

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ ЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ

КАФЕДРА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ ТА ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ

**Кваліфікаційна робота**

другий магістерський

(рівень вищої освіти)

на тему Аналіз теплової роботи камерної нагрівальної печі ковальсько-пресового цеху ПрАТ «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ»

Виконав: студент 2 курсу, групи ТЕ-18-1мз  
спеціальності 144 Теплоенергетика

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Теплоенергетика

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації \_\_\_\_\_

(код і назва спеціалізації)

Д. О. Дейнега

(ініціали та прізвище)

Керівник проф. д. т. н. Мних А. С.

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

Рецензент директор ТОВ «Вектор-Драйм»

Крутий Ігор Вікторович

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

Запоріжжя

2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет енергетики, електроніки та інформаційних технологій  
Кафедра теплоенергетики та гідроенергетики  
Рівень вищої освіти другий магістерський  
Спеціальність 144 Теплоенергетика  
(код та назва)  
Освітня програма Теплоенергетика  
(код та назва)  
Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

«26» 12 2019 року

**З А В Д А Н Н Я**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Дейнега Денис Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Аналіз теплової роботи камерної нагрівальної печі  
ковальсько-пресового цеху ПрАТ «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ»

керівник роботи проф. д. т. н. Мних Андрій Сергійович,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від «10» вересня 2019 року № 1537-с

2 Строк подання студентом роботи 13.01.2020

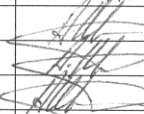
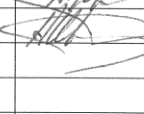
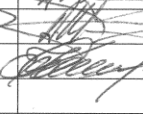
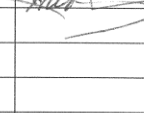
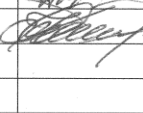
3 Вихідні дані до роботи нагрівальна піч з викотним подом 13,9 м<sup>2</sup> призначена  
для нагріву злитків та поковок. Теплова потужність 2,2x10<sup>6</sup> ккал/год, габарити  
довжина печі 5,22 м, ширина 4,06 м, висота печі 2,9 м. Марка сталі  
Р6М5

3. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно  
розробити) 1. Опис об'єкту модернізації; 2. Аналіз можливості модернізації;  
3. Техніка безпеки і охорона праці.

4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
піч нагрівальна з викотним подом, площа пода 13,9 м<sup>2</sup>; схема зонального

розподілу температур по перерізу металу ,що нагрівається в зонах печі; графік нагріву злитків при імпульсному режимі; конструкція пальника ЗІК 165; теплофізичні характеристики нової футеровки печі; тепловий баланс печі зі запропонованими модернізаціями.


5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	проф. д. т. н. Мних А. С.		
2	проф. д. т. н. Мних А. С.		
3	проф. д. т. н. Мних А. С.		
Нормо контроль	доц. к. т. н. Каюков Ю.М.		

6. Дата видачі завдання 02.09.2019 року

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Опис об'єкту модернізації	23.09.19	
2	Аналіз можливості модернізації печі	28.11.19	
3	Техніка безпеки і охорона праці	29.11.19	
4	Оформлення креслень	12.12.19	
5	Оформлення звіту та проходження нормоконтролю	26.12.19	

Студент  Д. О. Дейнега  
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проект)  А. С. Мних  
(підпис) (ініціали та прізвище)

**Нормоконтроль пройдено**

Нормоконтролер  Ю. М. Каюков  
(підпис) (ініціали та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Дейнега Д. О. Аналіз теплової роботи камерної нагрівальної печі ковальсько-пресового цеху ПрАТ «ДНПРОСПЕЦСТАЛЬ».

Кваліфікаційна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, науковий керівник А. С. Мних. Запорізький національний університет. Інженерний інститут. Факультет енергетики, електроніки та інформаційних технологій, 2020.

Нагрівальна піч з викатним подом, пл.13,9 м<sup>2</sup> призначена для нагріву злитків і поковок перед обтисканням на пресі.

Піч опалюється природним газом.

Проведено патентний пошук та літературний огляд світових опалювальних пристроїв і теплоізоляційних матеріалів. Модернізація передбачає: заміну системи безперервного опалення на імпульсне опалення та заміну футерування печі бічних стін, задньої торцевої стіни; заслінки на ефективнішу, вироблену з волокнистих матеріалів LYGX– 512, та заміну пальників які працюють в імпульсному режимі.

Виконано економічну оцінку доцільності впровадження застосування керамоволокнистих матеріалів та сучасних пальників і застосування системи імпульсного горіння палива в печах, дозволить економити до 30 % палива і збільшити термін експлуатації футерування до 5 років.

Ключові слова: ЗЛИТКИ, ПАЛЬНИКИ, ВЕНТИЛЯТОР, ПІЧ, ФУТЕРОВАКА, КЕРАМОВОЛОКНИСТІЙ МАТЕРІАЛ, БАЗАЛЬТОВА ПЛИТА, РОБОЧІЙ ПРОСТІР, МЕТАЛ, РОЗРАХУНОК, ТЕПЛОВІ ВТРАТИ, ПАЛЬНИКИ, ІМПУЛЬСНИЙ НАГРІВ.

## ANOTATION

Deynega D. O. Analysis of thermal robots in the chamber heating furnace of the Kovalsky-press workshop of DINPROSPETSSTAL.

Qualification of the robot for health, the stage of sanitation - the master for special 144 - Thermal power engineering, science core A. A. Mnikh. Zaporizhzhya National University. Engineering Institute. Faculty of Energy, Electronics and Information Technology, 2020.

Header with a bottom hearth, area 13.9 m<sup>2</sup> is designated for heaters and forgings before wiping on pres.

Піч be scorched by natural gas.

A patent test and a literary survey of light opal accessories and heat insulating materials were carried out. Modernization of transmission зам: replacement of the system for uninterrupted operation on the pulse and operation of the furnace: bichny food for the lower row of the oil seal; back end face; Efficiency shutters, fouling with fiber materials LYGX – 512, that deputy pinion yaki in standard mode.

In addition to economical assessment of the availability of ceramic fiber materials and regular regenerative oil seals and the pulse heating system in furnaces, it is possible to save up to 30% of the required temperature.

Key words: FILTS, FINGERIES, FAN, PCH, LINGER, PORCELAIN FIBER MATERIAL, BASALT PLATE, WORKING PROSTIR, METAL, ROSRAZHUNOK, HEAT RATE, PALNICI, NIMI.

## АННОТАЦИЯ

Дейнега Д. А. Анализ тепловой работы камерной нагревательной печи кузнечно-прессового цеха ЧАО «ДНЕПРОСПЕЦСТАЛЬ».

Квалификационная работа для получения степени высшего образования магистра по специальности 144 - Теплоэнергетика, научный руководитель А. С. Мных. Запорожский национальный университет. Инженерный институт. Факультет энергетики, электроники и информационных технологий, 2020.

Нагревательная печь с выкатным подом, пл.13,9 м<sup>2</sup> предназначена для нагрева слитков и поковок перед обжатием на прессе.

Печь отапливается природным газом.

Проведен патентный поиск и литературный обзор мировых отопительных устройств и теплоизоляционных материалов. Модернизация предусматривает: замену системы непрерывного отопления на импульсное отопление и замену футеровки печи: боковых стен; задней торцевой стены; заслонки на эффективную, произведенную из волокнистых материалов LYGX- 512, и замену горелок которые работают в импульсном режиме.

Выполнено экономическую оценку целесообразности внедрения применения керамоволокнистых материалов и современных горелок и применения системы импульсного горения топлива в печах, позволит экономить до 30 % топлива и увеличить срок эксплуатации футеровки до 5 лет.

Ключевые слова: СЛИТКИ, ГОРЕЛКИ, ВЕНТИЛЯТОР, ПЕЧЬ, ФУТЕРОВКА, КЕРАМОВОЛОКНИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ, БАЗАЛЬТОВАЯ ПЛИТА, РАБОЧИЕ ПРОСТРАНСТВО, МЕТАЛЛ, РАСЧЕТ, ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ, ГОРЕЛКИ, ИМПУЛЬСНЫЙ НАГРЕВ.

# ЗМІСТ

## ВСТУП

## 1 ОПИС ОБ'ЄКТУ МОДЕРНІЗАЦІЇ

### 1.1 Історія заводу Дніпроспецсталь

### 1.2 Ковальсько - пресове виробництво

#### 1.2.1 Методи підвищення використання теплоти палива

#### 1.2.2 Зниження непродуктивних втрат тепла

#### 1.2.3 Вдосконалення режимів нагріву металу

#### 1.2.4 Системи опалювання високотемпературних нагрівальних

печей

### 1.3 Постановка завдання аналізу роботи камерної печі

## 2 АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ ПЕЧІ

### 2.1 Розрахунок горіння природного газу

### 2.2 Теплоємність повітряї продуктів згорання

### 2.3 Розрахунок нагріву метала

#### 2.3.1 Перший період

#### 2.3.2 Перший інтервал

#### 2.3.3 Другий інтервал

#### 2.3.4 Третій інтервал

#### 2.3.5 Другий період

### 2.4 Розрахунок теплообміну

### 2.5 Розрахунок теплового балансу печі, до модернізації

#### 2.5.1 Перший період

#### 2.5.2 Другий період

#### 2.5.3 Теплова потужність і витрата палива

### 2.6 Розробка заходів з модернізації печі

#### 2.6.1 Вибір теплоізоляційного матеріалу

#### 2.6.2 Система опалення печі

#### 2.6.3 Імпульсне опалення печі

2.7 Розрахунок теплового балансу печі, після модернізації

2.7.1 Перший період

2.7.2 Другий період

2.7.3 Теплова потужність і витрата палива

2.8 Аналіз теплової роботи печі після модернізації

2.9 Система автоматизації печі

### 3 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ І ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

3.2 Заходи для поліпшення умов праці

3.3 Виробнича санітарія

3.4 Електро безпека

3.5 Пожежна безпека

3.6 Засоби індивідуального захисту

### ДОДАТКИ

Додаток А

Додаток Б

Додаток В

### ВИСНОВКИ



## ВСТУП

*Актуальність роботи* - в даний час на металургійних підприємствах України широко використовуються камерні нагрівальні та термічні печі, які опалюються природним газом. Більшість з них застаріло і потребує повної або часткової модернізації.

У вітчизняній металургії камерні нагрівальні та термічні печі мають ряд істотних недоліків. Серед них: великі теплові втрати з відхідними газами, нерівномірність нагрівання садки, високий угар металу при нагріванні. Крім того, нагрівальні камерні печі характеризуються суттєвим витратами теплоти на розігрів кладки, що пов'язані з періодичністю роботи, обумовленої заданим графіком нагріву.

Плюс до всього на українських металургійних підприємствах використовується, як правило, фізично зношене і морально застаріле обладнання. Вік деяких печей досягає 20-30 років. Вони не економічні через використання в них застарілих вогнетривких і теплоізоляційних матеріалів.

*Об'єкт дослідження* - камерна нагрівальна піч ковальсько-пресового цеху ПрАТ «ДІПРОСПЕЦСТАЛЬ».

*Предмет дослідження* – ефективність роботи печі і використання палива у високотемпературних нагрівальних печах.

*Мета роботи* – аналізувати роботу камерної нагрівальної печі.

*Задачі дослідження.* Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні питання:

- аналіз літературних джерел на тематику досліджень;
- методи підвищення коефіцієнта використання теплоти палива;
- зниження непродуктивних втрат тепла;
- вдосконалення режимів нагріву металу.

*Методи та засоби дослідження.* Досягнення проблем що розглядається у магістерській роботі ґрунтуються на уявленнях класичної

теорії тепломасообміну. Для знаходження розподілу температур по об'єму камери печі, використовувався резольвентний графічний зональний метод.

*Наукова новизна отриманих результатів.* Заміна футеровок на сучасні вогнетривкі волокнисті матеріали та встановлення сучасних регенеративних пальників та застосування імпульсного управління пальниками істотно змінить витрату палива.

*Практична цінність роботи полягає в наступному.* Аналізувати роботу печі і вдосконалення режимів нагріву металу для зменшення витрати палива.

*Структура та обсяг роботи.* Магістерська робота включає вступ, три розділи, висновок та перелік джерел посилань з 20 позицій. Загальний обсяг складає сторінок, у тому числі 10 рисунків та 19 таблиць.

# 1 ОПИС ОБ'ЄКТУ МОДЕРНІЗАЦІЇ

## 1.1 Історія заводу «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ»

Підприємство засновано в 1932 році. Першим директором Заводу інструментальних сталей (первинна назва заводу), що керував їм аж до початку 60-х років, був Олександр Трегубенко, металург, лауреат Ленінської премії. У його честь названа одна з вулиць Запоріжжя. Заводу було присвоєно ім'я А.Н. Кузьміна – міністра чорної металургії СРСР, одного з перших директорів Запоріжсталі.

