

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ**

**КАФЕДРА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ ТА ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ**

**Кваліфікаційна робота**

\_\_\_ перший бакалаврський \_\_\_  
(рівень вищої освіти)

на тему: **«Розробка конструкції шахтної вакуумної печі спротиву  
для підвищення робочої температури процесу»**

Виконав: студент \_\_IV\_\_ курсу, групи ТЕ-17-1бз  
Спеціальності 144 «Теплоенергетика»  
освітньої програми Теплоенергетика  
Варнавін Михайло Володимирович  
(ініціали та прізвище)

Керівник доц. каф., к.т.н. Карпенко Г.В.  
(вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент доц., канд. техн. наук Радченко В.В.  
(вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя  
2022

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ**  
**ім. Ю.М. ПОТЕБНІ**  
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Кафедра \_\_\_\_\_ Теплоенергетики та гідроенергетики \_\_\_\_\_

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ перший бакалаврський \_\_\_\_\_

Спеціальність \_\_\_\_\_ 144 Теплоенергетика \_\_\_\_\_

Освітня програма \_\_\_\_\_ Теплоенергетика \_\_\_\_\_

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ року

**З А В Д А Н Н Я**

**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Варнавіну Михайлу Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) «Розробка конструкції шахтної вакуумної печі  
спротиву для підвищення робочої температури процесу.»

керівник роботи Карпенко Ганна Володимирівна, канд. техн. наук.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від « 17 » січня 2022 року № 91-с \_\_\_\_\_

2 Строк подання студентом роботи 27 травня 2022 року.

3 Вихідні дані до роботи: габарити печі - 110×200×135, температура нагрівання - 1200±50 °С, перепад температур - 100 °С, теплопровідність – 22

$\frac{Вт}{м \cdot К}$ , питома теплоємність – 524  $\frac{Дж}{кг \cdot К}$

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1) класифікація та області застосування печей опору; 2) тепловий

розрахунок печі; 3) електричний розрахунок печі; 4) розрахунок вакуумної системи.

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): титульний аркуш, класифікація печей опору, Області застосування електричних печей опору, вихідні дані для теплового розрахунку, схема футеровки печі; розрахунок вакуумної системи.

#### 6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Карпенко Г.В., доц. каф. ТГЕ		
Розділ 2	Карпенко Г.В., доц. каф. ТГЕ		
Розділ 3	Карпенко Г.В., доц. каф. ТГЕ		
Розділ 4	Карпенко Г.В., доц. каф. ТГЕ		

7 Дата видачі завдання 20.01.2022 р. \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Теплові навантаження, розрахунки теплової схеми		
2	Розрахунки та вибір обладнання		
3	Графічна частина:		
4	- схема футеровки		
5	- вакуумна система		
6	Оформлення пояснювальної записки		

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_ М.В. Варнавін \_\_\_\_\_  
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) \_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_ Г.В. Карпенко \_\_\_\_\_  
(ініціали та прізвище)

#### Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер \_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_ С.Є. Чижов \_\_\_\_\_  
(ініціали та прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломного проекту містить: 58 аркушів, 9 таблиць та 8 малюнків.

ЕЛЕКТРОТЕРМІЯ, ЕЛЕКТРОПІЧ, ФУТЕРУВАННЯ, ВАКУУМ, ПІЧ  
ОПОРУ, НАГРІВАЧ, ГАРТУВАННЯ, ПОТУЖНІСТЬ, ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЯ,  
ВОГНЕТРИВ.

Метою проекту є розробка малогабаритної вакуумної електропечі для термічної обробки. У проекті наведені повні теплові, електричні та вакуумні розрахунки, на базі яких розроблена конструкція електропечі з обґрунтованим застосуванням необхідних комплектуючих. Також наведено докладний опис конструкції електропечі

## ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПЕЧЕЙ ОПОРУ	8
1.1 Класифікація печей опору	8
1.2 Области застосування печей опору	11
1.3 Сучасні малогабаритні печі опору	13
1.4 Сучасні малогабаритні вакуумні печі опору.	20
1.5 Термічна обробка титану	27
2 ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ПЕЧІ	31
2.1 Вихідні данні	31
2.2 Визначення часу нагріву садки	31
2.3 Розрахунок теплових втрат печі	33
2.4 Розрахунок потужності печі	37
3 ЕЛЕКТРИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПЕЧІ	40
3.1 Розрахунок нагрівальних елементів	40
3.2 Перевірка робочої температури нагрівача	44
4 РОЗРАХУНОК ВАКУУМНОЇ СИСТЕМИ	47
4.1 Методика розрахунку вакуумних печей	55
4.2 Розрахунок вакуумної системи печі опору	55
ВИСНОВОК	58
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	59

## ВСТУП

Принцип роботи печей опору заснований на тому, що при проходженні струму по провіднику, в ньому виділяється тепло. Відповідно до закону Джоуля-Ленца кількість тепла, що виділилося в провіднику, пропорційно квадрату сили струму, опору провідника і часу проходження струму. Підбираючи певні значення сили струму та опору, можна отримати потужність, достатню для розплавлення металів.

Електропечі опору класифікуються:

Електропечі опору класифікуються:

- 1) за типом дії - на печі періодичної та безперервної дії;
- 2) за робочою температурою - на низькотемпературні (до 350 °С), середні температури (до 1000 °С) і високотемпературні (до 1600 °С); для більш високих температур виготовляються печі вакуумні або з іншими атмосферами;
- 3) по атмосфері в робочому просторі печі — на печі з окислювальним (повітряним) середовищем, з атмосферами, що контролюються, і вакуумні;
- 4) за конструктивними ознаками: печі періодичної дії - на камерні, шахтні, ковпакові, елеваторні з підйомним подом, камерні з висувним подом, муфельні з пересувною камерою нагріву, ямні (скринькові), колодязі, ванни, калорифери, плавильні печі; печі безперервної дії - на конвеєрні, з рольганговим подом, штовхальні, барабанні, карусельні, струмкові, з крокуючим подом, пульсуючим подом, протяжні.

Найбільш широко печі опору використовуються для перерахованих нижче технологічних процесів.

Для загартування та відпустки використовують камерні, шахтні, карусельні, штовхальні, барабанні, конвеєрні, струмкові, рольгангові печі, печі з пульсуючим і крокуючим подом, протяжні, печі-ванни.

Для відпалу, томлення та нормалізації використовують камерні, елеваторні, ковпакові, шахтні, штовхальні, конвеєрні, протяжні, барабанні печі та печі з висувним подом.

Для цементації та нітроцементації використовують камерні, шахтні, штовхальні, рольгангові, барабанні печі, електричні ванни.

Для спікання металокераміки використовують штовхальні, ковпакові, конвеєрні, рольгангові та шахтні печі.

Для спікання металокераміки використовують штовхальні, ковпакові, конвеєрні, рольгангові та шахтні печі.

Для паяння з твердими припоями використовують камерні, штовхаючі, роликові, конвеєрні, ковпакові, шахтні печі і електричні ванни.

Для витримки використовують камерні, елеваторні, шахтові печі, печі з розсувним подом і електричні ванни.

Для нагрівання під кування, штампування, прокатку, пресування та інші види гарячої обробки використовують камерні, рольгангові, штовхальні, конвеєрні, карусельні печі та установки контактного нагрівання.

Для сушіння, прокалювання, випалу неметалевих матеріалів використовують електрокалорифери, камерні, барабанні, шахтні, рольгангові, елеваторні, штовхальні печі, печі з висувним подом, установки інфрачервоного нагріву.

Для видалення окалини використовують електрованні, для лудіння та оцинкування - протяжні ванни, для азотування - електрованні, шахтні та конвеєрні печі, для емалювання - протяжні та конвеєрні печі, для нагрівання газів - електрокалорифери.

Для плавки алюмінію та його сплавів застосовують плавильні камерні і тигельні печі опору, для плавки міді та її сплавів — плавильні барабанні, для роздачі алюмінію та її сплавів — плавильні тигельні і камерні.

Конкретний вибір типу печі повинен проводитися з більш повним урахуванням особливостей процесу і можливостей обладнання.

# 1 КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПЕЧЕЙ ОПОРУ

## 1.1 Класифікація печей опору

Печі опору є різновидом електротермічних установок.

Електротермія – прикладна наука про процеси перетворення електричної енергії на теплову; галузь електротехнології, що охоплює проектування, виготовлення та експлуатацію електротермічних установок. Водночас електротермія – галузь енергетики, що займається питаннями споживання електричної енергії для нагрівання, плавки чи опалення, а також сукупність електротехнологічних процесів з використанням теплової дії електричної енергії у різних галузях техніки.

В цьому випадку електротермічні установки – це технологічне обладнання, що реалізує електротермічні процеси.

Класифікація печей опору наведено на мал. 1. Печі опору за способом перетворення електричної енергії в теплову поділяються на печі непрямой та прямої дії. У печах опору непрямой дії теплота виділяється у спеціальних нагрівальних елементах (нагрівачах) та передається нагрівальному тілу (садку) конвекцією та тепловим випромінюванням. У печах опору прямої дії електричний струм протікає безпосередньо через тіло, що нагрівається.

Печі опору непрямой дії по своїй конструкції дуже різноманітні. Вони поділяються на групи залежно від способу передачі теплоти, від нагрівачів до садка на низькотемпературні, середньотемпературні та високотемпературні. У низькотемпературних печах опору теплота до садка передається переважно конвекцією, у середньотемпературних – конвекцією та тепловим випромінюванням, а у високотемпературних – переважно тепловим випромінюванням.

Якщо для технологічного процесу потрібен вакуум або, наприклад, інертний газ, то застосовують вакуумні печі опору з передачею теплоти тепловим випромінюванням або печі з так званою штучною атмосферою, в яких теплота до садка передається конвекцією та тепловим випромінюванням.



Нарешті, в печах опору непрямої дії з рідким теплоносієм (соляні ванни), в які занурюється садок, теплота передається конвекцією.

Усі печі опору непрямої дії за характером роботи, в свою чергу, можна розділити на печі періодичного і методичної дії. У печах періодичного впливу характерний постійний стан садки протягом усього часу її перебування в печі. Цикл роботи такої печі включає завантаження, термообробку за заданим режимом та вивантаження. У печах методичного впливу садка переміщується в процесі термообробки від завантажувального шлюзу печі до розвантажувального, а зміна температури садки відбувається в процесі їх руху.

За технологічним призначенням печі опору непрямої дії можна поділити на три групи:

- термічні печі опору для різних видів термічної та термохімічної обробки чорних та кольорових металів, скла, кераміки та інших діелектриків;
- плавильні печі опору для плавки легкоплавких кольорових металів;
- сушильні печі опору для сушіння лакофарбових покриттів, зварювальних електродів тощо

Електропечі опору, як правило, можна охарактеризувати встановленою потужністю, потужністю холостого ходу, розмірами робочого простору, кількістю електричних зон, робочою температурою, продуктивністю, різновидом пічної атмосфери.

Встановлена потужність печі - загальна потужність, яку здатні виділити нагрівачі печі (при розрахунковій напрузі мережі) з урахуванням потужності електродвигунів всіх пічних механізмів.

Електрична зона - ділянка печі, що має групу нагрівачів з незалежним живленням і, як правило, регульованою потужністю. Число електричних зон у печі визначається температурним графіком, необхідним технологічним режимом обробки.

Робоча температура - температура, яка може бути отримана в робочому просторі печі при забезпеченні достатнього терміну служби нагрівачів, внутрішньопечних механізмів, футерування і т.п.

