

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет  
Факультет митної справи, матеріалів та технологій

Кафедра матеріалознавства

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**Розробка технологічного процесу та обладнання  
термічної обробки деталі важіль/Development of  
technological process and equipment for heat treatment  
of lever parts**

спеціальність 132 Матеріалознавство

освітня програма «Матеріалознавство»

Виконав: здобувач вищої освіти  
групи ПМ-41

**Поліщук Віталій Андрійович**

Керівник:

к.т.н., доцент

**Мисковець Сергій Васильович**

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«14» червня 2025 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., професор

**Кашицький Віталій Павлович**

Луцьк – 2025 року

# ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів та технологій  
Кафедра матеріалознавства  
Ступінь вищої освіти: бакалавр  
Галузь знань: 13 Механічна інженерія  
Спеціальність: 132 Матеріалознавство  
Освітня програма: Матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри

Мельничук М.Д.

« 14 » 02 2025 року

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Мельничук Віталій Ігоревич  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка технологічного процесу та обладнання  
термічної обробки деталі валця / Development of technological process  
and equipment for heat treatment of roller parts

керівник роботи \_\_\_\_\_

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від "07" 02 2025 року № 43/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи  
« 5 » 06 2025р.

3. Вихідні дані до роботи Креслення до деталі програма вилуку  
N=100000 шт.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно  
розробити) Вступ, технологічна частина, конструкторська частина,  
розрахунок рекуренторів

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Креслення режі: 2 л. ФА1, креслення рекурентора 0,5 л. ФА1,  
креслення тари 0,5 л. ФА1

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Н. контроль	Мисковець С.В. доцент	11.05.25	05.06.25

7. Дата видачі завдання «11» 02 20225 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Тематичне обгрунтування	6.05.25	Виконано
2	Тематичний, конструкторський 70-смітка	20.05.25	Виконано
3	Креслення пелі, креслення ректритора, розрахунок ректритора	3.06.25	Виконано

Здобувач вищої освіти

Каличук В.Т.  
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

Мисковець С.В.  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Поліщук Віталій Андрійович. Розробка технологічного процесу та обладнання термічної обробки деталі важіль. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Матеріалознавство» спеціальності 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет.

У дипломній праці розглянуто питання розробка технологічного процесу та обладнання термічної обробки деталі типу «важіль», що широко використовується в машинобудівних механізмах для передавання зусиль та фіксації елементів. Об'єктом дослідження є важіль із конструкційної вуглецевої сталі марки Сталь 40, яка відрізняється високими механічними властивостями та добре піддається гартуванню.

У праці здійснено аналіз конструктивних особливостей деталі, обґрунтовано вибір матеріалу та режиму термічного оброблення, проведено розрахунок параметрів нагріву та горіння палива. Окрему увагу приділено проектуванню термічної печі: визначено її розміри, тепловий баланс, обрано оптимальний тип горілки і здійснено розрахунок рекуператорів для збільшення енергоефективності обладнання.

Результати роботи дозволяють гарантувати необхідні експлуатаційні властивості деталі – твердість, зносостійкість та довговічність – за оптимальних витрат енергії та ресурсів.

Бакалаврська робота складається з 43 сторінок формату А4, 5 рисунків та 8 літературних джерел.

Ключові слова: нагрів, паливо, рекуператор, продукти горіння, тепловий баланс, тара, природний газ.

					БП 0125.01.00.000 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Поліщук		20.06.25	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Мисковець		25.06.25		3	43
Реценз.					ЛНТУ, каф. матеріалознавства		
Н. Контр.		Мисковець		28.06.25	гр. ПМ-41		
Затверд.		Мельничук		29.06			

## ABSTRACT

Vitalii Andriiovych Polishchuk. Development of the technological process and equipment for the heat treatment of the lever part. Manuscript.

Bachelor's qualification work of the educational program "Materials Science" specialty 132 Materials Science. Lutsk National Technical University.

The thesis addresses the development of the technological process and equipment for the heat treatment of a "lever" type part, which is widely used in mechanical engineering mechanisms for transmitting forces and securing elements. The object of research is a lever made of structural carbon steel grade Steel 40, which is characterized by high mechanical properties and good hardenability.

The work analyzes the design features of the part, justifies the choice of material and the heat treatment mode, and calculates the parameters of heating and fuel combustion. Special attention is paid to the design of the heating furnace: its dimensions and heat balance are determined, the optimal type of burner is selected, and a recuperator is calculated to increase the energy efficiency of the equipment.

The results of the work make it possible to guarantee the required performance properties of the part – hardness, wear resistance, and durability – with optimal energy and resource consumption.

The bachelor's thesis consists of 43 pages of A4 format, 5 figures, and 8 literary sources.

Keywords: heating, fuel, recuperator, combustion products, heat balance, container, natural gas.

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	
1.1. Аналіз об'єкту виробництва, технічних умов, визначення типу виробництва	6
1.1.1. Аналіз креслення деталі	6
1.1.2. Характеристика сталі 40	8
1.1.3. Аналіз та вибір раціонального варіанту типового технологічного процесу	10
1.2. Мета і задачі дипломної роботи	14
РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	
2.1. Розрахунок горіння палива	16
2.1.1. Теплотворність палива	17
2.1.2. Кількість повітря, яка необхідна для повного спалювання одиниці палива	17
2.1.3. Кількість і склад продуктів повного спалювання палива	18
2.2 Тривалість нагріву металу	19
РОЗДІЛ 3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	
3.1. Розрахунок розмірів робочої камери печі	23
3.2. Вибір матеріалів для побудови печі	24
3.3. Тепловий баланс печі	26
3.3.1. Нагрів металу	27
3.3.2. Втрати тепла з димовими газами	27
3.3.3. Втрати тепла через стіни, склепіння і під печі	28
3.3.4. Втрати теплоти через вікно печі	29
3.3.5. Нагрів тари	30
3.4. Вибір горілок	32
РОЗДІЛ 4 РОЗРАХУНОК РЕКУПЕРАТОРІВ	34
ВИСНОВКИ	40
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	41

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# РОЗДІЛ 1

## ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

1.1. Аналіз об'єкту виробництва, технічних умов, визначення типу виробництва

1.1.1. Аналіз креслення деталі

Об'єктом виготовлення є деталь , що називається «важіль» (рисунок 1.1), що широко використовується в конструкціях машинобудівної галузі. Її основне призначення – передача механічного зусилля, зміна траєкторії руху або надійна фіксація окремих вузлів механізму у визначеному положенні. Такі важелі є незамінними елементами у трансмісійних системах, підвісках, механізмах із важільним приводом, а також у складі гідравлічного обладнання.

Враховуючи умови експлуатації, деталь піддається значним навантаженням як статичного, так і динамічного характеру. Тому до неї висуваються серйозні вимоги щодо міцності, твердості, опору до зношування та точності обробки поверхонь, які відповідають за з'єднання або передачу руху. Для виготовлення цієї деталі застосовується конструкційна вуглецева сталь марки «сталь 40», що забезпечує належні механічні характеристики у процесі роботи

Сталь 40 – це конструкційна легована вуглецева сталь із середнім вмістом вуглецю (приблизно 0,4%), яка характеризується підвищеною міцністю та зносостійкістю. Завдяки своїм механічним властивостям вона широко застосовується в машинобудуванні для виготовлення відповідальних деталей, що працюють під навантаженням, таких як вали, шестерні, пальці, осі, втулки, муфти тощо. Сталь 40 добре піддається термічній обробці – зокрема, гарту й відпуску, що дозволяє значно покращити її твердість і міцність. Водночас матеріал зберігає достатню оброблюваність при механічній обробці. Хоча зварюваність у цієї сталі обмежена через вищий

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вміст вуглецю, при дотриманні відповідних технологій зварювання її все ж можна використовувати для зварних конструкцій. Завдяки поєднанню високих експлуатаційних властивостей і відносно простої обробки, сталь 40 часто використовується в умовах підвищеного навантаження.