Під час Великої Вітчизняної війни завод, разом з персоналом, був успішно евакуйований в тилловий Новокузнецьк, де на його базі створили нове підприємство «Спецсталь», у військові роки, що забезпечував промисловість якісним металом.

Після закінчення війни і відновлення на початок 50-х років зруйнованих заводських цехів для "Днепрспецсталь", можна сказати, настала "золота пора".

Працюючи, фактично, на потреби опікуваного радянською державою військово – промислового комплексу, авіапромисловості і аерокосмічній галузі (днепрспецсталевський метал використовували для виготовлення деталей космічних кораблів «Союз», «Схід» і човника «Буран»), підприємство знаходилося на особливому рахунку в уряді, підкоряючись не українському, а безпосередньо всесоюзному Міністерству чорної металургії. У 1958 році на "Днепрспецсталь", уперше у світовій практиці, була запропована технологія електрошлакової переплавки. А також спеціалізується на плавці за цією методикою цех СПЦ - 5 вважався найбільшим і кращим в Європі.

Завод першим в Радянському Союзі освоїв технологію газо-кисневогорафінування при плавці нержавіючої сталі і виробництво інструментальної і швидкорізальної сталі методом порошкової металургії 1980 року. Причому відносно останньої технології "Днепрспецсталь" і

сьогодні не втратила своєї унікальності, будучи єдиним в СНД виробником металу порошковим методом, конкуруючи лише з Австрією, Швецією і США.

Підприємство робить сертифіковану металопродукцію з нержавіючих, інструментальних, швидкорізальних, підшипникових, легованих, конструкційних марок сталі, а також з жароміцних сплавів на основі нікелю.

Ковальсько-пресове виробництво сортові великогабаритні поковки з різних марок сталі. У ній встановлені гідравлічні преси з номінальним зусиллям 60 і 32 МН, оснащені маніпуляторами вантажопідйомністю відповідно до 10 і 5 тонн. Є ділянки для термообробки, правки і обробки поволок, а також для ультразвукового контролю якості продукції.

## 1.2 Ковальсько - пресове виробництво

Камерні ковальські печі відносяться до печей, що працюють при постійній температурі в робочій камері. Процес нагрівання в цих печах складається із одно-, двух-, трьох- та многоперіодних режимів нагріву.

У чорній металургії одним з найбільш енергоємних являється прокатне і ковальсько-пресове виробництво [1]. У його нагрівальних і термічних печах витрачається понад (10...12) % усього палива, спожитого галузю [2, 3]. В зв'язку з цим, проблема енергозбереження у рамках металургійного підприємства представляється такою, що складається із завдань зниження витрат палива на одиницю продукції, що випускається [4].

Одним з основних показників палива використання є питома витрата тепла, витрата хімічної енергії палива, що є, на одиницю металу, що нагрівається. Кількісний аналіз цієї величини показує можливість ефективного використання енергії в нагрівальних печах за рахунок підвищення коефіцієнта використання теплоти палива КВП, зниження непродуктивних втрат тепла, зменшення теплового дефіциту металу і вдосконалення режимів його нагріву [5].

### 1.2.1 Методи підвищення коефіцієнта використання теплоти палива

Коефіцієнт використання теплоти палива найбільшою мірою визначає величину питомої витрати тепла. Найбільш ефективним засобом підвищення КВП і зниження витрат палива є рекуперація тепла за рахунок підігрівання компонентів горіння димовими газами, що відходять з печі [6]. У свою чергу, це веде до скорочення довжини факела і можливості працювати з меншим надлишком повітря, дозволяє понизити собівартість нагріву за рахунок скорочення втрати тепла з відхідними газами [7].

### 1.2.2 Зниження непродуктивних втрат тепла

Витратна частина теплового балансу нагрівальних печей містить статті витрати палива на покриття втрат тепла огорожуваннями печі. Ці втрати складаються з тепла, що віддається в довкілля внаслідок теплопровідності, і тепла, з акумульованого футеруванням робочого простору печі. Перший вид втрат має місце в усіх печах, другий – тільки в печах періодичної дії. Їх величина багато в чому визначається теплофізичними властивостями вживаних вогнетривких і теплоізоляційних матеріалів. Відомо, що втрати тепла теплопровідністю пропорційні коефіцієнту теплопровідності  $\lambda_m$ , а втрати на акумуляцію - величині  $(C_m - \text{питома теплоємність, } \rho_m - \text{щільність матеріалу})$ . Для різних матеріалів меншим  $\lambda_m$  відповідають і менші  $\rho_m$  [1, 4, 8].

Цей досвід застосуванні сучасних вогнетривких і теплоізоляційних матеріалів, а так само конструктивних змін у виконанні футерувань, що виключають руйнування вогнетривів [9, 10].

### 1.2.3 Вдосконалення режимів нагріву металу

У практиці нагріву металу перед обробкою тиском застосовують одно-, двух-, трьох- і багатоперіодних режимів нагріву. Режими нагріву визначаються: маркою сталі, формою, розмірами і розташуванням металу в печі, її конструкцією і призначенням.

Розрізняють температурні і теплові режими. Режими нагріву металу взаємозв'язані між собою. Виконання температурного режиму для печей періодичної дії пов'язане з необхідністю певної зміни в часі кількості тепла, що подається в піч [11].

Вибір того, або іншого режиму здійснюється з урахуванням температурної напруги, величина якої, кінецькінцем, залежить від термічної масивності метала, що нагрівається. Для нагріву термічно тонких тіл використовують одноступінчаті режими, для масивних тіл – багато ступінчасті. Так, для теплової обробки злитків в нагрівальних печах застосовують двоступінчаті режими, що включають період підйому температури при постійній тепловій потужності печі і період витримки при постійній температурі гріючих газів [11, 12].

#### 1.2.4 Системи опалювання високотемпературних нагрівальних печей

Система імпульсного опалювання печі є сукупністю пристроїв пальників, клапанів, димовідвідних каналів і установок для підігрівання компонентів горіння. Вона призначена для реалізації температурного, теплового і аеродинамічного режимів печі [13, 14, 15].

Вибір системи опалювання обумовлений типом і пристроєм пічного агрегату, а її конструкція, згідно з роботою, визначається:

- 1) типом, кількістю і розташуванням в печі пристроїв пальників;
- 2) характером руху в робочій камері продуктів згорання;
- 3) способами подачі повітря і палива для горіння продуктів згорання;
- 4) температурою підігрівання компонентів горіння, типом і характеристикою тепло випромінювального пристрою.

Для радіаційного режиму роботи, характерного для полум'яних високотемпературних нагрівальних печей, розрізняють три його різновиди. Вони характеризуються різним співвідношенням променистих потоків, що падають, від полум'я на поверхню нагріву і кладку: рівномірно розподілений

радіаційний теплообмін; спрямований прямий радіаційний теплообмін [12, 16].

Одними з основних характеристик факела є його довжина і радіаційні характеристики. Для дифузійних турбулентних факелів, найбільш характерних для полум'яних високотемпературних печей розглядають ряд величин, пов'язаних з довжиною факела і частотою імпульсів вигорання палива. Розрізняють повну довжину і довжину підсосу факела.

Довжина факела чинить істотний вплив, як на теплосприймання і якісні показники нагріву металу, так і техніко-економічні показники роботи пічного агрегату в цілому. Укорочення факела давало приріст ККД печі і збільшувало КВП. Надмірне подовження факела привело до розтягання вигорання палива, зміщення максимуму температур.

### 1.3 Постановка завдання аналізу роботи камерної печі

Для поставлених завдань були прийняті наступні технічні рішення:

1. Заміну футеровки печі існуючу футеровку із шамотних вогнетривів замінити на малоінерційну з волокнистих матеріалів, у якої менший коефіцієнт теплопровідності, характеристики вогнетривких і теплоізоляційних матеріалів представлені у додатках А і Б (див. додат. А, додат. Б). Технічні характеристики камерної нагрівальної печі представлені у додатку В (див. додат. В);

2. Модернізування системи опалення, для скорочення втрат теплоти, у системі встановити пальники ZIO KPOMSCHRODER 165 HB 300/35, кожен з яких обладнаний індивідуальним малогабаритним регенератором;

3. Для збільшення ефективності печі застосувати іпульсне опалення печі;

4. Встановлення системи автоматизації. Для підвищення якості нагрівання й додаткової економії природного газу.

## 2 АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ МОДЕРНИЗАЦІЇ ПЕЧІ

### 2.1 Розрахунок горіння природного газу

Склад природного газу у відсотках приведений в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Склад природного газу

Газ	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	N <sub>2</sub>	Вологість W г/м <sup>3</sup>
Природний	1,79	0,5	0,09	0,27	0,006	96,08	0,02	1,22	10

Об'єм води в газі, %

$$H_2O = \frac{W \cdot 100}{803,6 + W} = \frac{10 \cdot 100}{803,6 + 10} = 1,22,$$

де W – вологість газу, г/м<sup>3</sup>.

Коефіцієнт перерахунку на вологий газ

$$K = \frac{100 - H_2O}{100} = \frac{100 - 1,22}{100} = 0,987.$$

Склад вологого природного газу у відсотках приведений в таблиці 2.2.

$$C_2H_6^{вл.} = K \cdot C_2H_6 = 1,766.$$

Таблиця 2.2 – Склад води в природному газі

Газ	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	N <sub>2</sub>
Природний	1,766	0,493	0,088	0,26	0,059	94,83	0,0197	1,204

Теплота згорання газу, мДж/м<sup>3</sup>

$$Q_{H^P} = 358,18CH_4 + 637,48C_2H_6 + 912,3C_3H_8 + 1186,46C_4H_{10} + 1460,77C_5H_{12},$$

$$Q_{H^P} = (358,18 \cdot 96,08) + (637,48 \cdot 1,79) + (912,3 \cdot 0,5) + (1186,46 \cdot 0,09) + (1460,77 \cdot 0,02) = 36,7.$$



Теоретично необхідна кількість повітря, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

$$L_0=0,0476 [2\text{CH}_4+3,5 \text{C}_2\text{H}_6+ 5 \text{C}_3\text{H}_8+ 6,5 \text{C}_4\text{H}_{10}-\text{O}_2] \cdot (1+0,00124 \cdot d_b),$$

$$L_0=0,0476 [2 \cdot 96,08 + 3,5 \cdot 1,79 + 5 \cdot 0,5+6,5 \cdot 0,09 -0,006] \cdot (1+0,00124 \cdot 10) = 9,710,$$

де  $d_b=10$  - вологість сухого повітря при 20 °С [19], кг/м<sup>3</sup>.

Дійсна кількість повітря при  $n=1,1$  м<sup>3</sup>

$$L_d=L_0 \cdot n=1,05 \cdot 9,831=10,322,$$

де  $n$  – коефіцієнт витрати повітря.

Кількість продуктів згоріння, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

- кількість вуглекислого газу, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

$$V_{\text{CO}_2} = (\text{CO}_2+\text{CH}_4+\sum m\text{C}_m\text{H}_n) \cdot 0,01,$$

$$V_{\text{CO}_2} = (6,27 + 96,08 + 2 \cdot 1,79+3 \cdot 0,5+4 \cdot 0,09+5 \cdot 0,02) \cdot 0,01=1,019;$$

- кількість водяних парів, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = (2 \cdot \text{CH}_4+\sum n/2 \cdot \text{C}_m\text{H}_n+0,124 \cdot L_d \cdot d_b) \cdot 0,01,$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = (2 \cdot 96,08+6/2 \cdot 1,79+8/2 \cdot 0,5+10/2 \cdot 0,09+12/2 \cdot 0,02+0,124 \cdot 10,681 \\ \cdot 10) \cdot 0,01= 2,133;$$

- кількість кисню, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

$$V_{\text{O}_2}=0,21 \cdot (n-1) \cdot L_0,$$

$$V_{\text{O}_2}=0,21 \cdot (1,1-1) \cdot 9,710=0,2039;$$

- кількість азоту, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

$$V_{\text{N}_2} = (\text{N}_2+79 \cdot L_d) \cdot 0,01,$$

$$V_{\text{N}_2} = (1,22+79 \cdot 10,681) \cdot 0,01=8,4494.$$

Загальна кількість продуктів горіння, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

$$V_d = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2},$$

$$V_d = 1,019 + 2,133 + 0,2039 + 8,44 = 11,7958.$$

Склад продуктів горіння, %

$$\text{CO}_2 = (V_{\text{CO}_2} / V_d) \cdot 100 = \left( \frac{1,019}{11,7958} \right) \cdot 100 = 8,6384 \text{ ,}$$

$$\text{H}_2\text{O} = (V_{\text{H}_2\text{O}} / V_d) \cdot 100 = \left( \frac{2,133}{11,7958} \right) \cdot 100 = 18,0827 \text{ ,}$$

$$\text{O}_2 = (V_{\text{O}_2} / V_d) \cdot 100 = \left( \frac{0,2039}{11,7958} \right) \cdot 100 = 1,7286 \text{ ,}$$

$$\text{N}_2 = (V_{\text{N}_2} / V_d) \cdot 100 = \left( \frac{8,4494}{11,7958} \right) \cdot 100 = 71,63054 \text{ .}$$

Щільність продуктів горіння, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_{\text{п.г.}} = \frac{44 \cdot \text{CO}_2 + 18 \cdot \text{H}_2\text{O} + 32 \cdot \text{O}_2 + 28 \cdot \text{N}_2}{22,4 \cdot 100} \text{ ,}$$

$$\rho_{\text{п.г.}} = \frac{44 \cdot 8,6384 + 18 \cdot 18,0827 + 32 \cdot 1,7286 + 28 \cdot 71,630}{22,4 \cdot 100} = 1,3598,$$

де – CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O і т. д. зміст відповідних газів в продуктах згорання, %.