Продуктивність - кількість оброблюваного матеріалу в одиницю часу - визначається розмірами робочого простору, тепловою потужністю і допустимим питомим навантаженням на під. Крім того, вона залежить від технологічного процесу і тому в наведених нижче відомостях про печі не вказано.

Можна розрізнити такі режими печі:

а) Тривалий режим, при якому піч працює без відключень цілодобово і футеровка досягає температури, що встановилася.

б) Періодичний режим, при якому піч часто (до 1 разу на добу) відключається, але футеровка досягає температури, що встановилася.

в) Циклічний режим, у якому піч включається і відключається з такою частотою, що сягає встановленої температури ні процесі нагрівання, ні процесі охолодження.

Потужність печі завжди менше встановленої і залежить від коефіцієнта використання печі, прийнятого розрахунком запасу потужності (на старіння футерування та нагрівачів). Оптимальні значення споживаної потужності печі становлять 70-80% встановленої.

Потужність холостого ходу печі - потужність, що забирається піччю в тепловому режимі, що встановився при робочій температурах, без урахування потужності нагріву садки і потужності пічних механізмів.

Розмір робочого простору печі - теоретичний (без зазорів) максимальний розмір садки, яка може бути завантажена в піч і нагріта із заданою точністю. У камерних печах розмір робочого простору визначається висотою віконного отвору (за вирахуванням стрілки аркового склепіння).

г) Швидкісний режим, при якому температура печі більш ніж на 50 °C перевищує температуру виробу протягом усього періоду нагрівання.

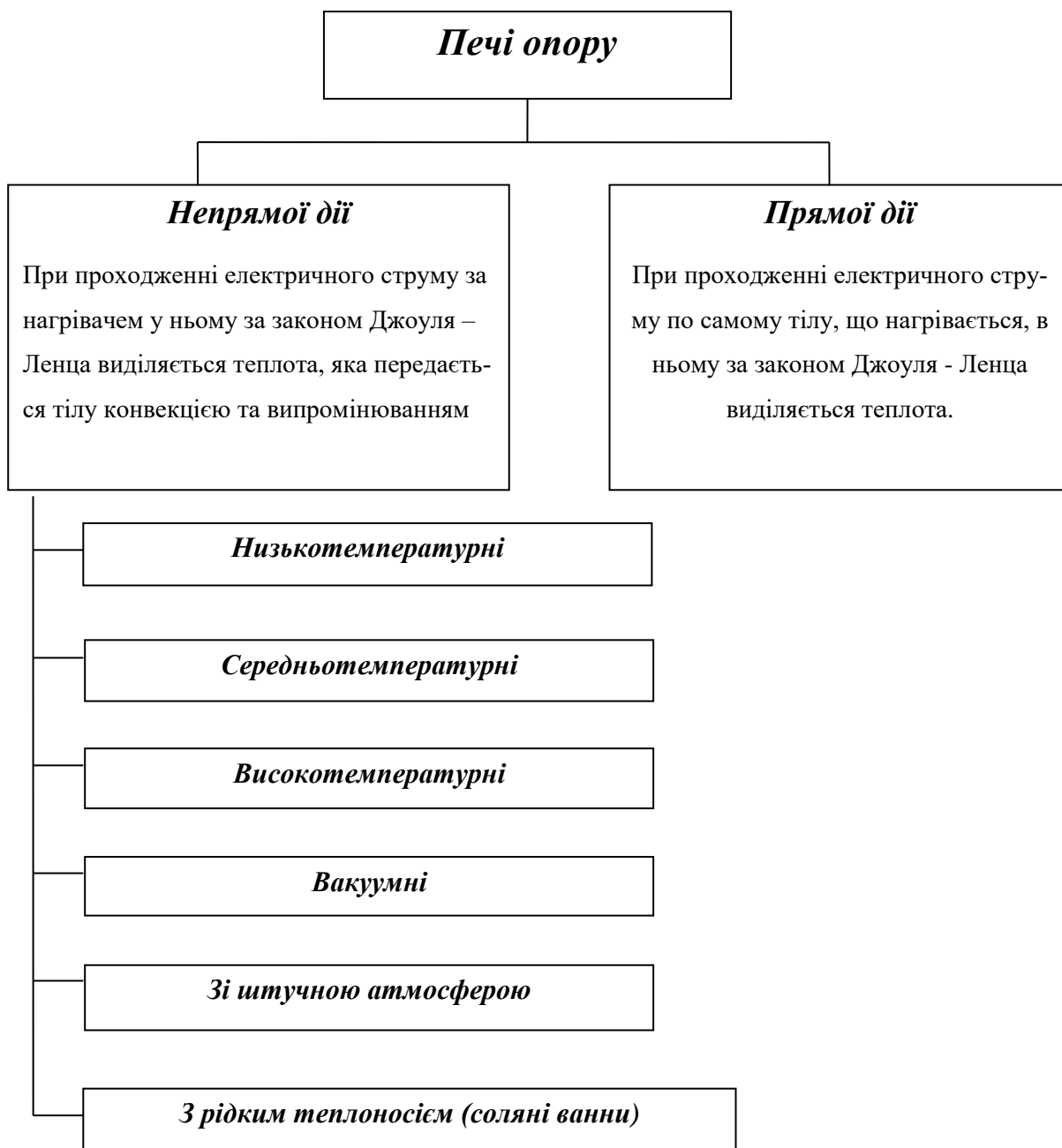


Рисунок 1.1 – Класифікація печей опору

## 1.2 Области застосування печей опору

Печі опору є найбільш поширеним видом електричних печей. Вони використовуються у всіх галузях господарства. На ряді підприємств печі опору є основними споживачами електроенергії. Области застосування печей опору показані у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Области застосування електричних печей опору

Галузь промисловості	Технологічні процеси	Застосовується обладнання
Металургія	Виплавка кольорових та легких сплавів. Виробництво електрографіту. Порошкова металургія, тверді сплави.	Печі опору непрямої дії. Печі опору прямої дії. Печі опору непрямої дії.
Машинобудування	Термічна обробка металів, скла та інших матеріалів. Лиття з легких металів. Нагрів під ковку та штампування. Сушіння ливарних форм та діелектричних виробів та матеріалів.	Печі опору непрямої та прямої дії, вакуумні печі опору. Печі опору непрямої дії.
Хімічна галузь	Виробництво синтетичних волокон, пластмас, синтетичних смол, вулканізація гуми, парфумерія та фармацевтичне виробництво	Печі опору непрямої дії
Харчова промисловість	Хлібопечення, підприємства громадського харчування	Печі опору непрямої дії
Галузь будівництва	Виробництво скла, сушіння будівельних матеріалів	Печі опору непрямої дії
Сільське господарство	Обігрів приміщень, виготовлення кормів, інкубатори, хлопці, підігрів води	Печі опору непрямої та прямої дії
Науково-дослідні установи, навчальні заклади	Хімічні, фізичні, механічні та технологічні експерименти та випробування	Електричні печі опору непрямої дії
Побутові електронагрівальні прилади	Приготування їжі, обігрів приміщень, підігрів води, інші побутові потреби	Печі опору непрямої дії, електроплити, чайники, каструлі, праски, калорифери та ін.

Таке широке поширення печей опору пояснюється рядом істотних їх переваг у порівнянні з теплотехнологічними установками, а саме:

- можливістю концентрувати виділення великої кількості теплоти у порі-

вняно малих об'ємах (прямий нагрівання садка) та отримати завдяки цьому велику швидкість (темп) нагріву та будь-які необхідні температури;

- можливістю забезпечити високу рівномірність нагріву садки як відповідним розміщенням нагрівачів по стінках робочої камери, і примусової циркуляції атмосфери всередині печі;

- легкістю регулювання потужності, що підводиться, а отже, зручністю регулювання температурного режиму печі;

- зручністю механізації та автоматизації процесу завантаження та вивантаження садки, а також переміщення оброблюваного об'єкта в печах опору методичної дії;

- легкістю герметизації печей опору, що дозволяє створювати вакуумні печі та печі зі штучною атмосферою;

- компактністю, зручністю обслуговування, покращенням умов праці.

Необхідно відзначити, що печі опору, як і всі електротермічні установки, відрізняються значними витратами на електроенергію. За цим показником вони поступаються теплотехнологічним установкам. У цьому випадку застосування печей опору виправдовують технологічні переваги. Остаточне рішення про застосування печей опору можна прийняти, провівши техніко-економічне порівняння їх з теплотехнологічними установками.

### **1.3 Сучасні малогабаритні печі опору**

#### **а) Муфельні печі СНОЛ.**

Робоча камера електрпечей муфельних лабораторних СНОЛ з корисним об'ємом від 3 до 10 літрів утворена керамічними муфелями з вмонтованими в них спіральними залізо-хромо-алюмінієвими нагрівачами.

Муфельні лабораторні печі опору СНОЛ (рис. 1.2) використовують для термообробки (нагрів, загартування, випал) та для аналітичних робіт у лабораторії. Муфельні печі СНОЛ чудово підходять для випалу кераміки. Нагрів у

модифікаціях муфельних печей на 3 і 6 літрів проводиться з трьох сторін: бічні стінки, склепіння та під, на 10 літрів з чотирьох сторін: бічні стінки, склепіння та під. Нагрівальні елементи можуть бути повністю запресовані в кераміку для температури до 1050° С та частково запресовані для температури до 1150°С.



Рисунок 1.2 – Муфельна лабораторна піч опору СНОЛ

Цифровий мікропроцесорний регулятор температури дозволяє проводити термообробку з високою точністю за заданою програмою. Електропечі муфельні, що випускаються серійно, оснащуються регуляторами з можливістю завдання тривалості нагрівання та витримки. Для реалізації складнішого температурного процесу термообробки в автоматичному режимі електропечі оснащуються іншими моделями регуляторів за індивідуальними замовленнями.

За індивідуальними замовленнями електропечі можуть бути оснащені іншими моделями регуляторів, що дозволяють реалізувати складніший температурний процес термообробки в автоматичному режимі.

б) Електропечі муфельні лабораторні з вмонтованою системою витяжки продуктів згоряння

Випускаються муфельні електропечі, оснащені витяжним пристроєм (модифікація з літерою В). Продукти згоряння у вигляді диму або пари відводяться через трубу з верхньої частини робочої камери електропечі за допомогою при-

родної тяги. Електропечі з витяжкою рекомендується встановлювати у витяжній шафі або під парасольку витяжної вентиляції.

Електропечі муфельні лабораторні СНОЛ широко та успішно застосовуються у лабораторних та виробничих підрозділах, в освітніх установах тощо.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики лабораторних муфельних електропечей СНОЛ

Модель печі	Об'єм, л	Температура, °С	Потужність, кВт	Число фаз	Ш х Д х В, мм	
					Робоча камера	Габарити
1	2	3	4	5	6	7
СНОЛ 3/10*	3	1050	1,8	1	150x200x100	425x530x520
СНОЛ 3/11		1150				
СНОЛ 6/10*	6	1050	2,2	1	180x270x130	450x600x545
СНОЛ 6/11		1150				
СНОЛ 10/10*	10	1050	4,0	1	200x300x180	470x620x595
СНОЛ 10/11		1150				
СНОЛ 3/10-В*	3	1050	1,8	1	150x200x100	425x610x650
СНОЛ 3/11-В		1150				
СНОЛ 6/10-В*	6	1050	2,2	1	180x270x130	450x680x675
СНОЛ 6/11-В		1150				
СНОЛ 10/10-В*	10	1050	4,0	1	200x300x180	470x700x725
СНОЛ 10/11-В		1150				

\* - електропечі із закритими нагрівачами

Аналітичні роботи та термообробка матеріалів у повітряному середовищі до температури 1150 °С.

