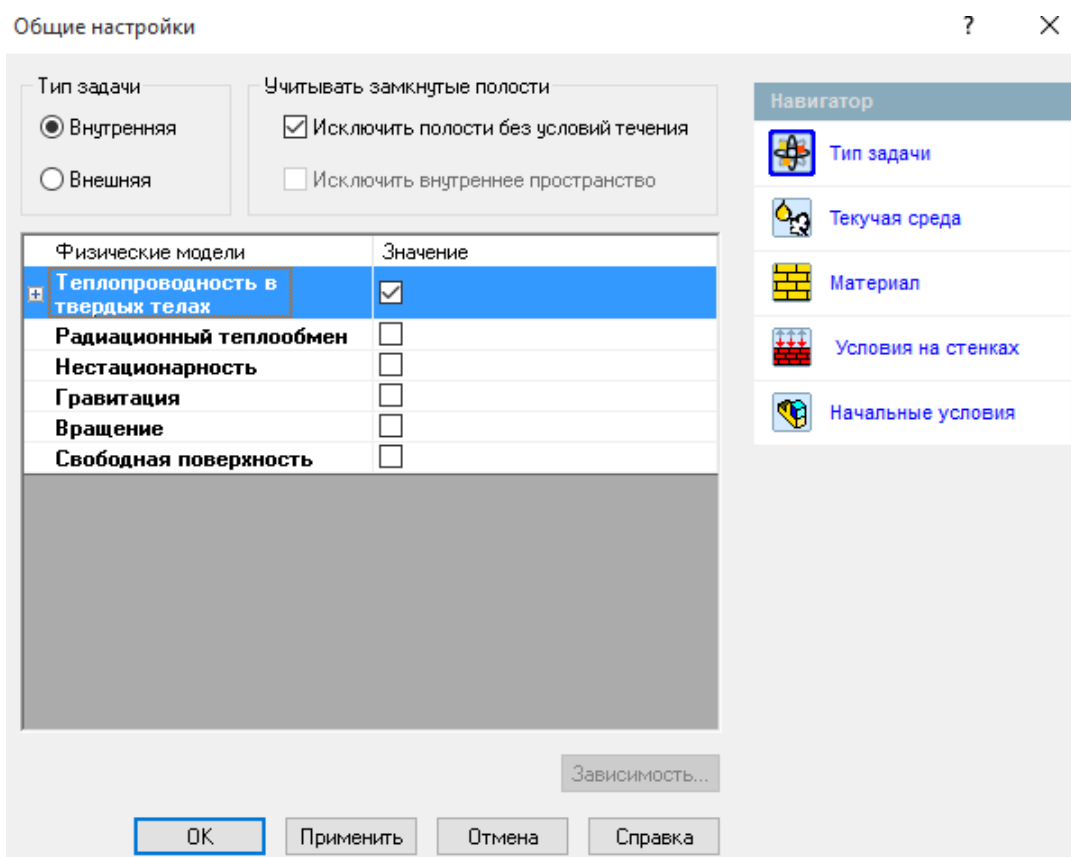


Рис. 4.15 Задання величин та матеріалів для моделювання

Далі натискаємо “Расчетная область” і обираємо простір, де розташований об’єкт досліджень. Варто попередньо зробити осісиметричний розріз зборки для кращої візуалізації. Результати зроблених операцій зображені на рис. 4.16.

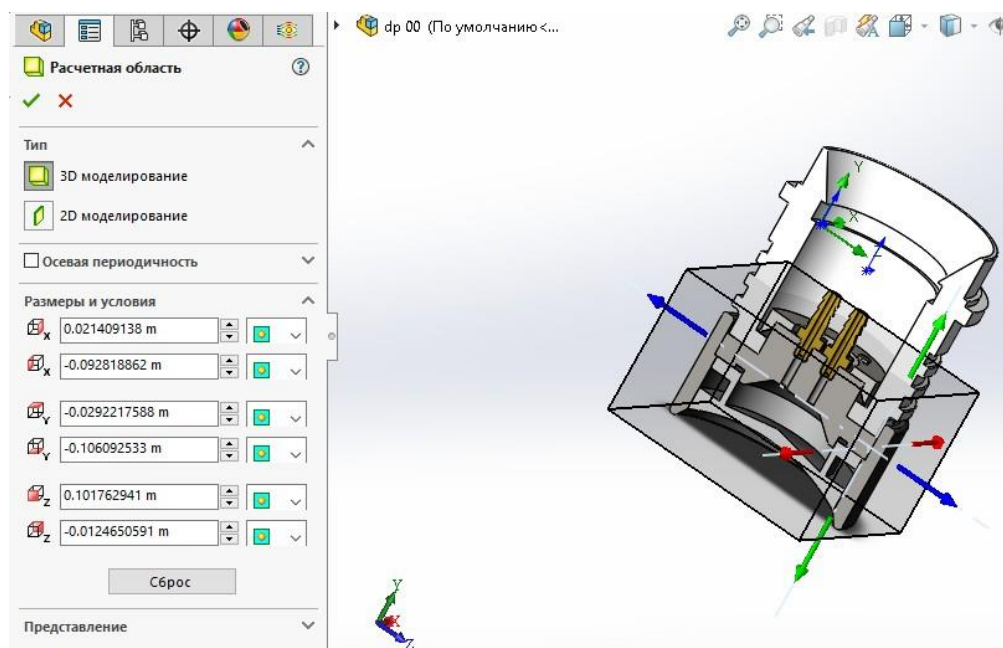


Рис. 4.15 Візуалізація розрахункової області

Наступним кроком обираємо матеріал окремих деталей, натиснувши на їх 3д-модель і обравши з бази необхідний матеріал. Якщо необхідного немає – його можна створити, занісши необхідні параметри матеріалу. Задання матеріалу для катоду зображене на рис. 4.16.