## 2.2 Теплоємність повітря і продуктів горіння

Калориметрична і дійсна температури згорання, мДж/м<sup>3</sup>

$$C_d(i_d) = (C_{\text{CO}_2} \cdot \text{CO}_2 + C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{H}_2\text{O} + C_{\text{O}_2} \cdot \text{O}_2 + C_{\text{N}_2} \cdot \text{N}_2) / 100,$$

$$C_d(i_d)_{1800} = (2,4 \cdot 8,68 + 1,9 \cdot 18,08 + 1,52 \cdot 1,73 + 1,47 \cdot 71,63) / 100 = 1,631,$$

де C<sub>CO<sub>2</sub></sub>, C<sub>H<sub>2</sub>O</sub>, C<sub>O<sub>2</sub></sub>, C<sub>N<sub>2</sub></sub> - середня теплоємність газів при 1800 °С, кДж/м<sup>3</sup>, [19].

Фізичне тепло повітря, кДж/м<sup>3</sup>

$$Q_{\phi} = L_d \cdot i_b,$$

$$Q_{\phi} = 10,681 \cdot 1,31 = 13,99,$$

де  $i_b$  – середня теплоємність повітря при 250 °С, кДж/м<sup>3</sup>, [19].

Калориметрична температура згорання, °С

$$t_k = \frac{Q_p^H + Q_{\phi}}{V_d \cdot C_d (1800)},$$

$$t_k = \frac{(36,602 \cdot 1000) + 13,99}{11,7958 \cdot 1,613} = 1925,$$

де  $V_d$  – 11,7958 - дійсне кількість продуктів згорання, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$C_d$  – 1,613 - теплоємність диму, кДж/(м<sup>3</sup>·°С);

$Q_p^H$  – 36602 - теплота згорання природного газу, кДж/м<sup>3</sup>;

$Q_{\phi}$  – 13,99 - фізичне тепло повітря, кДж/м<sup>3</sup>.

Наближення залежності при 1900 °С, мДж/м<sup>3</sup>

$$C_d(i_d)_{1900} = (2,41 \cdot 8,68 + 1,92 \cdot 18,08 + 1,53 \cdot 1,73 + 1,48 \cdot 71,63) / 100 = 1,629,$$

де  $C_{CO_2}$ ,  $C_{H_2O}$ ,  $C_{O_2}$ ,  $C_{N_2}$  - середня теплоємність газів при 1900 °С кДж/(м<sup>3</sup>·°С), [19].

Тоді калориметрична температура згорання, °С

$$t_k = \frac{(36,602 \cdot 1000) + 13,99}{11,7958 \cdot 1,629} = 1905,$$

$V_d$  – 11,7958 - дійсне кількість продуктів згорання, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$C_d$  – 1,629 - теплоємність диму, кДж/(м<sup>3</sup>·°С);

$Q_p^H$  – 36602 - теплота згорання природного газу, кДж/м<sup>3</sup>;

$Q_{\phi}$  – 13,99 - фізичне тепло повітря, кДж/м<sup>3</sup>.

Різниця в % (не більше 5%), %

$$\frac{1925-1905}{1925} \cdot 100 = 1,03.$$

### 2.3 Розрахунок теплообміну

Початкові дані для розрахунку наступні:

- паливо - природний газ;
- вид термообробки – нагрів металу;
- вироби, що нагріваються - зливки, заготівлі;
- марка стали – Р6М5 (C=1,1÷1,3%; Mn= 0,5÷0,8; Si= 0,25÷0,5%; P і S не більше 0,045÷0,04 %; Cr і Ni -0,3%);
- вироби укладаються на поді - 500 мм;
- кількість виробів - 8 шт;
- розміри виробу - А×А=630×630 мм, довжина L = 2000 мм.

Визначаємо розміри робочого простору печі:

- довжина печі L= 5 м;
- ширина В=3 м.

Висота печі в замку зведення від рівня підставок:

- Н = 2,3 м;
- радіус зведення R<sup>с</sup>=2,29м;
- висота бічної стінки h = 1,33 + 0,840 + 0,070 = 2,240 м;
- стріла прогину b=2,976-2,24=0,736 м.

Геометричні параметри випромінювання, м<sup>2</sup>

$$F_{\text{кл}}=2hL+2h_{\text{сп}}B+BL+\frac{\pi \cdot R_{\text{с}} \cdot \varphi}{180} \cdot L,$$

$$F_{\text{кл}}= (2 \cdot 2,240 \cdot 5,22)+(2 \cdot 2,608 \cdot 4,06)+(4,06 \cdot 5,22)+\left(\frac{3,14 \cdot 2,290 \cdot 60}{180}\right) \cdot 5,22=78,267.$$

Середня висота печі, м

$$h_{\text{ср}} = \frac{H+h}{2} = \frac{2.976+2.240}{2} = 2,608.$$

Поверхня нагріву металу, м<sup>2</sup>

$$F_{\text{м}} = 8 \cdot (4 \cdot A \cdot 2 + A^2 \cdot 2),$$

$$F_{\text{м}} = 8 \cdot (4 \cdot 0,63 \cdot 2 + 0,63^2 \cdot 2) = 46,67,$$

де А-0,63 переріз заготівлі, м.

Міра розвитку обмурування

$$\omega = \frac{F_{\text{кл}}}{F_{\text{м}}},$$

$$\omega = \frac{78,267}{46,67} = 1,677.$$

Об'єм робочого простору печі, м<sup>3</sup>

$$V_{\text{р.п.}} = B \cdot L \cdot h_{\text{ср}},$$

$$V_{\text{р.п.}} = 4,06 \cdot 5,22 \cdot 2,608 = 55,102.$$

Об'єм займаної металом (садінням), м<sup>3</sup>

$$V_{\text{м}} = 8 (A^2 \cdot 2),$$

$$V_{\text{м}} = 8 \cdot (0,63^2 \cdot 2) = 6,35.$$

Площа перерізу злитка, м<sup>2</sup>

$$S = A \times A = 0.63 \cdot 0.63 = 0.397.$$

Об'єм одного злитка, м<sup>3</sup>

$$V_{1 \text{ злитка}} = 2 \cdot S = 2 \cdot 0,397 = 0,794.$$

Об'єм робочого простору, займаного газом, м<sup>3</sup>

$$V_{\Gamma} = V_{p.n.} - V_M,$$

$$V_{\Gamma} = 55,102 - 6,35 = 48,516.$$

Сумарна випромінююча поверхня, м<sup>2</sup>

$$\sum F = F_{кл.} + F_M,$$

$$\sum F = 78,267 + 46,67 = 124,94.$$

Ефективна товщина газового шару, м

$$S_{\text{эф}} = 0,9 \cdot \frac{4 + V_{\Gamma}}{F},$$

$$S_{\text{эф}} = 0,9 \cdot \frac{4 + 48,7516}{118,567} = 1,48.$$

Визначаємо міру чорноти газу, Мн/м

$$P_{\text{CO}_2} S_{\text{эф}} = 0,086 \cdot 1,48 \cdot 0,0981 = 0,0124,$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} S_{\text{эф}} = 0,180 \cdot 1,48 \cdot 0,0981 = 0,0261,$$

де  $P_{\text{CO}_2} = \text{CO}_2 / 100 = 8,6384 / 100 = 0,086$ ;

$P_{\text{H}_2\text{O}} = \text{H}_2\text{O} / 100 = 18,0827 / 100 = 0,180$ .

За значеннями  $P_{\text{CO}_2} S_{\text{эф}}$  и  $P_{\text{H}_2\text{O}} S_{\text{эф}}$ , а також по температурам газу знаходимо міру чорноти газу [19]. Температура газу  $t_{\Gamma} = 300$  °С.

Визначаємо міру чорноти CO<sub>2</sub>. При  $P_{\text{CO}_2} S_{\text{эф}} = 0,0122$  Мн/м ( $0,0122 \cdot 1000 = 12,2$  кн/м) і  $t_{\Gamma} = 300$  °С складає  $\epsilon_{\text{CO}_2} = 0,11$ .

Міру чорноти водяної пари при  $P_{\text{H}_2\text{O}} S_{\text{эф}} = 0,0268$  Мн/м ( $0,0268 \cdot 1000 = 26,8$  кн/м) і  $t_{\Gamma} = 300$  °С складає  $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0,26$ .

Поправочний коефіцієнт  $\beta$  по [19] при  $P_{\text{H}_2\text{O}} = 0,0194$  Мн/м  $\cdot 1000 = 19,4$  кн/м<sup>2</sup> і  $P_{\text{H}_2\text{O}} S_{\text{эф}} = 26,8$  кн/м складає  $\beta = 1,1$ .

Міра чорноти газу при  $t_r = 300$  °C:

$$- P_{\text{CO}_2} S_{\text{эф}} = 12,2 \text{ кН/м};$$

$$- P_{\text{H}_2\text{O}} S_{\text{эф}} = 26,8 \text{ кН/м};$$

$$- \varepsilon_{\text{CO}_2} = 0,11;$$

$$- \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0,26;$$

$$- \beta = 1,1.$$

Тоді:

$$\varepsilon_{\Gamma} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \beta \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}},$$

$$\varepsilon_{\Gamma} = 0,11 + 1,1 \cdot 0,26 = 0,396.$$

Міру чорноти металу приймаємо  $\varepsilon_M = 0,8$ .

Тоді приведений коефіцієнт випромінювання, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>)

$$C_{\Gamma.к.м.} = \frac{5,77 \cdot \varepsilon_M \cdot \varepsilon_{\Gamma}}{\varepsilon_{\Gamma} + \varphi_{м.м.} (1 - \varepsilon_{\Gamma})},$$

$$C_{\Gamma.к.м.} = \frac{5,77 \cdot 0,8 \cdot 0,396}{0,396 + 0,373 \cdot (1 - 0,396)} = \frac{1,828}{0,621} = 2,942,$$

де - кутовий коефіцієнт  $\varphi_{м.м.}$  визначаємо за формулою,

$$\varphi_{м.м.} = \frac{F_M}{F_{\text{кл}} + F_M} = \frac{46,67}{78,267 + 46,67} = 0,373.$$

Приведений коефіцієнт випромінювання піч-метал, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>)

$$C_{\text{печ-м}} = \frac{5,77 \cdot \varepsilon_M \cdot \varphi_{к.м.}}{1 - \varphi_{м.м.} (1 - \varepsilon_M)},$$

$$C_{\text{печ-м}} = \frac{5,77 \cdot 0,8 \cdot 0,66}{1 - 0,373 \cdot (1 - 0,8)} = \frac{2,894}{0,925} = 3,292,$$

$$\text{де } \varphi_{м.м.} = \frac{F_M}{F_{\text{кл}} + F_M} = \frac{46,67}{78,267 + 46,67} = 0,373;$$

$$\varphi_{к.м.} = 1 - \varphi_{м.м.} = 1 - 0,340 = 0,66.$$

Для різних значень температури газу величини  $C_{г.к.м.}$  і  $\epsilon_{г.}$  зведені в таблицю 2.3.

Таблиця 2.3 – значення  $C_{г.к.м.}$  і  $\epsilon_{г.}$

$t, ^\circ\text{C}$	$\epsilon_{г.}$	$C_{г.к.м.}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}^4)$
300	0,396	2,944
400	0,403	2,971
500	0,395	2,935
600	0,389	2,911
700	0,370	2,823
800	0,356	2,757
900	0,329	2,623
1000	0,309	2,515
1100	0,291	2,420
1200	0,265	2,269
1300	0,249	2,172

#### 2.4 Розрахунок нагріву металу

Нагрів металу в печі складається з двох періодів і трьох інтервалів.

Режим тепловій обробки сталі марки Р6М5 приведений на рисунку 2.1.