Переваги муфельних електропечей:

- легко замінний блок із вбудованими нагрівачами.
- для захисту подової частини муфеля використовується плитка-прокладка корундова зносостійка.
- футерувальні матеріали сучасні волокнисті екологічно чисті та енергетично ефективні.
- металевий кожух із покриттям полімерним порошковим.
- спеціальна технологічна поличка з нержавіючої сталі біля дверного отвору.
- пристрій витяжки на основі природної тяги (модифікації печей з літерою «В») для видалення матеріалів, що виділяються при нагріванні, парів, продуктів сублімації або згоряння.
- мікропроцесорний регулятор- програматор температури із цифровою індикацією.

в) Муфельні печі МІМП-УЕ.

Муфельні печі лабораторні МІМП-УЕ універсальні з електронним цифровим терморегулятором (рис. 1.3) застосовуються в металургії, в ювелірному та керамічному виробництві, в ортопедичній стоматології, в хімічних та харчових лабораторіях.

Висока якість виконання, надійність, довговічність і безпека, гнучка настройка режимів роботи, оптимальні габарити і вага, сучасні матеріали та економічне енергоспоживання - ось лише деякі з переваг муфельних печей МІМП. Максимальна температура нагрівання – 1150°С

Муфельна піч МІМП-УЕ сертифікована та відповідає ТУ



3442.002.24662585-01.



Рисунок 1.3 – Муфельна піч МІМП-УЕ

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики

Тип печі	МІМП-3УЕ	МІМП-6УЕ	МІМП-10УЕ	МІМП-17УЕ	МІМП-21УЕ
Споживана потужність, Вт, не більше	2500	3500	4500	5000	6000
Діапазон заданих температурних величин, °С	1 - 1150 з кроком 1				
Розміри робочого простору, мм	155x105x200	205x185x200	205x185x300	305x185x300	305x230x300
Маса печі, кг	40	50	60	70	75

## г) Муфельні печі лабораторні МІМП-П

Муфельні печі лабораторні МІМП-П універсальні з програмним керуванням (рис. 1.4) призначені для термічної обробки матеріалів у повітряному середовищі. Муфельні печі МІМП-П застосовуються в металургії, в ювелірному та керамічному виробництві, в ортопедичній стоматології, у хімічних та харчових лабораторіях. Максимальна температура нагрівання – 1150 °С

Висока якість виконання, надійність, довговічність і безпека, гнучка на-

стройка режимів роботи, оптимальні габарити і вага, сучасні матеріали та економічне енергоспоживання - ось лише деякі з переваг цих печей.

Муфельна піч МІМП-П сертифікована та відповідає ТУ 3442.002.24662585-01.



Рисунок 1.4 - Муфельна піч МІМП-П

Таблиця 1.4 – Технічні характеристики

Тип печі	МІМП 3П	МІМП 6П	МІМП 10П	МІМП 17П	МІМП 21П
Споживана потужність, Вт, не більше	2500	3500	4500	5000	6000
Діапазон заданих температурних величин, °С	1 - 1150 з кроком 1				
Розміри робочої камери, мм	155x105x200	205x185x200	205x185x300	305x185x300	305x230x300
Маса печі, кг	40	50	60	70	75

#### г) Муфельна піч ПМ-8

Лабораторна муфельна піч ПМ-8 (рисунок 1.5) призначена для термічної обробки металів, кераміки, реактивів та інших матеріалів. Муфельна піч ПМ-8 використовується в лабораторіях виробництва, ювелірному та сувенірному виробництві, в медицині та інших областях.

Особливості даної печі:

- у печах серії ПМ застосований литий керамічний муфель, що має високу

міцність і твердість поверхні. Це виключає обсіпання внутрішніх стінок муфеля за можливих механічних впливів на нього. Завдяки високій тепловій провідності муфеля забезпечується рівномірне нагрівання внутрішнього об'єму печі.

- механізм кріплення дверцят забезпечує її самоустановку при закриванні і зменшує утворення щілин через деформацію корпусу при розігріві печі.

- для охолодження зовнішнього кожуха застосована примусова припливна вентиляція, що дозволяє знизити температуру кожуха до безпечних значень.



Рисунок 1.5 – Муфельна піч ПМ-8

Таблиця 1.5 – Технічні характеристики

Модель	ПМ-8
Діапазон регульованих температур в середині муфелю, С	від 400 до 900
Терморегулювання	ручне - 9 режимів
Об'єм робочої камери, л	7,5
Потужність, кВт	2,4
Напруга живлення, В/Гц	220/50
Габаритні розміри, мм	425x390x530
Маса, кг	28

#### д) Муфельна піч ПМ-10

Муфельна піч ПМ-10 (рисунок 1.6) призначена для термічної обробки металів, кераміки, реактивів та інших матеріалів. Муфельна піч ПМ-10 використовується в лабораторіях виробництв, ювелірному та сувенірному виробництві, в медицині та інших областях.

#### Особливості:

- у печах серії ПМ застосований литий керамічний муфель, що має високу міцність і твердість поверхні. Це виключає обсипання внутрішніх стінок муфеля за можливих механічних впливів на нього. Завдяки високій тепловій провідності муфеля забезпечується рівномірне нагрівання внутрішнього об'єму печі.

- механізм кріплення дверцят забезпечує її самоустановку при закриванні і зменшує утворення щілин через деформацію корпусу при розігріві печі.

- для охолодження зовнішнього кожуха застосована примусова припливна вентиляція, що дозволяє знизити температуру кожуха до безпечних значень.



Рисунок 1.6 – Муфельна піч ПМ-10

### 1.4 Сучасні малогабаритні вакуумні печі опору

Вакуум – стан розрідженого газу (пара). Величину вакууму виражають залишковим тиском газу (пара), у вакуумній техніці найбільш поширеними одиницями вимірювання тиску є міліметр і мікрон ртутного стовпа (мм. рт. ст. і мк. рт. ст.).

У сучасних вакуумних електропечах прийнято вважати низьким вакуумом тиск газу (пара) вище  $10^{-1}$  мм. рт. ст., середнім вакуумом - тиск  $10^{-1}$ - $10^{-3}$  мм. рт. ст., високим вакуумом - тиск  $10^{-4}$ - $10^{-6}$  мм. рт. ст. і надвисоким вакуумом- тиск нижче 10 мм. рт. ст.

Вакуумна піч - герметизований агрегат, в якому проводиться електротермічний процес при тиску газу (пара) в робочому просторі, що підтримується на зазначених вище рівнях. Відповідно до рівня залишкового тиску печі можна розділити на низько-, середньо-, високо- і свержвисоко-вакуумні.

Таблиця 1.6 – Технічні характеристики

Модель	ПМ-10
Діапазон регульованих температур, °С	від 100 до 1000
Терморегулювання	авт. з похибкою $\pm 2$ °С
Об'єм робочої камери, л	6,5
Потужність, кВт	2,4
Напруга живлення, В/Гц	220/50
Габаритні розміри, мм	611x613x530
Маса, кг	55

Переваги проведення електротермічних процесів у середовищі газу (пара) з низьким залишковим тиском:

- можливість без окислювального нагрівання металів. Порівняно з без окислювальним нагріванням у захисних середовищах нагрівання при низькому тиску пічного середовища виключає можливість взаємодії нагрітого металу із захисним газом (навеглюцювання, знеуглювання, азотизація, насичення газами тощо).

- у багатьох випадках застосування низького тиску пічного середовища замість захисних і особливо інертних (аргон, гелій) атмосфер економічно вигідніше. Збільшення початкових витрат на виготовлення та встановлення вакуумної електропечі з надлишком компенсується зниженням експлуатаційних витрат, пов'язаних з приготуванням та очищенням захисного газу.

- плавка металів у вакуумі забезпечує високий ступінь очищення їх від газів та окисних включень, виключає газову пористість, дозволяє обезвуглеводити метал та очистити його від шкідливих домішок.

- забезпечується можливість створення електропечей з високими робочими температурами за рахунок захисту нагрівачів від окислення та насичення газами.

- застосування середовища з низьким тиском дозволяє створювати нові види електротермічних установок, зокрема електронно-променеві печі.

Ці переваги визначають коло технологічних процесів, які проводяться у вакуумних електропечах. До них належать такі:

- плавка, рафінування, розливання у форми або виливниці високолегованих сталей, жароміцних сплавів, тугоплавких, рідкісних та кольорових металів.
- спікання виробів з тугоплавких і легко окисних металів.
- сушіння матеріалів.
- різні види термічної обробки, включаючи відпал, загартування та ін.
- паяння відповідальних деталей.
- дистиляція, сублимація та інші технологічні процеси, пов'язані з отриманням матеріалів високої чистоти, тонких плівок тощо.

#### а) Вакуумні печі СНВЕ-16/13

Вакуумні печі СНВЕ-16/13 (рис. 1.7) призначені для проведення різних термічних процесів (відпал, дегазація, спікання тощо) у вакуумі при температурі до 2000 °С та невеликих газовиділеннях, при яких не відбувається взаємодії середовища залишкових газів з елементами конструкції вакуумної електропечі.

Промислова вакуумна піч СНВЕ-16/13 є вакуумною камерною електропечю опору і складається з наступних основних складових частин: блоку ваку-

умного, камери і трансформатора ТТЕС3-100/17, змонтованих на загальній рамі, і пульта управління.

Вакуумні печі СНВЕ-16/13 розраховані на роботу у приміщенні категорії розміщення 4.2 виконання УХЛ за ДСТУ 15150.

Витрата води для охолодження вакуумної печі відповідає перепаду температур на вході та виході ланцюгів охолодження 20 °С.

Маса садки вакуумної печі залежить від щільності завантаження. Для садок із малою щільністю величина завантаження зменшується.



Рисунок 1.7 – Вакуумна піч СНВЕ-16/13

Таблиця 1.7. – Технічні характеристики вакуумних печей СНВЕ-16/13

Параметр	Значення
1	2
Потужність встановлена, КВт	20
Потужність номінальна електронагрівачів печі, КВт	16
Максимальна температура у робочому просторі, °С	2000
Рівномірність температури в робочому просторі печі за максимальної температури ±, °С	50
Стабільність підтримки заданої температури при керуванні нагріванням системою автоматичного регулювання ±, °С	10
Розміри робочого простору печі, LxVxH, мм	400x200x 200
Маса садки, не більше, кг	20
Граничний залишковий тиск у камері нагрівальної при холодній печі, Па	$4,0 \cdot 10^{-4}$

Продовження табл. 1.7	
Найбільший робочий тиск у нагрівальній камері при гарячій печі, Па	$6,5 \cdot 10^{-3}$
Номинальна напруга мережі живлення, В	380/220
Номинальна частота струму, Гц	50
Число фаз нагрівача печі	2
Витрата води на охолодження печі, м <sup>3</sup> /год	1
Габаритні розміри печі, $L \times B \times H$ , мм	2650x1500x1850
Маса печі, не більше, кг	2000
Номинальний термін служби, років	5

б) Електропіч опору вакуумна СНВЕ-2x4x2/16-2

Електропіч опору вакуумна СНВЕ-2x4x2/16-2 (рис. 1.8) призначені для проведення різних термічних процесів (відпал, дегазація, спікання тощо) у вакуумі при температурі до 1600 °С та невеликих газовиділеннях, при яких не відбувається взаємодії середовища залишкових газів з елементами конструкції вакуумної печі опору.