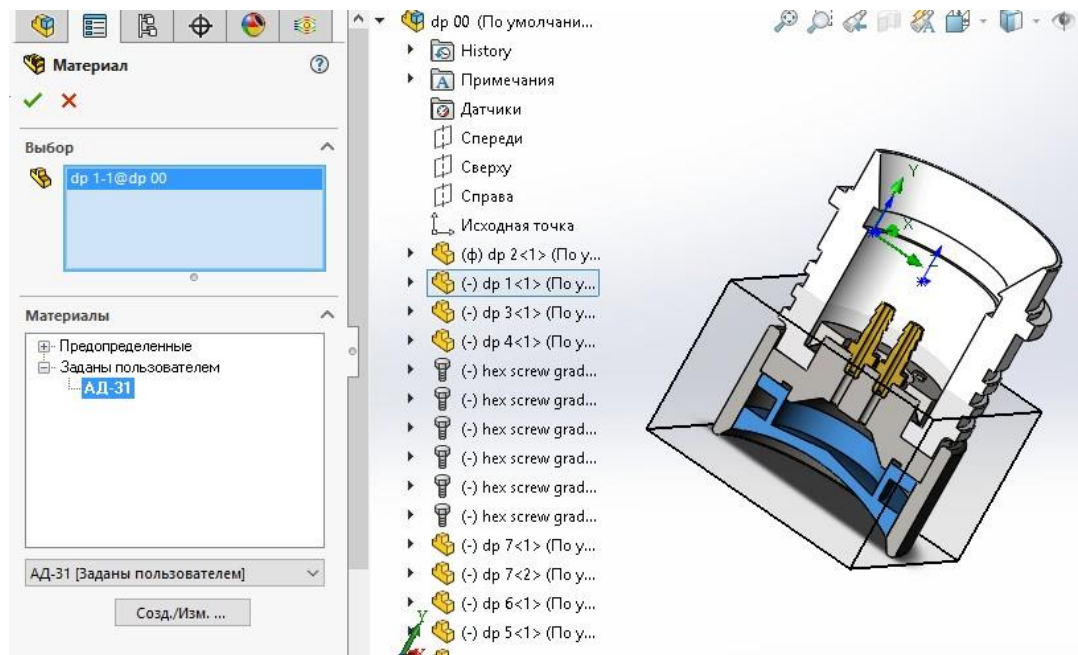


Рис. 4.16 Вибір матеріалу катоду

Обравши матеріали для деталей, слід переходити до задання граничних умов. В даному випадку граничні умови потрібно задати для води, що охолоджує катод. Задаємо об'ємну витрату 1л/с, тиск у системі 500000Па, та швидкість потоку 20 м/с (рис. 4.17).

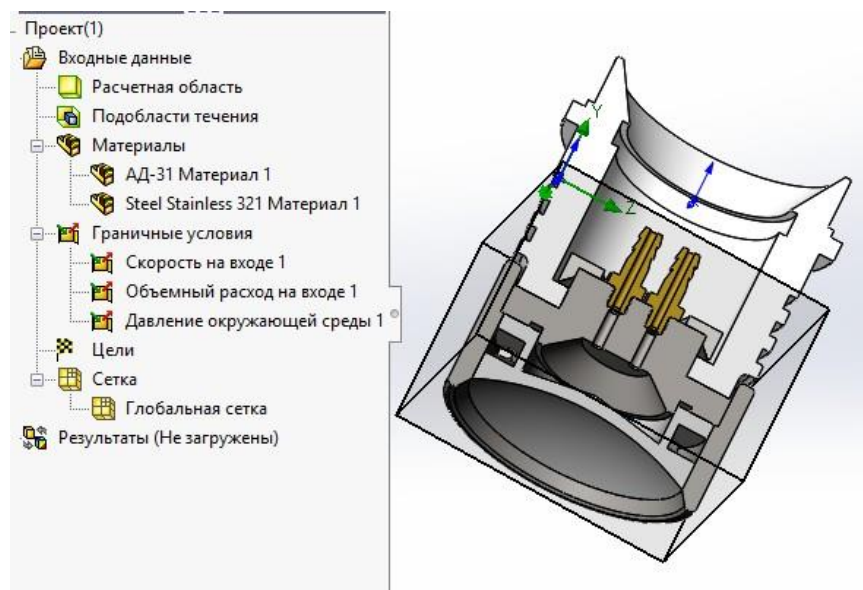


Рис. 4.17 Визначення граничних умов

Як зазначалося раніше, на катоді розсіюється до 5% потужності приладу. Програма не забезпечена функціоналом для симуляції іонного бомбардування, тому енергія поверхні буде надана за допомогою операції “Поверхностный тепловой источник”. Вказуємо максимальну потужність 5000Вт і поверхню, яка отримуватиме цю енергію, рис. 4.18.