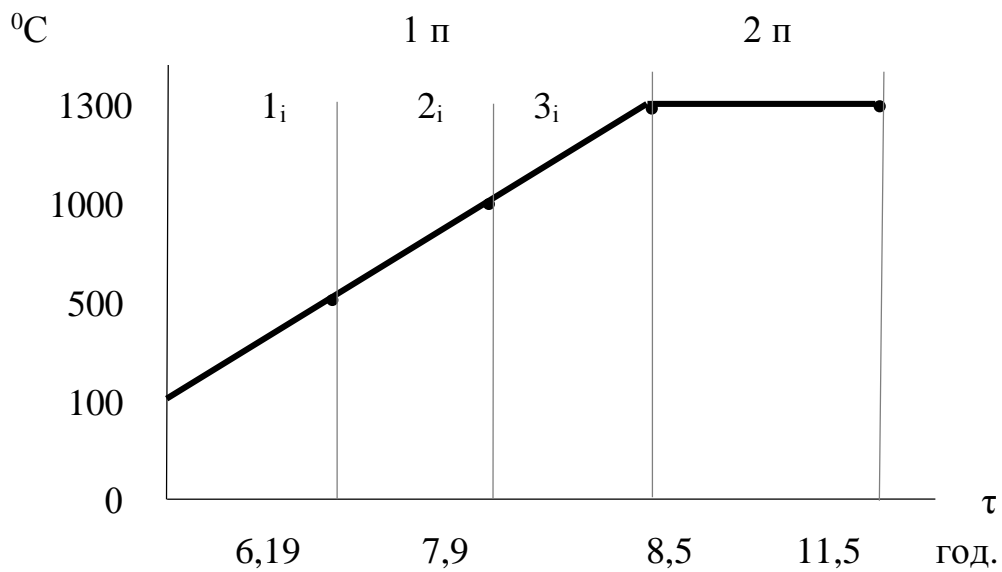


Рисунок 2.1 - Режим тепловій обробки сталі марки Р6М5

Температура при посаді 100 °C.



Перший період складається з трьох інтервалів ( $C_1 = \text{const} = 60 \text{ }^\circ\text{C}/\text{год.}$ ):

1. Нагрів від  $t_{п0} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $t_{п1} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
2. Нагрів від  $t_{п1} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $t_{п2} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
3. Нагрів від  $t_{п2} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $t_{п3} = 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Температура при посаді  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Другий період - витримка при  $t_{п3} = 1250 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Коефіцієнт теплопровідності визначається по формулам,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$

$$\lambda_0 = 1,163 \cdot (60 - 8,7 \cdot C - 14,4 \cdot \text{Mn} - 29 \cdot \text{Si}),$$

$$\lambda_0 = 1,163 \cdot (60 - 8,7 \cdot 1,22 - 14,4 \cdot 0,35 - 29 \cdot 0,16) = 46,1780,$$

$$\lambda_{200} = 0,95 \cdot \lambda_0 = 0,95 \cdot 46,17 = 43,86,$$

$$\lambda_{400} = 0,85 \cdot \lambda_0 = 0,85 \cdot 46,17 = 39,24,$$

$$\lambda_{600} = 0,75 \cdot \lambda_0 = 0,75 \cdot 46,17 = 34,62,$$

$$\lambda_{800} = 0,68 \cdot \lambda_0 = 0,68 \cdot 46,17 = 31,39,$$

$$\lambda_{1000} = 0,68 \cdot \lambda_0 = 0,68 \cdot 46,17 = 31,39,$$

$$\lambda_{1200} = 0,73 \cdot \lambda_0 = 0,73 \cdot 46,17 = 33,70.$$

Теплоємність сталі Р6М5 приведені у таблиці 2.4, [19].

Таблиця 2.4 - Теплоємність сталі Р6М5

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	400	600	800	1000	1200	1300
$i, \text{ кДж/кг}$	213,1	347,5	548,5	661,1	795,5	833,2

Значення коефіцієнта теплопровідності сталі Р6М5 приведено у таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 - Теплопровідності сталі Р6М5

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
$\text{Вт/м}$	49,4	100	154	213,1	276,2	347,5	427,9	548,5	602,9	661	732,3	795,5	833,2

За даними таблиці 2.4 і 2.5 побудовані залежності коефіцієнтів теплопровідності і теплоємності сталі Р6М5 від температури, які пертставлено на рисунку 2.2.і рисунку 2.3.

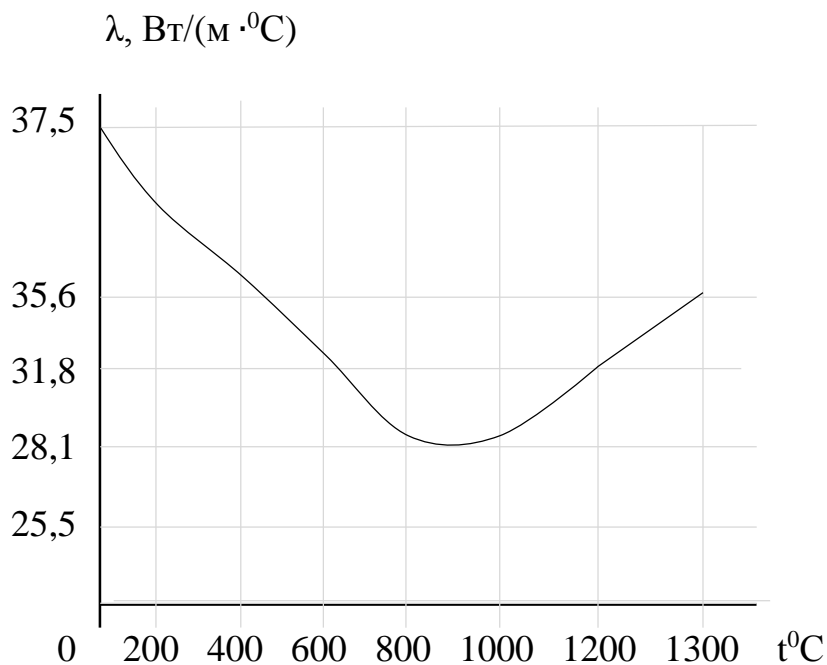


Рисунок 2.2 - Крива залежності коефіцієнта теплопровідності сталі Р6М5 від температури

$i$ - кДж/кг,

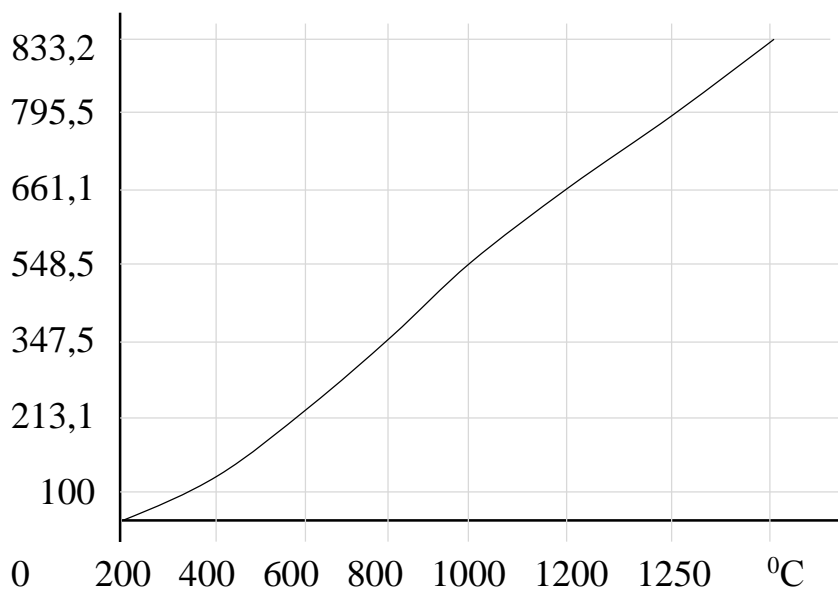


Рисунок 2.3 - Крива залежності теплоємності сталі Р6М5 від температури

## 2.4.1 Перший період

Робимо розрахунок нагріву металу по інтервалах.

### 2.4.1.1 Перший інтервал

Нагрів від температур і поверхні металу  $t_{п0} = 100$  °С до  $t_{п1} = 500$  °С.

Задаємося перепадом температур між поверхнею і центром заготовлі у кінці першого інтервалу  $\Delta t_1 = 50$  °С.

Середня температура у кінці першого інтервалу, °С

$$t_{cp1} = t_{п1} - 0,5 \cdot \Delta t_1,$$

$$t_{cp1} = 500 - 0,5 \cdot 50 = 475.$$

Середнє значення коефіцієнта теплопровідності знаходимо по даним рисунку 2.2, Вт/(м · °С)

$$\lambda_{cp1} = \frac{\lambda_{тп0} + \lambda_{ту0} + \lambda_{тп1} + \lambda_{ту1}}{4},$$

$$\lambda_{cp1} = \frac{46,18 + 46,18 + 36,93 + 38,08}{4} = 41,84.$$

Температура центру металу в кінці першого інтервалу, °С

$$t_{ц1} = t_{п1} - \Delta t_1,$$

$$t_{ц1} = 500 - 50 = 450.$$

Розрахункова теплоємність за інтервал визначаємо за допомогою рисунка 2.3, кДж/(кг · °С)

$$C_{p1} = \frac{i_{t_{cp1}} - i_{t_{cp0}}}{t_{cp1} - t_{cp0}},$$

$$C_{p1} = \frac{260,42 - 49,4}{475 - 100} = 0,562,$$

де  $i_{cp1} = i_{475} = 260,42$  - тепловміст металу, кДж/кг;

$i_{t0} = i_{100} = 49,4$  - тепловміст металу, кДж/кг.

Коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_{cp1}}{C_{p1} \cdot \rho},$$

$$\alpha_1 = \frac{41,84}{0,562 \cdot 10^3 \cdot 7850} = 9,343 \cdot 10^{-6},$$

де  $\rho = 7850$  – щільність сталі Р6М5, кг/м<sup>3</sup>.

Уточнюємо значення  $t_{ц1}$ ,  $\Delta t_1$ ,  $i \Delta t_{cp1}$ .

Температура центру металу, °С

$$t_{ц1}^{yt} = t_{п1} - \frac{C_1 \cdot B^2}{4 \cdot \alpha_1},$$

$$t_{ц1}^{yt} = 500 - \left( \frac{60 \cdot 0,355^2}{4 \cdot (3,6 \cdot 10^3 \cdot 9,343 \cdot 10^{-6})} \right) = 443,797,$$

де  $B = \frac{A}{\sqrt{\pi}} = \frac{0,630}{\sqrt{3,14}} = 0,355$  – радіус еквіволентного циліндра, м.

Перепад температур у кінці першого інтервалу, °С

$$\Delta t_1 = t_{п1} - t_{ц1}^{yt} = 500 - 443,797 = 56,343.$$

Середня температура (уточнене значення), °С

$$t_{cp1}^{yt} = t_{п1} - 0,5 \cdot \Delta t_1 = 500 - 0,5 \cdot 56,343 = 471,828.$$

Оскільки  $t_{cp1}^{yt} = 471,828$  °С трохи відрізняється від  $t_{cp1} = 475$  °С то повторного уточнення не робимо.

Тепловий потік, Вт/м<sup>2</sup>

$$q^1 = 0,5 \cdot C_1 \cdot C_{p1} \cdot \rho,$$

$$q^1 = 0,5 \cdot 0,0166 \cdot 0,355 \cdot 562 \cdot 7850 = 1308,$$

де  $\rho = 7850$  - щільність сталі Р6М5, кг/м<sup>3</sup>;

$C_1 = (C_1/60)/60 = (60/60)/60 = 0,0166$  переклад в секунди;

$C_{p1} = C_{p1} \cdot 10^3 = 0,562 \cdot 10^3 = 562$  теплоємність за інтервал, кДж/(кг · °С).

Година нагріву по тепловій діаграмі, год

$$\tau_1 = \frac{B \cdot \rho \cdot \Delta i_1}{2 \cdot q^1},$$

$$\tau = \frac{0,355 \cdot 7850 \cdot 207,316 \cdot 10^3}{2 \cdot 1308} = 22290 \text{ с} = 6,191;$$

де  $\Delta i_1 = i_{471,828} - i_{100} = 256,638 - 79,4 = 209,024$  - середня тепловмісність сталі Р6М5, кДж/кг.

Визначення температури газу на початку нагріву першого інтервалу.

Розрахунок теплообміну в печах для термічної обробки визначається значною роллю тепловіддачі конвекцією завдяки відносно низьким температурам нагріву.