Вакуумні електропечі СНВЕ-2x4x2/16-2 розраховані на роботу в приміщеннях, що відповідають вимогам "Міжгалузевих правил охорони праці при термічній обробці металів" ПОТ РМ-005-97.

Кожна нагрівальна камера печі є циліндричний, горизонтально розташований корпус, закритий з обох боків кришками, закріпленими на корпусі за допомогою петель і накидних затискачів.

Корпус та кришки печі опору СНВЕ-2x4x2/16-2 забезпечені рубашками охолодження. На верхній частині корпусу електропечі є чотири бобишки для установки водоохолоджуваних мідних струмопроводів. Збоку корпусу розташовані 6 вводів для установки регулюючих і (при необхідності) 4 контрольних датчиків температури.

Усередині корпусу розташовані теплові блоки, що являють собою сукупність бічного та двох торцевих екранів з молібденового листа товщиною 0,2 мм разом із нагрівальними елементами та їх підвісками. Усередині теплових блоків



розташовані молибденові листи – підставки для садіння. Робоча зона печі опору з боків та з обох торців оточена 10 w-подібними нагрівачами, виконаними з молибденового дроту діаметром 6 мм, що утворюють однофазну систему з двох паралельно включених груп.

Операція завантаження-вивантаження садки у двокамерну піч може проводитись з обох торців нагрівальних камер.

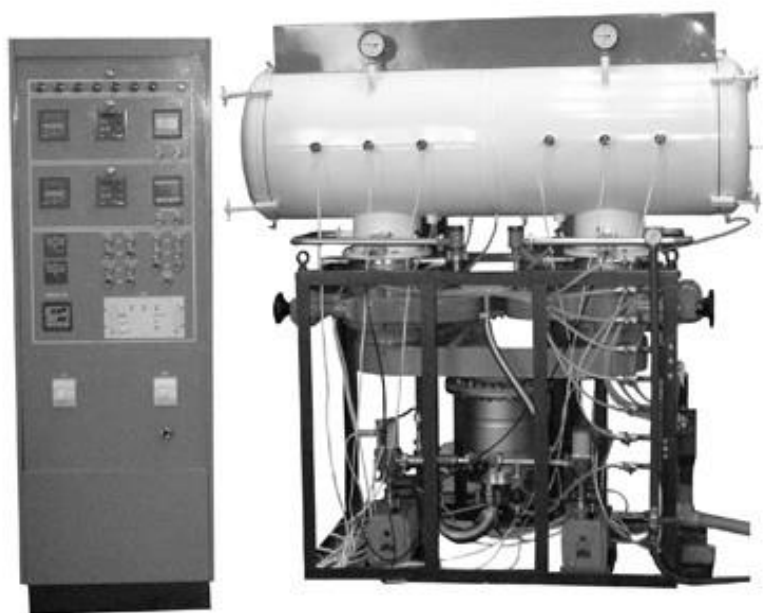


Рисунок 1.8 – Вакуумна електропіч СНВЕ-2х4х2/16-2

Таблиця 1.8 - Технічні характеристики вакуумних електропечей опору  
СНВЕ-2х4х2/16-2

Параметри	Значення
Потужність встановлена, КВт	30
Потужність електронагрівачів у кожній камері, КВт	25
Максимальна температура у робочому просторі, °С	1600
Рівномірність температури в робочому просторі печі за максимальної температури $\pm$ , °С	10
Стабільність підтримання заданої температури при керуванні нагріванням системою автоматичного регулювання $\pm$ , %	1
Розміри робочого простору печі, $V \times L \times H$ , мм	(200x400x200)x2
Маса садки, не більше, кг у кожній камері	20
Найбільший робочий тиск у нагрівальних камерах, Па (мм. рт. ст.)	
- за 1000 °С	$4,0 \cdot 10^{-4}$ ( $4,0 \cdot 10^{-6}$ )
- за 1600 °С	$1,0 \cdot 10^{-3}$ ( $1,0 \cdot 10^{-5}$ )
Температура зовнішніх поверхонь печі, не більше °С	45
Номинальна напруга мережі живлення, В	380/220
Номинальна частота струму, Гц	50
Число фаз нагрівача печі	1
Витрата води на охолодження печі, м <sup>3</sup> /год	1,5
Габаритні розміри печі, не більше, $L \times V \times H$ , мм	
- блок технологічний	1985x 910x2000
- пульт	645x590x1900
- блок силовий	255x580x 470
Маса печі, не більше, кг	
- блок технологічний	1116
- пульт	120
- блок силовий	324
Встановлений термін служби при однозмінній роботі, років	5

## 1.5 Термічна обробка титану

Механічні властивості титану більшою мірою визначаються присутніми у ньому фазами, ніж складом металу. Легуючі елементи частково замінюють атоми титану у ґратах і цим змінюють його властивості. Насправді ж вміст тієї чи іншої фази у сплаві більшою мірою залежить від циклів нагрівання та охолодження, ніж від такого заміщення атомів. Більшість легуючих добавок стабілізує об'ємно-центровану  $\beta$ -фазу і знижує температуру перетворення настільки, що при кімнатній температурі сплави представляють суміш фаз  $\alpha$  і  $\beta$ ,  $\alpha$ -фаза, що кристалізується в гексагональній решітці, порівняно м'яка, в'язка і пластична, тоді як  $\beta$ -фаза має більшу твердість і міцність, але меншу пластичність. Таким чином, змінюючи відносний вміст цих фаз, можна змінювати механічні властивості металу. Для цього користуються загартуванням, відпусткою, безперервним охолодженням, ізотермічним перетворенням, гомогенізацією та старінням.

### 1.5.1 Загартування титану

При швидкому охолодженні у воді або в соляному розчині з  $\beta$ -області (мінімальна температура якої залежить від складу сплаву) тенденція до утворення  $\alpha$ -фази пригнічується, що веде до збереження  $\beta$ -фази. Однак сплави з певним складом зазнають при загартуванні специфічне мартенситне перетворення, механізм якого не цілком зрозумілий. Утворення подібної структури, що складається з так званої  $\alpha'$ -фази, призводить до деякого спотворення решітки, внаслідок чого матеріал стає порівняно з  $\alpha$ -фазою більш твердим і в'язким, зміцнюється і краще протистоїть втомі.

### 1.5.2 Відпускання титана

Якщо титановий сплав загартувати з високої температури і потім, нагріваючи його до температури нижче  $\beta$  - перетворення, витримати при цій температурі певний час і швидко охолодити знову, то така операція називатиметься відпусткою. Відпустка характеризується трьома факторами: фазовим складом сплаву, тривалістю та температурою відпустки. Якщо вихідна структура містить  $\alpha'$  - фазу, то при відпустці спостерігаються зміни двоякого роду:  $\alpha'$  - фаза

перетворюється на  $\alpha$  - фазу, і зерна  $\alpha$  - фази з часом стають зубчастими формою. В результаті цього твердість та міцність зменшуються, а пластичність та ударна в'язкість підвищуються. Однак структури, що складаються з суміші фаз  $\alpha$  і  $\beta$ , цьому правилу не підкоряються: первинна  $\alpha$ -фаза залишається незмінною, а  $\beta$  - фаза розпадається з утворенням  $\alpha$  - фази. При низьких температурах відбувається додаткове утворення  $\alpha$  - фази, внаслідок чого низька температура відпустки веде до більш значного зменшення міцності та твердості та більшого підвищення пластичності, ніж при високотемпературній відпустці тієї ж тривалості. Це особливо помітно спостерігається в тому випадку, коли перед відпусткою матеріал піддається гарячій обробці при температурах ( $\alpha+\beta$ ) - області.

Однак цей процес залежить від часу, так що матеріалу можна повідомити по суті справи однакові властивості як шляхом тривалої відпустки при низьких температурах, так і шляхом короткочасної відпустки при високих температурах. Гомогенізація та старіння. Якщо титановий сплав загартувати з  $\beta$  - області або з верхньої частини ( $\alpha+\beta$ ) - області і потім нагріти знову до температури ( $\alpha+\beta$ ) - області, то прийнято говорити, що цей сплав зазнав гомогенізації та старіння. Подібна обробка титанових сплавів призводить до тих самих результатів, що й відпустка, якщо не вважати того, що вихідна структура в цьому випадку складається переважно з  $\beta$  - фази. Короткочасне старіння забезпечує максимальну твердість, обумовлену утворенням  $\beta'$  - фази. При більш тривалому старінні ця  $\beta'$ - фаза розпадається з виділенням  $\alpha$ - фази, що призводить до зниження твердості та підвищення пластичності.

Ізотермічне перетворення. При охолодженні сплаву з  $\beta$  - області до температур ( $\alpha+\beta$ ) - області та витримці при них протягом певного часу з подальшим швидким охолодженням до кімнатної температури відбувається ізотермічне перетворення з виділенням  $\alpha$  - фази з  $\beta$  - фази. При високих температурах  $\alpha$ -фаза виділяється спочатку за межами зерен  $\beta$  - фази, а потім і всередині самих. Якщо цю обробку проводити при температурах трохи нижче температури перетворення, спочатку внаслідок утворення  $\beta'$  - фази виходить дуже висока твердість. Якщо ж тривалість витримки збільшити, то твердість і міцність матеріалу

знижуються, яке пластичність і в'язкість зростають. За більш низьких температур відбувається поступове підвищення твердості і крихкості, причому при тривалих витримках можна досягти вищої твердості, ніж при короткочасній високотемпературній термообробці. Однак при досить великій витримці у разі низької відпустки внаслідок підвищеного вмісту  $\alpha$  - фази досягається краща пластичність за рахунок міцності.

Безперервне охолодження. Безперервне охолодження являє собою зниження температури сплаву з  $\beta$  - області з будь-якою швидкістю без зупинок або повторних нагрівів. Вже загартування вище розглянуте є особливий вид безперервного охолодження. Швидкість охолодження визначає тривалість проходження інтервалу перетворення. Високі швидкості охолодження пригнічують утворення  $\alpha$  - фази і сприяють більш менш повному збереженню  $\beta$  - фази, що призводить до отримання порівняно твердого матеріалу. Дещо менші швидкості охолодження дають значно твердіший і тендітніший матеріал зі структурою  $\beta'$  - фази. Невеликі швидкості охолодження призводять до утворення двофазної структури. Чим менша швидкість охолодження, тим більше утворюється  $\alpha$  - фази, що супроводжується підвищенням пластичності та в'язкості з одночасним зниженням твердості. Хоча може здатися, що однакові властивості можна досягти термообробкою різних видів за рахунок вибору температури і тривалості операцій, насправді ж існують деякі режими термічної обробки для певних складів сплавів, що дають оптимальні властивості готового продукту.

Коли від матеріалу потрібна висока твердість, його слід піддавати такій термообробці, яка забезпечує досягнення кривої вершини на діаграмі. Найвища твердість всього зразка найкраще виходить загартуванням малолегованого сплаву (область ліворуч від вершини кривої) з подальшою низькотемпературною відпусткою, що забезпечує досягнення вершини кривої. Цей спосіб дозволяє значно змінювати склад металу завдяки можливості вибору температури відпустки. Якщо тривалість відпустки зробити більш необхідною для отримання максимальної твердості, можна отримати матеріал з досить високою твердістю і відомої пластичністю, тобто структуру, що лежить після відпустки праворуч від

вершини кривої.