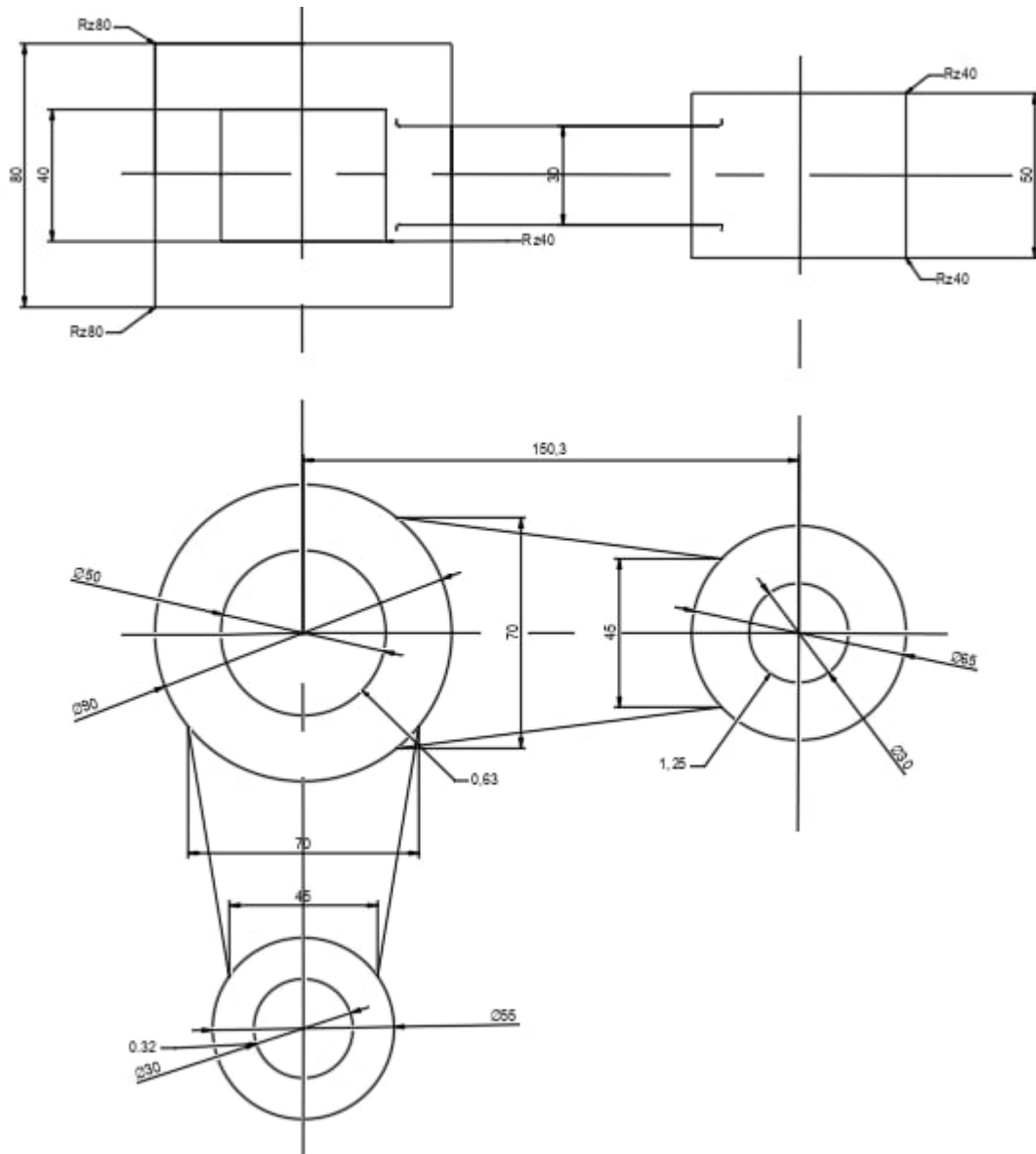


Рисунок 1.1 – Ескіз деталі важіль

Загальна довжина виробу: 227,8 мм;

										Арк.
										7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БП 0125.01.00.000 ПЗ					

Загальна ширина виробу: 192,5 мм;

Лівий циліндр:

- Зовнішній діаметр: 90 мм;
- Внутрішній діаметр: 50 мм з фаскою 0,63.

Правий циліндр:

- Зовнішній діаметр: 65 мм;
- Внутрішній діаметр: 30 мм з фаскою 1,25 мм.

Нижній циліндр:

- Зовнішній діаметр: 55 мм;
- Внутрішній діаметр: 30 мм з фаскою 0,32 мм.

Відстань між центрами лівого та правого отвору: 150,3 мм.

Відстань між центрами нижнього отвору до лівого отвору: 120 мм.

### 1.1.2.Характеристика сталі 40

У таблиці 1.1 приведений хімічний склад, у таблиці 1.2 – температура критичних точок сталі, у таблиці 1.3 – фізичні властивості, у таблиці 1.4 – технологічні властивості, а в таблиці 1.5 – механічні властивості сталі при  $T=20^{\circ}\text{C}$  [Данні взяті з: [https://www.splav-kharkov.com/mat\\_start.php?name\\_id=30](https://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=30)]

Таблиця 1.1

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
0.37 – 0.45	0.17 – 0.37	0.5 – 0.8	> 0.3	> 0.04	> 0.035	> 0.25	> 0.3	> 0.08

Таблиця 1.2

$A_{c1} = 724$  ,     $A_{c3}(A_{cm}) = 790$  ,     $A_{r3}(A_{rcm}) = 760$  ,     $A_{r1} = 680$

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

Таблиця 1.3

T	E 10 <sup>-5</sup>	a 10 <sup>6</sup>	l	r	C	R 10 <sup>9</sup>
Град	Мпа	1/Град	Вт/(м·град)	кг/м <sup>3</sup>	Дж/(кг·град)	Ом·м
20	2,13	-	51,50	7850,00	483	160
100	2,10	11,90	50,60	-	486	221
200	1,98	12,70	48,10	-	497	296
300	1,90	13,50	45,60	-	512	387
400	1,85	14,05	41,90	-	529	493
500	1,79	14,50	38,10	-	550	619
600	1,67	14,90	33,50	-	574	766
700	1,60	15,15	30,00	-	628	932
800	-	12,50	24,80	-	674	1110
900	-	13,50	25,70	-	657	1150
1000	-	14,50	26,90	-	653	1180
1100	-	15,20	28,00	-	649	1207
1200	-	15,80	29,50	-	649	1230
T	E 10 <sup>-5</sup>	a 10 <sup>6</sup>	l	r	C	R 10 <sup>9</sup>

Таблиця 1.4

Зварюваність	Обмежена
Флокеночутливість	Не чутлива
Схильність до відпускнуї крихкості	Не схильна

Таблиця 1.5

Асортимент	Розмір	S <sub>B</sub>	σ <sub>T</sub>	d <sub>5</sub>	y	Термообр.
-	мм	Мпа	Мпа	%	%	-
Лист термообработ., ГОСТ 4041-71	4-14	510-660		21		
Труби холоднокатан.		580	320	17		Нормалізація
Труби горячекатан.		600	340	16		
Прутки каліброван., ГОСТ 10702-78		590			40	Відпал

					БП 0125.01.00.000 ПЗ		Арк.
							9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Продовження таблиці 1.5

Прокат, ГОСТ 1050-88	до 80	570	335	19	45	Нормалізація
Прокат нагартван., ГОСТ 1050-88		610		6	35	
Прокат отожжен., ГОСТ 1050-88		510		14	40	
Стрічка отожжен., ГОСТ 2284-79		440-690		14		
Стрічка нагартван., ГОСТ 2284-79		690-1030				
Смуга, ГОСТ 1577-93	6-60	570	335	19	45	Нормалізація

1.1.3. Аналіз та вибір раціонального варіанту типового технологічного процесу

Загартування, як вид термічної обробки

Загартування це один з основних і найважливіших видів термічної обробки металів, зокрема вуглецевих сталей. Цей процес широко використовується в машинобудуванні для підвищення міцності та зносостійкості деталей, які будуть використовуватися під дією динамічних або ударних навантажень. У випадку виготовлення важеля з конструкційної вуглецевої сталі марки Сталь 40, загартування дозволяє значно покращити механічні властивості деталі, забезпечуючи її надійність в праці.

Суть процесу загартування

Загартування сталі 40 полягає у нагріванні матеріалу до температури, зазвичай у межах 830...860 °С – це діапазон, в якому в її структурі формується аустеніт. Аустеніт – це високоенергетична фаза з високою пластичністю, яка може трансформуватися при швидкому охолодженні в більш тверді структури.

Після досягнення необхідної температури деталь витримується певний час для повного й рівномірного аустенітизаційного перетворення в об'ємі деталі. Далі виконується інтенсивне охолодження – найчастіше в маслі або воді. Завдяки швидкому охолодженню аустеніт не встигає перетворитися в перліт або бейніт, натомість формується мартенсит – дуже тверда, але крихка структура.

Метою загартування сталі 40 є формування мартенситної структури, яка забезпечує суттєве підвищення твердості, зносостійкості та здатності деталі працювати в умовах значних механічних навантажень.

Чому загартування важливе для важеля

Важіль, як деталь, що зазвичай працює під дією навантажень згину, кручення або тиску, має мати високу міцність і бути витривалим до зношування. Особливо це важливо, якщо важіль є частиною механізму, що працює циклічно або у складних умовах: пил, волога, тертя, тощо.

Загартування дозволяє:

- Підвищити твердість робочих поверхонь важеля;
- Збільшити опір зношуванню, що подовжує термін експлуатації деталі;
- Покращити втомну міцність – здатність деталі витримувати багаторазові навантаження без руйнування;

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Надати матеріалу структурну однорідність, що зменшує ризик появи локальних дефектів.

#### Особливості загартування сталі 40

Сталь 40 є середньовуглецевою конструкційною сталлю, вміст вуглецю близько 0,38 ... 0,45%, що забезпечує їй високу гартівну здатність. Завдяки цьому вона легко піддається термічній обробці, зокрема загартуванню, що сильно дозволяє покращити її механічні властивості – особливо твердість і зносостійкість. Це робить сталь 40 придатною для виготовлення відповідальних і навантажених деталей, таких як вали, шестерні, втулки, шпонки тощо.

#### При загартуванні сталі 40:

- Застосовується температура нагріву в межах 830...860 °С.
- Найчастіше використовується охолодження в маслі – воно забезпечує оптимальний баланс між швидкістю охолодження і ризиком виникнення тріщин.

Результатом загартування є утворення мартенситної структури, що значно підвищує твердість, однак робить сталь більш крихкою.