Температура печі у початку нагріву за умови, що тепло від печі до металу передається тільки випромінюванням, °С

$$t_{\text{печі}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{q}{C_{\text{печі-м.}}} + \left(\frac{t_{\text{п0}} + 273}{100}\right)^4} - 273,$$

$$t_{\text{печі}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{13080}{3,129} + \left(\frac{100 + 273}{100}\right)^4} - 273 = 530,502.$$

Дійсне значення  $t_{\text{печі}}$  нижче, оскільки тепло передається не лише випромінюванням, але і конвекцією. Далі робиться уточнення температури печі. Визначаємо температуру газу на початку нагріву  $t_{\text{г0}} \approx t_{\text{печі}} = 530,5$  °С і визначаємо значення теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>

$$q^0 = C_{\text{г.к.м.}} \left[ \left(\frac{T_{\text{печ.}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{п0}}}{100}\right)^4 \right] + \alpha_{\text{к}} (t_{\text{г0}} - t_{\text{п0}}),$$

$$q^0 = 2,9287 \cdot \left[ \left(\frac{803,502}{100}\right)^4 - \left(\frac{373}{100}\right)^4 \right] + 6 \cdot (530,502 - 100) = 14220.$$

Згідно таблиці 2.3 при  $t = 530,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $C_{\text{Г.К.М.}} = 2,9287 \text{ Вт/м}^2$ . При повітрі  $t_{\text{п}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_{\text{к}} = 6 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$ . Оскільки  $q^1 = 14220 \text{ Вт/м}^2$  більше  $q = 13080 \text{ Вт/м}^2$ , прийнята температура газу  $t_{\text{г0}} = 530,5 \text{ }^\circ\text{C}$  більша за фактичну. Приймаємо  $t_{\text{г0}} = 510,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Тоді,  $\text{Вт/м}^2$

$$q^0 = 2,9287 \cdot \left[ \left( \frac{510+273}{100} \right)^4 - \left( \frac{100+273}{100} \right)^4 \right] + 6 \cdot (510 - 100) = 12950.$$

Оскільки  $q = 13080 \approx q^0 = 12950$ .

Загальний приведений коефіцієнт теплообміну з урахуванням тепловіддачі конвекцією,  $\text{Вт/(м}^2 \text{ К}^4)$

$$C_{\text{Г.К.М.}}^{\text{загальний}} = \frac{q^0}{\left[ \left( \frac{T_{\text{г0}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{по}}}{100} \right)^4 \right]},$$

$$C_{\text{Г.К.М.}}^{\text{загальний}} = \frac{12950}{\left[ \left( \frac{510+273}{100} \right)^4 - \left( \frac{100+273}{100} \right)^4 \right]} = 3,66.$$

Приведений коефіцієнт конвективного теплообміну,  $\text{Вт/(м}^2 \cdot \text{ К}^4)$

$$C_{\text{Г.К.М.}}^{\text{ковект}} = C_{\text{Г.К.М.}}^{\text{заг}} - C_{\text{Г.К.М.}}^{\text{вип}},$$

$$C_{\text{Г.К.М.}}^{\text{ковект}} = 3,66 - 2,9287 = 0,726.$$

Доля конвективної тепловіддачі від тепловіддачі випромінюванням

$$K = \frac{C_{\text{Г.К.М.}}^{\text{ковект}}}{C_{\text{Г.К.М.}}^{\text{вип}}} = \frac{0,726}{2,9287} = 0,247.$$

Оскільки тепловіддача конвекцією складає не більш 10 % тепловіддачі випромінюванням, то не можна нехтувати конвекцією або обмежитися надбавкою 10 % на тепловіддачу випромінюванням.

Температура печі на початку нагріву (уточнене значення),  $^\circ\text{C}$

$$t_{\text{печі.0}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{q^1}{C_{\text{печі-м}} \cdot 1,123} + \left( \frac{t_{\text{по}} + 273}{100} \right)^4} - 273,$$

$$t_{\text{печи.0}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{13080}{3,292 \cdot 1,23} + \left(\frac{100+273}{100}\right)^4} - 273 = 489,5.$$

Температура кладки печі, °С

$$t_{\text{кл.0}} = 2 \cdot t_{\text{печ.}} - t_{\text{г.0}},$$

$$t_{\text{кл.0}} = 2 \cdot 489,5 - 510 = 468,4.$$

Визначення температури газу у кінці нагріву першого інтервалу.

Температура печі за умови, що тепло від печі до металу передається тільки випромінюванням, °С

$$t_{\text{печи.1}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{q_1}{C_{\text{печи-м.}}} + \left(\frac{t_{\text{п1}}+273}{100}\right)^4} - 273,$$

$$t_{\text{печи.1}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{13080}{3,293} + \left(\frac{500+273}{100}\right)^4} - 273 = 659.$$

Температура газу у кінці першого інтервалу, °С

$$t_{\text{г.1}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{13080}{2,859} + \left(\frac{500+273}{100}\right)^4} - 273 = 677.$$

Визначаємо температуру печі у кінці першого інтервалу (уточнене значення), приймаючи теплоту конвекцією 15%, °С

$$t_{\text{печи.1}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{q_1}{C_{\text{печи-м.}} \cdot 1,15} + \left(\frac{t_{\text{п1}}+273}{100}\right)^4} - 273,$$

$$t_{\text{печи.1}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{13080}{3,292 \cdot 1,15} + \left(\frac{500+273}{100}\right)^4} - 273 = 642,6.$$

Температура кладки печі, °С

$$t_{\text{кл.1}} = 2 \cdot t_{\text{печ.1}} - t_{\text{г.1}},$$

$$t_{\text{кл.1}} = 2 \cdot 642,6 - 677 = 608,1.$$

Коефіцієнт температуро провідності на початку нагріву, м<sup>2</sup>/с

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_{100}}{C_{100} \cdot \rho},$$

$$\alpha_1 = \frac{45.0190}{562 \cdot 7850} = 1,161,$$

де  $\lambda_{(100)} = 45,019$  - коефіцієнт теплопровідності сталі Р6М5, Вт/м;

$C_{(100)} = 0,562$  - теплоємність сталі Р6М5, кДж/(кг · °С), [19].

#### 2.4.1.2 Другий інтервал

Нагрів металу від  $t_{п1} = 500$  °С до  $t_{п2} = 1000$  °С.

Задаємо перепат температур між поверхнею і центром заготівлі у кінці іншого інтервалу  $\Delta t_2 = 95$  °С.

Середнє значення коефіцієнта теплопровідності за другий період, °С

$$t_{ср2} = t_{п2} - 0,5 \cdot \Delta t_2,$$

$$t_{ср2} = 1000 - 0,5 \cdot 95 = 952,5.$$

Середнє значення коефіцієнта теплопровідності за другий період, Вт/(м·°С)

$$\lambda_{ср2} = \frac{\lambda_{t_{п1}} + \lambda_{t_{ц1}} + \lambda_{t_{п2}} + \lambda_{t_{ц2}}}{4},$$

$$\lambda_{ср2} = \frac{36.93 + 37.64 + 31.39 + 31.39}{4} = 34,365.$$

Температура центру, °С

$$t_{ц2} = t_{п2} - \Delta t_2,$$

$$t_{ц2} = 1000 - 95 = 905.$$



Розрахункова теплоємність за другий інтервал, кДж/(кг · °С)

$$C_{p2} = \frac{i_{t_{cp2}} - i_{t_{cp1}}}{t_{cp2} - t_{cp1}},$$

$$C_{p2} = \frac{633,45 - 256,638}{952,5 - 471,828} = 0,781,$$

де  $i_{t_{cp2}} = i_{952,5} = 633,45$  - тепловміст металу, кДж/кг;

$i_{t_{cp1}} = i_{471,8} = 256,638$  - тепловміст металу визначаємо по рисунку 2.3, кДж/кг.

Коефіцієнт температуро провідності, м<sup>2</sup>/с

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_{cp2}}{C_{p2} \cdot \rho},$$

$$\alpha_2 = \frac{31,39}{0,781 \cdot 10^3 \cdot 7850} = 5,604 \cdot 10^{-6}.$$

Уточнюємо значення  $t_{ц2}$ ,  $\Delta t_2$ , и  $\Delta t_{cp2}$ .

Температура центру (уточнене значення), °С

$$t_{ц2}^{yt} = t_{п2} - \frac{C_1 \cdot B^2}{4 \cdot a_2},$$

$$t_{ц2}^{yt} = 1000 - \left( \frac{60 \cdot 0,355^2}{4 \cdot (3,6 \cdot 10^3 \cdot 5,604 \cdot 10^{-6})} \right) = 906,1,$$

де  $B = \frac{A}{\sqrt{\pi}} = \frac{0,630}{\sqrt{3,14}} = 0,355$  - радіус еквіволентного циліндра, м.

Перепад температур у кінці другого інтервалу, °С

$$\Delta t_2^{yt} = t_{п2} - t_{ц2}^{yt} = 1000 - 906,062 = 93,9.$$

Середня температура (уточнене значення), °С

$$t_{cp2}^{yt} = t_{п2} - 0,5 \cdot \Delta t_2^{yt} = 1000 - 0,5 \cdot 93,938 = 953.$$

Оскільки  $t_{cp2}^{YT} = 953 \text{ }^{\circ}\text{C}$  незначно відрізняється від  $t_{cp2} = 952,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  то повторного уточнення не робимо.

Тепловий потік,  $\text{Вт}/\text{м}^2$

$$q_2 = 0,5 \cdot C_1 \cdot B \cdot C_{p2} \cdot \rho ,$$

$$q_2 = 0,5 \cdot 0,0166 \cdot 0,355 \cdot 781 \cdot 7850 = 18164.54,$$

де  $\rho = 7850$  - щільність металу Р6М5,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$C_1 = (C_1/60)/60 = (60/60)/60 = 0,0166$  – переклад в секунди;

$C_{p1} = C_{p1} \cdot 10^3 = 0,781 \cdot 10^3 = 781$  - теплоємність за інтервал,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$ .

Час нагріву по тепловій діаграмі, год

$$\tau_2 = \frac{B \cdot \rho \cdot \Delta i_2}{2 \cdot q_2} ,$$

$$\tau_2 = \frac{0.355 \cdot 7850 \cdot 357.564 \cdot 10^3}{2 \cdot 18164.54} = 28670 \text{ с} = 7,965,$$

де  $\Delta i_2 = i_{952,5} - i_{500} = 633,764 - 276,2 = 373,339$  - середня тепловмісткість металу,  $\text{кДж}/\text{кг}$ .

Визначення температури газу у кінці нагріву другого інтервалу.

Температура печі за умови, що тепло від печі до металу передається тільки випромінюванням,  $^{\circ}\text{C}$

$$t_{\text{печи.2}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{q_2}{C_{\text{печи-м.}}} + \left(\frac{t_{п2} + 273}{100}\right)^4} - 273 ,$$

$$t_{\text{печи.2}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{1816}{3,292} + \left(\frac{1000 + 273}{100}\right)^4} - 273 = 1062.$$

Температура газу у кінці другого інтервалу,  $^{\circ}\text{C}$

$$t_{г.2} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{1816}{2,455} + \left(\frac{1000 + 273}{100}\right)^4} - 273 = 1081.$$

Визначаємо температуру печі у кінці другого інтервалу (уточнене значення), °C

$$t_{\text{печі.2}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{q_2}{C_{\text{печі-м.}} \cdot 1,1} + \left(\frac{t_{\text{п2}}+273}{100}\right)^4} - 273,$$

$$t_{\text{печі.2}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{18\ 16}{2,455 \cdot 1,1} + \left(\frac{1000+273}{100}\right)^4} - 273 = 1057.$$

Температура кладки печі, °C

$$t_{\text{кл.2}} = 2 \cdot t_{\text{печ.2}} - t_{\text{г.2}},$$

$$t_{\text{кл.2}} = 2 \cdot 1032 - 1081 = 1032.$$

Коефіцієнт температуро провідності на початку нагріву, м<sup>2</sup>/с

$$\alpha = \frac{\lambda_{1000}}{C_{1000} \cdot \rho},$$

$$\alpha = \frac{31,39}{395 \cdot 7850} = 1,161 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с} = 0.036 \text{ м}^2/\text{ГОД},$$

де  $\lambda_{(1000)} = 31,39$  - коефіцієнт теплопровідності сталі Р6М5, Вт/м;

$C_{(1000)} = 0,395$  – теплоємність сталі Р6М5, кДж/(кг · °C), [19].

#### 2.4.1.3 Третій інтервал

Нагрів від  $t_{\text{п2}} = 1000$  °C до  $t_{\text{п3}} = 1300$  °C. Задаємося перепадом температур між поверхнею і центром заготівлі у кінці третього інтервалу  $\Delta t_3 = 95$  °C.

Середня температура у кінці третього інтервалу, °C

$$t_{\text{ср3}} = t_{\text{п3}} - 0,5 \cdot \Delta t_3,$$

$$t_{\text{ср3}} = 1300 - 0,5 \cdot 95 = 1252.$$

Середнє значення коефіцієнта теплопровідності, Вт/(м · °C)

$$\lambda_{\text{ср3}} = \frac{\lambda t_{\text{п2}} + \lambda t_{\text{ц2}} + \lambda t_{\text{п3}} + \lambda t_{\text{ц3}}}{4},$$

$$\lambda_{cp3} = \frac{31,401 + 31,02 + 34,864 + 33,768}{4} = 32,763.$$

Температура центру (попередня), °С

$$t_{ц3} = t_{п3} - \Delta t_3,$$

$$t_{ц3} = 1300 - 95 = 1205.$$

Розрахункова теплоємність за інтервал, кДж/(кг · °С)

$$C_{p3} = \frac{i_{t_{cp3}} - i_{t_{cp2}}}{t_{cp3} - t_{cp2}},$$

$$C_{p3} = \frac{835,085 - 633,455}{1252 - 952,5} = 0,672,$$

де  $i_{t_{cp3}} = i_{1252} = 835,085$  - тепловміст металу, кДж/кг;

$i_{t_{cp2}} = i_{953,031} = 633,455$  - тепловміст металу, кДж/кг.