Коли важливо отримати в'язкий матеріал, то слід взяти низьколегований сплав (область праворуч на діаграмі) і піддати його загартування з температури трохи нижче лінії  $\beta$  - перетворення. Така обробка дає низьку межу плинності, але забезпечує високий опір удару. Межу плинності цих сплавів можна трохи підвищити, якщо їх обробити до гарту в гарячому стані ( $\alpha+\beta$ ) області.

Найбільше застосування отримав матеріал з помірною міцністю, але гарними пластичністю та в'язкістю. Ці властивості найкраще досягаються при застосуванні сплавів, які в результаті загартування лягають на правій гілці кривої недалеко від піку максимальної твердості. Остаточні властивості сплаву залежать від того, наскільки далеко вправо від вершини кривої перемістився сплав при термообробці. Хороші властивості матеріалу надають помірні швидкості охолодження, що досягаються охолодженням на повітрі. Ізотермічне перетворення при низьких температурах дає такі самі результати; тривалість витримки визначає ступінь зниження міцності та підвищення в'язкості. Гомогенізація з наступним старінням також підвищує в'язкість з допомогою зниження міцності. Вказують, що гаряча обробка тиском і гомогенізація ( $\alpha+\beta$ ) області дозволять ще більше покращити механічні властивості сплавів.

Характер термообробки можна вибрати на власний розсуд, проте тривалість операції і температура у разі визначатимуться складом сплаву. Термообробці не піддаються лише нелегований титан та його подвійні сплави з алюмінієм.

## 2 ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ПЕЧІ

### 2.1 Вихідні данні

Розробити малогабаритну вакуумну піч опору для загартування титану з наступними вихідними даними (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для теплового розрахунку

Найменування	Позначення	Одиниці вимірювання	Значення
Ш×Д×В садки	$a \times b \times c$	мм	110×200×135
Температура нагрівання	$T_{нагр.}$	°C	1200±50
Перепад температур	$\Delta t$	°C	100
Теплопровідність	$\lambda$	$\frac{Вт}{м \cdot К}$	22
Питома теплоємність	$C$	$\frac{Дж}{кг \cdot К}$	524

### 2.2 Визначення часу нагріву садки

Температуру печі приймаємо 1250 °C.

Визначаємо ступінь масивності тіла:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot S}{\lambda} = \frac{10 \cdot 0,135}{22} = 0,06,$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні, Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$\lambda$  – теплопровідність садки, Вт/(м · К).

$Bi < 0,25$  отже розрахунки ведуться для тонкого тіла.

Корисний тепловий потік визначається за співвідношенням:

$$q_{\Pi} = \frac{C_{\Pi P}}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{вир}}} + \frac{F_{\text{вир}}}{F_{\text{печи}}} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_{\text{печи}}} - 1 \right)} \cdot \left[ \left( \frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{вир}}}{100} \right)^4 \right] = \frac{5,76}{0,8 + \frac{0,092}{0,336} \cdot \left( \frac{1}{0,9} - 1 \right)} \times \left[ \left( \frac{1523}{100} \right)^4 - \left( \frac{1293}{100} \right)^4 \right] = 116331 \text{ Вт/м}^2, \quad (2.1)$$

де  $c_{np} = \frac{5,76}{\frac{1}{0,8} + \frac{0,092}{0,336} - \left( \frac{1}{0,9} \right)} = 4,5$  – коефіцієнт випромінювання;

$T_{\text{печи}}$  и  $T_{\text{вир}}$  – поточні значення температури печі та виробу в К;

$\varepsilon_{\text{вир}}$  и  $\varepsilon_{\text{печи}}$  – ступінь чорноти виробу та печі відповідно;

$F_{\text{вир}}$  и  $F_{\text{печи}}$  – площі виробу та печі відповідно, мм;

$$t''_{\text{нов}} = 0,85 \cdot 1200 = 1020^\circ\text{C};$$

$$T_{\text{вир}} = 1020 + 273 = 1293\text{K}.$$

Температура поверхні виробу до кінця періоду нагрівання при  $q_{\Pi} = \text{const}$ :

$$t''_{\text{нов.вир.}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\left( \frac{T''_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \frac{q_{\Pi}}{c_{np}} - 273} = 100 \cdot \sqrt[4]{\left( \frac{1523}{100} \right)^4 - \frac{116331}{4,5} - 273} = 1020^\circ\text{C}, \quad (2.2)$$

де  $T''_{\text{печи}}$  – температура виробу в момент закінчення регулярного режиму, К.

Час нагріву валу до  $t''_{\text{нов.вир.}} = 1020^\circ\text{C}$  у цьому випадку дорівнює:

$$\tau_I = \frac{Gc(t''_{\text{вир}} - t'_{\text{вир}})}{q_n \cdot F_{\text{вир}}} = \frac{\rho Vc(t''_{\text{вир}} - t'_{\text{вир}})}{q_n \cdot F_{\text{вир}}} = \frac{13,62 \cdot 524 \cdot (1020 - 20)}{116331 \cdot 0,092} = 667 \text{ с} = 0,18 \text{ год}, \quad (2.3)$$



де  $G$  – маса виробу, кг;

$c$  – середня питома теплоємність, Дж/(кг·К);

$t''_{вир}$  и  $t'_{вир}$  – кінцева та початкова температури відповідно, К.

$$\tau_{II} = \frac{Gc}{F_{вир} C_{np}} \cdot \frac{100}{(T_{печи}/100)^3} \cdot \left[ \Psi\left(\frac{T'''}{T_{печи}}\right) - \Psi\left(\frac{T''}{T_{печи}}\right) \right] = \frac{13,62 \cdot 524}{0,092 \cdot 4,5} \cdot \frac{100}{1523/100} \times$$

$$\times \left[ \Psi\left(\frac{1523}{1523}\right) - \Psi\left(\frac{1293}{1523}\right) \right] = 734c = 0,2 \text{ год}, \quad (2.4)$$

де  $T'''$  – абсолютна температура виробу на початку другого періоду нагрівання, К;

$T''''$  – абсолютна температура виробу в кінці другого періоду нагрівання, К.

Значення функції  $\Psi (T_{вир.}/T_{печи})$  дано в табл. П-4-3 [8].

Знаходимо повний час нагрівання виробу:

$$\tau' + \tau'' = 0,38 \text{ год}. \quad (2.5)$$

### 2.3 Розрахунок теплових втрат печі

Для визначення теплових втрат печі конструємо її футерування. Внутрішній розмір печі беремо з огляду на розміщення нагрівачів. Розмір робочої камери печі: висота – 150мм, ширина – 200мм, довжина – 300мм. Стіни робимо із шарів: 2 шари теплоізоляції та вогнетриву. Як теплоізоляція вибираємо піношамот (щільність  $\rho=600 \text{ кг/м}^3$ , робоча температура  $t=1300^\circ\text{C}$ ), товщина шару – 100 мм і вермикуліт спучений (засипання) (щільність  $\rho=125 \text{ кг/м}^3$ , робоча температура  $t=1100^\circ\text{C}$ ), товщина шару - 150мм. В якості вогнетриву вибираємо базальтову БТВ плиту (щільність  $\rho = 240 \text{ кг/м}^3$ , робоча температура  $t = 700^\circ\text{C}$ ), товщина шару - 50мм. Для дверей беремо: піношамот (щільність  $\rho=600 \text{ кг/м}^3$ ,

робоча температура  $t=1300^{\circ}\text{C}$ ), товщина шару – 150мм і базальтову плиту БТВ (щільність  $\rho=240\text{кг}/\text{м}^3$ , робоча температура  $t=700^{\circ}\text{C}$ ), товщина шару – 100мм.

Для температури всередині печі в  $1250^{\circ}\text{C}$  (вважаємо температуру внутрішніх поверхонь стін рівної  $1250^{\circ}\text{C}$ ) приймаємо, що температура кожуха печі .

Для стінок печі коефіцієнт тепловіддачі з поверхні вибираємо в залежності від температури зовнішньої поверхні по табл. П1-1 в [8]:

$$\alpha_{зов} = 11,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}).$$

Коефіцієнт теплопровідності матеріалів футерування знаходимо по табл. П5-3 [8]:

$$\lambda_{\text{ніношамот}} = 0,1047 + 0,0001454 \cdot \frac{1250+1050}{2} \cdot 10^{-3} = 0,27191 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}); \quad (2.6)$$

$$\lambda_{\text{вермикулит}} = 0,0698 + 0,000233 \cdot \frac{670+1050}{2} \cdot 10^{-3} = 0,27018 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}); \quad (2.7)$$

$$\lambda_{\text{плитаБТВ}} = 0,07 + 0,000186 \cdot \frac{670+70}{2} \cdot 10^{-3} = 0,052 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}). \quad (2.8)$$

Теплові втрати через стіни визначаються за співвідношенням:

$$\begin{aligned} Q_{\text{пот.ст}} &= \frac{t_{\text{печ}} - t_{\text{зовн.}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{зовн}}} + \frac{\delta_{\text{ніношамот}}}{\lambda_{\text{ніношамот}}} + \frac{\delta_{\text{вермикулит}}}{\lambda_{\text{вермикулит}}} + \frac{\delta_{\text{плитаБТВ}}}{\lambda_{\text{плитаБТВ}}}} = \\ &= \frac{810 - 25}{\frac{1}{11,6} + \frac{0,1}{0,27191} + \frac{0,15}{0,27018} + \frac{0,05}{0,052}} = 6241439 \text{ Вт} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Перевіряємо температури на межах шарів футерування:

$$t_{\text{меж1}} = 1250 - \frac{624,1439 \cdot 0,1}{0,27191} = 1020^{\circ}\text{C}; \quad (2.10)$$

$$t_{\text{меж2}} = 1020 - \frac{624,1439 \cdot 0,15}{0,27018} = 674^{\circ}\text{C}; \quad (2.11)$$

$$t_{\text{кож}} = 674 - \frac{624,1439 \cdot 0,05}{0,052} = 73,8^{\circ}\text{C}; \quad (2.12)$$

$$t_{\text{кож}} = 20 + \frac{624,1439}{11,6} = 73,8^{\circ}\text{C}. \quad (2.13)$$

Збіг прийнятний.

Для дверей печі коефіцієнт тепловіддачі з поверхні вибираємо в залежності від температури зовнішньої поверхні по табл. П1-1 в [8]:

$$\alpha_{\text{зов}} = 11,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C});$$

Коефіцієнт теплопровідності матеріалів футерування знаходимо по табл. П5-3 [8]:

$$\lambda_{\text{піношамот}} = 0,1047 + 0,0001454 \cdot \frac{1250 + 780}{2} \cdot 10^{-3} = 0,33 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}); \quad (2.14)$$

$$\lambda_{\text{плитаБТВ}} = 0,07 + 0,000186 \cdot \frac{780 + 100}{2} \cdot 10^{-3} = 0,15184 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}); \quad (2.15)$$

Теплові втрати через стіни визначаються за співвідношенням:

$$q_{\text{пот.ст}} = \frac{t_{\text{печи}} - t_{\text{зовн}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{нар}}} + \frac{\delta_{\text{піношамот}}}{\lambda_{\text{піношамот}}} + \frac{\delta_{\text{плитаБТВ}}}{\lambda_{\text{плитаБТВ}}}} = \frac{810 - 25}{\frac{1}{11,6} + \frac{0,15}{0,33} + \frac{0,1}{0,15184}} = 1025,56 \text{ Вт}; \quad (2.16)$$

Перевіряємо температури на межах шарів футерування:

$$t_{\text{меж}} = 1250 - \frac{1025,56 \cdot 0,15}{0,33} = 784^{\circ}\text{C}; \quad (2.17)$$

$$t_{\text{кож}} = 784 - \frac{1025,56 \cdot 0,1}{0,15184} = 108,41^{\circ}\text{C}; \quad (2.18)$$

$$t_{\text{кож}} = 20 + \frac{1025,56}{11,6} = 108,41^{\circ}\text{C}. \quad (2.19)$$

Збіг прийнятний.

