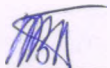


Довідка
про відсутність плагіату у випускній кваліфікаційній роботі

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій
Кафедра Інтелектуальні системи енергопостачання

ДОВІДКА

За результатами перевірки випускної кваліфікаційної роботи здобувача вищої освіти Катерини Білостоцької на тему: Дослідження системи утилізації теплоти продуктів згоряння палива в процесі виробництва залізничних коліс в роботі не виявлено порушень академічної доброчесності.

Керівник ВКР  Віталій Перцевий

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Український державний університет науки і технологій

Кафедра Інтелектуальні системи енергопостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

_____ /Дмитро БОСИЙ/

«_____» _____ 20____р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **144 Теплоенергетика**

Освітньо-професійна програма **Теплоенергетика**

Тема Дослідження системи утилізації теплоти продуктів згоряння палива в процесі виробництва залізничних коліс

Theme Research of heat utilization system of fuel combustion products in the process of railway wheels production

Керівник дипломної роботи

доцент _____ Віталій ПЕРЦЕВИЙ

Нормоконтролер

доцент _____ Віктор ДЬЯКОВ

Студентка групи ТЕ2021

_____ Катерина БІЛОСТОЦЬКА

Student

Bilostotska Kateryna

Дніпро – 2021

Український державний університет науки і технологій
Факультет «Управління енергетичними процесами»
Кафедра «Інтелектуальні системи енергопостачання»
Галузь 14 Електрична інженерія
Спеціальність 144 Теплоенергетика
Спеціалізація «Теплоенергетика»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри

_____ Дмитро Босий
«25 » січня 2021р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС магістр
студентки групи ТЕ2021 Білостоцької Катерини Владиславівни

1 Тема дипломної роботи: **«Дослідження системи утилізації теплоти продуктів згоряння палива в процесі виробництва залізничних коліс»**

затверджена наказом по університету від «25» січня 2021р. № 46ст.

2 Термін подання студентом закінченої роботи «10» грудня 2021р.

3 Вихідні дані до дипломної роботи: теплотехнічні характеристики кільцевої печі, теплофізичні властивості заготовки для залізничних коліс, склад палива.

4 Зміст пояснювальної записки {перелік питань до розробки}: математичне моделювання теплової роботи кільцевої печі, проектний розрахунок водопідігрівача, обґрунтування економічної ефективності впровадження системи утилізації теплоти.

5 Перелік креслень {демонстраційного матеріалу}: 1. Схема кільцевої печі. 2. Загальна характеристика кільцевої печі. 3. Характеристика димової труби. 4. Склад природного газу. 5. Тепловий баланс кільцевої печі. 6. Вихідні дані для розрахунку економічної ефективності установки водопідігрівача. 7. Калькуляція собівартості 1ГДж відпущеного споживачам тепла у вигляді гарячої води. 8. Техніко-економічні показники роботи водопідігрівача.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва розділу	Термін виконання	Об'єм розділу, %
1.	ВСТУП	01.04	5
2.	1 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОЇ РОБОТИ КІЛЬЦЕВОЇ ПЕЧІ	05.06	40
3.	2 ПРОЄКТНИЙ РОЗРАХУНОК ВОДОПІДГРІВАЧА	05.09	25
4.	3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ВОДОПІДГРІВАЧА	05.10	20
5.	ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	15.11	5
6.	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	05.12	5

Дата видачі завдання «25» січня 2021 р.

Керівник дипломної роботи, доцент _____ Віталій Перцевий

Завдання прийняв до виконання _____ Катерина Білостоцька

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка має обсяг: 65 сторінок, складається з 3 розділів та містить 1 ілюстрацію, 7 таблиць, 8 використаних джерел.

Мета роботи – розробка та дослідження способу утилізації теплоти продуктів згоряння палива кільцевої печі.

В роботі виконано тепловий розрахунок кільцевої методичної печі, а саме розрахунок повного горіння газоподібного палива, розрахунок теплообміну у робочому просторі печі, визначено теплові втрати та складено тепловий баланс печі, обчислені втрати теплоти теплопровідністю через кладку, виконано розрахунок теплових втрат в томильній зоні через свод, теплових втрат в зварювальній зоні, визначено теплові втрати в методичній зоні, витрату теплоти на підігрів металу, теплові потужності та витрата палива.

Виконано проєктний розрахунок водопідігрівача, для визначення поверхні нагрівання водопідігрівача, розроблено технічні рішення і рекомендації по установці водопідігрівача в боров печі.

Виконано розрахунок інвестицій на установку нового обладнання, розрахунок економічної ефективності капіталовкладень.

Одержані результати можуть бути використані при проектуванні систем утилізації методичних печей інших типів.

Ключові слова: ЗАГОТОВКИ, ПЕРВИНА ЗОНА, НАГРІВАННЯ, ТЕПЛООБМІН, ПАЛИВО, ТЕПЛОТА.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП.....	6
1 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОЇ РОБОТИ КІЛЬЦЕВОЇ ПЕЧІ.....	9
1.1 Характеристика підприємства та об'єкта проєктування.....	9
1.2 Опис кільцевої печі ТПЦ №5.....	11
1.3 Паспортні дані кільцевої печі.....	13
1.4 Тепловий розрахунок кільцевої методичної печі.....	13
1.4.1 Вихідні дані для розрахунку.....	13
1.4.2 Розрахунок повного горіння газоподібного палива.....	16
1.4.3 Розрахунок теплообміну у робочому просторі печі.....	17
1.4.4 Теплові втрати та тепловий баланс печі. Втрати теплоти теплопровідність через кладку.....	34
1.4.5 Розрахунок теплових втрат в томильній зоні через свод.....	36
1.4.6 Розрахунок теплових втрат в зварювальній зоні.....	38
1.4.7 Теплові втрати в методичній зоні.....	40
1.4.8 Витрата теплоти на підігрів металу.....	44
1.4.9 Теплові потужності та витрата палива.....	45
2 ПРОЄКТНИЙ РОЗРАХУНОК ВОДОПІДІГРІВАЧА.....	48
2.1 Перевірочний тепловий розрахунок рекуператора.....	48
3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ВОДОПІДІГРІВАЧА..	
3.1 Характеристика об'єкта проєктування.....	56
3.2 Розрахунок інвестицій на установку нового обладнання.....	57
3.3 Розрахунок економічної ефективності капіталовкладень.....	59
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	65

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробник		К. Білостоцька			Дослідження системи утилізації теплоти продуктів згоряння палива в процесі виробництва залізничних коліс	Літ.	Арк.
ОП та БНС							Акрушів
Керівник		В. Перцевий				5	65
Економ.						УДУНТ, ІСЕ, гр. ТЕ2021	
Н. контр.		В. Дьяков					

ВСТУП

Актуальність роботи. Промисловий теплотехнічний комплекс є одним з основних споживачів паливно-енергетичних ресурсів країни. Лише одні високотемпературні системи з основною технологічною ланкою промисловими печами по рівню вжитку органічного палива конкурують з виробництвом електроенергії на теплових електричних станціях. Серед найбільш енерговитратних виробництв виділяється прокатне виробництво, споживаюче значну кількість паливно-енергетичних ресурсів. Тут витрачається більше 10 % палива і 15 % електроенергії, що споживаються галуззю.

При цьому на нагрів металу витрачається всього біля 30 % підведеної теплоти, останнє – втрати. Найбільші втрати – з фізичною теплотою газів, що відходять. Використання теплоти газів, що відходять може бути направлене на зниження витрати палива при збільшенні температури підігрівання повітря, на попередній нагрів металу, а також на здобуття нових енергоносіїв (гарячої води, пари) для їх використання поза піччю.

У даній роботі для збільшення ступеня використання теплоти газів, що відходять, кільцевої нагрівальної печі ПАТ “Інтерпайп НТЗ” пропонується установка водопідігрівача в боріві кільцевої нагрівальної печі за рекуператором. Проєктування виконується з метою підігрівання води на потреби гарячого водопостачання підприємства.

Аналіз техніко-економічних показників роботи нагрівальної печі свідчить про можливість проведення такої реконструкції.

Зв’язок роботи з науковими програмами. Робота відповідає науковим напрямам роботи кафедри «Інтелектуальні системи енергопостачання» Українського державного університету науки і технологій.

Мета і завдання роботи. Розробка та дослідження способу утилізації

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

теплоти продуктів згоряння палива кільцевої печі.

Відповідно до поставленої мети в роботі вирішені наступні завдання:

- Виконано тепловий розрахунок кільцевої методичної печі з метою визначення теплотехнічних показників її роботи;
- Виконано перевірочний тепловий розрахунок рекуператора для підігрівання води;
- Визначено техніко-економічні показники роботи водопідігрівача.

Об'єкт дослідження – кільцева методична піч, боров кільцевої методичної печі для відведення продуктів згоряння палива.

Предмет дослідження – процес згоряння палива, теплообміну та утилізації теплоти продуктів виробництва залізничних коліс.

Методи дослідження – теоретичні дослідження на основі математичного моделювання теплової роботи методичної печі.

Наукова новизна та основні положення, які виносяться на захист:

1. Тепловий розрахунок кільцевої методичної печі дозволяє визначити спосіб утилізації теплоти газів, що відходять з печі.
2. Перевірочний тепловий розрахунок рекуператора для підігрівання води дозволяє визначити температуру нагрівання води, масову витрату гарячої води, теплову потужність водопідігрівача та площу поверхні теплообміну між продуктами згоряння палива в кільцевій методичній печі та водою.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Встановлення водопідігрівача в борові кільцевої печі з метою підігріву води на потреби гарячого водопостачання дозволяє ефективно використовувати теплоту газів, що відходять з печі. В свою чергу, це дозволяє збільшити ККД кільцевої печі.
2. Місце розташування рекуператора в борові печі та конструктивні характеристики бору залишаються без змін, що дозволяє зменшити капіталовкладення на установку нового обладнання.
3. Результати, отримані в даній роботі, можна використовувати для

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ухвалення технічних рішень і оцінки економічної ефективності реконструкції систем утилізації теплоти газів, що відходять, нагрівальних печей різного призначення.

Особистий внесок здобувача. Постановку мети та завдань дослідження виконано спільно з науковим керівником. Здобувачем самостійно проведені розрахунки, зіставлення та аналіз отриманих результатів розрахунків, формулювання висновків.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні положення роботи і результати досліджень доповідалися здобувачем і обговорювалися на 81 Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпро, 22-23 квітня 2021 р.) та 81 Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених, магістрантів та студентів «Наука і сталий розвиток транспорту» (28 жовтня 2021 р.)

Публікації.

Zhevzyk, O.V. Gasdynamics of the sonic jet for the continuous casting cooling process / O.V. Zhevzyk, V.O. Pertsevyi, K.V. Bilostotska, O.V. Derii // “Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту”: матеріали 81 Міжнародної науково-практичної конференції, 22-23 квітня 2021р.- Дніпро, ДНУЗТ, 2021.- С. 71-72.

Білоостоцька К.В. Дослідження системи утилізації теплоти продуктів згоряння палива в процесі виробництва залізничних коліс / К.В. Білоостоцька // “Наука і сталий розвиток транспорту”: збірник тез доповідей секції 81 Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених, магістрантів та студентів, 28 жовтня 2021 р. - Дніпро, Українського державного університету науки і технологій, 2021.- С. 5.

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

1 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОЇ РОБОТИ КІЛЬЦЕВОЇ ПЕЧІ

1.1 Характеристика підприємства та об'єкта проектування

ВАТ “Інтерпайп НТЗ” спеціалізується на виробництві труб, коліс, кілець і бандажів. Для забезпечення виробництва на заводі є колесопрокатний цех і п'ять трубопрокатних цехів.

Обладнання колесопрокатного виробництва призначено для виготовлення:

- залізничних коліс;
- заготовок тягових передач електровозів;
- заготовок кранових коліс, центрів та інших виробів асиметричного типу.

Проектна потужність трубопрокатного цеху № 1 складає 150 тис. т. Для нагріву злитків встановлено дві трьохзонні методичні печі з похилим подом. Посад злитків проводиться в два ряди, кантівка злитків на подині печі здійснюється катувальними машинами, які переміщуються вздовж печей. Методичні печі опалюються природним газом. Підігрів повітря реалізується в трубчастих рекуператорах. Для підігріву труб перед калібруванням встановлена методична піч з механічною кантуванням.

В трубоелектрозварювальному цеху № 2 є 4 ділянки: заготівельне відділення, ділянка трубоелектрозварювальних станів, оздоблювальне відділення. Сортамент цеху-труби діаметром 12 ... 60 мм.

Трубопрокатний цех № 3 призначений для виробництва гарячекатаних труб з легованих і вуглецевих сталей діаметром 76 ... 203 мм.

Трубопрокатний цех № 4 виробляє труби нафтового сортаменту та котельні труби діаметром 114 ... 350 мм. Термічне відділення забезпечене трьома секційними печами, де здійснюється гарт і відпуск. В секційній печі № 3 піддаються нормалізації обтяжені бурильні труби.

Трубопрокатний цех № 5 (стан 140) обладнаний двох кетовим станом поздовжньої прокатки.

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Колесопрокатний цех має:

- заготівельне відділення;
- пресопрокатне відділення;
- відділення обробки коліс.