Саме тому після загартування обов'язково проводиться відпуск – термічна обробка, яка знижує внутрішні напруження, підвищує ударну в'язкість та забезпечує необхідну експлуатаційну надійність деталі.

#### Види загартування, придатні для важеля

Для важеля можливе застосування двох основних видів загартування:

- Повне (об'ємне) твердіння

Всю деталь нагрівають до температури аустенізації та охолоджують.

Після такої обробки весь обсяг деталі набуває високого ступеня твердості. Це

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

доречно, якщо навантаженню піддається весь компонент, а не окремі його ділянки.

– Поверхнєве загартування

Виконується шляхом локального нагріву, наприклад, індукційного або полум'яного, лише поверхні важеля з подальшим охолодженням. У результаті твердість підвищується лише на поверхні, а як серцевина залишається м'якішою й пластичнішою. Це зменшує ризик поломки при навантаженні.

– Поєднання загартування з відпуском

Оскільки мартенситна структура, що утворюється в результаті загартування, є дуже твердою, але крихкою, після загартування обов'язково проводять відпуск – нагрів до температури 180...200 °С з подальшим охолодженням.

Відпуск дозволяє:

- Зменшити внутрішні напруження, які виникають під час різкого охолодження;
- Зменшити крихкість сталі;
- Підвищити ударну в'язкість;
- Оптимізувати співвідношення твердість/міцність.

Це особливо важливо для таких деталей як важіль, де деталь повинна бути не лише твердою, а й стійкою до ударів і не ламатися під навантаженням.

Умови та контроль загартування

Щоб досягти бажаного результату при загартуванні важеля, важливо дотримуватися правильного режиму нагрівання, витримки та охолодження.

Контроль процесу включає:

- Контроль температури нагріву;

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

- Вибір правильного охолоджувального середовища (вода для більшого загартування, масло для зниження ризику тріщин);
- Вимірювання твердості після обробки (наприклад, по Бринеллю або Роквеллу);
- При необхідності металографічне дослідження структури.

Можливі дефекти при загартуванні

У разі неправильного режиму загартування можуть виникати наступні дефекти:

- Тріщини на поверхні або в тілі деталі;
- Викривлення форми, при нерівномірному охолодженні;
- Низька твердість, при недостатній швидкості охолодження;
- Грубозерниста структура, при перегріві.

Тому після загартування важливо перевірити деталь на наявність дефектів і за необхідності провести такі процеси, як шліфування, механічну обробку або додаткову термообробку.

## 1.2. Мета і задачі дипломної роботи

Мета дипломної роботи:

Метою дипломної роботи є розробка раціонального технічного процесу виготовлення важеля з конструкційної вуглецевої сталі марки Сталь 40, а також обґрунтування оптимального режиму термічної обробки (загартування), проєктування обладнання та устаткування для термічної обробки з метою забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик деталі – міцності, твердості, зносостійкості та довговічності.

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Задачі дипломної роботи:

- Провести розрахунок горіння палива;
- Розрахувати тривалість нагрівання металу;
- Розрахувати розмір камери печі ;
- Вибрати горілку;
- Спроекткування тари.

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

## РОЗДІЛ 2

### ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

Усі розрахунки у розділі 2 проводяться з літератури [3]

#### 2.1. Розрахунок горіння палива

Для забезпечення термічної обробки (гартування) сталі 40, необхідне ефективне джерело тепла, здатне швидко і рівномірно нагрівати деталі до температури 830...860°C. У сучасній промисловій практиці використовуються різні види палива: тверде (вугілля, кокс), рідке (мазут, дизельне паливо), газ (природний газ), а також електроопалення. У моїй роботі головним паливом для термічних печей був вибраний природний газ, вибір був зроблений через його численні технічні, економічні та екологічні переваги.

Природний газ (метан  $\text{CH}_4$ ) має високу теплоту згоряння, орієнтовно:

- нижча теплота згоряння: 33 800 ... 35 000 кДж/м<sup>3</sup>;
- вища теплота згоряння: до 39 800 кДж/м<sup>3</sup>.

Це допомагає досягати потрібної температури нагріву у термічних печах за короткий проміжок часу з мінімальними втратами енергії. Нагрів відбувається рівномірно по всьому об'єму печі.

При визначенні параметрів горіння палива розраховують:

- а) теплотворність палива;
- б) кількість повітря, яка необхідна для повного спалювання одиниці палива;
- в) кількість і склад утворених при цьому продуктів горіння, тобто, димових газів.

##### 2.1.1. Теплотворність палива

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У таблиці 2.1 приведений склад природного газу

Таблиця 2.1

Компонент	Вміст, %	Теплота згоряння, кДж/м <sup>3</sup>
$CO_2$	0,3	0
$N_2$	5,2	0
$O_2$	0,2	0
$CH_4$	89	35 700
$C_2H_6$	4	65 000
$C_3H_8$	0,9	93 000
$C_4H_{10}$	0,4	120 000

Формула для розрахунку теплотворності для газоподібного пального:

$$Q_H^p = 127CO + 108H_2 + 234H_2S + 357CH_4 + \sum Q \frac{C_m H_m}{100} \text{ кДж/м}^3 = 127 \cdot 0 + 108 \cdot 0 + 234 \cdot 0 + 357 \cdot 89 + 3917 \text{ кДж/м}^3 = 35 690 \text{ кДж/м}^3 \quad (2.1)$$

де  $CO, H_2, H_2S, CH_4$  - це відсотковий вміст відповідних компонентів в пальному. Член  $\sum Q \frac{C_m H_m}{100}$  - у формулі (2.1) є сумою добутоків теплоти згоряння компонентів газу (етилен, етан, ацетилен та ін.) на їх процентний вміст у газі.

Нижча теплота згоряння природного газу за наведеною формулою складає приблизно 35 690 кДж/м<sup>3</sup>

Це підтверджує високу енергетичну ефективність природного газу, як пального для загартування сталі.

2.1.2. Кількість повітря, яка необхідна для повного спалювання одиниці палива

Кількість повітря, яка необхідна для повного спалювання газоподібного пального розраховується за формулою:

$$L_{\partial} = \alpha_n L_0, \quad (2.2)$$

де

$\alpha_n$  – коефіцієнт витрат повітря дорівнює 1,05;

$L_0$  – теоретична кількість повітря, яка необхідна для спалювання одиниці газоподібногопального.

$$L_0 = 0,0476 \left[ 0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + 2CH_4 + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right] \times \\ \times (1 + 0,00124d_n) \text{ м}^3/\text{м}^3 = 0,0476 [0 + 0 + 0 + 178 + 21,1 - 0,2] \times \\ \times (1 + 0,00124 \times 0,01) \text{ м}^3 / \text{м}^3 \approx 9,46 \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (2.3)$$

$d_n$  – вміст вологого сухого повітря, кг/м<sup>3</sup>

Зазвичай  $d_n$  у розрахунках приймається рівним 0,01 кг/м<sup>3</sup>

$$L_{\partial} = 1,05 \cdot 9,46 \text{ м}^3/\text{м}^3 = 9,93 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Для повного згоряння 1 м<sup>3</sup> природного газу з наведеним складом потрібно приблизно 9,93 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> повітря

### 2.1.3. Кількість і склад продуктів повного спалювання палива

Формули для обрахування кількості і склад продуктів повного спалювання газоподібного пального:

$$V_{CO_2} = (CO + CO_2 + CH_4 + \sum m C_m H_n) \cdot 0,01 \text{ м}^3/\text{м}^3 = \\ = (0 + 0,3 + 89 + 12,3) \cdot 0,01 \text{ м}^3/\text{м}^3 = 1,02 \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (2.4)$$

$$V_{H_2O} = \left( H_2 + H_2S + 2CH_4 + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + H_2O + 0,124L_{\partial} \cdot d_n \right) \cdot 0,01 \text{ м}^3/\text{м}^3 \\ = (0 + 0 + 2 \cdot 89 + 17,6 + 0 + 0,124 \cdot 9,93 \cdot 0,01) \times \\ \times 0,01 \text{ м}^3/\text{м}^3 = 1,96 \text{ м}^3 / \text{м}^3 \quad (2.5)$$

$$V_{SO_2} = 0,01 \cdot H_2S \text{ м}^3/\text{м}^3 = 0,01 \cdot 0 = 0 \text{ м}^3 / \text{м}^3 \quad (2.6)$$

$$V_{O_2} = 0,21(\alpha_n - 1)L_0 \text{ м}^3/\text{м}^3 = 0,21 \cdot (1,05 - 1) \cdot 9,46 = 0,09 \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (2.7)$$

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

$$V_{N_2} = (N_2 + 79L_{\partial}) \cdot 0,01 \text{ м}^3/\text{м}^3 = (5,2 + 79 \cdot 9,93) \cdot 0,01 = 7,90 \text{ м}^3/\text{м}^3 \quad (2.8)$$

Формула для знаходження сумарного об'єму продуктів горіння:

$$\begin{aligned} V_{\partial} &= V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{O_2} + V_{N_2} = \\ &= 1,02 + 1,96 + 0 + 0,09 + 7,9 = 10,97 \text{ м}^3/\text{м}^3 \end{aligned} \quad (2.9)$$

Відсотковий вміст:

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_{\partial}} \cdot 100\% = \frac{1,02}{10,97} \cdot 100\% = 9,30\% \quad (2.10)$$

$$H_2O = \frac{V_{H_2O}}{V_{\partial}} \cdot 100\% = \frac{1,96}{10,97} \cdot 100\% = 17,87\% \quad (2.11)$$

$$SO_2 = \frac{V_{SO_2}}{V_{\partial}} \cdot 100\% = \frac{0}{10,97} \cdot 100\% = 0\% \quad (2.12)$$

$$O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_{\partial}} \cdot 100\% = \frac{0,09}{10,97} \cdot 100\% = 0,82\% \quad (2.13)$$

$$N_2 = \frac{V_{N_2}}{V_{\partial}} \cdot 100\% = \frac{7,9}{10,97} \cdot 100\% = 72,01\% \quad (2.14)$$

## 2.2. Тривалість нагріву металу

Тривалість нагріву для масивних тіл визначається за формулою:

$$\tau = \frac{S\rho C_p}{k_1\alpha} \ln \frac{t_{\text{печ}} - t_n}{t_{\text{печ}} - t_k} \text{ с}, \quad (2.15)$$

де:  $S$  – розрахункова товщина тіла, що нагрівається, м (при двохсторонньому симетричному нагріві – половина товщини)

$k_1$  – коефіцієнт форми, який для рівний 1;

$\rho$  – щільність, 7 850 кг/м<sup>3</sup>;

$C_p$  – середня теплоємність, Дж/кг · °С;

$\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м<sup>2</sup> · град;

$t_n$  – початкова температура тіла, °С;

$t_k$  – кінцева температура тіла, °С.

									Арк.
									19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БП 0125.01.00.000 ПЗ				

Середня теплоємність в інтервалі температур:

$$C_{p_{t_n}}^{t_k} = \frac{i_0^{t_k} - i_0^{t_n}}{t_k - t_n}, \quad (2.16)$$

де  $i$  – тепловміст при температурі  $t$ , кДж/кг.

Коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha^* = \sigma_{\text{печ}} \frac{\left(\frac{T_{\text{печ}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_n}{100}\right)^4}{t_{\text{печ}} - t_n}, \quad (2.17)$$

де:  $t_{\text{печ}} (T_{\text{печ}})$  – температура печі, °С(°К);

$t_n (T_n)$  – температура поверхні, °С(°К).

$$\sigma_{\text{печ}} = \varepsilon \sigma_0 - \text{приведений коефіцієнт випромінювання, Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4 \quad (2.18)$$

де:  $\varepsilon$  – степінь чорноти.

$$\sigma_{\text{печ}} = 4,03 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4,$$

У формулу (2.15) підставляється середнє значення коефіцієнту тепловіддачі в інтервалі температур:

$$\alpha = \frac{\alpha_n + \alpha_k}{2}. \quad (2.19)$$

При розрахунку часу нагріву нагрів розбивається на три інтервали:

I – (20 – 600 °С), II – (600 – 800 °С), III – (800 – кінцева температура нагріву °С)

Коефіцієнт тепловіддачі:

I

$$\alpha_n = 4,03 \cdot \frac{\left(\frac{1233}{100}\right)^4 - \left(\frac{293}{100}\right)^4}{960 - 20} \approx 98,77$$

$$\alpha_k = 4,03 \cdot \frac{\left(\frac{1233}{100}\right)^4 - \left(\frac{873}{100}\right)^4}{960 - 600} \approx 187,55$$

						БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
							20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

$$\alpha = \frac{98,77 + 187,55}{2} = 143,16$$

II

$$\alpha_n = 4,03 \cdot \frac{\left(\frac{1233}{100}\right)^4 - \left(\frac{873}{100}\right)^4}{960 - 600} \approx 187,55$$

$$\alpha_k = 4,03 \cdot \frac{\left(\frac{1233}{100}\right)^4 - \left(\frac{1073}{100}\right)^4}{960 - 800} \approx 248,27$$

$$\alpha = \frac{187,55 + 248,27}{2} = 217,91$$

III

$$\alpha_n = 4,03 \cdot \frac{\left(\frac{1233}{100}\right)^4 - \left(\frac{1073}{100}\right)^4}{960 - 800} \approx 248,27$$

$$\alpha_k = 4,03 \cdot \frac{\left(\frac{1233}{100}\right)^4 - \left(\frac{1133}{100}\right)^4}{960 - 860} \approx 267,36$$

$$\alpha = \frac{248,27 + 267,36}{2} = 257,82$$

Середня теплоємність в інтервалі температур:

I

$$C_{p_{t_n}}^{t_k} = \frac{342,10 - 0}{600 - 20} = 0,59 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$$

II

$$C_{p_{t_n}}^{t_k} = \frac{549,10 - 342,10}{800 - 600} = 1,04 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$$

III

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$C_{p_{t_n}}^{t_k} = \frac{585,35 - 549,10}{860 - 800} = 0,60 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$$

Тривалість нагріву:

I

$$\tau = \frac{0,02 \cdot 7850 \cdot 0,59 \cdot 10^3}{1 \cdot 143,16} \ln \frac{960 - 20}{960 - 600} \approx 831 \text{ с}$$

II

$$\tau = \frac{0,02 \cdot 7850 \cdot 1,04 \cdot 10^3}{1 \cdot 217,91} \ln \frac{960 - 600}{960 - 800} \approx 363 \text{ с}$$

III

$$\tau = \frac{0,02 \cdot 7850 \cdot 0,60 \cdot 10^3}{1 \cdot 257,82} \ln \frac{960 - 800}{960 - 860} \approx 171 \text{ с}$$

$$\tau = 831 + 363 + 171 = 1365 \text{ с} = 0,38 \text{ год}$$

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

## РОЗДІЛ 3

### КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

Усі розрахунки у розділі 3 проводяться з літератури [3]

#### 3.1. Розрахунок розмірів робочої камери печі

Для визначення розмірів робочої камери печі необхідно знайти кількість деталей у садці:

$$N_c = \frac{N}{K_c} = \frac{200000}{4755} \approx 43 \text{ шт}, \quad (3.1)$$

де

$N$  – програма випуску, 200000 шт;

$K_c$  – кількість садок в рік.

Кількість садок в рік визначається за формулою:

$$K_c = \frac{\Phi_{р.о.} \cdot K_3 \cdot n}{\tau_{заг}} = \frac{2080 \cdot 0,8 \cdot 2}{0,70} = 4755 \text{ шт}, \quad (3.2)$$

$\Phi_{р.о.}$  – фонд роботи обладнання в одну зміну,  $\Phi_{р.о.}$  дорівнює 2080 год. при однозмінній роботі підприємства;

$n$  – кількість робочих змін, 2 зміни;

$K_3$  - коефіцієнт завантаження обладнання, так як це серійне виробництво, то коефіцієнт дорівнює 0,8;

$\tau_{заг}$  – загальний час садки год.

Визначаємо загальний час садки:

$$\tau_{заг} = \tau_{н.з.с.} + \tau_{\partial} = 0,53 + 0,17 = 0,70 \text{ год}, \quad (3.3)$$

$\tau_{н.з.с.}$  – час нагріву заготовки у садці, год.;

$\tau_{\partial}$  – додатковий час, год.

Час нагріву заготовки у садці:

$$\tau_{н.з.с.} = \tau \cdot \alpha = 0,38 \cdot 1,40 = 0,53 \text{ год}, \quad (3.4)$$

де  $\tau$  – час нагріву заготовки, год.;

$\alpha$  – коефіцієнт, що враховує спосіб розташування заготовки в печі дорівнює 1,40

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ширина черіні печі:

$$B_n = z_1 \cdot l + (z_1 + 1) \cdot \delta = 5 \cdot 227,8 + (5 + 1) \cdot 10 \approx 1200 \text{ мм} \quad (3.5)$$

$z_1$  – кількість рядків,

$l$  – довжина заготовки,

$\delta$  – зазор між торцями заготовки,

Заокруглення розмірів до числа кратного 50

Також потрібно додати зазор 200 мм

$$B_n = 1400 \text{ мм}$$

Довжина черіні:

$$L_n = z_2 \cdot b + (z_2 + 1) \cdot \delta = 9 \cdot 192,50 + 10 \cdot 10 \approx 1850 \text{ мм}, \quad (3.6)$$

$z_2$  – кількість заготовок у рядку,

$b$  – ширина заготовки,

$\delta$  – зазор між торцями заготовки,

Заокруглення розмірів до числа кратного 50

Також потрібно додати зазор 200 мм

$$L_n = 2050 \text{ мм}$$

Висота камери печі:

$$H = 1,2 \cdot B_n = 1,20 \cdot 1400 \approx 1700 \text{ мм} \quad (3.7)$$

Заокруглення розмірів до числа кратного 50

### 3.2. Вибір матеріалів для побудови печі

Вибір конструкційних і теплоізоляційних матеріалів для будови печі здійснюється на основі розрахунків вище.

Конструкція основних елементів печі: стіни, череня та склепіння – має двошарове виконання (рисунок 3.1),:

– внутрішній шар (вогнетривкий), який безпосередньо контактує з високотемпературним середовищем;

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

– зовнішній шар (теплоізоляційний), призначений для зниження теплових втрат і захисту конструкції від перегріву.