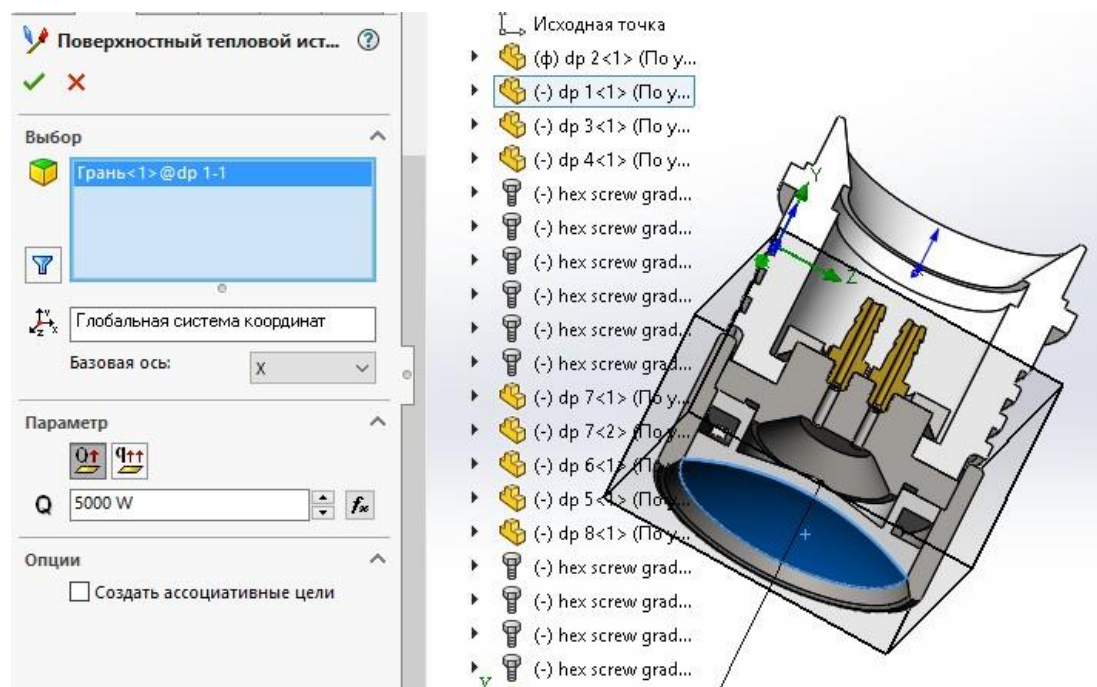


Рис. 4.18 Задання джерела нагріву

Останнім етапом перед запуском моделювання є визначення цілей моделювання. В даному випадку нас цікавить температура твердих тіл, а саме катоду і прикатодного електроду. Після задання необхідних параметрів запускаємо моделювання і аналізуємо результати.

По завершенню моделювання переходимо до перегляду результатів. Для початку перевіримо, чи правильно рідина циркулює у порожнині катоду. Треба обрати джерело потоку і спосіб його відображення. Результат наведено на рис. 4.19.

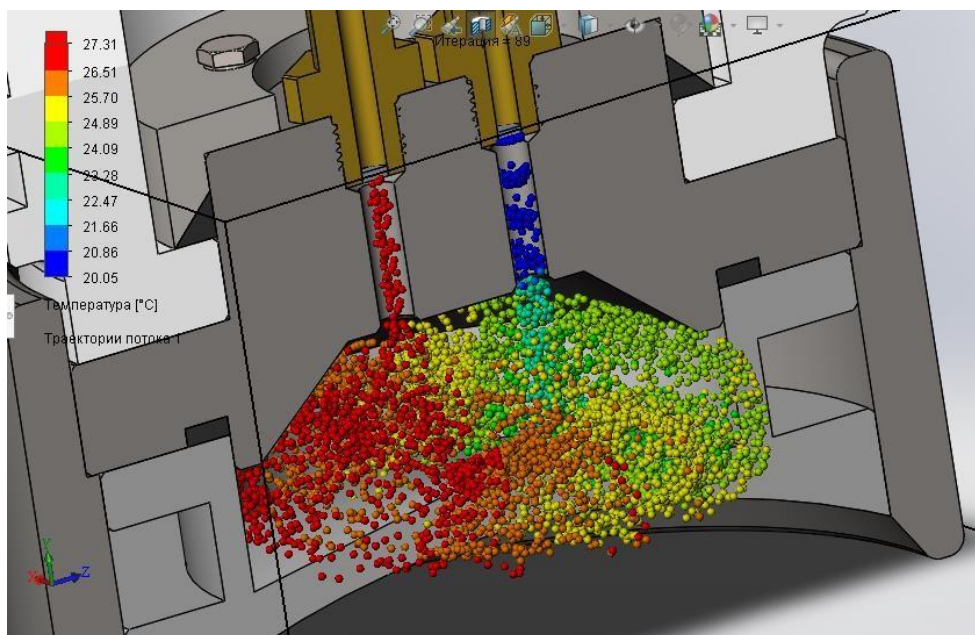


Рис. 4.19 Температурний розподіл по об'єму рідини

Як видно з моделі розподілу рідини, напрямок циркуляції промодельовано правильно, по об'єму на вході рідина має температуру 20 °С, а на виході – 27 С. Тому наступним кроком відобразимо температуру на поверхні катоду, рис. 4.20.