В колесо бандажному цеху є ділянка підготовки заготовок, пресопрокатне відділення, ділянка кільце прокатних станів, ділянка термічної обробки кілець і бандажів, ділянка агрегату холодної правки кілець.

У цеху передбачається потокове виробництво залізничних бандажів і суцільнокатаних кілець з вуглецевих і легованих марок сталі, зовнішнім діаметром 700 ... 3000 мм.

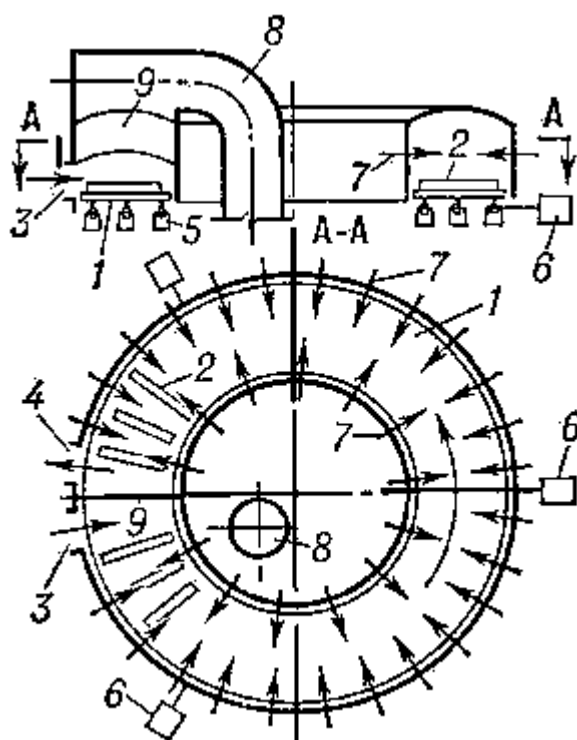
Кільцева піч це промислова піч, в якій нагрів виробів відбувається на кільцевому поді, що обертається. Кільцеву піч застосовують головним чином для нагріву заготовок при прокатці труб, коліс і бандажів залізничного рухомого складу, для термічної обробки металевих виробів, а також для нагріву заготовок з кольорових металів перед прокаткою і садкою. Перша кільцева піч розроблена в 1925 радянським винахідником Н. Д. Буніним. Кільцева піч складається з поду, що обертається, і нерухомого кільцевого каналу, перекритого зводом. Кільцеві щілини між подом, що обертається, і нерухомою частиною печі ущільнюють водяними затворами. Вироби завантажують в піч і видають з неї через вікна за допомогою спеціальних завантажувально-розвантажувальних машин (підлогових або на кранах). Робочий простір печі між вікнами розділений жаростійкою перегородкою. У кільцеві печі невеликого розміру завантажують і видають вироби через одне вікно. Під печей обертається на опорних роликах за допомогою електричного приводу. Зовнішній діаметр кільцевої печі 10...30 м, а ширина поду 1,5...6 м, продуктивність до 75 т/год. Теплотехнічні зони і температурний режим крупної кільцевої печі такі ж, як і в методичної печі. Невеликі кільцеві печі працюють з постійною температурою за всім обсягом печі. Кільцеві печі опалюють газом або рідким паливом. При зовнішньому діаметрі печі 10...12 м пальники або форсунки встановлюють лише на зовнішній стіні, а при

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		10

більшому - на зовнішній і на внутрішній стінах.

У печах з подом, що обертається, знижується угар металу, оскільки вироби на поді не переміщуються, а пересуваються разом з ним, шар окалини, що тому утворюється, зберігається до моменту видачі злитка з печі і захищає метал від інтенсивного окислення. Такі печі дозволяють механізувати, а в деяких випадках і автоматизувати процес завантаження і вивантаження заготовок. Найбільш компактну і досконалу конструкцію цих печей набувають при опалюванні газом [1].

Схема кільцевої печі зображена на рис. 1.1.



1 - кільцевий під, що обертається; 2 - виріб, який нагрівається; 3 - вікно завантаження; 4 - вікно видачі; 5 - опорний ролик; 6 - привід обертання поду; 7 - пальник; 8 - димопровід для відведення продуктів згорання з печі в боров; 9 - розділова перегородка

Рисунок 1.1 - Схема кільцевої печі

1.2 Опис кільцевої печі ТПЦ №5

Кільцева піч побудована по проєкту ДП “Укрдіпрометз” і введена в експлуатацію в червні 1975 року. Вона встановлена в трубопрокатному цеху №5 на ВАТ „ІНТЕРПАЙП” НТЗ. Піч призначена для нагріву заготовок з вуглецевих і легованих сталей перед прошивним станом “140”.

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		11

Кільцева піч має замкнуту кільцеподібну форму і складається із стаціонарної частини, внутрішньої і зовнішньої стінок, підвісного зведення і кільця поду, що обертається усередині.

Робоча камера печі викладена з шамотної цегли класу “А” з ізоляцією стін легковажним шамотом і ізоляційною засипкою. У нагрівальній зоні стіни викладені з легковагової шамотної цеглини і ізоляційної засипки, а звод печі є підвісним з фасонної шамотної цеглини класу “А” з ізоляцією діатомовою цеглою.

Под печі виконаний з шамотної цегли класу “А”, верхній шар з хромитової набивки. Вся кладка печі поміщена в герметичний металевий кожух. Для герметизації робочого простору печі між подом, що обертається, і стаціонарними стінами печі розташовано 2 гідрозасуви.

Обертання поду – періодичне, здійснюється двома приводами через редуктори від двох електродвигунів, потужністю по 30 кВт кожний і швидкістю обертання 715 об/хв. Піч забезпечена датчиком повороту поду, що дозволяє здійснювати контроль за рухом заготовок в печі.

Завантаження і видача злитків здійснюється через вікна, розташовані в зовнішній кільцевій стіні. Кут між осями вікон завантаження і видачі складає 24 градуси. У печі є чотири водоохолоджувачі перегородки, що відділяють камери посадки і видачі від останнього робочого простору.

Робочий простір печі по довжині розділений на шість зон, з яких п'ять мають індивідуальне підведення і автоматичне регулювання палива і повітря, а шоста – нульова зона – не опалюється.

Як резервне паливо в зимовий час передбачений мазут.

Спалювання газу здійснюється за допомогою двох провідних пальників. При опалюванні мазутом пальник обладнається мазутною форсункою типу ФВД-100.

Повітря для горіння подається від установки вентилятора, що складається з вентилятора типу ВМ-15 продуктивністю 40000 м³/ч. Їх два - робочий і резервний.

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		12

Повітря підігрівається теплом продуктів згоряння, що виходять з печі, в петлевому трубчастому рекуператорі.

1.3 Паспортні дані кільцевої печі

Паспортні дані печі та її характеристики відображені в таблицях нижче. Дані, що наведені в таблицях, збиралися шляхом обробки проєктних та технічних документів по печі, які були надані співробітниками цеху КВПіА та ТПЦ №5. В табл. 1.1 представлені основні конструктивні характеристики кільцевої печі. Характеристика палива та його складу представлена в табл. 1.2. Показники роботи печі представлені в табл. 1.3.

1.4 Тепловий розрахунок кільцевої методичної печі

1.4.1 Вихідні дані для розрахунку

Вихідні дані для повічного теплового розрахунку методичної печі відповідно до методики розрахунку [1] наступні:

Продуктивність печі - 31,5 т/год;

Температурний режим печі:

- температура металу при посаді $t_0 = 15^\circ \text{C}$;

- температура поверхні заготовок в кінці нагрівання $t_{\text{пк}} = 1250^\circ \text{C}$;

- температура робочого простору в томильної зоні становить 1300°C ;

- температура робочого простору в зварювальної зоні становить 1280°C ;

- середня температура робочого простору в методичній зоні становить 1040°C ;

- перепад температури по перетину заготовок в кінці нагрівання:
 $\Delta t = 20^\circ \text{C}$;

- температура відхідних газів $t_{\text{yx}} = 780^\circ \text{C}$;

- температура підігріву повітря 300°C .

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Таблиця 1.1 – Загальна характеристика кільцевої печі

№ з/п	Найменування		Одиниці виміювання	Показники
1	Призначення печі		Нагрів заготовок перед прокаткою	
2	Зовнішній діаметр печі		мм	24200
3	Внутрішній діаметр печі		мм	12450
4	Середній діаметр печі		мм	18325
6	Висота робочого простору Висота	в опалюваній частині	мм	1540
7		в неопалюваній частині	мм	1040
8	Ширина поду печі		мм	4425
9	Корисна площа поду		м ²	236,0
10	Свод	тип	підвісний	
11		товщина	мм	330
12	Максимальна продуктивність		т/год	55,0
13	Теплова потужність печі		Гкал/год	26,4
14	Паливо	основне	природний газ	
15		резервне	мазут	
16	Сортамент заготовок, що нагріваються	діаметр	мм	120, 130, 140, 150, 160, 168
17		довжина	м	1400...2000
18		марка сталі		Ст. 10, Ст. 20; Ст. 35, 45, 15X, 20X, 40X, Д
19	Температура	посаду	°С	15
20		видачі	°С	1220...1270
21	Спосіб нагріву		Відкритим полум'ям	
22	Тип пічного транспорту		Кільцевий під	
23	Швидкість обертання поду по зовнішньому діаметру		м/хв.	5,07
24	Максимальне число обертів		4	300 при $\varphi=1,15^\circ$
25	Кут оберту поду		град.	довільний
26	Прилад для підігрівання повітря		петлевий рекуператор	
27	Тип повітряного рекуператора		трубчатий металевий	
28	Спосіб видалення окалини		вручну	
29	Тип опалювальних приладів		пальники (при опалюванні	
30	Агрегат, що обслуговується піччю		прокатний стан «140»	
31	Кількість печей в цеху		шт.	1

Таблиця 1.2 – Характеристика димової труби

Найменування		Од. виміру	Показники
Продуктивність		нм ³ /год	40000
Тиск		мм. вод. ст.	830
Число обертів вентилятора		об/хв	1470
Електричний двигун	Тип	-	A03-315S-4
	Потужність	кВт	160
	Кількість обертів	об/хв	1470
	Напруга	в	380/160
Висота ствола труби		м	80,0
Внутрішній діаметр	зверху	м	2,4
	у основи	м	5,53
Кількість димових труб		шт	1
Матеріал димових труб			Шамотна цегла марки ШБ пендиатомитовий - марки К-1, ПД-350, глиняний звичайний

Характеристика заготовок, що нагріваються: діаметр $d=1058$ мм; висота $l=157$ мм; маса 1050 кг. Число рядів заготовок в печі: $n=2$. Довжина томильної зони 10,99 м. Довжина зварювальної зони 27,02 м. Довжина методичної зони 32,92 м. Температура підігріву повітря в рекуператорі 300 °С.

Характеристика палива (природного газу) спалюваного в нагрівальній печі представлена в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Склад природного газу

Компонент	% по об'єму
CH ₄	92,8
C ₂ H ₆	3,9
C ₃ H ₈	1,0
C ₄ H ₁₀	0,4
C ₅ H ₁₂	0,3
N ₂	1,5
CO ₂	0,1

1.4.2 Розрахунок повного горіння газоподібного палива

Теоретично необхідний об'єм повітря для повного спалювання 1 м_n^3 газоподібного палива

$$V^0 = 0,0476 \cdot \left[0,5 \cdot \text{CO} + 0,5 \cdot \text{H}_2 + 2 \cdot \text{CH}_4 + 1,5 \cdot \text{H}_2\text{S} + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) \cdot \text{C}_m\text{H}_n - \text{O}_2 \right] =$$
$$= 0,0476 \times \left[0,5 \cdot 0 + 0,5 \cdot 0 + 2 \cdot 92,8 + 1,5 \cdot 0 + \right. \\ \left. + 3,5 \cdot 3,9 + 5 \cdot 1 + 6,5 \cdot 0,4 + 8 \cdot 0,3 - 0 \right] = 9,96 \frac{\text{м}_{\text{повітря}}^3}{\text{м}_{\text{палива}}^3}.$$

Дійсний об'єм повітря для повного спалювання 1 м_n^3 газоподібного палива

$$V_{\text{пов}} = \alpha \cdot V^0 = 1,1 \cdot 9,96 = 10,96 \frac{\text{м}_{\text{повітря}}^3}{\text{м}_{\text{палива}}^3}.$$

Об'єм продуктів згоряння газоподібного палива

$$V_{\text{п.г.}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} = 12,19 \frac{\text{м}_{\text{п.г.}}^3}{\text{м}_{\text{палива}}^3}.$$

Об'єм вуглекислого газу CO_2 , що утворюється при повному спалюванні 1 м_n^3 газоподібного палива, визначається за формулою

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01 \cdot (1 \cdot \text{CO}_2 + 1 \cdot \text{CO} + \sum m \cdot \text{C}_m\text{H}_n) =$$
$$= 0,01 \cdot (1 \cdot 0,1 + 1 \cdot 0 + 1 \cdot 92,8 + 2 \cdot 3,9 + 3 \cdot 1 + 4 \cdot 0,4 + 5 \cdot 0,3) = 1,07 \frac{\text{м}_{\text{CO}_2}^3}{\text{м}_{\text{палива}}^3},$$

де CO_2 , CO , C_mH_n - це склад CO_2 , CO і вуглеводнів C_mH_n в газоподібному паливі у відсотках по об'єму.