Коефіцієнт температуропровідності в третьому інтервалі, м<sup>2</sup>/с

$$\alpha_3 = \frac{\lambda_{cp3}}{C_{p3} \cdot \rho},$$

$$\alpha_3 = \frac{32,763}{0,672 \cdot 10^3 \cdot 7850} = 6,21 \cdot 10^{-6}.$$

Уточнюємо значення  $t_{ц3}$ ,  $\Delta t_3$ , і  $\Delta t_{cp3}$ .

Температура центру (уточнене значення), °С

$$t_{ц3}^{yt} = t_{п3} - \frac{C_1 \cdot B^2}{4 \cdot \alpha_3},$$

$$t_{ц3}^{yt} = 1300 - \left( \frac{60 \cdot 0,355^2}{4 \cdot (3,6 \cdot 10^3 \cdot 6,21 \cdot 10^{-6})} \right) = 1215,$$

де  $B = \frac{A}{\sqrt{\pi}} = \frac{0,630}{\sqrt{3,14}} = 0,355$  - радіус еквівалентного циліндра, м.

Перепад температур у кінці третього інтервалу, °С

$$\Delta t_{3^{YT}} = t_{п3} - t_{ц3^{YT}} = 1300 - 1215 = 84,769.$$

Середня температура (уточненое значення), °С

$$t_{ср3^{YT}} = t_{п3} - 0,5 \cdot \Delta t_{3^{YT}} = 1300 - 0,5 \cdot 84,769 = 1258.$$

Оскільки  $t_{ср3^{YT}} = 1258$  °С незначно відрізняється від  $t_{ср3} = 1252$  °С то повторного уточнення не робимо.

Тепловий потік, Вт/м<sup>2</sup>

$$q_3 = 0,5 \cdot C_1 \cdot B \cdot C_{p3} \cdot \rho,$$

$$q_3 = 0,5 \cdot 0,0166 \cdot 0,355 \cdot 672 \cdot 7850 = 1563,$$

де  $\rho = 7850$  - щільність металу Р6М5, кг/м<sup>3</sup>;

$C_1 = (C_1/60)/60 = (60/60)/60 = 0,0166$  – переклад в секунди;

$C_{p3} = C_{p3} \cdot 10^3 = 0,672 \cdot 10^3 = 672$  - теплоємність за інтервал, кДж/(кг · °С).

Час нагріву по тепловій діаграмі, год

$$\tau = \frac{R \cdot \rho \cdot \Delta i_3}{2 \cdot q_3},$$

$$\tau = \frac{0,355 \cdot 7850 \cdot 205,487 \cdot 10^3}{2 \cdot 1563} = 18340 \text{ с} = 5,096,$$

де  $\Delta i_3 = 838,942 - 633,455 = 205,487$  - середня тепловміскість металу, кДж/кг.

Визначення температури газу у кінці нагріву третього інтервалу.

Температура печі на початку нагріву за умови, що тепло від печі до металу передається тільки випромінюванням, °С

$$t_{печі\ 3} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{q_3}{C_{печі-м.}} + \left(\frac{t_{п3} + 273}{100}\right)^4} - 273,$$

$$t_{\text{печі } 3} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{1563}{3,292} + \left(\frac{1000+273}{100}\right)^4} - 273 = 1330.$$

Температура газу у кінці третього інтервалу, °С

$$t_{г. 3} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{q_3}{C_{\text{печі-м.}}} + \left(\frac{t_{\text{пз}}+273}{100}\right)^4} - 273,$$

$$t_{г. 3} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{1563}{2,144} + \left(\frac{1300+273}{100}\right)^4} - 273 = 1345.$$

Температура печі в кінці третього нагріву (уточнена), °С

$$t_{\text{печі } 3}^{\text{YT.}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{q_3}{C_{\text{печі-м.}} \cdot 1,1} + \left(\frac{t_{\text{пз}}+273}{100}\right)^4} - 273,$$

$$t_{\text{печі } 3}^{\text{YT.}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{15\,630}{3,292 \cdot 1,1} + \left(\frac{1300+273}{100}\right)^4} - 273 = 1327.$$

Температура кладки печі, °С

$$t_{\text{кл. } 3} = 2 \cdot t_{\text{печ. } 3}^{\text{YT.}} - t_{г. 3},$$

$$t_{\text{кл. } 3} = 2 \cdot 1327 - 1345 = 1309.$$

#### 2.4.2 Другий період

Витримка при  $t_{\text{пз}} = 1300$  °С. Визначаємо час, необхідний для вирівнювання температур.

Задаємо  $\Delta t_{\text{к}} = 20$  кінцевий перепад температури по перетину металу, °С.

Ступень вирівнювання температур, мм

$$\delta = \frac{\Delta t_{\text{к}}}{\Delta t_3^{\text{YT.}}} = \frac{20}{84,769} = 0,236.$$

Знаходимо коефіцієнт вирівнювання  $m$  [19].

При коефіцієнт  $m=0,275$ :

$$\tau_{\text{вир}} = \frac{m \cdot R^2}{\alpha};$$

- коефіцієнт температуропровідності,  $\text{м}^2/\text{с}$

$$\alpha_4 = \frac{\lambda_{\text{ср4}}}{C_p \cdot \rho};$$

$$\alpha_4 = \frac{34,562}{754 \cdot 7850} = 5,839 \cdot 10^{-6};$$

- розрахункова теплоємність за інтервал,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$

$$C_{p4} = \frac{863,36 - 838,942}{1290 - 1258} = 0,754;$$

- середнє значення теплопровідності за інтервал,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$

$$\lambda_{\text{ср4}} = \frac{34,864 + 33,886 + 34,634 + 34,634}{4} = 34,562;$$

- визначаємо час витримки

$$\tau_{\text{вир.}} = \frac{0,275 \cdot 0,355^2}{5,839 \cdot 10^{-6}} = 5,950 \text{ с.}$$

Витримка при випалі потрібна для вирівнювання температур по перерізу, а також для завершення усіх структурних перетворень металу, год

$$\tau''_{\text{вир}} = 2 \cdot 5,95 = 1,19 \cdot 10^4 \text{ с} = 3,305.$$

Тепловий потік у кінці вирівнювання температур,  $\text{Вт}/\text{м}^2$

$$q_4 = \frac{2 \cdot \lambda_{\text{ср4}} \cdot \Delta t_{\text{к}}}{s},$$

$$q_4 = \frac{2 \cdot 34,562 \cdot 20}{0,355} = 3895.$$

Визначення температура печі на початку витримки другого періоду.

Дійсне значення  $t_{\text{печі}}$  нижче, оскільки тепло передається не лише випромінюванням, але і конвекцією. Далі робиться уточнення температури печі.

Температура печі на початку витримки (уточнене значення),  $^{\circ}\text{C}$

$$t_{\text{печі}}^{\text{ут } 3} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{q_3}{C_{\text{печі-м}} \cdot 1,16} + \left(\frac{t_{\text{п3}} + 273}{100}\right)^4} - 273,$$

$$t_{\text{печі}}^{\text{ут } 3} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{15\,638}{3,292 \cdot 1,16} + \left(\frac{1300 + 273}{100}\right)^4} - 273 = 1327.$$

Температура кладки печі,  $^{\circ}\text{C}$

$$t_{\text{кл.4}} = 2 \cdot t_{\text{печ.}}^{\text{ут4}} - t_{\text{г.3}},$$

$$t_{\text{кл.4}} = 2 \cdot 1327 - 1345 = 1309.$$

Визначення температури печі у кінці витримки другого періоду.

Температура печі за умови, що тепло від печі до металу передається тільки випромінюванням,  $^{\circ}\text{C}$

$$t_{\text{печі.4}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{q_4}{C_{\text{печі-м.}}} + \left(\frac{t_{\text{п3}} + 273}{100}\right)^4} - 273,$$

$$t_{\text{печі.4}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{3895}{3,292} + \left(\frac{1300 + 273}{100}\right)^4} - 273 = 1276.$$

Температура газу у кінці витримки,  $^{\circ}\text{C}$

$$t_{\text{г.4}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{3895}{2,165} + \left(\frac{1300 + 273}{100}\right)^4} - 273 = 1311.$$



Визначаємо температуру печі у кінці витримки (уточнене значення), °С

$$t_{\text{печі.ут}4} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{q_4}{C_{\text{печі-м.}} \cdot 1,16} + \left(\frac{t_{\text{пз}} + 273}{100}\right)^4} - 273,$$

$$t_{\text{печі.ут}4} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{3895}{3,292 \cdot 1,16} + \left(\frac{1300 + 273}{100}\right)^4} - 273 = 1307.$$

Температура кладки печі, °С

$$t_{\text{кл.4}} = 2 \cdot t_{\text{печ.ут}} - t_{\text{г.4}},$$

$$t_{\text{кл.4}} = 2 \cdot 1307 - 1311 = 1302.$$

Коефіцієнт температуропровідності на початку нагріву, м<sup>2</sup>/с

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho},$$

$$\alpha = \frac{28}{265 \cdot 7850} = 0,9 \cdot 10^{-5} = 0,032,$$

де  $\lambda_{(1300)} = 28$  - коефіцієнт теплопровідності сталі, Вт/м;

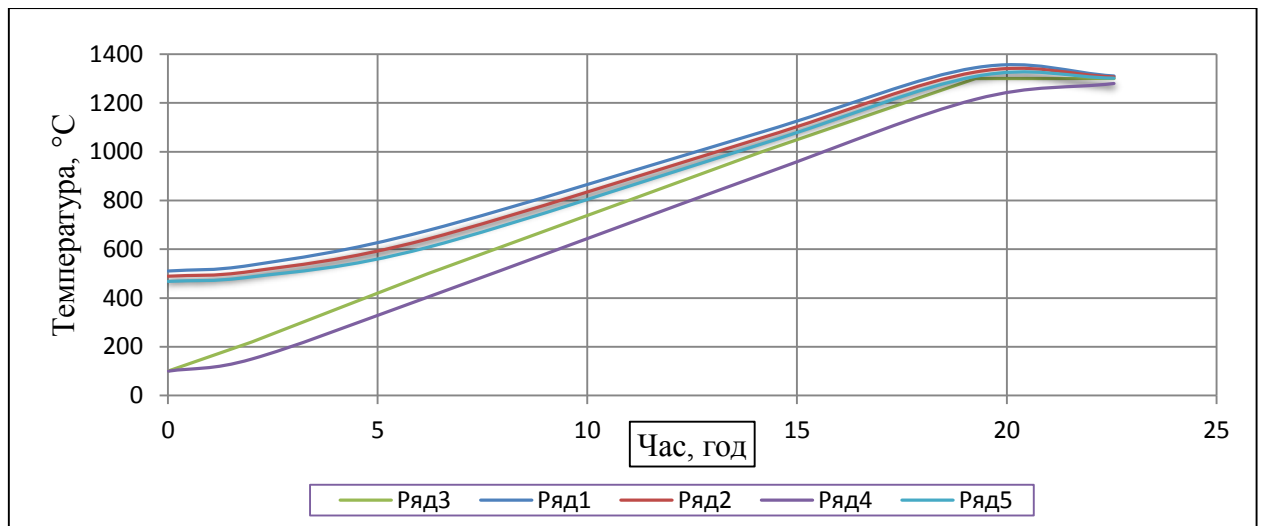
$C_{(1300)} = 0,265$  - теплоємність сталі Р6М5, кДж/(кг · °С).

Результати розрахунку температурного режиму нагріву восьмью злитків металу в камерній нагрівальній печі з викатним подом зведені в таблицю 2.6.

Таблиця 2.6 - Результати розрахунку температурного режиму нагріву восьмью злитків металу в камерній нагрівальній печі з викатним подом

Інтервал	$t_{\text{г.}}$	$t_{\text{печ.}}$	$t_{\text{кл.}}$	$t_{\text{п.м.}}$	$t_{\text{ц.м.}}$	$\tau$ , ГОД.
0	510,5	489,5	468,4	100	100	0
1	677	642	608	500	443,8	6,191
2	1081	1057	1032	1000	906	7,965
3	1345	1327	1302,69	1300	1215	5,096
4	1311	1307	1302	1300	1280	3,305

Температурний режим нагріву металу у камерній нагрівальній печі представлено на рисунку 2.4.