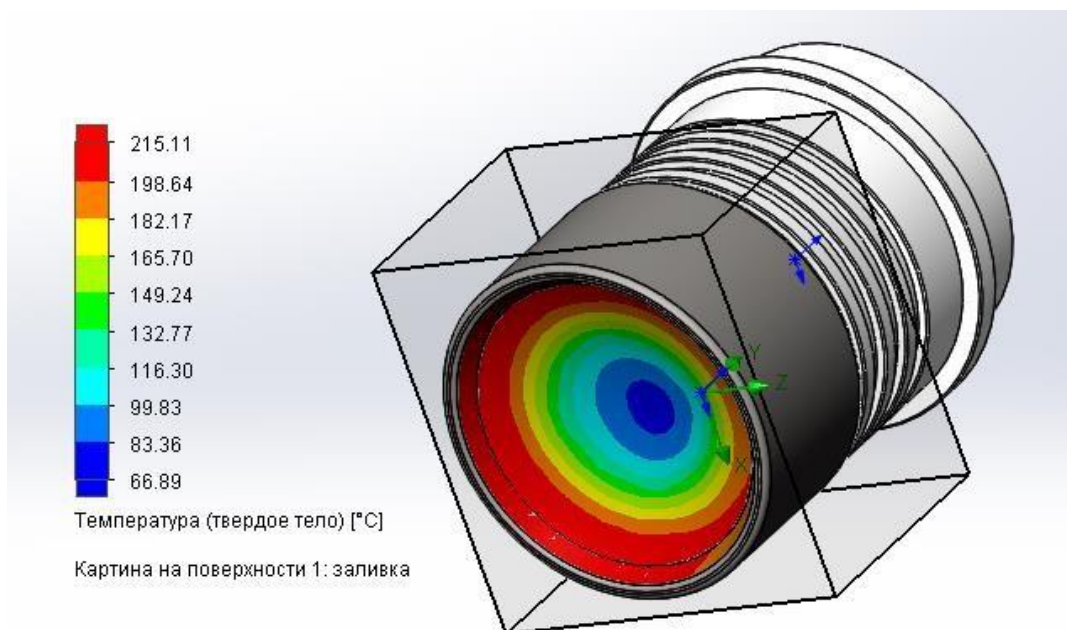


Рис. 4.20 Епюр розподілу температури по поверхні катоду

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДЕ71.712115.001.ПЗ

Арк.

50

Піддамо аналізу дані, отримані по завершенню симуляції теплових навантажень на катодний вузол. Оптимальним температурним режимом роботи для катоду є до 100 °С в центрі і 100-150 по периферії [1.2]. З огляду на теплову картину поверхні катоду можна зробити висновок, що на відміну від центральної частини температура периферії катоду більша за оптимальні значення. Це відхилення можна пояснити тим, що в умовах симуляції тепловий потік розподіляється рівномірно по всій поверхні катоду. На практиці ж робоча поверхня локалізується в центрі, тому основний потік енергії направлений туди. Периферія катоду може бути задіяна тільки при пікових значеннях струму, але й тоді найбільше теплове навантаження буде приходиться на центральну частину. Цю інформацію варто враховувати, щоб правильно сприймати результати. В основному рівномірність охолодження катоду досягається не завдяки зміні площі і форми контактної поверхні катод-вода, а завдяки розподільникам рідини, що вносяться у порожнину з рідиною. У невеликому діапазоні температуру можна коригувати зміною швидкості водяного потоку. Конструктивні особливості катодного вузла не дозволяють вільно маніпулювати геометричними параметрами катоду, тому ідеально налаштувати температурний режим – досить складна задача.

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

ВИСНОВКИ

В дипломному проектуванні розглядалася тема газорозрядних гармат високовольтного тліючого розряду, а саме розрахунок температурного режиму катодного вузла.

В теоретичній частині був проведений огляд загальної конструкції гармати, її структурної схеми, окремих деталей з описом їх вигляду, розмірів та призначення. Були вказані переваги та недоліки холодних катодів перед катодами розжарювання. Зроблений огляд та класифікація систем охолодження катоду у відповідності до потужності, що має гармата.

В розрахунковій частині були розраховані оптимальна швидкість і початкова температура води для охолодження катоду гармати потужністю 100кВт. Отримані результати використовувалися у подальшому моделюванні.

Моделювання катодного теплового режиму проводився з використанням програмного пакету САПР SolidWorks. Для цього були створені 3д- моделі усіх конструктивних елементів та деталей катодного вузла, а саме: катоду, катодного тримача, прижимної шайби, вхідного і вихідного штуцера, ущільнюючих прокладок, прикатодного електроду та ізолятора. По завершенню створення 3д-моделей була складена зборка катодного вузла. За допомогою програмного додатку SolidWorks Flow Simulation було проведена симуляція теплових навантажень на катодний вузол. Результати симуляції представлені у вигляді теплових епюрів поверхонь, що досліджувалися, та моделі об'ємного розподілу температури рідини.