Об'єм діоксиду сірки SO_2 визначається за формулою

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$$V_{\text{SO}_2} = 0,01 \cdot H_2S = 0,01 \cdot 0 = 0 \frac{M_{\text{H}_2\text{SO}_4}^3}{M_{\text{H}_2\text{палива}}^3}.$$

Об'єм азоту N_2 , утворюється при повному спалюванні $1 M_{\text{H}_2}$ газоподібного палива, визначається за формулою

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot V_{\text{B}} + \frac{N_2}{100} = 0,79 \cdot 10,96 + \frac{1,5}{100} = 8,67 \frac{M_{\text{H}_2N_2}^3}{M_{\text{H}_2\text{палива}}^3}.$$

Об'єм кисню надлишкового повітря, визначається за формулою

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot V^0 = 0,21 \cdot (1,1 - 1) \cdot 9,96 = 0,21 \frac{M_{\text{H}_2O_2}^3}{M_{\text{H}_2\text{палива}}^3}.$$

Об'єм водяної пари визначається за формулою

$$V_{H_2O} = 0,01 \cdot \left(H_2S + H_2 + \sum \frac{n}{2} \cdot C_m H_n + 0,124 \cdot d_{\text{г.т.}} \right) + 0,0161 \cdot V_{\text{пов}} = 2,24 \frac{M_{\text{H}_2O}^3}{M_{\text{H}_2\text{палива}}^3}.$$

1.4.3 Розрахунок теплообміну у робочому просторі печі

Поверхня зводу та поду

$$F_{\text{св}} = F_{\text{п}} = \pi \cdot D_{\text{ср}} \cdot B = 3,14 \cdot 18,325 \cdot 4,425 = 254,62 \text{ м}^2,$$

де $D_{\text{ср}}$ - середній діаметр печі, м;

B - ширина печі, м.

Бокова поверхня кладки по зовнішньому діаметру кільця

$$F_{\text{н}} = \pi \cdot (D_{\text{ср}} + B) \cdot h = 3,14 \cdot (18,325 + 4,425) \cdot 1,540 = 392,12 \text{ м}^2,$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

де h - висота робочого простору в опалюваній частині, м.

Повна поверхня кладки

$$F_{\text{кл}} = F_{\text{св}} + F_{\text{п}} + F_{\text{н}} + F_{\text{вн}} = 2 \cdot \pi \cdot D_{\text{ср}} \cdot B + \pi \cdot (D_{\text{ср}} + B) \cdot h + \pi \cdot (D_{\text{ср}} - B) \cdot h = 2 \cdot \pi \cdot D_{\text{ср}} \cdot (B + h) = 2 \cdot 3,14 \cdot 18,325 \cdot (4,425 + 1,540) = 686,458 \text{ м}^2.$$

Поверхня металу

$$F_{\text{м}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{ср}}}{m \cdot d} \cdot \pi \cdot D \cdot l \cdot n = \frac{\pi^2 \cdot D_{\text{ср}} \cdot l \cdot n}{m} = \frac{3,14^2 \cdot 18,325 \cdot 1,57 \cdot 2}{1,49} = 380,75 \text{ м}^2,$$

де $m \cdot d$ - відстань між осями заготовок, м;

m - число діаметрів, м;

n - число рядів, шт.;

d, l - діаметр та довжина заготовок, м.

Кутовий коефіцієнт

$$\varphi_{\text{мм}} = \frac{F_{\text{м}}}{F_{\text{м}} + F_{\text{кл}}} = \frac{380,75}{380,75 + 686,458} = 0,356.$$

Враховуючи, що

$$\varphi_{\text{мк}} = 1 - \varphi_{\text{мм}} = 1 - 0,356 = 0,644,$$

знаходимо коефіцієнт випромінювання з виразу

$$C_{\text{печ}} = \frac{5,76 \cdot \varepsilon_{\text{м}} \cdot \varphi_{\text{мк}}}{1 - \varphi_{\text{мм}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{м}})}.$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Величину ступеня почервоніння металу ε_m приймаємо рівною 0,8, тоді

$$C_{\text{печ}} = \frac{5,76 \cdot 0,8 \cdot 0,644}{1 - 0,356 \cdot (1 - 0,8)} = 3,2 \frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)}.$$

Коефіцієнт випромінювання, віднесений до температури газу, знаходимо з виразу

$$C_{\Gamma} = \frac{5,76 \cdot \varepsilon_{\Gamma} \cdot \varepsilon_m}{\varepsilon_{\Gamma} + \varphi_{\text{МК}} \cdot \varepsilon_m \cdot (1 - \varepsilon_{\Gamma})}.$$

Попередньо необхідно визначити ступінь чорноти газу.

Температура робочого простору в томильної зоні становить 1300°C .

Температура робочого простору в зварювальної зоні становить 1280°C .

Внаслідок однакової геометрії робочого простору в усіх середня ефективна довжина промінню в них буде однаковою.

Об'єм заповненого газом простору в печі

$$V_{\Gamma} = h \cdot F_{\Pi} = h \cdot D_{\text{ср}} \cdot B = 1,540 \cdot 254,62 = 392,1 \text{ м}^3.$$

Поверхня металу в печі

$$F_{\Sigma \text{ заг}} = N_{\text{заг}} \cdot F_{\text{заг}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{ср}}}{m \cdot d} \pi \cdot d \cdot l = \frac{3,14 \cdot 18,325}{1,49 \cdot 1,058} \cdot 3,14 \cdot 1,57 \cdot 2 = 359,88 \text{ м}^2.$$

Сумарна поверхня, обмежена газовим об'ємом в печі

$$F_{\Sigma} = F_{\text{кл}} + F_{\Sigma \text{ заг}} = 686,458 + 359,88 = 1046,338 \text{ м}^2.$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Тоді середня ефективна довжина промінню для кожної зони буде

$$S_{\text{еф}} = 3,6 \frac{V_r}{F_{\Sigma}} = 3,6 \cdot \frac{392,1}{1046,338} = 1,34 \text{ м.}$$

Добуток парціальних тисків випромінюючих газів на середню ефективну довжину проміння в зонах

$$P_{\text{CO}_2} \cdot S_{\text{еф}} = 98,1 \cdot 1,34 \cdot 0,0954 = 12,54 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} \cdot S_{\text{еф}} = 98,1 \cdot 1,34 \cdot 0,1903 = 25,01 \text{ кН.}$$

Ступінь чорноти газів CO_2 та H_2O в методичній зоні

$$\varepsilon_{\text{CO}_2} = 0,13; \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0,195; \beta = 1,1.$$

$$\varepsilon_{\text{ГМ}} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \beta \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0,13 + 1,1 \cdot 0,195 = 0,3445.$$

В зварювальній зоні

$$\varepsilon_{\text{CO}_2} = 0,095; \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0,145; \beta = 1,1,$$

$$\varepsilon_{\text{Г.СВ}} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \beta \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0,095 + 1,1 \cdot 0,145 = 0,2545.$$

В томильній зоні

$$\varepsilon_{\text{CO}_2} = 0,090; \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0,140; \beta = 1,1,$$

$$\varepsilon_{\text{Г.Т}} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \beta \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0,090 + 1,1 \cdot 0,140 = 0,244.$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Коефіцієнти випромінювання $C_{ГМ}$ в методичній зоні

$$C_{ГМ} = \frac{5,76 \cdot \varepsilon_{Г} \cdot \varepsilon_{М}}{\varepsilon_{Г} + \varphi_{ММ} \cdot \varepsilon_{М} \cdot (1 - \varepsilon_{Г})} = \frac{5,76 \cdot 0,3445 \cdot 0,8}{0,3445 + 0,356 \cdot 0,8 \cdot (1 - 0,3445)} = 2,98 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4},$$

в зварювальній зоні

$$C_{Г.СВ} = \frac{5,76 \cdot 0,2545 \cdot 0,8}{0,2545 + 0,356 \cdot 0,8 \cdot (1 - 0,2545)} = 2,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4},$$

в томильній зоні

$$C_{Г.Т} = \frac{5,76 \cdot 0,244 \cdot 0,8}{0,244 + 0,356 \cdot 0,8 \cdot (1 - 0,244)} = 2,44 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}.$$

Середнє значення приведенного коефіцієнту випромінювання

$$C_{Г} = \frac{1}{3} \cdot (C_{Г.М} + C_{Г.СВ} + C_{Г.Т}) = \frac{1}{3} \cdot (2,98 + 2,5 + 2,44) = 2,64 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}.$$

Середня температура заготовки в кінці нагріву

$$t_{\text{ср.к}} = t_{\text{п.к}} - \frac{1}{2} \cdot \Delta t = 1250 - \frac{1}{2} \cdot 20 = 1240 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Кінцева ентальпія металу при $t_{\text{ср.к}} = 1240 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в зоні витримки

$$t_{\text{к}} = c^{t_{\text{ср.к}}} \cdot t_{\text{ср.к}} = 0,702 \cdot 1240 = 870,48 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

$$c^{t_{\text{ср.к}}} = 0,702 \frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})}.$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Теплопровідність сталі при цій же температурі

$$\lambda_{\text{ср.к}} = 45,6 \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot ^\circ \text{C})}.$$

Питомий тепловий потік в кінці нагріву

$$q_k = \frac{2 \cdot \lambda_{\text{ср.к}} \cdot \Delta t}{R} = \frac{2 \cdot 45,6 \cdot 20}{0,135} = 13511 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Розрахункова температура димових газів в томильній зоні

$$t_{\text{г.т}} = 100 \sqrt[4]{\frac{q_k}{c_{\text{г}}} + \left(\frac{T_{\text{пк}}}{100}\right)^4} = 100 \sqrt[4]{\frac{13511}{2,64} + \left(\frac{1593}{100}\right)^4} - 273 = 1350 ^\circ \text{C}.$$

Коефіцієнт використання теплоти в свар очній зоні

$$\eta_{\text{св}} = \frac{(Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{ф}} - Q_{\text{ух.св}})}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}} - \left(q_{\text{н.св}} + \frac{Q_{\text{вип}}}{M_{\text{заг}}} \right),$$

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 34000 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}; Q_{\text{ф}}^{\text{в}} = L_{\text{д}} \cdot i_{\text{пов}},$$

де $i_{\text{пов}}$ - ентальпія повітря, відповідна температурі нагрітого повітря

$t_{\text{в}} = 300 ^\circ \text{C}$:

$$i_{\text{пов}} = c_{\text{т}}^{\text{пов}} \cdot t_{\text{пов}} = 1,315 \cdot 300 = 394,5 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3},$$

де $c_{\text{пов}}^{\text{т}} = 1,315 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ \text{C}}$ - середня теплоємність повітря при $t_{\text{пов}} = 300 ^\circ \text{C}$.

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$$Q_{\phi}^{\text{пов}} = L_{\text{д}} \cdot i_{\text{пов}} = 1.1 \cdot 8.93 \cdot 1.315 \cdot 300 = 3875 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Кількість теплоти, що виноситься газом із зварювальний зони

$$Q_{\text{ух.св}} = V_{\text{д}} \cdot i_{\text{д}}.$$

Ентальпія $i_{\text{д}}$ димових газів при цій же температурі знаходимо по i - t діаграмі

$$i_{\text{д}} = 2005 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3},$$

$$Q_{\text{ух.св}} = 12,19 \cdot 2005 = 24440 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Хімічний недожиг палива в зварювальний зоні відсутній, тобто

$$q_{\text{н.св}} = 0.$$

Кількість теплоти випромінювана із свар очної зони в методичну

$$Q_{\text{св}}^{\text{вип}} = q_{\text{св}}^{\text{вип}} \cdot F,$$

$$q_{\text{св}}^{\text{вип}} = C_{\text{г}} \cdot \left[\left(\frac{t_{\text{св}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{мет}}}{100} \right)^4 \right] = 2,64 \cdot \left[\left(\frac{1280 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{1040 + 273}{100} \right)^4 \right] = 75101 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Поперечний перетин печі

$$F = B \cdot h = 4,425 \cdot 1,540 = 6,8 \text{ м}^2,$$

$$Q_{\text{св}}^{\text{вип}} = 75101 \cdot 6,8 = 510686,8 \text{ Вт}.$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Питома витрата теплоти

$$b = 2100 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Загальна теплова потужність при цьому

$$M_{\text{заг}} = G \cdot b = 35100 \cdot 2100 = 73,71 \cdot 10^6 \frac{\text{кДж}}{\text{год}}.$$

Тоді

$$\eta_{\text{св}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{ф}} - Q_{\text{ух.св}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}} - \left(q + \frac{Q_{\text{вип}}}{M_{\text{заг}}} \right) = \frac{34000 + 3875 - 24440}{34000} - \left(\frac{1,83 \cdot 10^6}{73,71 \cdot 10^6} \right) = 0,371.$$

Загальний коефіцієнт використання теплоти палива в печі

$$\eta_{\text{заг}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{ф}} - Q_{\text{ух}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}} = \frac{34000 + 3875 - 14079,45}{34000} = 0,7.$$

$$Q_{\text{ух}} = V_{\text{д}} \cdot i_{\text{ух}} = 12,19 \cdot 1155 = 14079,45 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}.$$

Ентальпію $i_{\text{ух}}$ знаходимо по i - t діаграмі, для

$$t_{\text{д.ух}} = 780 \text{ } ^\circ\text{C}; i_{\text{ух}} = 1155 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}.$$

Загальне збільшення ентальпії металу при $t=15 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\Delta i_{\text{заг}} = i_{\text{к}} - i_{\text{н}} = c^{\text{т}_{\text{ср.к}}} \cdot t_{\text{ср.к}} - c^{\text{т}_{\text{ср.н}}} \cdot t_0 = 870,48 - 10,53 = 859,95 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Збільшення ентальпії в методичній зоні

$$\Delta i_M = \Delta i_{\text{заг}} \cdot \left(1 - \frac{\eta_{\text{св}}}{\eta_{\text{заг}}}\right) = 859,95 \left(1 - \frac{0,371}{0,7}\right) = 404,17 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Питомий тепловий потік на початку методичної зони

$$q_{\text{м.н}} = C_{\text{г.м}} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{д.ух}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_0}{100}\right)^4 \right] = 2,98 \left[\left(\frac{1053}{100}\right)^4 - \left(\frac{288}{100}\right)^4 \right] = 36432 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Температура відхідних газів перед рекуператором приймається

$t = 620^\circ\text{C}$ перед входом металу 470°C .