ряд 1 – температура газу; ряд 2 – температура печі; ряд 3 – температура кладки; ряд 4 – температура поверхні металу, що нагрівається; ряд 5 – температура центру металу, що нагрівається

Рисунок 2.4 - Температурний режим нагріву металу у камерній нагрівальній печі

## 2.5 Розрахунок теплового балансу печі, до модернізації

Одним з важливих показників паливо використання в печі є коефіцієнт використання хімічної енергії палива, що показує яка доля хімічної енергії палива залишається в робочому просторі печі.

Тепловий баланс камерної печі складається з трьох інтервалів і двох періодів.

Витрата тепла на нагрів металу, мДж

$$Q_M = E \cdot (i_{\text{ср}} - i_{t_0}),$$

$$Q_M = 49847 \cdot (835,08 - 49,4) = 40570,$$

де  $E = V_M \cdot \rho = 6,35 \cdot 7850 = 49847$  - маса садки кг;

$V_M = 6,35 \text{ м}^3$  – об'єм садки;

$i_{\text{ср(при 1300)}} = 835,08$  – тепловмісність сталі Р6М5, кДж/кг;

$i_{t_0 \text{ (при 100)}} = 49,4$  – тепловмісність сталі Р6М5, кДж/кг [19].

### 2.5.1 Перший період

Середня температура внутрішньої поверхні кладки за перший період, °С

$$t_{\text{кл I}} = \frac{t_{\text{кл 0}} + t_{\text{кл 1}} + t_{\text{кл 2}} + t_{\text{кл 3}}}{4},$$

$$t_{\text{кл}} = \frac{468,444 + 608,047 + 1032 + 1309}{4} = 854,3,$$

де  $t_{\text{кл 0}} = 468,4$  – температура кладки на початку нагріву, °С;

$t_{\text{кл 1}} = 608,1$  – температура кладки в першому інтервалі, °С;

$t_{\text{кл 2}} = 1032$  – температура кладки в другому інтервалі, °С;

$t_{\text{кл 3}} = 1309$  – температура кладки в третьому інтервалі, °С;

$t_{\text{в}} = 20$  – температура повітря навколишнього середовища, °С.

При двошаровій кладці середня температура перетину кладки, °С

$$t_1 = \frac{t_{\text{кл}} + t_{\text{в}}}{2} = \frac{854,372 + 20}{2} = 437,186.$$

Середня температура зовнішнього шару, °С

$$t_{\text{ср.кл. 1}} = \frac{t_1 + t_{\text{кл}}}{2} = \frac{437 + 854}{2} = 645,5.$$

Середня температура внутрішнього шару, °С

$$t_{\text{ср.кл. 2}} = \frac{t_1 + t_{\text{в}}}{2} = \frac{437 + 20}{2} = 229.$$

Два шари ізоляції.

Коефіцієнт теплопровідності шамотної цегли [19], Вт/(м·°С)

$$\lambda_1 = 0,7 + 0,00064 \cdot t_{\text{ср.кл. 1}} = 0,7 + 0,00064 \cdot 645,5 = 1,163.$$

Теплоємність шамотної цегли, кДж/(кг·°С)

$$C_1 = 0,8 + 0,000315 \cdot t_{\text{ср.кл. 1}} = 0,8 + 0,000315 \cdot 645,5 = 1,003.$$

Коефіцієнт теплопровідності діатомової цегли [19], Вт/(м · °С)

$$\lambda_2 = 0,12 + 1,5 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\text{ср.кл.}}^2 = 0,12 + 1,5 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 229 = 0,154.$$

Теплоємність діатомової цегли, кДж/(кг · °С)

$$C_2 = 0,8 + 0,000315 \cdot t_{\text{ср.кл.}}^2 = 0,8 + 0,000315 \cdot 229 = 0,872.$$

Приводимо двошарову кладку к еквівалентної одношарової.

Еквівалентний коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м · °С)

$$\lambda_{\text{екв.}} = \frac{\delta_{\text{загал.}}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}},$$

$$\lambda_{\text{екв.}} = \frac{0,580}{\frac{0,348}{1,163} + \frac{0,232}{0,154}} = 0,32,$$

де  $\delta_1$  - 0,348 товщина шамотної кладки, м;

$\delta_2$  - 0,232 товщина діатомової кладки, м;

$\delta_{\text{загал.}}$  - 0,580 загальна товщина кладки, м.

Еквівалентна щільність, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_{\text{екв.}} = \frac{\delta_1 \cdot \rho_1 + \delta_2 \cdot \rho_2}{\delta_{\text{загал.}}},$$

$$\rho_{\text{екв.}} = \frac{0,348 \cdot 1860 + 0,232 \cdot 600}{0,580} = 1356,$$

де  $\rho_1$  - 1860 щільність шамотної цегли, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_2$  - 600 щільність діамантової цегли, [19], кг/м<sup>3</sup>.

Еквівалентна теплоємність, кДж/(кг · °С)

$$C_{\text{екв.}} = \frac{\delta_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1 + \delta_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2}{\delta_{\text{загал.}} \cdot \rho_{\text{екв.}}},$$

$$C_{\text{екв.}} = \frac{0,348 \cdot 1860 \cdot 1 + 0,232 \cdot 600 \cdot 0,872}{0,580 \cdot 1356} = 0,985.$$

Тепло акумульоване кладкою, мДж

$$Q_{ак.} = 0,75 \cdot (t_{клз} - t_{кл0}) \cdot \sqrt{\lambda_{экв.} \cdot C_{экв.} \cdot \rho_{экв.} \cdot \tau_{общ.1п.}} \cdot F_{кл.},$$

$$Q_{ак.} = 0,75 \cdot (1309 - 468,444) \cdot \sqrt{0,32 \cdot 985 \cdot 1356 \cdot 69303} \cdot 65,772 = 7131 \cdot 10^3,$$

де  $\tau_{общ.1п} = 69303$  - час нагріву першого періода, с;

$F_{кл.} = 65,772$  - площа стін печі, м<sup>2</sup>.

Втрати тепла випромінюванням при посаді.

Розміри вікна:

- ширина  $b = 2,992 + 2 \cdot 70 = 3,123$  м;

- висота  $a = 2,336$  м;

- товщина кладки  $L = 0,580$  м;

Коефіцієнт діафрагмування  $\Phi = 0,85$ , [19].

Час посаду 10 хвилин, 8 злитків =  $\tau_{пос.} = 600$  с.

Втрати випромінюванням при посаді металу, мДж

$$Q_{пос.} = 5,67 \cdot \Phi \cdot \tau_{пос.} \cdot \left[ \left( \frac{t_{г0} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{в} + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot b \cdot a,$$

$$Q_{пос.} = 5,67 \cdot 0,85 \cdot 600 \cdot \left[ \left( \frac{510,5 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot 3,123 \cdot 2,336 = 77,94.$$

Втрати випромінюванням при видачі металу, мДж

$$Q_{вид.} = 5,67 \cdot \Phi \cdot \tau_{пос.} \cdot \left[ \left( \frac{t_{г4} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{в} + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot b \cdot a,$$

$$Q_{вид.} = 5,67 \cdot 0,85 \cdot 600 \cdot \left[ \left( \frac{1311 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot 3,123 \cdot 2,336 = 13280.$$

Втрати тепла з вихідними газами:

$$Q_{вид.} = V_{д.} \cdot C_{д.} \cdot t_{д.}^{cp.} \cdot B \cdot \tau_{загал.};$$

- середня температура диму за період нагріву, °С

$$t_{д. ср.} = \frac{t_{г0} + t_{г1} + t_{г2} + t_{г3} + t_{г4}}{5},$$

$$t_{д. ср.} = \frac{510 + 677,072 + 1081 + 1345 + 1311}{5} = 985;$$

- коефіцієнт випромінювання димових газів, кДж/м<sup>3</sup>

$$C_{д. (при 985)} = (2,2055 \cdot 8,64 + 18,0827 \cdot 1,7055 + 1,4485 \cdot 1,73 + 1,385 \cdot 71,63) \cdot \frac{1}{100} = 1,519;$$

де  $\tau_{общ.} = 81201$  - загальний час нагріву металу, с.

$$Q_{вид.} = 11,79 \cdot 1,519 \cdot 985 \cdot V \cdot 81201 = 14324,19 \text{ кДж} \cdot V = 14324 \cdot V \text{ мДж.}$$

Втрати тепла теплопровідністю через стіни в першому періоді, мДж

$$Q_{ст. 1} = \frac{t_{кл} - t_{в}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_1}} \cdot F_{кл.} \cdot \tau_1,$$

$$Q_{ст. 1} = \frac{854,37 - 20}{\frac{0,348}{1,113} + \frac{0,232}{0,154} + \frac{1}{16}} \cdot 65,772 \cdot 69303 = 2025,$$

де  $\alpha_1 = 16 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

## 2.5.2 Другий період

Середня температура внутрішньої поверхні кладки за другий період, °С

$$t_{кл II} = \frac{t_{кл 3} + t_{кл 4}}{2} = \frac{1309 + 1302}{2} = 1306,$$

$t_{кл 4} = 1302$  - температура кладки в другому періоді, °С.

При двошаровій кладці середня температура по перетину кладки, °С

$$t_1 = \frac{t_{кл II} + t_{в}}{2} = \frac{1305,5 + 20}{2} = 662,5.$$

Середня температура зовнішнього шару, °С

$$t_{\text{ср.кл.}}^1 = \frac{t_1 + t_{\text{кл. II}}}{2} = \frac{1305,5 + 662,5}{2} = 983,7.$$

Середня температура внутрішнього шару, °С

$$t_{\text{ср.кл.}}^2 = \frac{t_1 + t_{\text{в}}}{2} = \frac{662,5 + 20}{2} = 341.$$

Два шари ізоляції.

Коефіцієнт теплопровідності шамотної цегли [19], Вт/(м · °С)

$$\lambda_1 = 0,7 + 0,00064 \cdot t_{\text{ср.кл.}}^1 = 0,7 + 0,00064 \cdot 983,75 = 1,33.$$

Теплоємність шамотної цегли, кДж/(кг · °С)

$$C_1 = 0,8 + 0,000315 \cdot t_{\text{ср.кл.}}^1 = 0,8 + 0,000315 \cdot 983,75 = 1,109.$$

Коефіцієнт теплопровідності діамантової цегли [19], Вт/(м · °С),

$$\lambda_2 = 0,12 + 1,5 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\text{ср.кл.}}^2 = 0,12 + 1,5 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 341 = 0,17.$$

Теплоємність діамантової цегли, кДж/(кг · °С)

$$C_2 = 0,9.$$

Приводимо двошарову кладку до еквівалентної одношарової.

Еквівалентний коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м · °С)

$$\lambda_{\text{екв}} = \frac{\delta_{\text{загал.}}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}},$$

$$\lambda_{\text{екв}} = \frac{0,580}{\frac{0,348}{1,33} + \frac{0,232}{0,17}} = 0,356,$$

де  $\delta_1 = 0,348$  – товщина шамотної кладки, м;

$\delta_2 = 0,232$  - товщина діамантової кладки, м;

$\delta_{\text{загал.}} = 0,580$  - загальна товщина кладки, м.

Еквівалентна щільність, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_{\text{ЭКВ.}} = \frac{\delta_1 \cdot \rho_1 + \delta_2 \cdot \rho_2}{\delta_{\text{загал.}}},$$

$$\rho_{\text{ЭКВ.}} = \frac{0,348 \cdot 1860 + 0,232 \cdot 600}{0,580} = 1356,$$

де  $\rho_1 = 1860$  - щільність шамотної цегли, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_2 = 600$  - щільність діамантової цегли, кг/м<sup>3</sup>.

Еквівалентна теплоємність, кДж/(кг · °С)

$$C_{\text{ЭКВ.}} = \frac{\delta_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1 + \delta_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2}{\delta_{\text{загал.}} \cdot \rho_{\text{ЭКВ.}}},$$

$$C_{\text{ЭКВ.}} = \frac{0,348 \cdot 1860 \cdot 1,109 + 0,232 \cdot 600 \cdot 0,9}{0,580 \cdot 1356} = 1,07.$$

Тепло акумульоване кладкою, мДж

$$Q_{\text{ак.}} = 0,75 \cdot (t_{\text{кл.4}} - t_{\text{кл.3}}) \cdot \sqrt{\lambda_{\text{ЭКВ.}} \cdot C_{\text{ЭКВ.}} \cdot \rho_{\text{ЭКВ.}} \cdot \tau_{\text{загал.2п.}}} \cdot F_{\text{кл.}},$$

$$Q_{\text{ак.}} = 0,75 \cdot (1302 - 1309) \cdot \sqrt{0,356 \cdot 1070 \cdot 1356 \cdot 11898} \cdot 65,772 = -26,7,$$

де  $\tau_{\text{загал.2п.}} = 11898$  - час нагріву за другого періода, с;

$F_{\text{кл.}} = 65,772$  - площа кладки стін, м<sup>2</sup>.