Порівнюючи теоретичні дані з результатами моделювання можна помітити, що температура на периферії катоду більша за оптимальну. Це пояснюється особливостями подання вхідних даних для моделювання.

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В процесі роботи більш за все гріється робоча поверхня катоду, яка локалізована в центральній його частині, в той час коли периферія нагрівається лише завдяки теплопровідності. При моделюванні ж енергія підводиться рівномірно до всієї поверхні катоду, причому миттєво. Такий випадок можна розглядати як аварійний режим при роботі на піковій потужності. Але, не зважаючи на це, система охолодження справляється із своєю задачею і не дозволяє піднятися температурі на катоді навіть до половини температури плавлення алюмінію. У процесі експлуатації температуру катоду можна підкоригувати зміною потоку рідини через порожнину катоду.

Для отримання більш точних результатів необхідно моделювати тепловий режим з певним кроком зміни потужності роботи приладу. Тоді можна буде більш точно оцінити теплову картину на поверхні катоду в різних режимах роботи. Також бажано змінювати площу поверхні, якій надається енергія в залежності від струму пучка, від середньої при номінальних значеннях струму до максимальної при пікових. Врахувавши вищенаведені особливості можна значно підвищити точність результатів моделювання.

Також необхідно враховувати, що програма не є професійним фізичним симулятором на кшталт COMSOL Multiphysics, тому результати все одно матимуть певну похибку через неврахування крайових ефектів, недостатню деталізацію сітки моделювання або банально через нестачу обчислювального ресурсу комп'ютера.

Зважаючи на всі особливості, наведені вище, можна вважати, що мета дослідження досягнута і отримані результати максимально наближені до реальних значень.

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. // М.А. Завьялов, Ю.Е. Крейндель, А.А. Новиков, Л.П. Шантурин / М.: Атомиздат, 1989. – 256 с.
2. Melnik V.G., Melnik I.V., Tugay B.A., Chayka M.V., Vasyura V.M., Kondratiy M.P. Technological Equipment for Electron Beam Refusing on the Base of Glow Discharge Electron Guns. – Електротехника и електроника. № 5-6, 2006. – С. 119-121.
3. Денбновецкий С.В., Мельник В.И., Мельник И.В., Тугай Б.А. Газоразрядные электронные пушки и их применение в промышленности. – Электроника и связь, тематический выпуск «Проблемы электроники», часть 2, 2005. – С. 84-87.
4. Мельник И.В. Численное моделирование распределения электрического поля и траекторий частиц в источниках электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда. – Известия выс-ших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2005. – Т. 48. – №6. – С. 61-71.
5. Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология. – М.: Энергия, 1980. - 528 с.
6. Электронно-лучевая сварка. Под ред. Патона Б.Е. Киев: Наукова думка, 1987. – 256 с.
7. Эспе В. Технология электровакуумных материалов. В 3-х томах. – М.: Энергия, 1969.
8. Мельник І.В. Теоретичні та експериментальні основи проектування технологічних газорозрядних джерел електронів. // Автореферат дисертації на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук. – Київ, 2008. – 40 с

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Мельник И.В. Теоретические оценки влияния нагрева электродов и рабочего газа на энергетические параметры источников электронов высоковольтного тлеющего разряда. – Электроника и связь, том 9, № 21, 2004. – С. 14-16
10. Мельник И.В., Тугай С.Б. Методика моделирования технологических источников электронов высоковольтного тлеющего разряда. // Электронное моделирование. – Т. 32. – №6. – 2010. – С. 31-43.
11. Мельник И.В. Классификация моделей электронно-оптических систем с точки зрения методологии САПР // Электроника и связь, №2(37), 2007. –С. 20 – 31.
12. В.И. Мельник, И.В. Мельник, Крыжановский В.И. Вестник Херсонского национального технического университета. Вып. 3 (39). – Херсон, 2010. – С. 311 – 315.

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

SUMMARY

Gas discharge gun current control system

The diploma project of educational and qualification level "Bachelor" specialty 171 - Electronics, specialization - Electronic devices and systems. Surzhikov Mykola Serhiiovych. KPI them. Igor Sikorsky, Faculty of Electronics, Department of Electronic Devices and Systems. DE-71 group. - K .: KPI them. Igor Sikorsky, 2021. –53 pp., fig. 37, table. 3.

INTRODUCTION

The development of the industrial complex, special equipment and civilian infrastructure is impossible without the introduction of new technologies, materials and equipment. That is why new methods of common operations are being developed that would have greater economic and production efficiency. Electron beam guns have found application in a wide range of processes and operations. They allow you to weld metals with a thickness of hundreds of micrometers to tens of centimeters. In addition, the guns are indispensable in melting and cleaning metals due to their high refining capacity, which is possible due to the low gas pressure in the process chamber and the constant pumping of vapors from it. The power of industrial designs of guns varies from units to hundreds of kW.

CALCULATION OF THE THERMAL REGIME OF THE CATHODE OF THE GUN

The source of electrons for the formation of the electron beam is the cathode. In this study, a high-voltage incandescent gun with a cold cathode was considered. Emission from such a cathode occurs due to the bombardment of its surface with ions of the working gas, which was ionized under the action of a field formed by the potential difference between the cathode and the anode.