Питомий тепловий потік в кінці методичної зони

$$q_{\text{м.к}} = C_{\text{г}} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{г.св}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{п.м.к}}}{100}\right)^4 \right].$$

Температура поверхні металу в кінці методичної зони

$$t_{\text{п.м.к}} = t_{\text{ср.м.к}} + \frac{K_3 - 1}{K_3} \cdot \Delta t_{\text{м.к}},$$

де $t_{\text{ср.м.к}}$ - середня температура металу в кінці методичної зони відповідна ентальпії

$$i_{\text{м.к}} = i_{\text{н}} + \Delta i_{\text{мет}} = 10,53 + 414,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Температуру $t_{\text{ср.м.к}}$ знаходимо по, де ентальпія дана для температур з інтервалом у 100°C . Спочатку по таблиці знайшли, що дійсна ентальпія $i_{\text{м.к}}$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

знаходиться в інтервалі температур між i при $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ та i при $900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Потім, використовуючи лінійну інтерполяцію, знаходимо

$$t_{\text{ср.м.к}} = 500 + \frac{i_{\text{м.к}} - i_{800}}{i_{900} - i_{800}} \cdot 100 = 500 + \frac{414,7 - 351}{421,2 - 351} \cdot 100 = 590\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Цю ж температуру можна знайти методом послідовних наближень по формулі

$$t_{\text{ср.м.к}} = \frac{i_{\text{м.к}}}{c_{\text{ср.м.к}}}.$$

Для знайденої температури знайдемо коефіцієнт теплопровідності сталі

$$\Delta t_{\text{м.к}} = \frac{q_{\text{м.к}} \cdot R}{K_2 \cdot \lambda_{\text{ср.м.к}}},$$

$$\lambda_{\text{ср.м.к}} = 40,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}},$$

де K_2 - коефіцієнт усереднення теплового потоку по перетину тіла, для циліндру $K_2=2$.

Маємо

$$t_{\text{п.м.к}} = t_{\text{ср.м.к}} + \frac{K_3 - 1}{K_3} \frac{q_{\text{м.к}} \cdot R}{K_2 \cdot \lambda_{\text{ср.м.к}}} = t_{\text{ср.м.к}} + \frac{q_{\text{м.к}} \cdot R}{4 \cdot \lambda_{\text{ср.м.к}}},$$

де K_3 - коефіцієнт усереднення температури по перетину тіла, для циліндру $K_3=2$.

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$$q_{м.к} = C_{г.м} \cdot \left[\left(\frac{T_{г.св}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ср.м.к} + \frac{q_{м.к} \cdot R}{4 \cdot \lambda_{ср.м.к}}}{100} \right)^4 \right].$$

Вирішуємо це рівняння методом послідовних наближень. Приймаємо в першому наближенні

$$\frac{q_{м.к} \cdot R}{4 \cdot \lambda_{ср.м.к}} = 0,$$

$$q'_{м.к} = 2,98 \cdot \left[\left(\frac{1553}{100} \right)^4 - \left(\frac{863}{100} \right)^4 \right] = 156811 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Отримане значення підставимо в початкове рівняння і виконаємо друге наближення

$$q''_{м.к} = 2,98 \cdot \left[\left(\frac{1553}{100} \right)^4 - \left(\frac{863 + \frac{156811 \cdot 0,529}{4 \cdot 40,5}}{100} \right)^4 \right] = 66805 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Кінцевий результат

$$q_{м.к} = 2,98 \cdot \left[\left(\frac{1553}{100} \right)^4 - \left(\frac{863 + \frac{66805 \cdot 0,529}{4 \cdot 40,5}}{100} \right)^4 \right] = 132626 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Температура поверхні металу в кінці методичної зони

$$t_{п.м.к} = t_{ср.м.к} + \frac{q_{м.к} \cdot R}{K_2 \cdot K_2 \cdot \lambda_{ср.м.к}} = 590 + \frac{132626 \cdot 0,529}{2 \cdot 2 \cdot 40,5} = 1023 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Перепад температур по перетину металу в кінці методичної зони

$$\Delta t_{\text{м.к}} = \frac{q_{\text{м.к}} \cdot R}{K_2 \cdot \lambda_{\text{ср.м.к}}} = 590 + \frac{132626 \cdot 0,529}{2 \cdot 2 \cdot 40,5} = 866 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Температура на осі заготовки в кінці методичної зони

$$t_{\text{ось.м.к}} = t_{\text{п.м.к}} - t_{\text{м.к}} = 1023 - 866 = 157 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Середній тепловий потік в методичній зоні

$$q_{\text{ср.м}} = \sqrt{q_{\text{м.н}} \cdot q_{\text{м.к}}} = \sqrt{36432 \cdot 132626} = 69511 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Тривалість підігріву металу в методичній зоні

$$\tau_{\text{м}} = \frac{\Delta i_{\text{м}} \cdot 1,1 \cdot R \cdot \rho}{K_1 \cdot q_{\text{ср.м}}} = \frac{414,7 \cdot 1,1 \cdot 0,135 \cdot 7500}{2 \cdot 69511 \cdot 3,6} = 0,92 \text{ год.},$$

де ρ - густина металу, кг/м^3 ;

K_1 - коефіцієнт масової загрузки для циліндру, $K_1 = 2$.

Тривалість підігріву металу в томильній зоні

$$\tau_{\text{т}} = \frac{E_{\text{т}}}{G} = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot l \cdot \rho \cdot N_{\text{т}}}{G},$$

де $N_{\text{т}}$ - число заготовок в томильній зоні

$$N_{\text{т}} = \frac{L_{\text{т}}}{2 \cdot d} = \frac{10,99}{2,116} = 5,$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

де L_T - довжина томильної зони, м; $L_T = 10,99$ м, тоді

$$\tau_T = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot l \cdot \rho \cdot L_T}{4G \cdot 2 \cdot d} = \frac{3,14 \cdot 1,058^2 \cdot 0,157 \cdot 7500 \cdot 10,99}{4 \cdot 35100 \cdot 2,116} = 0,15 \text{ год.}$$

Середню температуру металу на початку томильної зони знаходимо методом послідовних наближень із формули

$$\tau_m = \frac{R \cdot \rho \cdot c_{\text{ср.т}}}{K_1 \cdot \alpha_{\text{ср.т}}} \cdot m \cdot \ln \frac{t_{\text{г.т}} - t_{\text{ср.т.м}}}{t_{\text{г.т}} - t_{\text{ср.т.м}}}.$$

Тобто

$$t_{\text{ср.т.н}} = t_{\text{г.т}} - (t_{\text{г.т}} - t_{\text{ср.т.к}}) \cdot e^{\frac{K_1 \cdot \alpha_{\text{ср.т}} \cdot \tau_T}{R \cdot \rho \cdot c_{\text{ср.т}} \cdot m}},$$

де $c_{\text{ср.т}}$ - середня питома теплоємність металу в томильній зоні, в першому наближенні її приймаємо рівною теплоємності металу в кінці томильної зони, кДж/(кг·К);

$\alpha_{\text{ср.т}}$ - середній коефіцієнт тепловіддачі в томильній зоні, Вт/(м²·К):

$$\alpha_{\text{ср.т}} = \frac{\alpha_{\text{т.н}} + \alpha_{\text{т.к}}}{2} = \frac{\frac{q_{\text{т.м}}}{t_{\text{г.св}} - t_{\text{п.т.н}}} + \frac{q_{\text{т.к}}}{t_{\text{г.т}} - t_{\text{п.т.к}}}}{2}.$$

В першому наближенні приймаємо

$$\alpha_{\text{ср.т}}^* = \alpha_{\text{т.н}} = \frac{q_{\text{т.к}}}{t_{\text{г.т}} - t_{\text{п.т.к}}},$$

де m – коефіцієнт масивності,

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$$m = 1 + \frac{K_3 - 1}{K_2 \cdot K_3} \cdot Bi_{\text{ср.т}},$$

де

$$Bi_{\text{ср.т}} = \frac{\alpha_{\text{ср.т}} \cdot R}{\lambda_{\text{ср.т}}}; \lambda_{\text{ср.т}} = \frac{\lambda_{\text{ср.т.н}} + \lambda_{\text{ср.т.к}}}{2}.$$

В першому наближенні $\lambda_{\text{ср.т}}$ приймаємо рівним коефіцієнту теплопровідності для кінця томильної зони.

Тоді

$$c_{\text{ср.т}}^* \approx c_{\text{т.к}} = 0,702 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}},$$

$$\alpha_{\text{ср.т}}^* \approx \alpha_{\text{т.к}} = \frac{q_{\text{т.к}}}{t_{\text{г.т}} - t_{\text{п.т.к}}} = \frac{13511}{1350 - 1250} = 135 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}},$$

$$\lambda_{\text{ср.т}}^* \approx \lambda_{\text{ср.т.к}} = 45,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}},$$

$$Bi_{\text{ср.т}} \approx Bi_{\text{т.к}} = \frac{\alpha_{\text{т.к}} \cdot R}{\lambda_{\text{ср.т.к}}} = \frac{135 \cdot 0,135}{45,6} = 0,4.$$

Значення K_2 та K_3 для $Bi = 1,36$ знаходимо $K_2 \approx 1,8$; $K_3 \approx 1,935$.

Значення m в першому наближенні буде

$$m^* = 1 + \frac{K_3 - 1}{K_2 \cdot K_3} \cdot Bi_{\text{ср.т}} = 1 + \frac{1,935 - 1}{1,8 \cdot 1,935} \cdot 1,36 = 1,37.$$

Тоді орієнтовне значення середньої температури металу на початку

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

ТОМИЛЬНОЇ ЗОНИ

$$t_{\text{ср.т.н}}^* = t_{\text{г.т}} - (t_{\text{г.т}} - t_{\text{ср.т.к}}) \cdot e^{\frac{K_1 \cdot \alpha_{\text{ср.т}} \cdot \tau_{\text{т}}}{R \cdot \rho \cdot c_{\text{ср.т}} \cdot m}} =$$
$$= 1350 - (1350 - 1240) \cdot 0,157^{\frac{2 \cdot 135 \cdot 0,15 \cdot 3,6}{0,135 \cdot 7500 \cdot 0,702 \cdot 1,37}} = 1267,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Орієнтовний питомий тепловий потік на початку томильної зони (кінці зварювальний) зони знаходимо методом послідовних наближень

$$q_{\text{св.к}} = q_{\text{т.н}} = C_{\text{г}} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{св}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{ср.т.н}} + \frac{q_{\text{т.н}} \cdot R}{4 \cdot \lambda_{\text{ср.т.н}}}}{100} \right)^4 \right].$$

В першому наближенні

$$\frac{q_{\text{т.н}} \cdot R}{4 \cdot \lambda_{\text{ср.т.н}}} = 0,$$

$$q_{\text{т.н}}^* = 2,64 \cdot \left[\left(\frac{1553}{100} \right)^4 - \left(\frac{1267,5 + 273}{100} \right)^4 \right] = 4691,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2},$$

$$\lambda_{\text{ср.т.н}} = 44 \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot \text{К})},$$

$$\frac{q_{\text{т.н}}^* \cdot R}{4 \cdot \lambda_{\text{ср.т.н}}} = \frac{4691,8 \cdot 0,135}{4 \cdot 44} = 3,5,$$

$$q_{\text{т.н}}^{**} = 2,64 \cdot \left[\left(\frac{1553}{100} \right)^4 - \left(\frac{1267,5 + 273 + 3,5}{100} \right)^4 \right] = 3528,9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2},$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$$\frac{q_{т.н}^{**} \cdot R}{4 \cdot \lambda_{ср.т.н}} = \frac{3528,9 \cdot 0,135}{4 \cdot 44} = 2,7,$$

$$q_{т.н} = 2,64 \cdot \left[\left(\frac{1553}{100} \right)^4 - \left(\frac{1267,5 + 273 + 2,7}{100} \right)^4 \right] = 3839,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Орієнтовна температура поверхні металу на початку томильної зони

$$t_{н.т.н}^{*} = t_{ср.т.н}^{*} + \frac{q_{т.н} \cdot R}{4 \cdot \lambda_{ср.т.н}} = 1267,5 + \frac{4691,8 \cdot 0,135}{4 \cdot 44} = 1271 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Уточнюємо значення $\alpha_{ср.т}$

$$\alpha_{т.н} = \frac{4691,8}{1280 - 1271} = 521,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}},$$

$$\alpha_{ср.т} = \frac{521,3 + 135}{2} = 328,15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Уточнюємо значення $\lambda_{ср.т}$ та $Bi_{ср.т}$

$$\lambda_{ср.т} = \frac{44 + 45,6}{2} = 44,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}},$$

$$Bi_{ср.т} = \frac{\alpha_{ср.т} \cdot R}{\lambda_{ср.т}} = \frac{328,15 \cdot 0,135}{44,8} = 0,9.$$

Уточнюємо значення питомої теплоємності металу

$$C_{т.н} = 0,702 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Внаслідок того, що величини $\alpha_{\text{ср.т}}, \lambda_{\text{ср.т}}, V_{\text{іср.т}}$ та $C_{\text{ср.т}}$ практично не змінилися в порівнянні з першим наближенням, другого наближення робити не будемо.