Внутрішній шар (вогнетривка кладка)

– Матеріал: шамотна цегла класу В

Шамотна цегла класу В має здатність витримувати надзвичайно високу температуру, близько до 1350 °С. Вона характеризується високою механічною міцністю, а також здатністю зберігати форму навіть після багаторазового охолодження і нагрівання, що назвичайно важливо при експлуатації. Завдяки цим характеристикам її часто застосовують для облицювання внутрішніх стінок печей, де умови особливо жорсткі, а саме дуже висока температура, можливі різкі перепади тепла і вплив агресивних продуктів згорання. З погляду теплотехніки матеріал забезпечує тривалий термін служби і стабільну роботу конструкцій.

Зовнішній шар (теплоізоляційний)

– Матеріал: теплоізоляційна цегла типу «Діамантова»

Діамантову цеглу виготовлена із вогнетривких матеріалів, при цьому її структура є доволі пориста, а сама вона має досить легку вагу. Низька теплопровідність- це одна її основних переваг, приблизно 0,15...0,25 Вт/м·К, що дозволяє відчутно знизити теплові втрати через стінки печі. Як наслідок, це допомагає економити паливо, покращує нергоефективність і сприяє зниженню температури на зовнішніх поверхнях обладнання.

Перерахунок розмірів печі з врахуванням розмірів цегли:

$$L_n = 2024 \text{ мм}$$

$$B_n = 1476 \text{ мм}$$

$$H = 1768 \text{ мм}$$

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

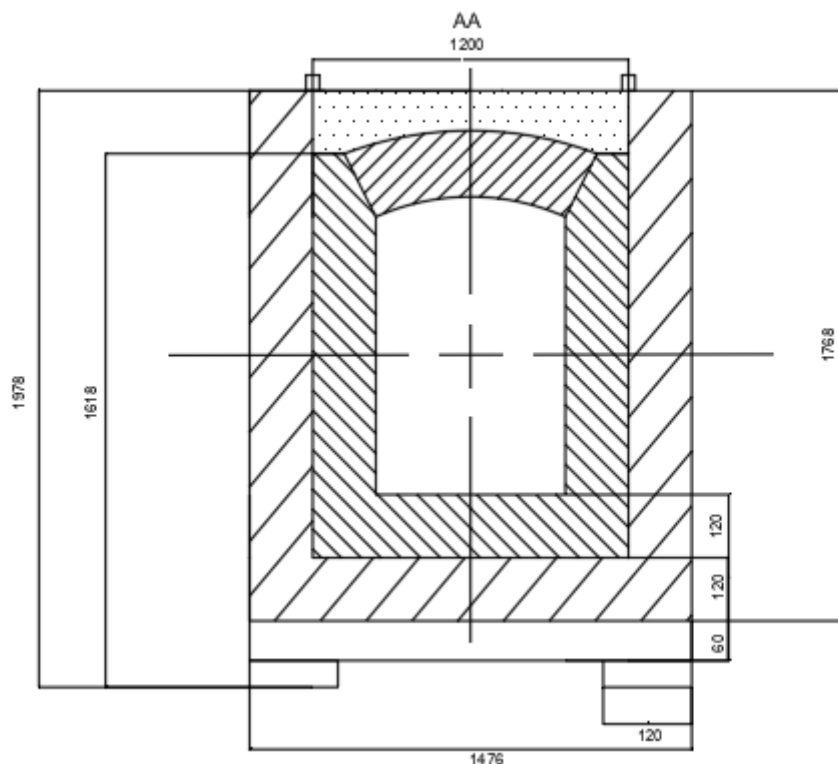


Рисунок 3.1 – Ескіз печі

### 3.3. Тепловий баланс печі

Під час роботи печі тепло постійно циркулюється від гарячих елементів до нижчих за температурою. Для оцінки ефективності роботи, можна розрахувати тепловий баланс. Він враховує абсолютно все тепло, яке піч отримує та витрачає. До джерел надходження тепла відносять, зокрема, тепло, яке утворюється в процесі спалювання палива, а також те, яке повертається в піч через рекуператор. Видаткова кількість балансу буде складатися з paru статей:

- нагрів металу;
- втрати з продуктами горіння;
- втрати через стіни, склепіння, і черинь печі;
- витрати тепла через вікна печі;
- втрати тепла на нагрів тари.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БП 0125.01.00.000 ПЗ

Арк.

26

### 3.3.1. Нагрів металу

Кількість тепла на нагрівання металу визначається по формулі:

$$Q_{\text{мет}} = C_{\text{мет}}(t_{\text{мет}}^k - t_{\text{мет}}^n)\Pi = 0,74 \cdot (860 - 20) \cdot 326,8 = \quad (3.8) \\ = 203\,138,88 \text{ кДж},$$

де:

$C_{\text{мет}}$  – теплоємність металу, кДж/кг·°С;

$t_{\text{мет}}^k, t_{\text{мет}}^n$  – кінцева і початкова температура металу, °С;

$\Pi$  – продуктивність печі, кг/год.

Приблизна маса 1 деталі становить 3,80 кг, тоді  $\Pi$  дорівнює 326,8 кг/год

### 3.3.2. Втрати тепла з димовими газами

Продукти, що утворюються при спалюванні пального, виходячи з печі, мають із собою величезну кількість тепла, яке обраховується за формулою:

$$Q_{n.g} = C_{n.g} t_{n.g} V_{n.g}, \text{ кДж}, \quad (3.9)$$

де:  $C_{n.g}$  – теплоємність продуктів горіння, кДж/м<sup>3</sup>·°С, 0,80 кДж/м<sup>3</sup>;

$t_{n.g}$  – температура продуктів горіння, °С, 960 °С;

$V_{n.g}$  – об'єм продуктів горіння, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, 10 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

$$Q_{CO_2} = 2,18 \cdot 910 \cdot 1,02 = 2\,023,48 \text{ кДж}$$

$$Q_{H_2O} = 1,68 \cdot 910 \cdot 1,96 = 2\,996,45 \text{ кДж}$$

$$Q_{O_2} = 1,44 \cdot 910 \cdot 0,09 = 117,94 \text{ кДж}$$

$$Q_{N_2} = 1,38 \cdot 910 \cdot 7,9 = 9\,920,82 \text{ кДж}$$

$$Q_{n.g} = (2\,023,48 \cdot 9,30 + 2\,996,45 \cdot 17,87 + 117,94 \cdot 0,82 + \\ + 9\,920,82 \cdot 72,01)/100 = 7\,686,60 \text{ кДж},$$

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

### 3.3.3. Втрати тепла через стіни, склепіння і під печі

Зовнішня поверхня печі гарячіша за температуру навколишнього середовища, саме тому тепло на постійній основі передається від печі до навколишнього повітря за допомогою конвекції та до навколишнього простору за допомогою випромінювання. Втрату тепла поверхнею печі можна визначити за формулою:

$$Q_{\text{нов}} = k(t_1 - t_4)F, \text{кДж}, \quad (3.10)$$

де  $k$  – коефіцієнт теплопередачі, Вт/м·°С;

$t_1$  – температура на внутрішній стороні стіни, °С;

$t_4$  – температура на зовнішній стороні стіни, °С.

Оскільки температури різних ділянок поверхні печі різні, загальні тепловтрати визначають шляхом додавання тепловтрат усіх ділянок.

$$Q_{\text{нов}} = 0,9 + 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot (960 - 200) \cdot 3\,578,43 = 816,78 \text{ кДж} - \text{бокова стіна печі}$$

$$Q_{\text{нов}} = 0,163 + 0,313 \cdot 10^{-3} \cdot (200 - 60) \cdot 3\,578,43 = 156,97 \text{ кДж} - \text{бокова стіна печі}$$

$$Q_{\text{нов}} = 0,9 + 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot (960 - 200) \cdot 3\,578,43 = 816,78 \text{ кДж} - \text{бокова стіна печі}$$

$$Q_{\text{нов}} = 0,163 + 0,313 \cdot 10^{-3} \cdot (200 - 60) \cdot 3\,578,43 = 156,97 \text{ кДж} - \text{бокова стіна печі}$$

$$Q_{\text{нов}} = 0,9 + 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot (960 - 200) \cdot 2\,987,42 = 682,03 \text{ кДж} - \text{черень печі}$$

$$Q_{\text{нов}} = 0,163 + 0,313 \cdot 10^{-3} \cdot (200 - 60) \cdot 2\,987,42 = 131,07 \text{ кДж} - \text{черень печі}$$

$$Q_{\text{нов}} = 0,9 + 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot (960 - 200) \cdot 2\,609,57 = 595,88 \text{ кДж} - \text{задня стіна печі}$$

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Q_{\text{нов}} = 0,163 + 0,313 \cdot 10^{-3} \cdot (200 - 60) \cdot 2\,609,57 = 114,51 \text{ кДж кДж}$$

– задня стіна печі

$$Q_{\text{нов}} = 0,078 + 0,186 \cdot 10^{-3} \cdot (960 - 200) \cdot 3\,458,40 = 488,96 \text{ кДж кДж}$$

– склепіння печі

$$Q_{\text{нов}} = 0,163 + 0,313 \cdot 10^{-3} \cdot (200 - 60) \cdot 2\,987,42 =$$

$$= 131,07 \text{ кДж – потолок печі}$$

Загальні втрати:

$$Q_{\text{нов}} = 131,07 + 488,96 + 114,51 + 595,88 + 131,07 + 682,03 + 156,97 +$$

$$+ 816,78 + 156,97 + 816,78 = 4\,091,02 \text{ кДж,}$$

### 3.3.4. Втрати теплоти через вікно печі

Коли відкриваються завантажувальні або розвантажувальні вікна печі, частина тепла з камери нагрівання виходить назовні у вигляді теплового випромінювання. У такі моменти відбуваються помітні втрати енергії. Для того щоб оцінити їхню величину, можна скористатися спеціальною формулою:

$$Q_{\text{вік}} = 5,7 F_{\text{вік}} \varphi \tau \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 = 5,7 \cdot 0,67 \cdot 0,14 \cdot 0,24 \cdot \left( \frac{1233}{100} \right)^4 = (3.11)$$

$$= 2\,965,80 \text{ кДж,}$$

де  $F_{\text{вік}}$  – площа відкритого вікна, м<sup>2</sup>;

$\varphi$  – коефіцієнт діафрагмування, що залежить від конфігурації вікна і товщини стіни;

$\tau$  – частка часу протягом години, коли вікно відкрите;

$T_n$  – температура в печі, К.