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Under the action of bombardment, the cathode is heated due to the fact that part of the ion energy only converts the electrons of the cathode material to a higher energy level, without knocking them out of the material. The secondary ion-electron emission factor, on which the beam current depends, depends, among other things, on the cathode temperature. In addition, when overheated above the melting point, the cathode melts and fails, which is also not desirable. The cathode considered in this work is made of aluminum alloy AD-31 and is shown in Fig. 1.

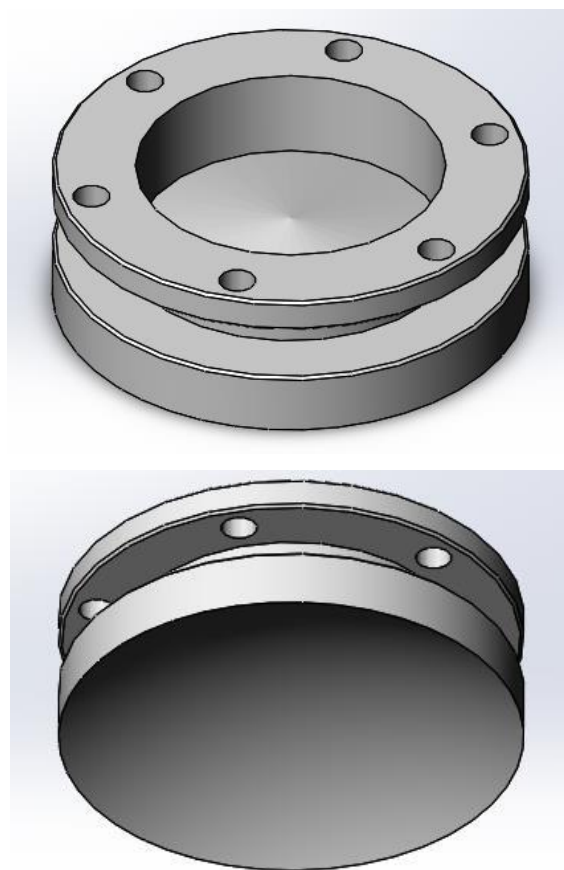


Fig. 1 Cathode

At a melting point of about 600 degrees Celsius, it has an optimum temperature of the working surface from which electrons are taken, about hundreds of degrees, and to divert the positive charge of ions bombarding the cathode, the periphery of the cathode must have a temperature of 150 C.

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

Up to 5% of the total power of the device is released at the cathode in the form of heat. For the electron gun VTR-100, the cathode assembly of which is investigated in the work, the peak power is 100 kW. That is, the maximum value of energy that can be transferred to the cathode is approximately 5 kW. This is a very large capacity, so the cooling system must have time to dissipate heat. To do this, use a system with direct forced cooling of the cathode. Since the geometric dimensions of the cathode are determined mainly by design requirements, changing them to optimize the thermal regime is undesirable. In practice, the cathode temperature is regulated by the rate of water flow through the cathode cavity and the liquid distributors inside this cavity. Therefore, the calculation of the thermal regime of the cathode with its known geometric parameters is reduced to the calculation of the velocity of the liquid.

SIMULATION OF THE CATHODE ASSEMBLY OF THE ELECTRONIC GUN.

To verify the results of calculations of complex and expensive objects, it is advisable to use pre-modeling in CAD systems. This allows you to roughly understand how the designed system will behave. In this case, SolidWorks CAD was used, which in addition to a powerful base of 3D modeling also has the functions of modeling loads of different nature. The first step was to create all the elements of the cathode assembly, indicating their geometric dimensions and materials. For example, a 3D model of the insulator is shown, Fig.2.

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

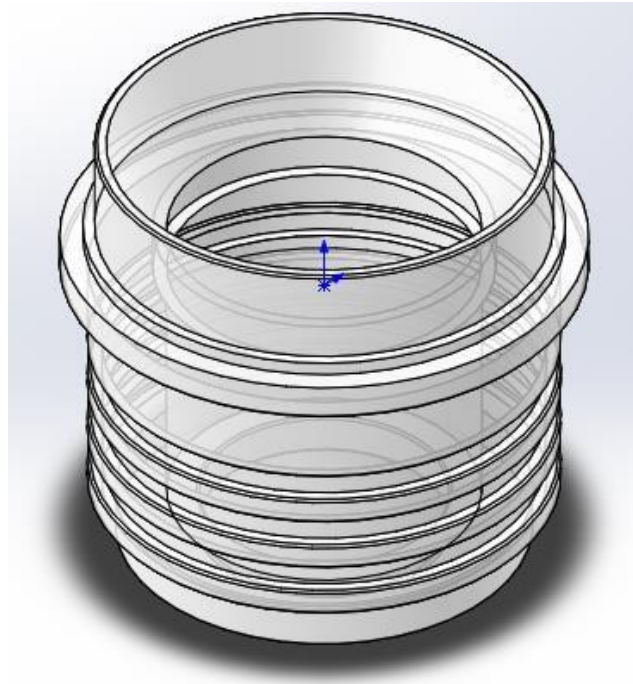


Fig. 2 Insulator

After creating all the parts, they were combined into the assembly shown in Figure 3.