Перепад температури по перетину металу на початку томильної зони

$$\Delta t_{\text{т.н}} = \frac{q_{\text{т.н}} \cdot R}{K_2 \cdot \lambda_{\text{ср.т.н}}} = \frac{4691,8 \cdot 0,135}{2 \cdot 44,8} = 7 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура осі металу на початку томильної зони

$$t_{\text{ось.т.н}} = t_{\text{п.т.н}} - \Delta t_{\text{т.н}} = 1271 - 7 = 1264 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Приріст ентальпії в зварювальній зоні та ентальпії металу в кінці сварочної зони при $t_{\text{ср.н}} = 1267,5 \text{ } ^\circ\text{C}$.

$$\Delta i_{\text{св}} = i_{\text{т.н}} - i_{\text{м.к}} = 878,9 - 414,7 = 464,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

$$i_{\text{т.н}} = 878,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Середній тепловий потік в зварювальній зоні

$$q_{\text{ср.св}} = \frac{q_{\text{м.к}} - q_{\text{т.н}}}{\ln \frac{q_{\text{м.к}}}{q_{\text{т.н}}}} = \frac{132626 - 4691,8}{\ln \frac{132626}{4691,8}} = 38767 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Тривалість підігріву металу в зварювальній зоні

$$\tau_{\text{св}} = \frac{\Delta i_{\text{св}} \cdot 1,1 \cdot R \cdot \rho}{K_1 \cdot q_{\text{ср.св}}} = \frac{464,2 \cdot 1,1 \cdot 0,135 \cdot 7500}{2 \cdot 38767 \cdot 3,6} = 1,8 \text{ год.}$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Загальна тривалість нагріву металу в печі

$$\tau_{\text{заг}} = \tau_{\text{м}} + \tau_{\text{св}} + \tau_{\text{т}} = 0,92 + 1,8 + 0,15 = 2,87 \text{ год.}$$

1.4.4 Теплові втрати и тепловий баланс печі. Втрати теплоти теплопровідністю через кладку

Знаходимо температуру внутрішньої поверхні кладки

$$\Phi_{\text{кл}} = \frac{\varepsilon_{\Gamma}}{\varepsilon_{\Gamma} + \phi_{\text{м.к}} + \varepsilon_{\text{м}} \cdot (1 - \varepsilon_{\Gamma})} = \frac{\theta_{\text{кл}}^4 - \theta_{\text{м}}^4}{1 - \theta_{\text{м}}^4},$$

де $\theta_{\text{кл}} = \frac{T_{\text{кл}}}{T_{\Gamma}}$ - відносна температура кладки;

$\theta_{\text{м}} = \frac{T_{\text{м}}}{T_{\Gamma}}$ - відносна температура металу.

В томильній зоні

$$t_{\text{ср.т.п}} = \frac{t_{\text{п.н.т}} + t_{\text{п.к.т}}}{2} = \frac{1271 + 1250}{2} = 1260,5 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$t_{\Gamma} = 1350 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad \varphi_{\text{к.м}} = 0,644, \quad \varepsilon_{\Gamma} = 0,244,$$

$$\Phi_{\text{кл}} = \frac{0,244}{0,244 + 0,644 \cdot 0,8 \cdot (1 - 0,244)} = 0,38,$$

$$\theta_{\text{м}} = \frac{1553,5}{1623} = 0,9,$$

$$\theta_{\text{кл}} = \sqrt[4]{\Phi_{\text{кл}} \cdot (1 - \theta_{\text{м}}^4) + \theta_{\text{м}}^4} = \sqrt[4]{0,38 \cdot (1 - 0,9^4) + 0,9^4} = 0,941,$$

$$T_{\text{кл}} = 0,941 \cdot (1350 + 273) = 1527,2 \text{ K},$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		34

$$t_{\text{кл}} = 1527,2 - 273 = 1254,2^{\circ}\text{C}$$

В зварювальній зоні

$$t_{\text{ср.п.св}} \approx \frac{t_{\text{п.н.св}} + t_{\text{п.к.св}}}{2} = \frac{1023 + 1271}{2} = 1147^{\circ}\text{C},$$

$$t_{\text{г}} = 1350^{\circ}\text{C}, \varphi_{\text{к.м}} = 0,644, \varepsilon_{\text{г}} = 0,2545,$$

$$\Phi_{\text{кл}} = \frac{0,2545}{0,2545 + 0,644 \cdot 0,8 \cdot (1 - 0,2545)} = 0,39,$$

$$\theta_{\text{м}} = \frac{1420}{1623} = 0,874,$$

$$\theta_{\text{кл}} = \sqrt[4]{0,39 \cdot (1 - 0,874^4) + 0,874^4} = 0,92,$$

$$T_{\text{кл}} = 0,92 \cdot (1350 + 273) = 1493^{\circ}\text{C},$$

$$t_{\text{кл}} = 1493 - 273 = 1220^{\circ}\text{C}.$$

В методичній зоні

$$t_{\text{ср.п.м}} \approx \frac{t_{\text{п.н.м}} + t_{\text{п.к.м}}}{2} = \frac{15 + 1023}{2} = 519^{\circ}\text{C},$$

$$t_{\text{ср.г.м}} \approx \frac{t_{\text{ух}} + t_{\text{г.св}}}{2} = \frac{470 + 1350}{2} = 910,$$

$$\varepsilon_{\text{г}} = 0,3445,$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$$\theta_m = \frac{792}{1313} = 0,61,$$

$$\Phi_{кл} = \frac{0,3445}{0,3445 + 0,644 \cdot 0,8 \cdot (1 - 0,3445)} = 0,5,$$

$$\theta_{кл} = \sqrt[4]{0,5 \cdot (1 - 0,61^4) + 0,61^4} = 0,86,$$

$$t_{кл} = 1129,18 - 273 = 856,18 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

1.4.5 Розрахунок теплових втрат в томильній зоні через свод

Поверхня зводу

$$F_{св} = B \cdot h_T = 4,425 \cdot 10,99 = 48,6 \text{ м}^2.$$

Знаходимо в першому наближенні температуру стику и середні температури шарів кладки

$$t' = \frac{t_{кл} + t_{пов}}{2} = \frac{1254,2 + 15}{2} = 634,6 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Середня температура шару шамоту

$$t_{ш} = \frac{t_{кл} + t'}{2} = \frac{1254,2 + 634,6}{2} = 944,4 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Середня температура шару ізоляції

$$t_{із} = \frac{t_{пов} + t'}{2} = \frac{15 + 634,6}{2} = 324,8 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Коефіцієнти теплопровідності шамоту і ізоляції

$$\lambda_{\text{ш}} = 1,136 \cdot (0,6 + 0,00055 \cdot t_{\text{ш}}) = 1,163 \cdot (0,6 + 0,00055 \cdot 944,4) = 1,3 \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot \text{К})},$$

$$\lambda_{\text{із}} = 1,136 \cdot (0,2 + 0,0002 \cdot t_{\text{із}}) = 1,163(0,2 + 0,0002 \cdot 324,8) = 0,3 \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot \text{К})}.$$

Втрати теплоти знаходимо по формулі

$$Q_{\text{т.свод}} = \frac{t_{\text{кл}} - t_{\text{пов}}}{\sum \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha//}} \cdot F_{\text{кл}} = \frac{1254,2 - 15}{\frac{0,33}{1,3} + \frac{0,15}{0,3} + 0,54} \cdot 48,6 = 74550 \text{ В} = 74,5 \text{ кВт},$$

де $\sum \frac{S}{\lambda}$ – сума теплових опорів шарів, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$;

$\alpha//$ - коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні в оточуючу середу
 $\alpha// = 18,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Перевіряємо правильність прийнятих температур шарів кладки

$$t_{\text{ш}} = t_{\text{кл}} - \frac{Q_{\text{т.свод}} \cdot S_{\text{ш}}}{F_{\text{св}} \cdot 2 \cdot \lambda_{\text{ш}}} = 1254,2 - \frac{74550 \cdot 0,33}{48,6 \cdot 2 \cdot 1,3} = 1059,5^\circ \text{C},$$

$$t_{\text{із}} = t_{\text{кл}} - \frac{Q_{\text{т.свод}}}{F_{\text{св}}} \left(\frac{S_{\text{ш}}}{\lambda_{\text{ш}}} + \frac{S_{\text{із}}}{\lambda_{\text{із}}} \right) = 1254,2 - \frac{74550}{48,6} \left(\frac{0,33}{1,3} + \frac{0,15}{2 \cdot 0,3} \right) = 481,3^\circ \text{C},$$

Втрати через под.

$$Q_{\text{том.под}} = 0,6 \cdot Q_{\text{том.свод}} = 0,6 \cdot 74,5 = 44,7 \text{ кВт}.$$

Сумарні втрати через кладку в томільній зоні

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$$Q_{\text{ТОМ}} = 74,5 + 74,5 + 44,7 = 193,7 \text{ кВт.}$$

1.4.6 Розрахунок теплових втрат в зварювальній зоні

Поверхня зводу

$$F_{\text{СВ}} = B \cdot L_{\text{СВ}} = 4,425 \cdot 27,02 = 119,5 \text{ м}^2.$$

Знаходимо в першому наближенні температуру на стику и середині температури шарів кладки

$$t' = \frac{t_{\text{КЛ}} + t_{\text{ПОВ}}}{2} = \frac{1220 + 15}{2} = 617,5 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Середня температура шару динасу

$$t_{\text{Д}} = \frac{t_{\text{КЛ}} + t'}{2} = \frac{1220 + 617,5}{2} = 918,75 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Середня температура шару ізоляції

$$t_{\text{ІЗ}} = \frac{t_{\text{КЛ}} + t'}{2} = \frac{617,5 + 15}{2} = 316,25 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Коефіцієнти теплопровідності динасу і ізоляції

$$\lambda_{\text{Д}} = 1,163 \cdot (0,6 + 0,00055 \cdot t_{\text{Д}}) = 1,163 \cdot (0,6 + 0,00055 \cdot 918,75) = 1,28 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}},$$

$$\lambda_{\text{ІЗ}} = 1,163 \cdot (0,2 + 0,0002 \cdot t_{\text{ІЗ}}) = 1,163 \cdot (0,2 + 0,0002 \cdot 316,25) = 0,306 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}},$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$$Q_{\text{св.свод}} = \frac{1220 - 15}{\frac{0,33}{1,28} + \frac{0,15}{0,306} + 0,054} \cdot 119,5 = 179546 \text{ Вт} = 179,5 \text{ кВт.}$$

Перевіряємо правильність прийнятих температур

$$t_d = 1220 - \frac{179546 \cdot 0,33}{119,5 \cdot 2 \cdot 1,28} = 1026,3 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$t_{i3} = 1220 - \frac{179546}{119,5} \cdot \left(\frac{0,33}{1,28} + \frac{0,15}{2 \cdot 0,306} \right) = 464,3 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Приймаємо для другого наближення

$$t_d = 990 \text{ }^{\circ}\text{C}; t_{i3} = 410 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad \lambda_d = 1,33 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}, \quad \lambda_{i3} = 0,32 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}},$$

$$Q_{\text{св.свод}} = \frac{1220 - 15}{\frac{0,33}{1,33} + \frac{0,15}{0,32} + 0,054} \cdot 119,5 = 186798 \text{ Вт} = 186,7 \text{ кВт},$$

$$\lambda_d = 1,163 \cdot (0,6 + 0,00055 \cdot t_d) = 1,163 \cdot (0,6 + 0,00055 \cdot 990) = 1,33 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}},$$

$$\lambda_{i3} = 1,163 \cdot (0,2 + 0,0002 \cdot t_{i3}) = 1,163 \cdot (0,2 + 0,0002 \cdot 410) = 0,32 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}},$$

$$t_d = 1220 - \frac{186798,6 \cdot 0,33}{119,5 \cdot 2 \cdot 1,33} = 1026 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$t_{i3} = 1220 - \frac{186798,6}{119,5} \cdot \left(\frac{0,33}{1,33} + \frac{0,15}{2 \cdot 0,32} \right) = 465,7 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		39