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3.3.5. Нагрів тари

Небажаною складовою теплового балансу печ є нагрів тари. Із збільшенням маси тари знижується коефіцієнт корисної дії обладнання. Тарою називаються піддони та різні пристрої, що використовуються для розміщення деталей у печі (рисунок 3.2),. Кількість тепла, що витрачається під час нагріву цієї тари протягом години її роботи, обчислюється за наступною формулою:

$$Q_m = C_m(t_m^k - t_m^n)G_m = 8,80 \cdot (900 - 20) \cdot 17,50 \cdot \frac{1}{0,53} = (3.12) \\ = 256\,132,80 \text{ кДж},$$

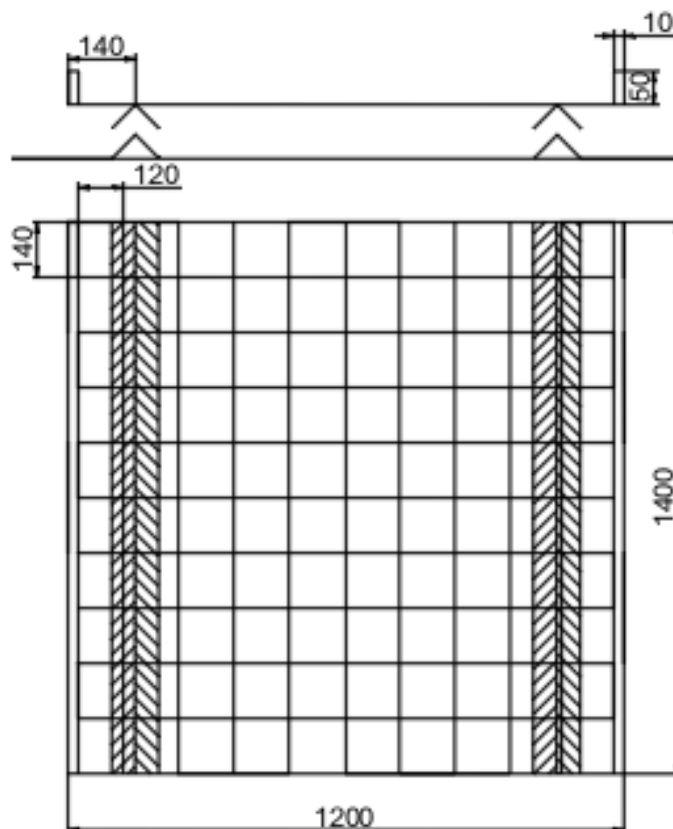


Рисунок 3.2 – Ескіз тари

де  $C_m$  – теплоємність матеріалу тари, кДж/(кг·°С);

$t_m^k, t_m^n$  – кінцева і початкова температури тари, °С;

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

$G_m$  – маса тари, що нагрівається за 1 год., кг.

Після визначення всіх статей складається рівняння теплового балансу (рисунок 3.3),:

$$\begin{aligned} 1,18(Q_{\text{мет}} + Q_m + Q_{\text{н.г}} \cdot V + Q_{\text{нов}} + Q_{\text{вік}}) &= Q_{\text{н}}^p \cdot V + Q_{\text{рек}} \cdot V = \\ &= 1,18( 203\,138,88 + 7\,686,60 + 4\,091,02 + 2\,965,80 + 256\,132,80 ) = \\ &= 35\,690 \cdot V + 12\,511,80 \cdot V \end{aligned} \quad (3.13)$$

де  $Q_{\text{рек}}$  – кількість тепла, що повертається через рекуператор у піч, кДж;

$V$  – витрати пального,  $\text{м}^3$  .

Кількість тепла, що повертається через рекуператор у піч, визначається за формулою:

$$Q_{\text{рек}} = L_{\partial} i_0 = 9,93 \cdot 1\,260 = 12\,511,80 \text{ кДж}, \quad (3.14)$$

де  $L_{\partial}$  – кількість повітря, яка необхідна для спалювання одиниці пального;

$i_0$  – тепловміст підігрітого повітря,  $\text{кДж}/\text{м}^3$  .

З рівняння теплового балансу визначаються витрати пального  $V$ .

$$V = 11,60 \text{ м}^3$$

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

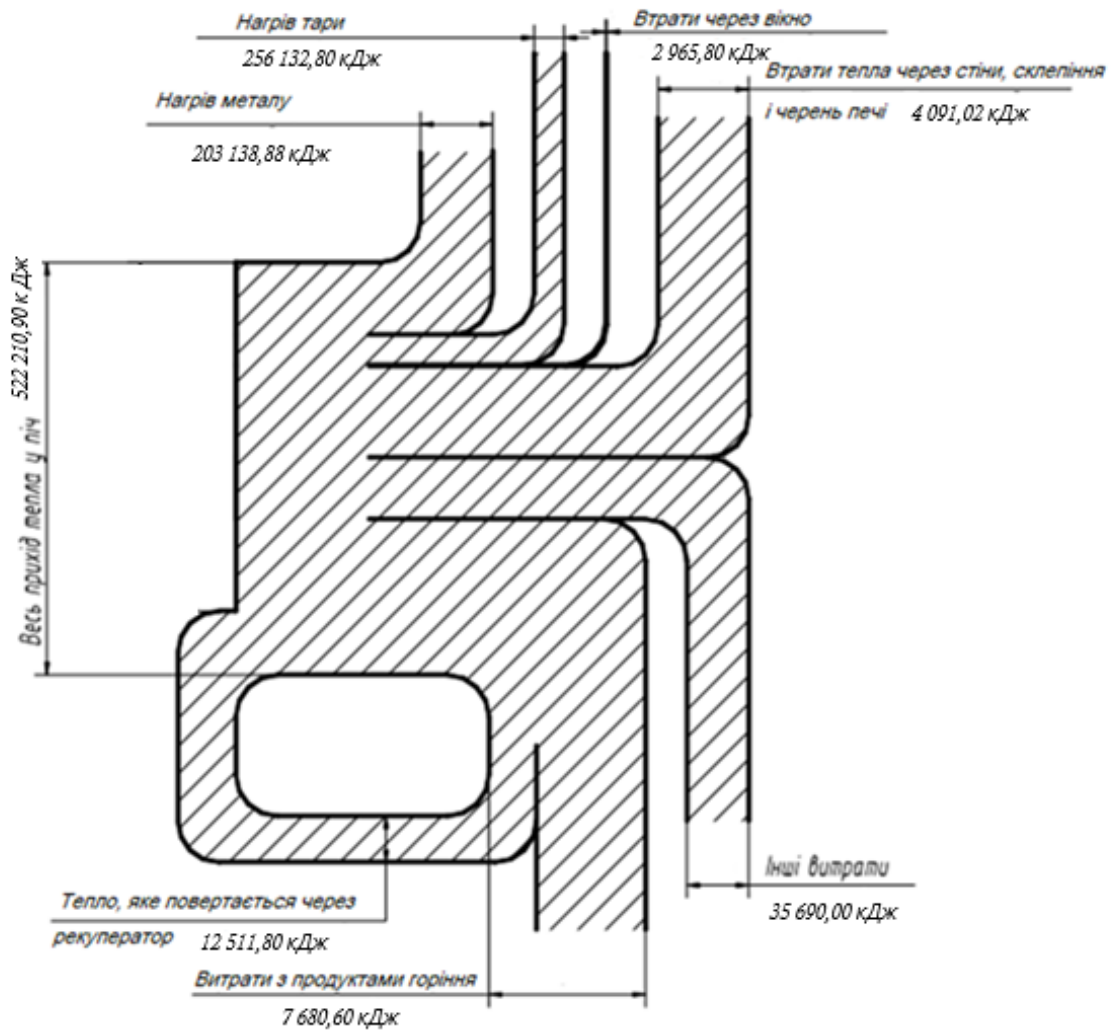


Рисунок 3.3 – Тепловий баланс

### 3.4. Вибір горілок

У печі планується встановити дві газові горілки, які будуть розташовані у шаховому порядку з обох боків печі. Довжина печі становить 1,2 м., і цього достатньо для розміщення 2-х горілок.

Щоб визначити, яка продуктивність має бути у кожної горілки, використовуємо формулу:

$$P_{\Gamma} = K_{з.г} \cdot \frac{B}{N_{\Gamma}} = 1,15 \cdot \frac{11,60}{2} = 6,67 \text{ м}^3/\text{год}, \quad (3.15)$$

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

де:

$K_{з,г}$  – коефіцієнт запасу (в даному випадку 1,15);

$V$  – загальна витрата палива (11,60 м<sup>3</sup>);

$N_г$  – кількість горілок (2 шт).