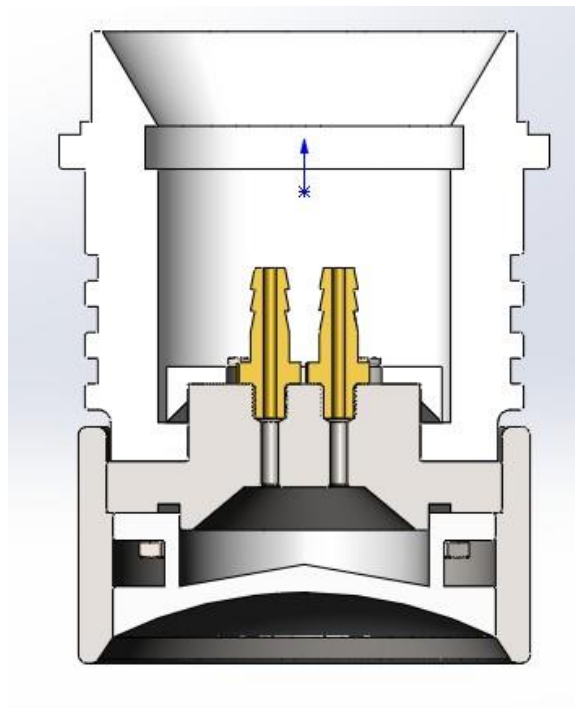


Fig. 3 Assembly of the cathode assembly in section

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

Using the software application SolidWorks Flow Simulation, the thermal regime of the cathode assembly was simulated. As a result of modeling, a model of the temperature distribution of the liquid by volume was obtained (Fig. 4), and the surface temperature of the cathode in the form of a diagram (Fig. 5).