Знаходимо втрати через стіни

$$F_{\text{св.ст}} \approx 2 \cdot h \cdot L_{\text{св}} = 2 \cdot 1,540 \cdot 27,02 = 83,2 \text{ м}^2,$$

$$t_{\text{д}} = 990 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad t_{\text{із}} = 410 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad \lambda_{\text{д}} = 1,33 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}, \quad \lambda_{\text{із}} = 0,32 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}},$$

$$Q_{\text{св.свод}} = \frac{1220 - 15}{\frac{0,33}{1,33} + \frac{0,15}{0,32} + 0,054} \cdot 83,2 = 130055,6 \text{ Вт} = 130 \text{ кВт.}$$

Втрати через под

$$Q_{\text{св.под}} = 0,6 \cdot Q_{\text{св.под}} = 0,6 \cdot 254,8 = 152,88 \text{ кВт.}$$

Сумарні втрати в зварювальний зоні

$$Q_{\text{св}} = 130 + 254,8 + 152,88 = 537,68 \text{ кВт.}$$

1.4.7 Теплові втрати в методичній зоні

$$F_{\text{св}} = B \cdot L_{\text{мет}} = 4,425 \cdot 32,92 = 145,67 \text{ м}^2,$$

$$t' = \frac{t_{\text{кл}} + t_{\text{пов}}}{2} = \frac{856,18 + 15}{2} = 435,6 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$t_{\text{д}} = \frac{t_{\text{кл}} + t'}{2} = \frac{856,18 + 435,6}{2} = 645,9 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$$t_{i3} = \frac{t_{кл} + t'}{2} = \frac{15 + 435,6}{2} = 225,3 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$\lambda_d = 1,163 \cdot (0,6 + 0,00055 \cdot t_d) = 1,163 \cdot (0,6 + 0,00055 \cdot 645,9) = 1,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}},$$

$$\lambda_{i3} = 1,163 \cdot (0,2 + 0,0002 \cdot t_{i3}) = 1,163 \cdot (0,2 + 0,0002 \cdot 225,3) = 0,28 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}},$$

$$Q_{\text{мет.свод}} = \frac{856,18 - 15}{\frac{0,33}{1,1} + \frac{0,15}{0,28} + 0,054} \cdot 145,67 = 138143,2 \text{ Вт} = 138,1 \text{ кВт},$$

$$t_d = 856,18 - \frac{138143,2 \cdot 0,33}{145,67 \cdot 2 \cdot 1,11} = 715,2 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$t_{i3} = 856,18 - \frac{138143,2}{145,67} \cdot \left(\frac{0,33}{1,11} + \frac{0,15}{2 \cdot 0,28} \right) = 320,2 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Проводимо перерахунок

Приймаємо

$$\lambda_d = 1,163 \cdot (0,6 + 0,00055 \cdot t_d) = 1,163 \cdot (0,6 + 0,00055 \cdot 695) = 1,14 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}},$$

$$\lambda_{i3} = 1,163(0,2 + 0,0002 \cdot t_{i3}) = 1,163(0,2 + 0,0002 \cdot 270) = 0,29 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}},$$

$$Q_{\text{мет.свод}} = \frac{856,18 - 15}{\frac{0,33}{1,14} + \frac{0,15}{0,29} + 0,054} \cdot 145,67 = 142363,8 \text{ Вт} = 142,3 \text{ кВт},$$

$$t_d = 856,18 - \frac{142363,8 \cdot 0,33}{145,67 \cdot 2 \cdot 1,14} = 714,7 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		41

$$t_{i3} = 856,18 - \frac{142363,8}{145,67} \cdot \left(\frac{0,33}{1,14} + \frac{0,15}{2 \cdot 0,29} \right) = 320,5 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Знаходимо втрати через стіни

$$F_{\text{мет}} = 2 \cdot h \cdot L_{\text{м}} = 2 \cdot 1,540 \cdot 32,92 = 101,4 \text{ м}^2,$$

$$t_{\text{д}} = 714,7 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad t_{i3} = 320,5 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad \lambda_{\text{д}} = 1,14 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}, \quad \lambda_{i3} = 0,29 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}},$$

$$Q_{\text{мет.свод}} = \frac{856,18 - 15}{\frac{0,33}{1,14} + \frac{0,15}{0,29} + 0,054} \cdot 101,4 = 99098,5 \text{ Вт} = 99,09 \text{ кВт}.$$

Втрати через под

$$Q_{\text{мет.под}} = 0,6 \cdot Q_{\text{мет.под}} = 0,6 \cdot 99,09 = 54,4 \text{ кВт}.$$

Сумарні втрати теплоти в методичній зоні

$$Q_{\text{св}} = 138,1 + 99,09 + 59,4 = 296,6 \text{ кВт}.$$

Загальні втрати теплоти через кладку печі

$$Q_{\text{заг}} = 193,7 + 537,68 + 296,6 = 1027,98 \text{ кВт}.$$

Втрати тепла випромінюванням відбуваються через вікно видачі в томильній зоні і вікно посаду в методичній зоні. Втрати випромінюванням розраховують по формулі

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$$Q_{\text{вип}} = 5,77 \cdot \left(\frac{T_{\text{печ}}}{100}\right)^4 \cdot F \cdot \Phi \cdot \psi,$$

де 5,77 - коефіцієнт випускання променів абсолютно чорного тіла;

$\Phi = 0,8$ - коефіцієнт діафрагмування, знаходиться в залежності від товщини кладки і розмірів вікна;

$\psi = 0,5$ - частка часу в плинні котрого вікно відкрито;

$F = 1 \text{ м}^2$ - площа відкритого вікна;

$T_{\text{печ}}$ - середня температура в печі.

$$\begin{aligned} t_{\text{печ.том}} &= 100 \sqrt[4]{\frac{q_{\text{к}}}{C_{\text{печ}}} + \left(\frac{T_{\text{п.к}}}{100}\right)^4} - 273 = \\ &= 100 \sqrt[4]{\frac{13511}{3,2} + \left(\frac{1250 + 273}{100}\right)^4} - 273 = 1279 \text{ }^{\circ}\text{C}. \end{aligned}$$

Втрати випромінюванням через вікно видачі

$$Q_{\text{вип}} = 5,77 \cdot \left(\frac{1552}{100}\right)^4 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 0,5 = 133906,8 \text{ Вт.}$$

$$\begin{aligned} t_{\text{печ.мет}} &= 100 \sqrt[4]{\frac{q_{\text{н.меч}}}{C_{\text{печ}}} + \left(\frac{T_{\text{п.н}}}{100}\right)^4} - 273 = \\ &= 100 \sqrt[4]{\frac{9725}{3,2} + \left(\frac{15 + 273}{100}\right)^4} - 273 = 473,6 \text{ }^{\circ}\text{C}. \end{aligned}$$

Втрати випромінюванням через вікно посаду

$$Q_{\text{вип}} = 5,77 \cdot \left(\frac{746,6}{100}\right)^4 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 0,5 = 7171,1 \text{ Вт.}$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		43

Загальні втрати через вікна

$$Q_{\text{вип}} = 133906,8 + 7171,1 = 141077,9 \text{ Вт} = 141 \text{ кВт.}$$

Загальні втрати теплоти з робочого простору печі

$$\Sigma Q_{\text{втрат}} = 1,1 \cdot (Q_{\text{заг}} + Q_{\text{вип}}) = 1,1 \cdot (1027,98 + 141) = 1285,8 \text{ кВт.}$$

1.4.8 Витрата теплоти на підігрів металу

Загальна кількість теплоти, засвоєне металом

$$Q_{\text{м}} = \frac{100 - \delta}{100} \cdot G \cdot \Delta i_{\text{заг}} = \frac{100 - 1,8}{100} = 8233591,2 \text{ Вт} = 8233,6 \text{ кВт,}$$

де $\delta = 1,8$ - угар металу;

Теплота виділена від окису заліза

$$Q_{\text{екз}} = \frac{5657G \cdot \delta}{100} = \frac{5657 \cdot 35100 \cdot 1,8}{100 \cdot 3,6} = 992803,5 \text{ Вт} = 992,8 \text{ кВт.}$$

Втрати теплоти з окалиною

$$Q_{\text{ок}} = G_{\text{ок}} \cdot i_{\text{ок}},$$

де $G_{\text{ок}}$ – кількість окалини

$$G_{\text{ок}} = \frac{\delta \cdot G \cdot m}{100} = \frac{1,8 \cdot 35100 \cdot 1,38}{100} = 871,8 \frac{\text{кВт}}{\text{год}},$$

де $m=1,38$ - кількість окалини, утворюємо при окисленні 1 кг заліза.

Ентальпія окалини

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$$i_{\text{ок}} = c_{\text{ок}} \cdot (t_{\text{п.к}} - t_0),$$

$$\text{де } c_{\text{ок}} = 1,257 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

питома теплоємність окалини

$$i_{\text{ок}} = 1,257 \cdot (1250 - 15) = 1552,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

$$Q_{\text{ок}} = \frac{871,8 \cdot 1552,3}{3,6} = 375915,3 \text{ Вт} = 375,9 \text{ кВт.}$$

Теплота, засвоєна металом від окислення заліза

$$Q_{\text{зас Fe}} = Q_{\text{екз}} - Q_{\text{ок}} = 992,8 - 375,9 = 616,9 \text{ кВт.}$$

Теплота, засвоєна металом від горіння палива

$$Q_{\text{зас.топ}} = Q_{\text{м}} - Q_{\text{зас Fe}} = 8233,6 - 616,9 = 7616,7 \text{ кВт.}$$

1.4.9 Теплові потужності та витрата палива

Корисна теплова потужність

$$M_{\text{кор}} = \frac{Q_{\text{зас.топ}}}{\eta_{\text{заг}}} = \frac{7616,7}{0,78} = 9765 \text{ кВт.}$$

де $\eta_{\text{заг}} = 0,78$ при температурі продуктів згоряння перед рекуператором

$$t_{\text{yx}} = 620 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Потужність холостого ходу

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$$M_{x.x} = \frac{\sum Q_{\text{втрат}}}{\eta_{\text{заг}}} = \frac{1285,8}{0,78} = 1648,4 \text{ кВт.}$$

Загальна теплова потужність

$$M_{\text{заг}} = M_{\text{кор}} + M_{x.x} = 9765 + 1648,4 = 11413,4 \text{ кВт.}$$

Годинна втрата палива

$$B = \frac{M_{\text{заг}}}{Q_H^p} = \frac{11413,4 \cdot 3600}{34000} = 1208,4 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}.$$

Питома витрата теплоти

$$b = \frac{M_{\text{заг}}}{G} = \frac{11413,4 \cdot 3600}{35100} = 1170,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Питома витрата умовного палива

$$b_{\text{ум}} = \frac{B \cdot Q_H^p}{7000 \cdot G} = \frac{1208,4 \cdot 34000}{7000 \cdot 35100 \cdot 4,19} = 39,9 \frac{\text{кг.у.п.}}{\text{т}}.$$

Коефіцієнт корисної дії печі

$$\eta = \frac{Q_{\text{зас.топ}} \cdot 100}{M_{\text{заг}}} = \frac{7616,7 \cdot 100}{11413,4} = 66,7\%.$$

Фізична теплота повітря

$$Q_{\text{фіз}}^B = \frac{B \cdot L_d \cdot i_{\text{пов}}}{3,6} = \frac{1208,4 \cdot 9,8 \cdot 394,5}{3,6} = 1297720 \text{ Вт} = 1297 \text{ кВт.}$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Втрати теплоти з димовими газами

$$Q_{yx} = B \cdot V_d \cdot i_{yx} = \frac{1208,4 \cdot 12,19 \cdot 1155}{3,6} = 4726002 \text{ Вт} = 4726 \text{ кВт.}$$

Результати розрахунку теплового балансу кільцевої печі занесені до табл. 1.4

Таблиця 1.4 – Тепловий баланс кільцевої печі

Надходження теплоти		
	кВт	%
Теплота горіння палива	11413,4	83,2
Фізична теплота повітря	1297	9,46
Теплота окису заліза	992,8	7,2
Разом	13703,2	100
Витрата теплоти		
На підігрів металу	7616,7	52,5
Засвоєна теплота від окису заліза	616,9	4,2
Втрати з димовими газами	4726	32,5
Втрати через кладку печі	1027,98	7,08
Втрати через вікна	141	0,97
Втрати з окалиною	375,9	2,5
Разом	14504,48	100

2 ПРОЄКТНИЙ РОЗРАХУНОК ВОДОПІДІГРІВАЧА

Відповідно до аналізу теплової роботи методичної нагрівальної печі прийнято рішення по установці водопідігрівача в борові кільцевої печі за рекуператором. Проєктування виконується з метою підігріву води на потреби гарячого водопостачання підприємства, що дозволяє ефективно використовувати теплоту відхідних з печі газів, а також знизити витрату палива в котельних агрегатах шляхом зниження їх теплового навантаження. Розміщення водопідігрівача в борові печі здійснюється без збільшення прохідного перетину кабана. У зв'язку з прийнятими проєктними рішеннями необхідно:

- виконати проєктний розрахунок водопідігрівача, для визначення поверхні нагрівання водопідігрівача;
- розробити технічні рішення і рекомендації по установці проєктованого водопідігрівача в боров печі.

2.1 Проєктний розрахунок водопідігрівача

Водопідігрівач складається з трубного пакету і двох колекторів. Трубний пакет складається з окремих змійовиків. Він розташовується в димоході таким чином, що площині змійовиків паралельні бічних стінок димоходу. Прямі ділянки змійовиків перпендикулярні до напрямку потоку продуктів горіння. Отже, має місце поперечний омивання труб продуктами горіння з кутом атаки $\psi = 90^\circ$. Почала всіх змійовиків з'єднані з колектором холодної води, а кінці з колектором гарячої води.