Таким чином, сумарні теплові втрати печі при температурі її стінок дорівнюють:

$$Q_{\text{бок}} = 0,15 \cdot 0,3 \cdot 624 = 28,08 \text{ Вт}, \quad (2.20)$$

$$Q_{\text{зс}} = 0,2 \cdot 0,15 \cdot 624 = 18,72 \text{ Вт}, \quad (2.21)$$

$$Q_{\text{верх}} = 0,2 \cdot 0,3 \cdot 624 = 37,44 \text{ Вт}, \quad (2.22)$$

$$Q_{\text{бок}} = 0,15 \cdot 0,2 \cdot 1025 = 30,75 \text{ Вт}, \quad (2.23)$$

$$Q = 1,2 \cdot (18,72 + 2 \cdot 28,08 + 2 \cdot 37,44 + 30,75) = 216,6 \text{ Вт}, \quad (2.24)$$

де 1,2 - коефіцієнт запасу, так як ми не враховували втрати через теплі короткі замикання. Крім того, коефіцієнт 1,2 враховує можливе старіння теплоізоляції печі в експлуатації.

## 2.4 Розрахунок потужності печі

Для розрахунку часу остигання печі визначаємо акумульоване її кладкою тепло.

Маса вогнетриву:

$$V = 0,1(2 \cdot 0,4 \cdot 0,15 + 0,1 \cdot 0,15 + 2 \cdot 0,4 \cdot 0,4) + 0,05 \cdot 0,14 \cdot 0,2 + 0,1 \cdot 0,16 \times \\ \times 0,21 = 0,05 \text{ м}^3; \quad (2.25)$$

$$m = \rho \cdot V = 600 \cdot 0,05 = 30 \text{ кг}, \quad (2.26)$$

$$c = 880 + 0,23 \cdot t_{cp} = 880 + 0,23 \cdot \frac{1250 \cdot 1050}{2} = 1144,5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}. \quad (2.27)$$

Акумульоване ним тепло:

$$Q_{ак.вогн.} = c \cdot m \cdot t_{cp} = 1144,5 \cdot 30 \cdot 1150 = 3,95 \cdot 10^7 \text{ Дж} \quad (2.28)$$

Маса засипки:

$$V = 0,15 \cdot (2 \cdot 0,65 \cdot 0,55 + 2 \cdot 0,4^2 + 0,4 \cdot 0,15) = 0,1643 \text{ м}^3, \quad (2.29)$$

$$m = \rho \cdot V = 125 \cdot 0,1643 = 20,5 \text{ кг}, \quad (2.30)$$

$$Q_{ак.зас.} = c \cdot m \cdot t_{cp} = 880 \cdot 20,5 \cdot 860 = 1,55 \cdot 10^7 \text{ Дж}. \quad (2.31)$$

Маса теплоізоляції:

$$V = 0,05 \cdot (2 \cdot 0,8 \cdot 0,75 + 2 \cdot 0,8^2 + 0,7 \cdot 0,65) + 0,1 \cdot 0,16 \cdot 0,21 = 0,15 \text{ м}^3, \quad (2.32)$$

$$m = \rho \cdot V = 240 \cdot 0,15 = 36 \text{ кг}, \quad (2.33)$$

$$Q_{ак.мен.} = c \cdot m \cdot t_{cp} = 1047 \cdot 36 \cdot 370 = 1,39 \cdot 10^7 \text{ Дж}. \quad (2.34)$$

Сумарне акумульоване кладкою тепло при температурі печі дорівнює:

$$Q_{ак.сум} = (3,95 + 1,55 + 1,39) \cdot 10^7 = 6,89 \cdot 10^7 \text{ Дж} \quad (2.35)$$

Кількість тепла, акумульованого виробом:

$$Q_{ак.вир} = c_{вир} \cdot m \cdot t_{нагр} = 524 \cdot 13,62 \cdot 1200 = 0,86 \cdot 10^7 \text{ Дж}. \quad (2.36)$$

Повна кількість тепла, акумульованого завантаженою піччю, дорівнює при 1250°C:

$$Q_{ак.1250} = (6,89 + 0,86) \cdot 10^7 = 7,75 \cdot 10^7 \text{ Дж}. \quad (2.37)$$

Повний час циклу:

$$\tau_{цикл} = \tau_{нагр} + \tau_{всп} = 0,38 + 0,12 = 0,5 \text{ год}. \quad (2.38)$$

Теплові втрати за час нагрівання:

$$Q_{пот.нагр} = q_{пот.ост.ср} \cdot \tau_{нагр} = 216,6 \cdot 0,38 \cdot 3600 = 0,03 \cdot 10^7 \text{ Дж}. \quad (2.39)$$

Повна витрата тепла за цикл:

$$Q_{цикл} = Q_{вир+тел} + Q_{пот.нагр} = (7,75 + 0,03) \cdot 10^7 = 7,78 \cdot 10^7 \text{ Дж}, \quad (2.40)$$

а звідси питома витрата енергії:

$$A = \frac{Q_{\text{цикл}}}{m} = \frac{7,78 \cdot 10^7}{13,62} = 5,7 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг} = 1,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг} \quad (2.41)$$

Коефіцієнт корисної дії печі:

$$\eta = \frac{Q_{\text{ак.вир+тел}}}{Q_{\text{цикл}}} = \frac{7,75 \cdot 10^7}{7,78 \cdot 10^7} = 0,896. \quad (2.42)$$

Потужність складе:

$$P_{\text{печи}} = 1,2 \cdot \left[ q_n \cdot V_{\text{вир}} + \frac{Q_{\text{пот.нагр}}}{\tau_{\text{нагр}}} \right] = 1,2 \cdot \left[ 16331 \cdot 0,07 + \frac{0,03 \cdot 10^7}{0,38 \cdot 3600} \right] = 10 \text{ кВт}. \quad (2.43)$$

## 3 ЕЛЕКТРИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПЕЧІ

### 3.1 Розрахунок нагрівальних елементів

Розрахунок нагрівальних елементів повинен відповідати наступним техніко-економічним вимогам:

- у межах прийнятих розмірів пічної камери нагрівальні елементи розміщуються відповідно до заданого теплового режиму нагріву завантаження із забезпеченням необхідної продуктивності та можливості її підвищення;

- форма та розміри поперечного перерізу нагрівача повинні вибиратися з умови забезпечення тривалої безперебійної служби нагрівача при заданому тепловому режимі печі. Термін служби нагрівальних елементів промислових електропечей опору, особливо якщо їхня заміна вимагає повної зупинки печі та її охолодження, повинен вимірюватися роками. В окремих випадках у високотемпературних печах, коли нагрівачі вимушено працюють за граничних температур матеріалу, доводиться миритися з терміном служби нагрівачів менше року;

- нагрівальні елементи повинні забезпечувати мінімальну річну витрату дефіцитних сплавів на 1 кВт встановленої потужності печі.

Правильний розрахунок, який відповідає цим вимогам, ув'язується з конструкцією нагрівача, що відповідає умовам його експлуатації.

Для електричного розрахунку нагрівальних елементів печей опору потрібно отримати співвідношення між електричними параметрами нагрівача, його питомою поверхневою потужністю і розмірами. Для виведення цих залежностей вводяться позначення:

$P$  – потужність нагрівача, кВт;

$U$  – напруга на нагрівачі, В;

$R$  – опір нагрівача, Ом;

$\rho_2$  – питомий опір матеріалу нагрівача у нагрітому стані, Ом·мм<sup>2</sup>/м;

$\ell$  – довжина нагрівача, м;

$S$  – переріз нагрівача, мм<sup>2</sup>;



$d$  – діаметр дротяного нагрівача, мм;

$a, b$  – товщина та ширина перерізу стрічкового нагрівача, мм;

$\Pi$  – периметр перерізу нагрівача, мм;

$F_n$  – поверхня нагрівача, см<sup>2</sup>;

$W$  – питома поверхнева потужність нагрівача, Вт/см<sup>2</sup>.

Застосовуємо відомі залежності:

$$R = \frac{U^2}{10^3 \cdot P} \quad (3.1)$$

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{S} \quad (3.2)$$

$$W = \frac{P \cdot 10^3}{F_n} \quad (3.3)$$

З виразів (3.1) та (3.2) виходить, що довжина нагрівача:

$$\ell = \frac{U^2 \cdot S}{P \cdot \rho \cdot 10^3} \quad (3.4)$$

Підставивши у формулу (3.3) значення  $F_n = 10 \cdot \Pi \cdot \ell$ , отримаємо:

$$W = \frac{P \cdot 10^3}{10 \cdot \Pi \cdot \ell} = \frac{P \cdot 10^2}{\Pi \cdot \ell} \quad (3.5)$$

Звідси визначимо довжину нагрівача:

$$\ell = \frac{P \cdot 10^2}{W \cdot \Pi} \quad (3.6)$$

Прирівнявши значення  $\ell$  із формул (3.4) та (3.6) отримаємо залежність:

$$\frac{U^2 \cdot S}{P \cdot \rho \cdot 10^3} = \frac{P \cdot 10^2}{W \cdot \Pi}. \quad (3.7)$$

Для нагрівачів, виготовлених з матеріалу круглого перерізу (дрот, пруток):

$$\Pi = \pi \cdot d; S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}. \quad (3.8)$$

Підставивши значення S та  $\Pi$  у вираз (3.7) визначимо діаметр матеріалу нагрівача:

$$d = 3 \sqrt{\frac{4 \cdot 10^5 \cdot \rho \cdot P^2}{\pi^2 \cdot U^2 \cdot W}}, \text{ мм} \quad (3.9)$$

На підставі наведених вище фотмул можна зробити електричний розрахунок нагрівачів.

Як матеріал для нагрівачів приймається сплав ОХ23Ю5А (ЕІ – 626). Приймаємо робочу температуру металу 1250 °С, цієї температури за графіком рис. П7-1 [8].

Розрахункова потужність нагрівачів однієї зони:

$$P = 10 \text{ кВт}.$$

Розрахункова напруга нагрівача однієї зони:

$$U = 220 \text{ В}.$$

Діаметр дротяного нагрівача:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 10^5 \cdot 1,48 \cdot 3,3^2}{3,14^2 \cdot 220^2 \cdot 2}} = 1,9 \text{ мм}. \quad (3.10)$$

Найближчий стандартний діаметр дроту  $d = 2$  мм. Отриманий розрахунком діаметр дроту не викликає сумнівів у працездатності нагрівача. Площа поперечного перерізу нагрівача:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0,785 \cdot 2^2 = 3,14 \text{ мм}^2. \quad (3.11)$$

Опір нагрівача:

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{3,3 \cdot 10^3} = 14,7 \text{ Ом}. \quad (3.12)$$

Довжина нагрівача:

$$\ell = \frac{R \cdot S}{\rho} = \frac{14,7 \cdot 3,14 \cdot 10^{-6}}{1,48 \cdot 10^{-6}} = 31,2 \text{ м}. \quad (3.13)$$

Поверхня нагрівача на фазу:

$$F_n = \pi \cdot d \cdot \ell = 3,14 \cdot 0,2 \cdot 3120 = 1959,4 \text{ см}^2. \quad (3.14)$$

Фактичне питоме поверхнєве навантаження нагрівача:

$$W = \frac{P}{F_n} = \frac{3333}{1959,4} = 3,27 \text{ Вт/см}^2. \quad (3.14)$$

Перевірка можливості розміщення нагрівача на заданій поверхні стінки: розміщуємо нагрівач на керамічних трубках, 4 ряди, трубки встановлюємо по висоті через 15 мм.