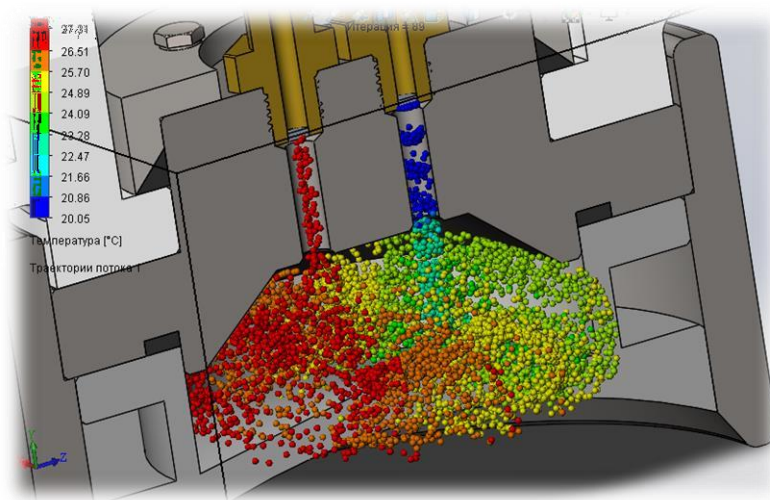


Fig. 4 model of liquid temperature distribution

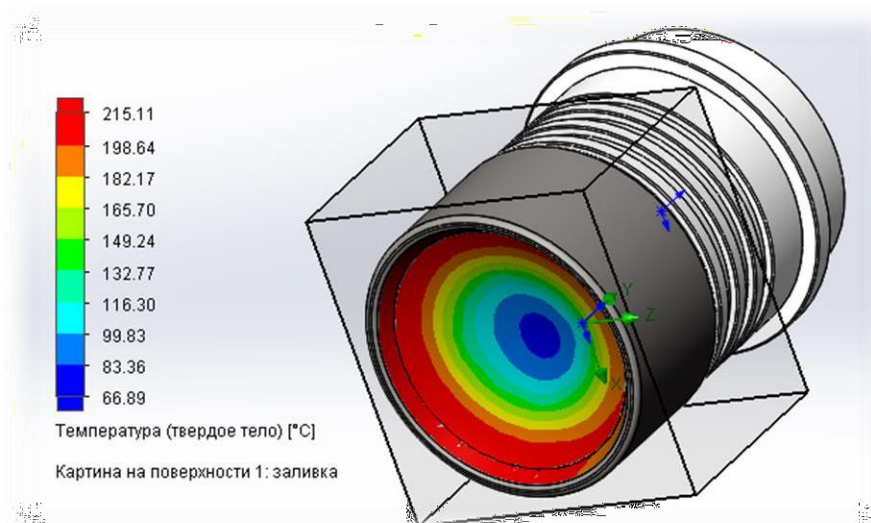


Fig. 5 picture of the temperature on the cathode surface

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

RESULTS OF WORK

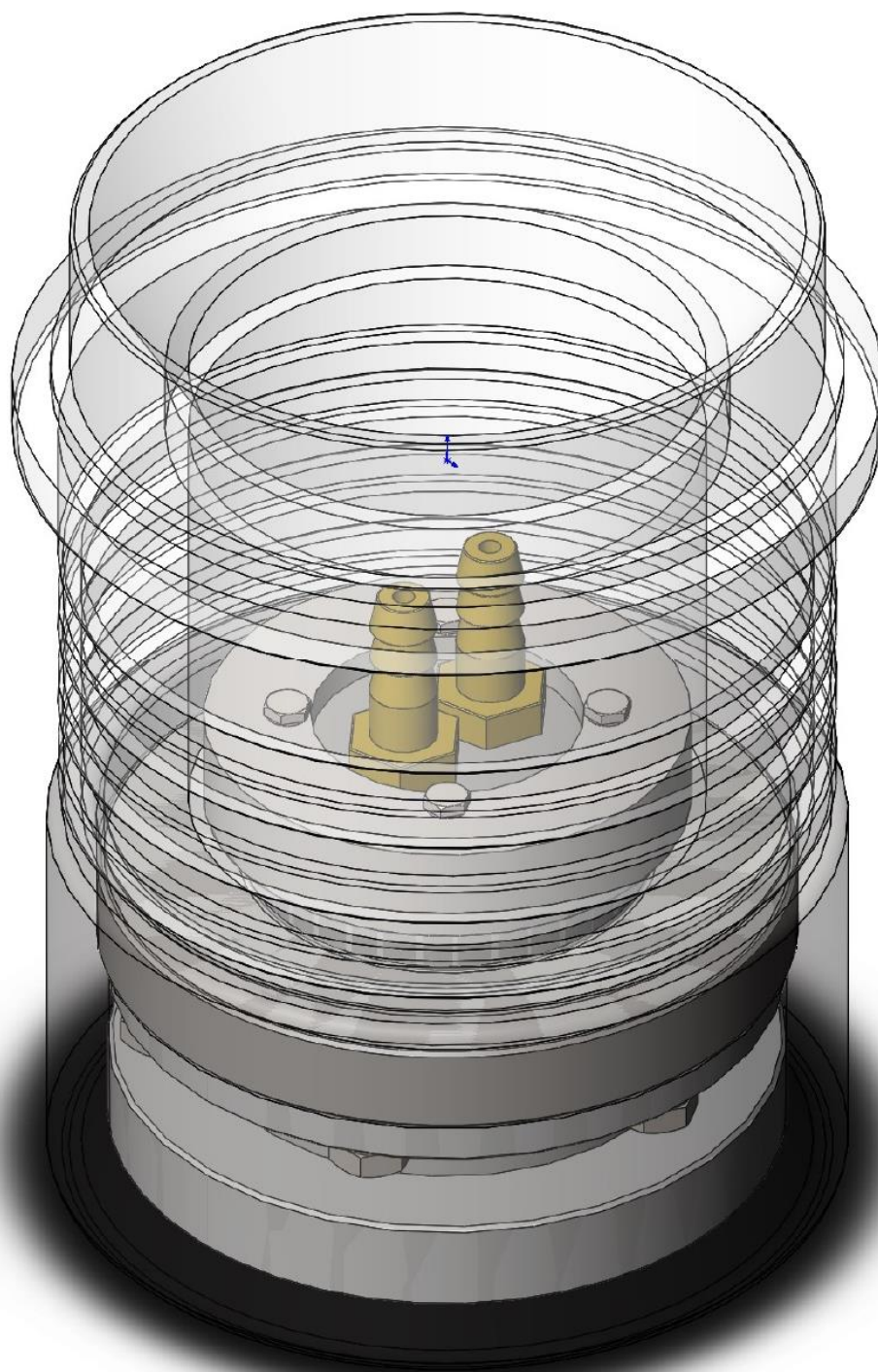
As a result of research, the thermal regime of the cathode assembly of the gun VTR-100 was calculated and simulated. The obtained picture of the thermal distribution of the cathode surface differs from the optimal values in the peripheral regions. This is due to the fact that the simulation mode was taken emergency mode, when the entire surface of the cathode is used to obtain peak current. In practice, the gun uses the nominal mode, when not the entire surface of the cathode is involved. Therefore, the cathode temperature is lower. The obtained results allow to make sure that the cathode will not melt even at maximum power.

To increase the accuracy of calculations, it is necessary to take each specific mode of operation separately, changing the area of the working surface accordingly and adjusting the fluid flow rate accordingly.

					ДЕ71.712115.001.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість	Примітка
-------	--------	------------	--------------	-----------	----------

					<u>Документація</u>	
	A4	ДЕ-71.15.000.00 СК			Складальне креслення	
					<u>Деталі</u>	
1	A4	ДЕ-71.15.000.01			Катод	1
2					Утримувач катодау	1
3					Прикатодний електрод	1
4					Ізолятор	1
5					Прижимна шайба	1
6					Штуцер	2
7					Ущільнювальна прокладка	1
8					Ущільнювальна прокладка	1
					<u>Стандартні вироби</u>	
9					Болт МЗ х 12-N ISO 4017	4
10					Болт М6 х 12-N ISO 4017	6
					ДП.ДЕ-71.15.000.00.СП	
Зм.	Арк	П.І.Б.	Підп.	Дата	Катодний вузол	
Розроб.	Суржиков					
Перевірив	Мельник					
Н.контр.						
Затверд.						
					Лім.	Арк.
						1
						1
					«КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕЛ, ЕПС, гр. ДЕ-71	



Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП.ДЕ-71.15.000.00 ПЛ

Арк.

2