З метою спрощення розрахунку без істотного впливу на кінцевий результат прийняті наступні допущення:

- втрати тепла на ділянці димоходу, зайнятому водопідігрівачем, відсутні;
- тепловий потік випромінюванням від газу, що знаходиться в між трубному просторі, дорівнює нулю;
- довжина прямих ділянок змійовиків дорівнює глибині димоходу;

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

- термічний опір стінки труби не враховується;
- розрахунок теплопередачі ведеться за формулами плоскої стінки.

Вихідні дані для проєктного розрахунку водопідігрівача

- об'ємна витрата продуктів горіння $V_1 = 14556 \text{ м}^3/\text{год}$;
- початкова температура продуктів згоряння палива $t_1' = 455^\circ\text{C}$;
- кінцева температура продуктів згоряння палива $t_1'' = 300^\circ\text{C}$;
- початкова температура води, що йде на гаряче водопостачання $t_2' = 455^\circ\text{C}$;
- кінцева температура води, що йде на гаряче водопостачання: $t_2'' = 60^\circ\text{C}$;
- теплові втрати в рекуператорі $\eta = 0,9$;
- відстань між осями труб в поперечному ряду $S_1 = 100 \text{ мм}$;
- відстань між осями прямих ділянок змієвиків $S_2 = 110 \text{ мм}$;
- розміри камери кабана печі в місці установки рекуператора: довжина $L = 6,612 \text{ м}$; ширина $B = 1,5 \text{ м}$; висота $H = 1,972 \text{ м}$.
- розміри труб:
- зовнішній діаметр $d_n = 38 \text{ мм}$;
- внутрішній діаметр $d_b = 32 \text{ мм}$;
- тип пучка-коридорний;
- склад продуктів горіння $r_{\text{H}_2\text{O}} = 15,6 \%$; $r_{\text{CO}_2} = 7,8 \%$;
- ступінь чорноти поверхні труб $\varepsilon_{\text{ст}} = 0,8$;
- схема руху теплоносіїв - прямоток.

Число змієвиків для коридорних пучків

$$N = \frac{B + d_n - S_1}{S_1} = \frac{1,5 + 0,038 - 0,1}{0,1} \approx 15 \text{ шт.}$$

Масова витрата води

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		49

$$M_2 = V_1 \cdot \frac{i_1' - i_1''}{i_2'' - i_2'} = 4,04 \cdot \frac{691350 - 419000}{251400 - 41900} = 5,25 \text{ кг/с.}$$

Середня температура продуктів горіння

$$t_1 = 0,5 \cdot (t_1' + t_1'') = 0,5 \cdot (455 + 300) = 377,5^\circ\text{C.}$$

Середня температура води

$$t_2 = 0,5 \cdot (t_2' + t_2'') = 0,5 \cdot (10 + 60) = 35^\circ\text{C.}$$

Площа живого перетину для проходу газу для коридорних пучків

$$f_1 = (B - N \cdot d_H) \cdot H = (1,5 - 15 \cdot 0,038) \cdot 1,972 = 1,833 \text{ м}^2.$$

Площа живого перетину для проходу води

$$f_2 = N \cdot \frac{\pi \cdot d_B^2}{4} = 15 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,032^2}{4} = 0,012 \text{ м}^2.$$

Дійсна швидкість газу

$$w_1 = \frac{V_1}{f_1} \cdot \frac{T_1}{273} = \frac{4,04}{1,833} \cdot \frac{377,5 + 273}{273} = 5,25 \frac{\text{м}}{\text{с.}}$$

Дійсна швидкість руху води

$$w_2 = \frac{M_2}{\rho_2 \cdot f_2} = \frac{5,25}{1000 \cdot 0,012} = 0,43 \frac{\text{м}}{\text{с.}}$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Число Рейнольдса для потоку продуктів горіння [5]

$$Re_{p1} = \frac{w_1 \cdot d_H}{\nu_{p1}} = \frac{5,25 \cdot 0,038}{2,024 \cdot 10^{-5}} = 9862.$$

Число Нуссельта для потоку продуктів горіння

$$Nu_{p1} = 0,22 \cdot Re_{p1}^{0,65} \cdot Pr_{p1}^{0,36} = 0,22 \cdot 9862^{0,65} \cdot 0,693^{0,36} = 76,06.$$

Конвективний коефіцієнт тепловіддачі від продуктів горіння до труб

$$\alpha_{1к} = \frac{Nu_{p1} \cdot \lambda_{p1}}{d_H} = \frac{76,06 \cdot 0,050915}{0,038} = 101,91 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Парціальні тиску випромінюючих газів

$$P_{\text{CO}_2} = P \cdot r_{\text{CO}_2} = 1 \cdot 0,078 = 0,078 \text{ атм.}$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = P \cdot r_{\text{H}_2\text{O}} = 1 \cdot 0,156 = 0,156 \text{ атм.}$$

Ефективна товщина газового шару

$$l_{\text{еф}} = 1,08 \cdot d_H \cdot \left(\frac{S_1 \cdot S_2}{d_H^2} - 0,785 \right) = 1,08 \cdot 0,038 \cdot \left(\frac{0,1 \cdot 0,11}{0,038^2} - 0,785 \right) = 0,28 \text{ м.}$$

Твір парціальних тисків випромінюючих газів на ефективну товщину випромінюючого шару

$$P_{\text{CO}_2} \cdot l_{\text{еф}} = 0,078 \cdot 0,28 = 0,021 \text{ атм.}$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$$P_{\text{H}_2\text{O}} \cdot l_{\text{эф}} = 0,156 \cdot 0,28 = 0,043 \text{ атм.}$$

Значення ступеня чорноти випромінюючих газів

$$\varepsilon_{\text{CO}_2} = 0,063.$$

$$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0,092.$$

Ступінь чорноти газового шару

$$\varepsilon_{\text{г}} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0,063 + 0,092 = 0,155.$$

Наведена ступінь чорноти системи "газ-труби"

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{г}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{ст}} - 1}} = \frac{1}{\frac{1}{0,155} + \frac{1}{0,8} - 1} = 0,149.$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням від газу до труб

$$\alpha_{1\text{л}} = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot c_0 \cdot \frac{\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{ст1}}}{100}\right)^4\right]}{T_1 - T_{\text{ст1}}}$$

$$= 0,149 \cdot 5,67 \cdot \frac{\left[\left(\frac{650,5}{100}\right)^4 - \left(\frac{313}{100}\right)^4\right]}{650,5 - 313} = 4,24 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Орієнтовно вважаємо, що температура стінки труби з боку газу становить

$$T_{\text{ст1}} = T_2 + 5 = 308 + 5 = 313 \text{ К.}$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		52

Сумарний коефіцієнт тепловіддачі від газу до труб

$$\alpha_1 = \alpha_{1к} + \alpha_{1л} = 101,91 + 4,24 = 106,16 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Число Рейнольдса для потоку води

$$\text{Re}_{p2} = \frac{w_2 \cdot d_B}{\nu_{p2}} = \frac{0,43 \cdot 0,032}{728,35 \cdot 10^{-9}} = 19154.$$

Середня температура стінки труби з боку води

$$t_{ст2} = \frac{\frac{\alpha_2}{\alpha_1} \cdot t_2 + t_1}{1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1}} = \frac{\frac{2000}{106,16} \cdot 35 + 377,5}{1 + \frac{2000}{106,16}} = 52^\circ\text{C}.$$

При цьому попередньо задаємось значенням $\alpha_2 = 2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Число Нуссельта для потоку води

$$\begin{aligned} \text{Nu}_{p2} &= 0,021 \cdot \text{Re}_{p2}^{0,8} \cdot \text{Pr}_p^{0,43} \cdot \left(\frac{\text{Pr}_p}{\text{Pr}_{ст}} \right)^{0,25} = \\ &= 0,021 \cdot 19154^{0,8} \cdot 5,01^{0,43} \cdot \left(\frac{5,01}{3,65} \right)^{0,25} = 121,15. \end{aligned}$$

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби до води

$$\alpha_2 = \frac{\text{Nu}_{p2} \cdot \lambda_{p2}}{d_B} = \frac{121,15 \cdot 0,639}{0,032} = 2419 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Перевірка значення температури стінки

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		53

$$t_{\text{сг2}} = \frac{\frac{\alpha_2}{\alpha_1} \cdot t_2 + t_1}{1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1}} = \frac{\frac{2419}{106,16} \cdot 35 + 377,5}{1 + \frac{2419}{106,16}} = 49 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Середнє значення коефіцієнта теплопередачі

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{2419} + \frac{1}{106,16}} = 101,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Средньюлогарифмічний температурний напір для прямотоку

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{(t_1' - t_2') - (t_1'' - t_2'')}{\ln \frac{(t_1' - t_2')}{(t_1'' - t_2'')}} = \frac{(455 - 10) - (300 - 60)}{\ln \frac{455 - 10}{300 - 60}} = 205^\circ\text{C}.$$

Кількість теплоти, що передано воді:

$$Q = M_2 \cdot (i_2'' - i_2') = 5,25 \cdot (251400 - 41900) = 1101272 \text{ Вт}.$$

Площа поверхні теплообміну

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_{\text{cp}}} = \frac{1101272}{101,7 \cdot 205} = 52,66 \text{ м}^2.$$

Площа поверхні одного змійовика

$$f_{\text{зм}} = \frac{F}{N} = \frac{52,66}{15} = 3,51 \text{ м}^2.$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		54

Довжина одного змійовика

$$l_{зм} = \frac{f_{зм}}{\pi \cdot d_{ср}} = \frac{3,51}{3,14 \cdot 0,035} = 29,42 \text{ м.}$$

Кількість прямих ділянок в одному змійовику

$$m = \frac{l_{зм}}{H} = \frac{29,42}{1,972} \approx 14 \text{ шт.}$$

довжина трубчатки

$$L = m \cdot S_2 = 14 \cdot 0,11 = 1,54 \text{ м.}$$

В результаті проєктного розрахунку водопідігрівача отримані площа теплообміну і геометричні розміри рекуператора.

Проєктований рекуператор передбачається виготовляти з жароміцної сталі Х25Т.

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

З ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ВОДОПІДІГРІВАЧА

3.1 Характеристика об'єкта проєктування

Значне підвищення вартості енергоносіїв вимагає ефективного їх використання в технологічному процесі. Одним з пріоритетних напрямків по економії паливно-енергетичних ресурсів є використання вторинних енергетичних ресурсів, що дає економію за рахунок скорочення кількості палива одержуваного з боку і спалюється в котельних установках підприємства при виробництві теплової енергії.

В економічній частині дипломного проєкту досліджується економічна ефективність використання вторинних енергоресурсів кільцевої печі трубопрокатного цеху ВАТ "Інтерпайп НТЗ". Основні технічні рішення полягають в установці водопідігрівача в Борове печі, утилізує теплоту ходять з печі газів. Установка водопідігрівача дозволить отримувати теплову енергію (гарячу воду) для гарячого водопостачання за ціною нижче, ніж купується з боку.

Водопідігрівач складається з трубного пакету і двох колекторів. Трубний пакет складається з окремих змійовиків, що розташовуються паралельно бічних стінок кабана печі. Прямі ділянки змійовиків перпендикулярні до напрямку потоку димових газів. Почала всіх змійовиків з'єднані з колектором холодної води, а кінці з колектором гарячої води. Температури відхідних газів з печі. Температура нагрітої гарячої води на виході з водопідігрівача.

Для накопичення гарячої води (за відсутності водозбору), а також для вирівнювання витрати гарячої води передбачається установка бака накопичувача гарячої води.

Витрати на установку водопідігрівача і бака запасу гарячої води включають:

- витрати на проєктування;
- витрати на закупівлю обладнання;

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

- витрати на доставку обладнання;
- будівельно-монтажні роботи по установці водопідігрівача в Борове печі;
- витрати на розводку труб споживачів системи гарячого водопостачання;
- пусконаладжувальні роботи реконструйованої печі.

3.2 Розрахунок інвестицій на установку нового обладнання

Водопідігрівач виготовляється з трубок сталевих електрозварювальних зовнішнім діаметром 38 мм і збирається в 2 гнутих змійовика (довжина одного змійовика 23,89 м, загальна довжина змійовиків 47,78 м) з жаростійких марок сталі. Крім того, для установки водопідігрівача в Борове печі будуть потрібні додаткові витрати на різання і зварювання трубок, виготовлення кріпильних елементів: гаки-держателі, трубки-колектори, куточки і т.п., а також складання і безпосередньо установку водопідігрівача.

Визначимо вартість труб, необхідних для спорудження водопідігрівача

$$\begin{aligned} C_{\text{труб}} &= \rho_{\text{ст}} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_1^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \right) \cdot L_{\text{зм}} \cdot C_{\text{ст}} = \\ &= 7550 \cdot \left(\frac{3,14 \cdot 0,038^2}{4} - \frac{3,14 \cdot 0,032^2}{4} \right) \cdot 47,78 \cdot 4523 = 534,38 \text{ грн.}, \end{aligned}$$

де $\rho_{\text{ст}}$ - густина сталі, кг/м³;

d_1 та d_2 - зовнішній і внутрішній діаметри трубок відповідно, м;

$L_{\text{зм}}$ - довжина змійовиків, м;

$C_{\text{ст}}$ - ціна 1т. жаростійкої стали 4523грн./т.