Середній діаметр спіралі  $D=20\text{мм}$ .

Довжина одного витка:

$$l_{cn} = \pi \cdot D = 3,14 \cdot 20 \approx 62,8\text{мм} . \quad (3.15)$$

Число витків:

$$n = \frac{3 \cdot l}{l_{cn}} = \frac{3 \cdot 31,2 \cdot 10^3}{62,8} = 1490 . \quad (3.16)$$

Крок витка спіралі:

$$t = \frac{L}{n} = \frac{7000}{1490} \approx 4,5\text{мм}, \quad (3.17)$$

що є цілком прийнятним для дроту діаметром 2 мм. Перевірка показує можливість розміщення дротяних нагрівачів на заданій поверхні стіни.

### 3.2 Перевірка робочої температури нагрівача

Поверхня нагрівача:

$$F_1 = \frac{\pi^2 \cdot D_0 \cdot d}{t} = \frac{3,14 \cdot 0,02 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3}} = 0,1\text{м}^2; \quad (3.18)$$

Коефіцієнт опромінення визначаємо за табл. П7-3 [8]:

$$\varphi_{12H} = 0,34. \quad (3.19)$$

Коефіцієнт взаємного опромінення визначаємо за табл.. П7-3 [8]:

$$\varphi_{12H.H} = 0,88. \quad (3.20)$$

Поверхня опромінення нагрівач - виріб дорівнює поверхні опромінення нагрівач - футерування і дорівнює:

$$F_{12} = F_{13} = F_1 \cdot \varphi_{12H} \cdot \varphi_{12H.H} = 0,1 \cdot 0,88 \cdot 0,34 = 0,03 \text{ м}^2. \quad (3.21)$$

Поверхня футерування дорівнює:

$$F_3 = F_{\text{внутр}} = 0,12 \text{ м}^2. \quad (3.22)$$

Поверхня опромінення футерування – виріб дорівнює:

$$F_{32} = F_3 - F_{13} = 0,12 - 0,03 = 0,09 \text{ м}^2. \quad (3.23)$$

Поверхня виробу дорівнює:

$$F_2 = F_{\text{стекла}} = 0,076 \text{ м}^2. \quad (3.24)$$

Теплові втрати стін печі дорівнюють:

$$q_{\text{втр}} = 216,6 \text{ Вт}. \quad (3.25)$$

Отже розрахунковий коефіцієнт теплових втрат:

$$\gamma = \frac{q_{emp}}{P} = \frac{216}{10000} = 0,022. \quad (3.26)$$

Наведений коефіцієнт випромінювання в системі нагрівач - виріб дорівнює:

$$c_{12} = \frac{5,76}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{F_2}{F_1} \left( \frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right)} = \frac{5,76}{0,93 + \frac{0,076}{0,1} \left( \frac{1}{0,8} - 1 \right)} = 4,55. \quad (3.27)$$

Наведений коефіцієнт випромінювання в системі нагрівач - футерування дорівнює:

$$c_{13} = \frac{5,76}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_3} \left( \frac{1}{\varepsilon_3} - 1 \right)} = \frac{5,76}{0,8 + \frac{0,1}{0,12} \left( \frac{1}{0,4} - 1 \right)} = 2,3. \quad (3.28)$$

Звідси активна поверхня нагрівача:

$$\begin{aligned} F_{акт} &= \frac{(1-\gamma)(c_{12}F_{12}c_{13}F_{13} + c_{13}F_{13}c_{32}F_{32})}{c_{12}c_{13}F_{13}(1-\gamma) + c_{12}c_{32}F_{32}} = \\ &= \frac{(1-0,022)(4,55 \cdot 0,03 \cdot 2,3 \cdot 0,03 + 2,3 \cdot 0,03 \cdot 2,84 \cdot 0,09)}{4,55 \cdot 0,03 \cdot 2,3 \cdot (1-0,022) + 4,55 \cdot 2,84 \cdot 0,09} = 0,018 м^2. \end{aligned} \quad (3.29)$$

Робоча температура нагрівача становитиме:

$$\begin{aligned} t_n &= 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{P_\phi(1-\gamma)}{c_{12}F_{акт}} + \left( \frac{T_{нечи}}{100} \right)^4} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{3333 \cdot (1-0,022)}{4,55 \cdot 0,018} + \left( \frac{1250+273}{100} \right)^4} - \\ &- 273 = 1250 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (3.30)$$

Температура нагрівача в допустимому діапазоні.

## 4 РОЗРАХУНОК ВАКУУМНОЇ СИСТЕМИ

Розрахунки параметрів вакуумних систем проводяться за умови, що кількість газу  $Q$ , що проходить через будь-який переріз системи в одиницю часу, постійна.

Для з'ясування особливостей відкачування газу вакуумною системою введемо деякі терміни.

Пропускна здатність трубопроводу  $C$  може бути представлена як кількість газу  $Q$ , яке проходить через цей трубопровід при відомій різниці тисків на його кінцях:

$$C = \frac{Q}{P_1 - P_2}. \quad (4.1)$$

Під швидкістю відкачування  $S$  розуміється віднесене до одиниці тиску кількість газу  $Q$ , що проходить через переріз трубопроводу в одиницю часу:

$$S = \frac{Q}{P}, \quad (4.2)$$

для насоса швидкість відкачування

$$S_n = \frac{Q_n}{P_n}. \quad (4.3)$$

При відкачуванні газу через трубопровід з провідністю  $C$  ефективна швидкість відкачування сосуду  $S_{ef}$  може бути визначена із співвідношення:

$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{S_n}. \quad (4.4)$$

З формули (4.4) можна зрозуміти, що ефективна швидкість відкачування і швидкість відкачування насоса, яку треба визначити, щоб вибрати вакуумний насос, пов'язані між собою величиною пропускної здатності  $C$ . Ця величина залежить від режиму перебігу газу, температури, роду газу, форми трубопроводу і т.п.

Розглянемо, як змінюється режим течії газу через певний трубопровід за зміни тиску.

Хаотичне перемішування частинок газу має місце при високих тисках та великій швидкості течії газу. Цей режим називається турбулентним. Внаслідок поступового зменшення тиску та швидкості, хаотичний рух частинок газу змінюється впорядкованим прямолінійним рухом. Швидкість течії газу плавно збільшується від стін до центру трубопроводу. На природу течії газу в цьому випадку впливає в'язкість газу. Режим у цьому варіанті носить в'язкісний характер і називається в'язкісним.

Надалі при зниженні тиску кількість газу зменшується, а довжина вільного пробігу молекул збільшується. У випадку, якщо середня довжина вільного пробігу молекул дорівнює або більше діаметра судини або трубопроводу, молекули зіштовхуються між собою рідше, ніж зі стінками. І тут природа потоку знову зміниться. Молекули починають переміщатися трубопроводом незалежно друг від друга. Такий режим перебігу газу називається молекулярним.

Між цими режимами немає різких переходів і від одного до іншого відбувається у областях перехідних режимів.

Для кожного режиму течії газу є цілком певні залежності провідностей трубопроводів від їхньої геометрії та від фізичних параметрів газу. Так як у вакуумних печах турбулентний режим течії існує тільки в початковий період відкачування тривалістю кілька хвилин, його розгляд у цій роботі є недоцільним. Основна увага приділятиметься в'язковому, молекулярному та перехідному режимам.

Дуже важливо, наприклад, визначити межі існування в'язкостного режиму течії газу через трубопроводи. Перехід від турбулентного режиму до в'язкостно-



го визначається упорядкуванням руху молекул. Критерій, що визначає цей перехід, виражається числом Рейнольдса, що визначається безрозмірним співвідношенням:

$$Re = \frac{Dv\rho}{\eta}, \quad (4.5)$$

де  $D$  – діаметр трубопроводу, см;

$v$ ,  $\rho$ ,  $\eta$  - відповідно швидкість, щільність та в'язкість газу.

Для визначення провідності довгого круглого трубопроводу при проходженні через нього повітря при 20 °С в режимі, що описується, справедлива формула:

$$C = 0,182 \frac{D^4}{L} P, \quad (4.6)$$

Величини пропускних здібностей інших газів стосовно повітря при температурі 20 °С і в'язкісному режимі наведені в табл.

При зменшенні тиску, коли середня довжина вільного пробігу молекул стає порівнянною з діаметром трубопроводу, формула (74) визначає провідність при в'язкісному режимі, якщо при розрахунку провідності помилка трохи більше 10%. Таким чином, нижня межа в'язкісного режиму визначається співвідношенням  $PD > 500$  мксм.

У цьому режимі провідність трубопроводу залежить від тиску. Для довгого круглого трубопроводу в умовах молекулярного режиму при 20 °С формула пропускної здатності має вигляд:

$$C = 12,1 \frac{D^3}{L}. \quad (4.7)$$

Для коротких трубопроводів враховується діафрагмування при переході газу з судини з великим перетином в посудину з меншим перетином. У цьому випадку сумарна провідність визначатиметься формулою:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{mp}} + \frac{1}{C_o}. \quad (4.8)$$

Провідність діафрагми при молекулярному режимі визначається формулою:

$$C_o = \frac{11,6A}{1 - \frac{A}{A_o}}. \quad (4.9)$$

Для круглого трубопроводу формула для визначення провідності діафрагми має вигляд:

$$C_o = \frac{9,11D^2}{1 - \left(\frac{D}{D_o}\right)^2}, \quad (4.10)$$

де  $D$  -діаметр трубопроводу або діафрагми;

$D_o$  – діаметр сосууду, з якого газ потрапляє у трубопровід.

У цьому випадку формула для визначення провідності короткого трубопроводу при молекулярному режимі набуває вигляду:

$$C = \frac{12,1 \frac{D^3}{L}}{1 + 1,33 \frac{D}{L} \left(1 - \frac{D^2}{D_0^2}\right)} = 12,1 \frac{D^3}{L} \alpha. \quad (4.11)$$

Для полегшення розрахунків залежність  $\alpha$  від  $L/D$  представлені в [5].

У цій таблиці наведено значення  $\alpha$ , отримані Клаузингом з урахуванням усіх явищ перебігу газів через короткі трубопроводи з точністю до 1%.

Можна побачити з наведених значень, при  $L/D \geq 100$ ,  $\alpha = 1$ . Однак з точністю до 10%, достатньої розрахунку вакуумних систем, можна нехтувати коефіцієнтом  $\alpha$  вже за значеннях  $L/D \geq 20$ .

При молекулярному режимі перебігу газу вигини в трубопроводах великої довжини не надають серйозного опору, але для розрахунків рекомендується збільшувати осьову довжину такого трубопроводу на величину від  $D$  до  $1,33D$ .

Якщо послідовно є  $n$  вигинів, то

$$L_{\text{еф}} = L_{\text{осев}} + (1 - 1,33)nD. \quad (4.12)$$

Найбільший вплив вигини мають на короткі трубопроводи, які зазвичай застосовуються у високовакуумних печах.

Значення пропускних здібностей різних газів при  $20^\circ\text{C}$  молекулярному режимі стосовно повітря представлені в [5].