Отже, з розрахунків потрібна горілка, яка має продуктивність близько 6,67 м<sup>3</sup>/год. Тому обрав модель горілки ГПП-2.

У піч буде встановлено дві такі горілки, їхні основні характеристики:

продуктивність – 10 м<sup>3</sup>/год;

діаметр підведення газу – 12 мм;

діаметр підведення повітря – 48 мм;

діаметр вихідного сопла – 35 мм;

довжина горілки – 116 мм.

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРАХУНОК РЕКУПЕРАТОРІВ

Усі розрахунки у розділі 4 проводяться з літератури [3]

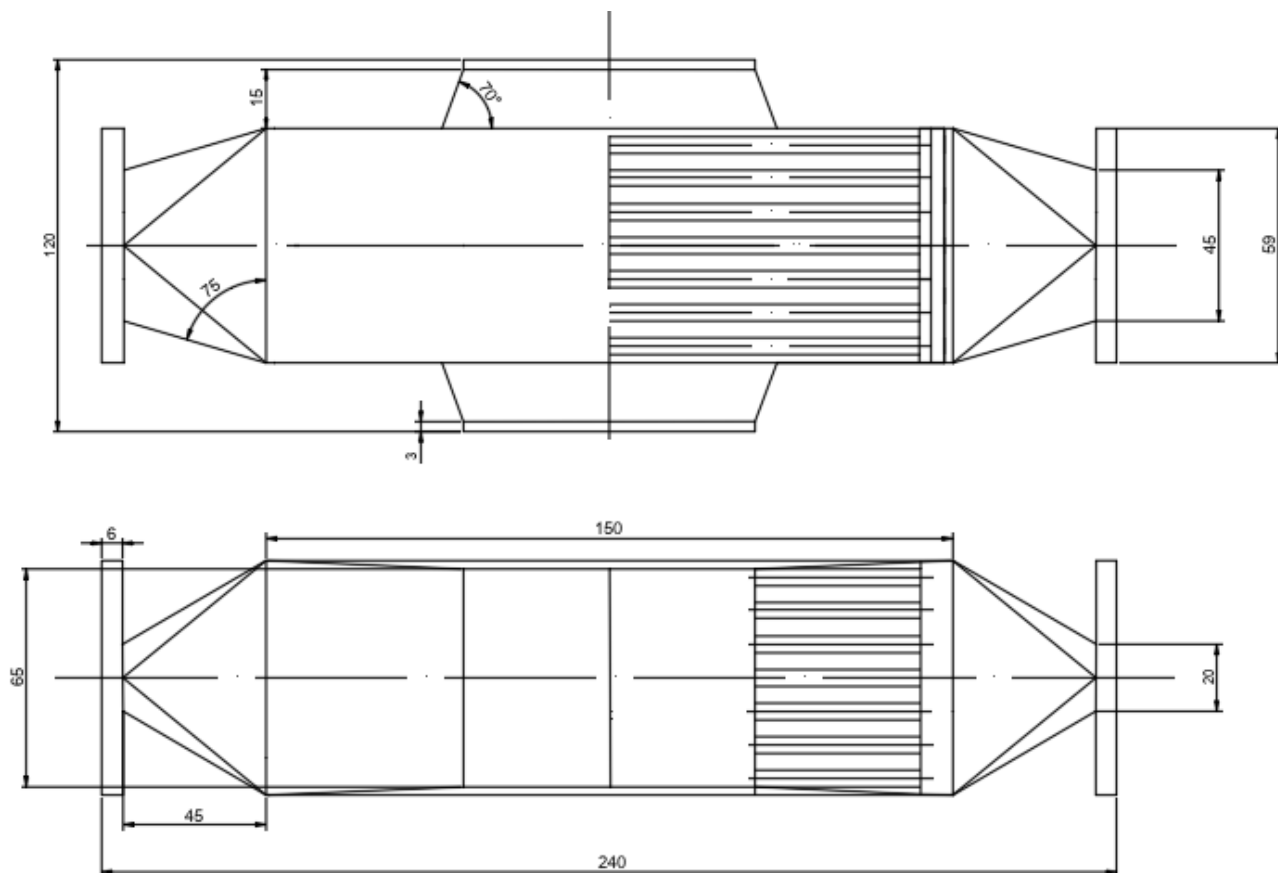


Рисунок 4.1 – Ескіз рекуператора

Загалом спосіб розрахунку рекуператорів однаковий для всіх типів.

Головна різниця полягає в тому, які саме формули застосовуються для визначення коефіцієнта теплопередачі, гідравлічних втрат та інших характеристик.

Щоб виконати розрахунок рекуператора, потрібні такі параметри:

- витрати горючого на піч  $11,60 \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- витрати повітря на  $1 \text{ м}^3$  пального  $9,93 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ;
- об'єм продуктів згоряння на  $1 \text{ м}^3$  пального  $10,97 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ;
- склад продуктів згоряння (вміст  $\text{CO}_2 = 9,30\%$  та  $\text{H}_2\text{O} = 17,87\%$ );

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БП 0125.01.00.000 ПЗ

Арк.

34

- початкова та кінцева температура повітря (20 °С та 960°С);
- температура продуктів згоряння, що виходять з печі (в °С).

Розрахунок починається з визначення витрат повітря, що подається в рекуператор, м<sup>3</sup>/с;

$$V'_n = V_n + \Delta V_n = 115,18 + 0 = 115,18 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (4.1)$$

$$V_n = BL_\partial = 11,60 \cdot 9,93 = 115,18 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (4.2)$$

$$\Delta V_n = nV_b = 0 \cdot 115,18 = 0 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (4.3)$$

Витікання повітря  $n$  дорівнює 0

Потім визначається витрати продуктів горіння перед рекуператором:

$$V'_\partial = mV_\partial(1 + \rho) = 10,97 \cdot 0,70(1 + 0,10) = 8,45 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (4.4)$$

де  $m$  – коефіцієнт, який враховує втрати продуктів горіння в печі і боровах до рекуператора;

$\rho$  – підтягування повітря в долях від кількості продуктів горіння;

$$V_\partial = Bv_\partial = 11,60 \cdot 10,97 = 127,25 \text{ м}^3/\text{с},$$

Коефіцієнт  $m$  є рівним 0,70, коефіцієнт  $\rho$  складає в середньому 0,10

Тепловміст диму перед рекуператором з врахуванням підтягування повітря:

$$i'_\partial = \frac{\rho i_n + i_{\text{вих}}}{1 + \rho} = \frac{0,10 \cdot 1300 + 14975,02}{1 + 0,10} \approx 13731 \text{ кДж/м}^3, \quad (4.5)$$

де:

$i_{\text{вих}}$  – тепловміст продуктів горіння при температурі  $t_{\text{вих}}$ , кДж/м<sup>3</sup>;

$i_n$  – тепловміст оточуючого повітря, кДж/м<sup>3</sup>.

Температура диму перед рекуператором  $t'_\partial$  визначається по його тепловмісту  $i'_\partial$ .

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Розрахункові витрати повітря і продуктів горіння (для визначення поверхні нагріву і прохідних перерізів:

$$V_n^* = V_n' + \frac{\Delta V_n}{2} = 87,68 + \frac{0}{2} = 115,18 \text{ м}^3/\text{год}, \quad (4.6)$$

$$V_{\partial}^* = V_{\partial}' + \frac{\Delta V_n}{2} = 8,45 + \frac{0}{2} = 8,45 \text{ м}^3/\text{год}, \quad (4.7)$$

Середньологарифмічний температурний напір визначається за формулами (4.13) і (4.14). Після цього обчислюється коефіцієнт теплопередачі  $k$ .

Щоб його розрахувати, зазвичай задають швидкість руху повітря та димових газів. Рекомендовані значення цих швидкостей для різних типів рекуператорів наведені в таблиці

Площа поверхні нагріву рекуператора обчислюється за формулою (4.8).

Під час розробки рекуператорів завданням обчислень є встановлення площі теплообміну та деяких інших параметрів, які визначають конструктивні особливості.

Основними виразами для аналізу рекуператора є:

Рівняння тепловіддачі:

$$Q = kF\Delta t_c = 35,23 \cdot 12,07 \cdot 893,87 \approx 380\,096 \text{ кДж}, \quad (4.8)$$

Рівняння теплового балансу:

$$V_{\partial}(i'_{\partial} - i''_{\partial})\xi = V_n(i'_n - i''_n), \quad (4.9)$$

де  $Q, V_n(i'_n - i''_n)$  – кількість тепла, що передається через всю поверхню нагріву, Вт;

$F$  – поверхня нагріву рекуператора,  $\text{м}^2$ ;

$k$  – коефіцієнт теплопередачі,  $\text{Вт}/\text{м}^2\text{град}$ ;

$t_c$  – середня різниця температур між продуктами горіння і повітрям,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$V_{\partial}$  – витрати продуктів горіння,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

$V_n$  – витрати повітря,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$i'_\partial$  та  $i''_\partial$  – початковий і кінцевий тепловміст диму,  $\text{МДж}/\text{м}^3$ ;

$\xi$  – коефіцієнт, який враховує втрати тепла через кладку рекуператора.