Елементи кріплення водопідігрівача виконуються з вуглецевих марок сталей Ст. 3, Ст. 10. Ціна таких сталей 3710грн./т. Вартість кріплення водопідігрівача складе

$$C_{\text{кр}} = M \cdot C'_{\text{ст}} = 112 \cdot 3710 = 415,52 \text{ грн.},$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		57

де М - маса елементів кріплення, кг;

$C'_{ст}$ - ціна металопрокату для виготовлення кріплення 3710грн./т.

Витрати на спорудження бака запасу гарячої води об'ємом 54м³ з листової сталі Ст. 3, Ст. 10 складуть

$$C_{бак} = m \cdot C_{лист} = 41 \cdot 56,5 = 2316,5 \text{ грн.},$$

де m - кількість листів, шт;

$C_{лист}$ - ціна 1 листа стали, грн./шт.

Витрати на закупівлю труб розводки системи гарячого водопостачання від водопідігрівача до споживачів складуть

$$\begin{aligned} C_{розвод} &= \rho_{ст} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_1^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \right) \cdot L_{тр} \cdot C'_{ст} = \\ &= 7550 \cdot \left(\frac{3,14 \cdot 0,076^2}{4} - \frac{3,14 \cdot 0,07^2}{4} \right) \cdot 252 \cdot 3710 = 4821,80 \text{ грн.}, \end{aligned}$$

де $L_{тр}$ - загальна довжина труб, м.

Ціна водопідігрівача складе

$$\begin{aligned} C_{вод} &= (C_{труб} + C_{кр} + C_{бак} + C_{розвод}) = \\ &= (537,95 + 415,52 + 2316,50 + 4853,95) = 8088,20 \text{ грн.} \end{aligned}$$

Виготовлення водопідігрівача і бака запасу води проводиться ремонтно-механічних цехом заводу, які включають витрати на різання, гнуття, зварювання трубок і за даними комбінату складуть 35 % від вартості металу

$$C_{гіб} = C_{вод} \cdot 0,35 = 8088,20 \cdot 0,35 = 2830,87 \text{ грн.}$$

Витрати на проектування водопідігрівача приймаємо рівними

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$C_{\text{пр}}=2500$ грн.

Витрати на доставку обладнання приймемо рівними $C_{\text{дост}} = 1100$ грн.

Витрати на будівельно-монтажні роботи складають 20 % від суми всіх витрат

$$\begin{aligned} C_{\text{см}} &= (C_{\text{вод}} + C_{\text{гіб}} + C_{\text{пр}} + C_{\text{дост}}) \cdot 0,2 = \\ &= (8088,20 + 2830,87 + 2500 + 1100) \cdot 0,2 = 2903,81 \text{ грн.} \end{aligned}$$

Капітальні витрати по установці водопідігрівача розраховуються за формулою

$$\begin{aligned} K_{\text{вод}} &= (C_{\text{вод}} + C_{\text{гіб}} + C_{\text{пр}} + C_{\text{дост}} + C_{\text{см}}) = \\ &= (8088,20 + 2830,87 + 2500 + 1100 + 2903,81) = 17422,89 \text{ грн.} \end{aligned}$$

З урахуванням проведення пусконаладжувальних робіт реконструйованої печі загальні капітальні витрати складуть

$$K_{\text{заг}} = K_{\text{вод}} \cdot 1,5 = 17422,89 \cdot 1,5 = 26134,34 \text{ грн.,}$$

де 1,5- коефіцієнт враховує витрати на пусконаладжувальні роботи.

3.3 Розрахунок економічної ефективності капіталовкладень

Вихідні дані для розрахунку економічної ефективності установки водопідігрівача наведені в табл. 3.1.

Річне виробництво тепла водопідігрівачем складе

$$Q'_{\text{відп}} = Q_y \cdot \varphi \cdot n = 3,77 \cdot 0,9 \cdot 1 \cdot 7000 = 26390 \text{ ГДж/год.}$$

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для розрахунку економічної ефективності установки водопідігрівача

Найменування показників	Позначення Величина	Одиниці виміру	Величина
Кількість печей	n	шт.	1
Час роботи печі в рік	t	час	7000
Кількість утилізованої теплоти, за розрахунком	Q _y	ГДж/час	3,77
Коефіцієнт утилізації теплоти	φ	-	0,93
Вартість 1ГДж теплоти, що закуповується ззовні (за даними підприємства)	C ₁	грн.	23,68

Обчислення калькуляції за статтею витрат електроенергії

$$Z'_{ee} = \frac{B'_{ee} \cdot C_{ee}}{Q'_{отп}} = \frac{26,32 \cdot 350}{26390} = 0,35 \frac{\text{грн.}}{\text{Гдж}},$$

де B'_{ee} - річна витрата електроенергії (на привід двох циркуляційних насосів системи гарячого водопостачання потужністю 6,0 кВт) після реалізації проєкту складе 26320 кВтгод.;

C_{ee} - вартість електроенергії (за даними підприємства), становить 350грн./1000 кВтгод.

Обчислення калькуляції за статтею витрати сирої води

$$Z_{\text{вода}} = \frac{B_{\text{вода}} \cdot C_{\text{вода}}}{Q_{\text{відп}}} = \frac{126000 \cdot 1,40}{26390} = 6,68 \frac{\text{грн.}}{\text{Гдж}},$$

де $B_{\text{вода}}$ - витрата води в системі гарячого водопостачання, м³/рік;

$C_{\text{вода}}$ - ціна сирої води (за даними підприємства), становить 1,40 грн./м³.

Обчислення калькуляції за статтею заробітної плати

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		60

$$z'_{\text{ФЗП}} = \frac{\text{ФЗП}}{Q'_{\text{відп}}} = \frac{133322}{26390} = 5,05 \frac{\text{грн.}}{\text{ГДж}},$$

де ФЗП - фонд зарплати, становить 13332 грн.

Обчислення калькуляції за статтею нарахування на заробітну плату

$$z'_{\text{соц}} = \frac{\text{ФЗП} \cdot H_{\text{соц}}}{Q'_{\text{відп}}} = \frac{13322 \cdot 0,375}{26390} = 1,89 \frac{\text{грн.}}{\text{ГДж}},$$

де $H_{\text{соц}}$ - норма відрахувань на заробітну плату, становить 37,5 % від фонду заробітної плати.

Обчислення калькуляції за статтею амортизації основних фондів

$$z'_{\text{ам}} = \frac{K_{\text{общ}} \cdot H_a}{Q'_{\text{отп}}} = \frac{26134,34 \cdot 0,24}{26390} = 0,24 \frac{\text{грн.}}{\text{ГДж}},$$

де H_a - середня норма амортизаційних відрахувань основних фондів, $H_a = 0,24$ [6].

Обчислення калькуляції за статтею відрахувань коштів на поточний ремонт

$$z_{\text{тр}} = \frac{K_{\text{заг}} \cdot K_{\text{пр}}}{Q'_{\text{відп}}} = \frac{26134,34 \cdot 0,1}{26390} = 0,1 \text{ ГДж},$$

де $K_{\text{пр}}$ - коефіцієнт витрат на поточний ремонт, для печей (котлів), приймаємо згідно з [6].

Калькуляція собівартості 1 ГДж відпущеного споживачам тепла у вигляді гарячої води після реалізації проекту представлена в табл. 3.2 [7].

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Таблиця 3.2 – Калькуляція собівартості 1ГДж відпущеного споживачам тепла у вигляді гарячої води

Статті витрат	Кількість	Ціна, грн	Сума, грн
Енерговитрати:			
Електроенергія, 1000 кВтгод	0,001	350	0,35
Вода сира, 1000м3	4,77	1,40	6,68
Всього енерговитрат			7,03
Заробітна плата			5,05
Нарахування на соціальне страхування			1,89
Амортизація основних фондів			0,24
Зміст коштів на поточний ремонт			0,1
Інші витрати (становлять 3% від усіх витрат)			0,03
Цехова собівартість 1ГДж теплоти			14,44
Загальнозаводські витрати (становлять 5% від всіх витрат)			0,05
Виробнича собівартість 1ГДж тепла			14,49

Балансовий прибуток від реалізації проєкту

$$\Delta\P = (C_1 - C_2) \cdot Q_{\text{відп}} =$$

$$= (23,68 - 14,49) \cdot 26390 = 248929,2 \text{ грн./год.},$$

де C_1 і C_2 собівартості 1 ГДж вироблюваної теплоти до і після реалізації проєкту.

Чистий прибуток від реалізації проєкту

$$\Pi_{\text{ч}} = \Delta\P - 0,25 \cdot \Delta\P =$$

$$= 248929,2 - 0,25 \cdot 248929,2 = 186696,9 \text{ грн./год.}$$

Коефіцієнт рентабельності розраховується за формулою [8]:

					02.15.ТЕ2021.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		62

$$R = \frac{\Pi_q}{K_{\text{зар}}} = \frac{186696,9}{26134,34} = 7,14.$$

Техніко-економічні показники роботи водопідігрівача представлені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Техніко-економічні показники роботи водопідігрівача

Найменування показників	Одиниця виміру	Проектний варіант
Річне виробництво теплоти	ГДж/рік	26390
Витрата електроенергії	тис. кВт·год.	26,32
Витрати води	м³/рік	126000
Капітальні вклади	грн.	26134,34
Коефіцієнт абсолютної економічної ефективності	грн./грн.	7,38
Собівартість 1ГДж теплоти	грн.	14,49
Коефіцієнт рентабельності	-	7,14

За результатами розрахунків економічної ефективності установки водопідігрівача, представленим в табл. 3.3, видно, що така установка дозволяє утилізувати теплоту відхідних газів нагрівальної печі та отримувати 26390 ГДж/рік теплової енергії у вигляді гарячої води для системи гарячого комунально-побутового теплопостачання підприємства, що дозволяє знизити кількість закуповуваної про боку теплової енергії і виробляти власну теплову енергію за ціною, значно нижче (14,49 грн./ГДж), ніж закуповується зі сторони (23,68 грн./ГДж).

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. З метою уточнення техніко-економічних показників роботи печі виконаний перевірочний розрахунок печі і рекуператора. Витрата природного газу на піч складає 1208,4 м³/год. ККД кільцевої печі дорівнює 66,7 %. Температура підігрівання води в рекуператорі складає 60°C. Температура продуктів згорання за рекуператором дорівнює 300°C.

2. Відповідно до аналізу теплової роботи методичної нагрівальної печі прийнято рішення щодо встановлення додаткового водопідігрівача в борові кільцевої печі. Проектування виконується з метою підігріву води на потреби гарячого водопостачання, що дозволяє ефективно використовувати теплоту газів, що відходять з печі. Місце розташування проєктованого рекуператора в борові печі та конструктивні характеристики бору залишаються без змін.

3. Виконано проєктний розрахунок водопідігрівача та визначено поверхню нагріву, що склала 52,66 м². Рекуператор, що проєктується, передбачається виготовляти з жароміцної сталі Х25Т.

4. Аналіз роботи встановленого водопідігрівача дозволяє зробити такі висновки:

- температура газів, що йдуть, знизилася на 155°C і становить 300°C;
- Витрата води на гаряче водопостачання становить 5,25 кг/с;
- Потужність підігрівача становить 1,101 МВт.

5. Дано економічну оцінку проєкту установки водопідігрівача. Виконано розрахунок потреби в інвестиціях для реалізації проєкту. Капітальні витрати проєкту становлять 26134,34 грн. Реалізація цього проєкту дозволяє отримувати теплоту у вигляді гарячої води з собівартістю 14,49 грн./ГДж за собівартості теплоти, що закуповується зі сторони 23,68 грн./ГДж. Термін окупності капітальних витрат становить 0,14 року.

					Арк. 64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тимошпольський В. І. Кольцевые печи: Теория и расчеты / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, М. Я. Пекарский. - Минск.: Высшая школа, 1993.- 248 с.
2. Тайц Н. Ю. Методические нагревательные печи / Н. Ю. Тайц, Ю. И. Розенгарт. - М.: Металлургиздат, 1964.- 408 с.
3. Гольдфарб Э. М. Расчеты нагревательных печей / Э. М. Гольдфарб, А. Ф. Кравцов, И. И. Радченко. - К.: Техніка, 1969.- 540 с.
4. Справочник конструктора печей прокатного производства.- Т. 1. / А. Л. Бергауз, В. Л. Гусовский, Н.И. Иванова. - М.: Металлургия, 1969. – 576 с.
5. Жолудов В. С. Теплова ізоляція в промисловості. Теорія і розрахунки / В. С. Жолудов. - К.: Теплотехнік, 2004. – 448 с.
6. Эфрос М. М. Нагрівальні та термічні печі опалювані газовим паливом / М. М. Эфрос. - М.: Металургія, 1965.– 415 с.
7. Ключові фінансові показники [Електронний ресурс] / Інформаційне агентство „Прометал”. – Режим доступу: \www/ URL <http://www.prometal.com.ua/dp.php?id=82> — 10.12.2021 г. — Загл. з екрана.
8. Мамон Э. Н. Экономика энергетики : учебное пособие / Э. Н. Мамон, Е. В. Литвинов. - Днепропетровск: НМетАУ, 1999. – 128 с.

						Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

						Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		