Великий інтерес представляє залежність пропускної спроможності при молекулярному режимі зміни температури. Нижче наводяться співвідношення провідностей деяких температур по відношенню до провідності при кімнатній температурі в табл.

З підвищенням температури провідність зростає. Фізичний сенс цього явища полягає у збільшенні швидкостей руху молекул газу.

Крім круглих трубопроводів трапляються випадки застосування вакуумпроводів інших форм: прямокутного, щілинного, кільцевого тощо. Далі наво-

дяться формули розрахунку провідності при молекулярному режимі трубопроводів з цими формами перерізів.

Провідність трубопроводу прямокутного перерізу [5]:

$$C = 30,9 \frac{a^2 b^2}{(a+b)L} K. \quad (4.13)$$

Величина  $K$  визначається залежно від відношення  $b/a$  по табл.

Провідність трубопроводу щілинного перерізу [5]:

$$C = 30,9 \frac{ab^2}{L} K, \quad (4.14)$$

при умові, що  $a \gg b$ .

Величина  $K$  цього разу береться залежно від відношення  $L/b$  представлена в [5].

Таким чином, для довгого трубопроводу

$$C = \frac{ab}{L} 27 \ell n \frac{L}{b}. \quad (4.15)$$

Провідність трубопроводу з кільцевим перетином [5]:

$$C = 12,1 \frac{(D_1 - D_2)^2 (D_1 + D_2)}{L} K, \quad (4.16)$$

де величина  $K$  визначається залежно від відношення  $D_2/D_1$  [5].

У всіх випадках для коротких трубопроводів слід враховувати діафрагмування при переході від більшого діаметра до меншого.

При розрахунках вакуумних систем необхідно враховувати перехідний режим, у якому одночасно є ознаки в'язкостного і молекулярного режимів, тобто. мають місце зіткнення молекул між собою, так і зі стінками труби.

Верхньою межею перехідного режиму є співвідношенням  $PD < 500$  мксм.

Нижньою межею режиму є співвідношення  $PD > 15$  мксм.

У цих межах формула Кнудсена для повітря при 20°C має вигляд:

$$C = 12,1 \frac{D^3}{L} \left[ \frac{1 + 0,271DP + 0,00479 (DP)^2}{1 + 0,316 DP} \right] \quad (4.17)$$

або

$$C = 12,1 \frac{D^3}{L} K. \quad (4.18)$$

Для спрощення обчислення провідності за цією формулою наводиться крива, що дає значення  $K$  залежно від  $PD$  [5].

З аналізу формули (4.18) видно, що з малих значеннях співвідношенню  $PD$  можна знехтувати величиною  $K$  і тоді виходить формула провідності при молекулярному режимі. При порівняно великих тисках можна знехтувати малими членами у виразі  $K$  і тоді виходить формула провідності при в'язкісному режимі.

Таким чином, можна написати узагальнену формулу для розрахунку пропускної здатності круглих трубопроводів будь-якої довжини в умовах молекулярного та в'язкісного режимів:

$$C = 12,1 \frac{D^3}{L} K \alpha. \quad (4.19)$$

Час відкачування сосуду від атмосферного тиску може визначатися за такою формулою:

$$t = 2,3 \frac{V}{S_{ef}} \lg \frac{P_1}{P_2}, \quad (4.20)$$

де  $V$  – об'єм сосуду, л;

$P_1$  – тиск в сосуді, що відкачується, в початковий момент часу, Па;

$P_2$  – тиск у сосуді, що відкачується, через час  $t$ , Па.

Найчастіше при розрахунках форвакуумних систем ефективна швидкість відкачування з печі близька до швидкості відкачування насоса. Тож попередніх розрахунків можна умовно приймати  $S_{ef} = S_n$ . Іноді слід робити перевірочний розрахунок ефективної швидкості відкачування на форвакуумній лінії, що особливо важливо для довгих трубопроводів малого діаметра.

На графіку [5] показано час відкачування повітря з судини від атмосферного тиску до 1 мм. рт. ст. залежно від обсягу посудини для насосів типу ВН – 4Г та ВН – 6Г (без урахування провідності вакуум – дроти).

Для полегшення розрахунків наводиться графік залежності провідності круглого трубопроводу завдовжки 1м від діаметра та тиску (рис. 7) [5]. При побудові кривих коефіцієнт діафрагмування не враховували. За допомогою цього графіка можна визначити провідність трубопроводу будь-якої довжини.

Для цього за графіком (Мал. 7) [5] визначається провідність трубопроводу довжиною 1м, а потім отримана величина ділиться на довжину всього трубопроводу. Якщо розраховується провідність короткого трубопроводу, загальну величину провідності  $C_{тр}$  слід помножити на коефіцієнт діафрагмування, що визначається з графіка (Мал. 1) [5].

Таким чином, теоретично розглянуті різні випадки підрахунку пропускної спроможності (провідності) вакуум – дроти. Проте теоретичні положення дозволяють з достатньою точністю розрахувати найпростіші випадки. Для бага-

твoх вузлів вакуумних систем теоретичний розрахунок ускладнений і тому провідності визначаються експериментально. Для деяких елементів вакуумних систем, таких як фільтри і пастки, величина пропускної здатності вказується при описі цих конструкцій.

#### **4.1 Методика розрахунку вакуумних печей**

Загалом вакуумний розрахунок електропечі не представляє особливих труднощів, якщо відомі кількість газу, що виділяється, і кінетика його виділення в залежності від температури і часу. Маючи вказані значення, можна прорхувати вакуумну систему.

Однак ці вихідні для розрахунку величини зазвичай відсутні в довідниках і слабо освітлені у спеціальній літературі.

В даний час є невелика кількість оригінальних робіт, присвячених розрахункам вакуумних систем електропечей. У зв'язку з цим основним завданням є систематизація наявного матеріалу і на цій основі навести значення деяких розрахункових параметрів.

Кількість газів, що відкачують у процесі роботи вакуумної печі, можна розділити на наступні категорії:

- а) газ, що виділяється з садки оброблюваного матеріалу;
- б) газ, що десорбується зі стінок печі та з елементів конструкції;
- в) газ, що виділяється з футерування;
- г) газ, що проникає через нещільність печі.

#### **4.2 Розрахунок вакуумної системи печі опору**

Під час розрахунку задаються такі параметри печі:

1. Температура 1250°C.
2. Вага садки 13,62 кг.
3. Газовиділення з садка 3 см<sup>3</sup>/100 г.

4. Матеріал футерування - піношамот. Розміри футерування: 300×200×150 мм, товщина стінки 300 мм.
5. Час нагріву – 0,38 години.
6. Площа внутрішньої поверхні печі 0,009 м<sup>2</sup>, матеріал – молібден
7. Розмір вакууму 1·10<sup>-2</sup> мм рт. ст.
8. Натікання 5 мкл/сек = 5 · 10<sup>-3</sup> л · мм рт. ст. / сек. (6,65 · 10<sup>-1</sup> Па)
9. Коефіцієнт нерівномірності виділення газу  $n = 1,2$ .
10. Середня температура футерування 650°C.
11. Об'єм футерування: 50 дм<sup>3</sup>.

За графіком (рис. 10) [10] визначається кількість газів, що виділяються за середньої температури футеровки 650°C після початкової очистки: 4 см<sup>3</sup>/дм<sup>3</sup>.

За табл. 9 [10] визначається газовідділення зі стінок для молібдену:

$$q_g = 1,65 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3 / \text{см}^2 \cdot \text{год} \quad (4.21)$$

Визначаємо необхідну швидкість відкачування з печі:

$$S_{нб} = \frac{3 \cdot 10 \cdot 13,68 \cdot 760}{10^3 \cdot 3600 \cdot 0,38 \cdot 1 \cdot 10^{-2}} \cdot 1,2 + \frac{4 \cdot 50 \cdot 760}{10^3 \cdot 3600 \cdot 0,38 \cdot 1 \cdot 10^{-2}} + \frac{1,65 \cdot 10^{-5} \cdot 0,009 \cdot 10^4 \cdot 760}{10^3 \cdot 10^{-3} \cdot 3600} + \frac{5 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-2}} = 27,36 + 11,1 + 0,0003 + 0,5 = 39 \text{ л / сек} \quad (4.22)$$

Орієнтовно, швидкість відкачування насоса має бути в 2 рази більшою за необхідну, тобто.  $39 \cdot 2 = 78 \text{ л / сек}$ .

Для заданого тиску при такій швидкості відкачування найбільш підходящим насосом є вакуумний золотниковий насос АВЗ-90 зі швидкістю відкачування 90 л / сек при 5·10<sup>-3</sup> мм. рт. ст.

Задаючись діаметром вакуум - дрти 100 мм і завдовжки, включаючи затвор 0,9 м, за графіками рис. 1 і 7 [5] визначається пропускна здатність трубоп-



роводу:  $C = 100$  л / сек та  $\alpha = 0,91$ ;  $C_{тр} = 100 \cdot 0,91 = 91$  л / сек.

Визначається ефективна швидкість відкачування:

$$S_{ef} \frac{91 \cdot 90}{91 + 90} = 45,2 \text{ л/с}, \quad (4.23)$$

тобто. небагато перевищує необхідну швидкість відкачування (39 л/сек).

Визначається середній тиск в печі:

$$P = \frac{39 \cdot 1 \cdot 10^{-2}}{45,2} = 8,6 \cdot 10^{-3} \text{ мм.рт.ст.} \quad (4.24)$$

Як насос попереднього розрідження приймається насос ВН - 1Г.

## **Висновок**

В результаті розрахунків було розроблено малогабаритну вакуумну піч опору. Було визначено електричні та теплові параметри печі. Отримані параметри енергетичного балансу оцінювалися за існуючими вимогами до печей опору. Розраховано вакуумну систему печі опору.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Альтгаузен А. П. Применение электронагрева и повышение его эффективности. Москва, Энергоатомиздат, 1987. 128с.:
2. Камнев В. Н. Чтение схем и чертежей электроустановок: практ. пособие для ПТУ.-2-е изд., перераб.и доп. Москва, Высш. шк.,1990. 144с.
3. Кацевич Л.С. Расчет и конструирование электрических печей. Москва Госэнергоиздат, 1959. 65с.
4. Методы расчета нагревателей различных типов, применяемых в электропечах сопротивления: учеб. пособие по курсу "Электропечи сопротивления" для студ. спец. 180500/А. А. Ефимов, С. В. Тригорлый, Е. Л. Максина и др. Саратов. гос. техн. ун-т. Саратов:СГТУ, 2002. 67 с.
5. Огурцов К.Н. Расчет и конструирование вакуумных систем для электропечей различных типов: учеб. пособие / К.Н. Огурцов, Т.Ю. Дунаева, Д.А. Давыдов. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2010. 44 с.
6. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электроэнергетических специальностей вузов/Под ред. В.М. Блок. М.: Высшая школа, 1990. - 388 с.
7. Свенчанский А. Д. и др. Электроснабжение и автоматизация электротермических установок: учеб. Пособие / А.Д.Свенчанский, З.Л. Трейзон, Л.А.Мнухин. - М.: Энергия,1980.-320с.
8. Свенчанский А.Д. Электрические печи сопротивления. Москва, Энергия, часть первая, 1975 г.
9. Электрооборудование и автоматика электротермических установок: Справочник/Под ред. А.П. Альтгаузена, М.Д. Бершицкого, М.Я.Смелянского В.М. Эдемского. Москва, Энергия, 1978. 125 с.
10. Электротермическое оборудование: Справочник. Под ред. А.К. Альтгаузена. Москва, Энергия, 1980. 254 с.