Під час створення нового рекуператора зазвичай задають три температурні параметри: початкову та кінцеву температури повітря  $t'_n$  та  $t''_n$ , а також початковою температурою диму  $t_\partial$ . Для визначення кінцевої температури диму з рівняння (4.9) визначається його тепловміст:

$$i_\partial^n = i'_\partial - \frac{V_n}{V_\partial \xi} (i''_n - i'_n) = 532 - \frac{115,18}{127,25 \cdot 1} (85,22 - 1590) = 1894,04 \text{ кДж}/\text{м}^3, \quad (4.10)$$

Площа теплообміну рекуператора  $F$  визначається за формулою (4.8), до якої входять коефіцієнт теплопередачі  $k$  та середнє значення температурної різниці між димовими газами та повітрям  $\Delta t_c$ . Для конвективних рекуператорів  $\Delta t_c$  температурна різниця змінюється вздовж теплообмінної поверхні за експоненційним законом.

Середнє значення перепаду температур між димовими газами та повітрям визначається як середньологарифмічна температура. Для прямолінійного (прямоточного) руху диму та повітря середня температура різниці має такий вигляд:

$$\Delta t_c = \frac{(t'_\partial - t'_n) - (t''_\partial - t''_n)}{\ln \frac{t'_\partial - t'_n}{t''_\partial - t''_n}} = \frac{(860 - 20) - (1300 - 350)}{\ln \frac{860 - 20}{1300 - 350}} \approx 893,87^\circ\text{C}, \quad (4.11)$$

Коефіцієнт теплопередачі  $k$  визначається за формулою:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_\partial} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_n}} = \frac{1}{\frac{1}{260,67} + \frac{0,002}{24,80} + \frac{1}{40,91}} = 35,26 \text{ Вт}/\text{м}^2, \quad (4.12)$$

де  $\alpha_\partial$  – коефіцієнт тепловіддачі від диму до стінки  $\text{Вт}/\text{м}^2$  град;

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

$\alpha_n$  – коефіцієнт тепловіддачі від стінки до повітря або газу, Вт/м<sup>2</sup> град;

S – товщина стінки, 0,002м;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності стінки, 1 Вт/м град.

Коефіцієнт тепловіддачі на димовій стороні:

$$\alpha_{\partial} = \alpha_{\partial}^{\kappa} + \alpha_{\partial}^{\text{випр}} = 50,46 + 210,21 = 260,67 \text{ Вт/м}^2 \text{ град.} \quad (4.13)$$

де:  $\alpha_{\partial}^{\kappa}$  – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, Вт/м<sup>2</sup> град;

$\alpha_{\partial}^{\text{випр}}$  – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, Вт/м<sup>2</sup> град.

На повітряній стороні враховується лише тепловіддача шляхом конвекції.

У газових рекуператорах з боку газу додатково береться до уваги теплове випромінювання.

Коефіцієнт тепловіддачі через конвекцію обчислюється за формулами, які відповідають типу конструкції рекуператора та характеру руху димових газів і повітря.

Коефіцієнт тепловіддачі за рахунок випромінювання визначається за формулою:

$$\alpha_{\partial}^{\text{випр}} = \frac{\sigma \left[ \left( \frac{T_{\partial}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{cm}}{100} \right)^4 \right]}{T_{\partial} - T_{cm}} = \frac{2,98 \left[ \left( \frac{1183}{100} \right)^4 - \left( \frac{1233}{100} \right)^4 \right]}{1183 - 1233} = \quad (4.14)$$
$$= 210,21 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град},$$

де  $T_{\partial}$   $T_{cm}$  – відповідно температура диму і стінки, °К;

$\sigma$  – приведений коефіцієнт випромінювання, Вт/м<sup>2</sup>.

Приведений коефіцієнт випромінювання:

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

$$\sigma = \frac{5,75}{\frac{1}{\varepsilon_{\partial}} + \frac{1}{\varepsilon_{cm}} - 1} = \frac{5,75}{\frac{1}{0,55} + \frac{1}{0,9} - 1} = 2,98 \text{ Вт/м}^2, \quad (4.15)$$

де:  $\varepsilon_{\partial}$  – степінь чорноти диму;

$\varepsilon_{cm}$  – степінь чорноти стінки.

Степінь чорнота диму визначається в залежності від вмісту  $CO_2$  та  $H_2O$ , товщини газового шару, форми каналу і температури.

Величину випр  $\alpha_{\partial}^{\text{випр}}$  можна також визначити по графіку залежності коефіцієнта тепловипромінювання від температури газів і товщини газового шару.

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

## ВИСНОВКИ

У цій роботі було розроблено проєкт полум'яної камерної газової печі для гартування металу. Проведено розрахунки:

- процесу згоряння газоподібного палива;
- теплотворну здатність;
- склад і кількість продуктів горіння;
- тривалість нагріву металу до необхідної температури.

Складено тепловий баланс печі, у якому враховано втрати тепла з димовими газами через стінки, склепіння й основу печі, а також через завантажувальне вікно та нагрів самої тари. На основі даних було спроектовано оптимальні габарити робочої камери, вибрано відповідні матеріали конструкції та горілки для ефективного згоряння палива.

Щоб підвищити енергоефективність печі, був спроектований трубчастий рекуператор, котрий дозволяє повертати частину тепла димових газів через підігрів повітря, що значно знижує теплові втрати.

Запропонована піч може підходити для використання на підприємствах машинобудування. Її головна перевага в тому, що вона працює переважно на природному газі, який на сьогоднішній день, є економічно вигіднішим у порівнянні з електроенергією.

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. <https://www.splav-kharkov.com/>
2. <https://studwood.net/>
3. Устаткування процесів теплової обробки Методичні вказівки до виконання курсового проекту для студентів спеціальності 6.090100 – “Прикладне матеріалознавство” для всіх форм навчання. С.В.Мисковець, Н.П.Зайчук- Луцьк: ЛНТУ, 2019.- 44 с.
4. <https://uk.wikipedia.org/>
5. <https://karbaz.com.ua/>
6. <https://ua.superb-heater.com/>
7. Богачев В.Д. Термічна обробка металів і сплавів. – К.: Вища школа, 2007. – 360 с.
8. Ільїн В.С. Основи технології машинобудування. – Харків: НТУ «ХП», 2010. – 267 с.
9. Козлов В.В. Технологія машинобудування: технологічні процеси та виробництво. – Харків: ХНАДУ, 2022. – 312 с.
10. Яковлєв С.Ю. Сучасні методи термічної обробки сталей і сплавів. – Київ: КНУ, 2021. – 284 с.
11. Гриньков О.В. Технологічні процеси обробки металів тиском та термічною обробкою. – Львів: Видавництво ЛНУ, 2023. – 198 с.
12. Сапожников А.Ю. Інженерна технологія машинобудування. – Дніпро: НМетАУ, 2020. – 276 с.
13. Дубровін В.М. Механічна обробка і проектування технологічних процесів. – Полтава: ПНТУ, 2019. – 241 с.

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

14. Технологія конструкційних матеріалів. Підручник/ М. Н. Сологуб, І.О.Рожнецький, О.І. Некоз та ін. За ред.. М.Н. Сологуба – К.:Вища школа; 2002 – 374с.
15. Металознавство: підручник / О.М. Бялік, В.С. Черненко та ін. – 2-ге вид., перер. і доп. – К. ІВЦ «Політехніка», 2002. – 384 с.
16. Устаткування процесів теплової обробки ОТ. [Текст]: конспект лекцій для студентів спеціальності 6.050403 "Інженерне матеріалознавство" денної та заочної форми навчання / уклад. С.В. Мисковець, Н.П. Зайчук. – Луцьк: Луцький НТУ, 2015. – 100 с.
17. Кузін О.А., Яцюк Р.А. Металознавство та термічна обробка металів: підручник. – Л.: «Афіша», 2002. – 304 с.
18. Атаманюк В.В. Технологія конструкційних матеріалів/В.В. Атаманюк. – К.: Кондор, 2016. – 528 с.
19. Леговані сталі та сплави з особливими властивостями. Підручник / Куцова В.З., Ковзель М.А., Носко О.А. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. – 348 с.
20. Леговані сталі та сплави : навч. посіб. / Л. Ф. Руденко, Т. П. Говорун. – Суми : Сумський державний університет, 2012. – 171 с.
21. Термічна обробка: методичні вказівки до лабораторних занять для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітніх програм «Матеріалознавство» та «Індустріальний інжиніринг та менеджмент» спеціальності 132 Матеріалознавство, галузі знань 13 Механічна інженерія денної та заочної форм навчання / уклад. Н.П. Зайчук., Ю.П. Фещук Луцьк: ЛНТУ, 2022. – 74 с.
22. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення [Текст]. – Введ. 2015-06-22. – К.: Держстандарт України, 2017. – 29 с.

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

23. Кваліфікаційна робота: методичні вказівки до оформлення кваліфікаційних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівня вищої освіти освітньо-професійної програми «Матеріалознавство», «Індустріальний інжиніринг та менеджмент» галузі знань 13 Механічна інженерія спеціальності 132 Матеріалознавство денної та заочної форм навчання / уклад. М.Д. Мельничук, Ю.П. Фещук, Д.А. Гусачук, С.В. Мисковець. Луцьк : ЛНТУ, 2023. 52 с.

					БП 0125.01.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43