Втрати тепла теплопровідністю через стіни в другому періоді, мДж

$$Q_{\text{ст.}}^2 = \frac{t_{\text{кл.2}} - t_{\text{в}}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_1}} \cdot F_{\text{кл.}} \cdot \tau_{\text{обш.2п.}},$$

$$Q_{\text{ст.}}^2 = \frac{1032 - 20}{\frac{0,348}{1,33} + \frac{0,232}{0,17} + \frac{1}{16}} \cdot 65,772 \cdot 11898 = 59,93,$$

де  $\alpha_1 = 16$  Вт/(м<sup>2</sup> · К).

Втрата тепла через зведення в першому періоді.

Приводимо двошарову кладку до еквівалентної одношарової.



Еквівалентний коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м · °С)

$$\lambda_{\text{екв}} = \frac{\delta_{\text{загал.}}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}},$$

$$\lambda_{\text{екв}} = \frac{0,486}{\frac{0,3}{1,13} + \frac{0,186}{0,154}} = 0,33,$$

де  $\delta_1 = 0,3$  - товщина шамотної кладки, м;

$\delta_2 = 0,186$  - товщина діамантової кладки, м;

$\delta_{\text{загал.}} = 0,486$  - загальна товщина кладки, м;

$\lambda_1 = 1,13$  - коефіцієнт теплопровідності шамотної цегли Вт/(м · °С);

$\lambda_2 = 0,154$  - коефіцієнт теплопровідності діатомової цегли Вт/(м · °С).

Еквівалентна щільність, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_{\text{екв.}} = \frac{\delta_1 \cdot \rho_1 + \delta_2 \cdot \rho_2}{\delta_{\text{загал}}},$$

$$\rho_{\text{екв.}} = \frac{0,3 \cdot 1860 + 0,186 \cdot 600}{0,486} = 1378,$$

де  $\rho_1 = 1860$  - щільність шамотної цегли, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_2 = 600$  - щільність діамантової цегли, кг/м<sup>3</sup>.

Еквівалентна теплоємність, Дж/(кг · °С)

$$C_{\text{екв.}} = \frac{\delta_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1 + \delta_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2}{\delta_{\text{загал}} \cdot \rho_{\text{екв.}}},$$

$$C_{\text{екв.}} = \frac{0,3 \cdot 1860 \cdot 1,003 + 0,186 \cdot 600 \cdot 0,9}{0,486 \cdot 1378} = 986,2,$$

де  $C_1 = 1,003$  - теплоємність шамотної цегли, кДж/(кг · °С);

$C_2 = 0,9$  - теплоємність діатомової цегли, кДж/(кг · °С).

Тепло акумульоване кладкою, мДж

$$Q_{\text{ак}} = 0,75 \cdot (t_{\text{кл } 3} - t_{\text{кл } 0}) \cdot \sqrt{\lambda_{\text{екв.}} \cdot C_{\text{екв.}} \cdot \rho_{\text{екв.}} \cdot \tau_{\text{загал.1п.}}} \cdot F_{\text{звед.}},$$

$$Q_{\text{ак.}} = 0,75 \cdot (1309 - 468,44) \cdot \sqrt{0,33 \cdot 986,2 \cdot 1378 \cdot 69\,303} \cdot 22,65 = 2516,$$

де  $\tau_{\text{загал. 1п}} = 69303$  - час нагріву за перший період, с;

$F_{\text{звед.}} = 22,65$  - площа зведення, м<sup>2</sup>.

Втрати тепла теплопровідністю через зведення в першому періоді, мДж

$$Q_{\text{звед. 1}} = \frac{t_{\text{кл2}} - t_{\text{в}}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_1}} \cdot F_{\text{звед.}} \cdot \tau_{\text{общ. 2п}},$$

$$Q_{\text{звед. 1}} = \frac{854,47 - 20}{\frac{0,3}{1,13} + \frac{0,186}{0,154} + \frac{1}{16}} \cdot 22,65 \cdot 69\,303 = 852,$$

де  $\alpha_1 = 16$  Вт/(м<sup>2</sup> · К).

Втрати тепла через зведення в другому періоді.

Середня температура внутрішньої поверхні кладки за другий період, °С

$$t_{\text{кл 2}} = \frac{t_{\text{кл 3}} + t_{\text{кл 4}}}{2} = \frac{1309 + 1302}{2} = 1306.$$

При двошаровій кладці середня температура перетину кладки, °С

$$t_1 = \frac{t_{\text{кл2}} + t_{\text{в}}}{2} = \frac{1305 + 20}{2} = 662,5.$$

Середня температура зовнішнього шару, °С

$$t_{\text{ср.кл. 1}} = \frac{t_1 + t_{\text{кл2}}}{2} = \frac{1305,5 + 662,5}{2} = 983,7.$$

Середня температура внутрішнього шару, °С

$$t_{\text{ср.кл. 2}} = \frac{t_1 + t_{\text{в}}}{2} = \frac{662,5 + 20}{2} = 341.$$

Два шари ізоляції.

Коефіцієнт теплопровідності шамотної цегли [19], Вт/(м · °С)

$$\lambda_1 = 0,7 + 0,00064 \cdot t_{\text{ср.кл. 1}} = 0,7 + 0,00064 \cdot 983,75 = 1,33.$$

Теплоємність шамотної цегли, кДж/(кг · °С)

$$C_1 = 0,8 + 0,000315 \cdot t_{\text{ср.кл.}}^1 = 0,8 + 0,000315 \cdot 983,75 = 1,109.$$

Коефіцієнт теплопровідності діамантової цегли[19], Вт/(м · °С)

$$\lambda_2 = 0,12 + 1,5 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\text{ср.кл.}}^2 = 0,12 + 1,5 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 341 = 0,17.$$

Теплоємність діамантової цегли, кДж/(кг · °С)

$$C_2 = 0,9.$$

Приводимо двошарову кладку до еквівалентної одношарової.

Еквівалентний коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м · °С)

$$\lambda_{\text{екв.}} = \frac{\delta_{\text{загал.}}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}},$$

$$\lambda_{\text{екв.}} = \frac{0,486}{\frac{0,3}{1,133} + \frac{0,186}{0,17}} = 0,37,$$

де  $\delta_1 = 0,3$  - товщина шамотної кладки, м;

$\delta_2 = 0,186$  - товщина діамантової кладки, м;

$\delta_{\text{загал.}} = 0,486$  - загальна товщина кладки, м.

Еквівалентна щільність, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_{\text{екв.}} = \frac{\delta_1 \cdot \rho_1 + \delta_2 \cdot \rho_2}{\delta_{\text{загал.}}},$$

$$\rho_{\text{екв.}} = \frac{0,3 \cdot 1860 + 0,186 \cdot 600}{0,486} = 1378,$$

де  $\rho_1 = 1860$  - щільність шамотної цегли, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_2 = 600$  - щільність діамантової цегли, кг/м<sup>3</sup>.

Еквівалентна теплоємність, кДж/(кг · °С)

$$C_{\text{екв.}} = \frac{\delta_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1 + \delta_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2}{\delta_{\text{загал.}} \cdot \rho_{\text{екв.}}},$$

$$C_{\text{ЭКВ.}} = \frac{0,3 \cdot 1860 \cdot 1,109 + 0,186 \cdot 600 \cdot 0,9}{0,486 \cdot 1378} = 1,075.$$

Тепло акумульоване кладкою, мДж

$$Q_{\text{ак.2}} = 0,75 \cdot (t_{\text{кл.3}} - t_{\text{кл.4}}) \cdot \sqrt{\lambda_{\text{ЭКВ.}} \cdot C_{\text{ЭКВ.}} \cdot \rho_{\text{ЭКВ.}} \cdot \tau_{\text{загал.2п.}}} \cdot F_{\text{зв.}},$$

$$Q_{\text{ак.2}} = 0,75 \cdot (1302 - 1309) \cdot \sqrt{0,36 \cdot 1075 \cdot 1378 \cdot 11898} \cdot 22,65 = -9,548,$$

де  $\tau_{\text{заг. 2п}} = 11898$  - час нагріву за другий період, с;

$F_{\text{звед.}} = 22,65$  - площа зведення, м<sup>2</sup>.

Втрати тепла теплопровідністю через зведення в другому періоді, мДж

$$Q_{\text{звед.}}^2 = \frac{t_{\text{кл.2}} - t_{\text{в}}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_1}} \cdot F_{\text{звед.}} \cdot \tau_{\text{загал.2п.}},$$

$$Q_{\text{звед.}}^2 = \frac{1032 - 20}{\frac{0,3}{1,33} + \frac{0,186}{0,17} + \frac{1}{16}} \cdot 22,65 \cdot 11898 = 25,21,$$

де  $\alpha_1 = 16$  Вт/(м<sup>2</sup> · К).

Початкові дані для подальшого розрахунку приведені у таблицю 2.7.

Таблиця 2.7 – Теплові втрати теплопровідністю за 1 - 2 період

Кладка	1 період	2 період
Стіни	$Q_{\text{ак.}} = 7131$ мДж	$Q_{\text{ак.}} = -26,7$ мДж
	$Q_{\text{ст.}}^1 = 2025$ мДж	$Q_{\text{ст.}}^2 = 59,93$ мДж
Зведення	$Q_{\text{ак.}} = 2516$ мДж	$Q_{\text{ак.}} = -9,548$ мДж
	$Q_{\text{звед.}}^1 = 852$ мДж	$Q_{\text{звед.}}^2 = 25,21$ мДж

$Q_{\text{вид.}} = 1,434 \cdot 10^6$  - втрати тепла с відхідними газами, мДж;

$Q_{\text{випром.}} = 316,44$  - втрати тепла від випромінювання, мДж.

Сумарні втрати тепла теплопровідністю, мДж

$$Q_{\text{тепл.}} = Q_{\text{ст.}}^1 + Q_{\text{ст.}}^2 + Q_{\text{св.}}^1 + Q_{\text{св.}}^2,$$

$$Q_{\text{тепл.}} = 2,025 + 5,993 + 8,52 + 2,521 = 3728.$$

Загальні втрати тепла і витрата тепла на акумуляцію, мДж

$$\Sigma Q_{\text{втр.}} = Q_{\text{ак. загал.}} + Q_{\text{випр.}} + Q_{\text{тепл.}} + Q_{\text{відх.}} \cdot V,$$

$$\Sigma Q_{\text{втр.}} = 9,61 + 316,44 + 3,728 = 1,4740 \cdot V.$$

Загальні витрата тепла на акумуляцію, мДж

$$Q_{\text{ак. загал.}} = Q_{\text{ак.1}} + Q_{\text{ак1}} + Q_{\text{ак2.}} + Q_{\text{ак2}},$$

$$Q_{\text{ак. загал.}} = 2,0250 + 85200 + (-26,7) + (-9,427) = 9610,$$

де  $V$  – витрата палива,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Нижче наводяться прибутковість теплового балансу.

Хімічне тепло палива, мДж

$$Q_{\text{хим.}} = Q_{\text{н}^{\text{р}}} \cdot \tau_{\text{загал.}} = 36602,82 \cdot 81201 = 2972.$$

Фізичне тепло повітря при  $t_{\text{в}} = 250$  °С, мДж

$$Q_{\text{физ. пов.}} = L_{\text{д}} \cdot C_{\text{в}} \cdot t_{\text{в}} \cdot V \cdot \tau_{\text{загал.}},$$

$$Q_{\text{физ. пов.}} = 10,681 \cdot 1,315 \cdot 250 \cdot V \cdot 81201 = 285 \cdot 10^3 \cdot V,$$

де  $t_{\text{в}} = 250$  - температура підігрітого повітря °С;

$C_{\text{в}} (\text{при } 250 \text{ } ^\circ\text{C}) = 1,315$  – теплоємність повітря,  $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ .

Фізичне тепло димових газів при  $t_{\text{в}} = 985$  °С, мДж

$$Q_{\text{физ. дим.}} = L_{\text{д}} \cdot C_{\text{д}} \cdot t_{\text{д}} \cdot V \cdot \tau_{\text{загал.}},$$

$$Q_{\text{физ. пов.}} = 11,8 \cdot 1,519 \cdot 985,072 \cdot V \cdot 81201 = 1434 \cdot 10^6,$$

де  $t_{\text{д}} = 985,072$  - температура димових газів, °С;

$C_{\text{д}} (\text{при } 985) = 1,519$  – теплоємність димових газів,  $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ .

Прирівнюючи прибутковості і витратні теплового балансу, визначаємо середньочасову витрату палива, м<sup>3</sup>/с

$$B = \frac{Q_{\text{втр.}} + Q_{\text{м}}}{Q_{\text{хим.}} + Q_{\text{повіт.}} - Q_{\text{ух.}}} = 0,03 ,$$

де  $B = 0,03 \text{ м}^3/\text{с} = 109,2 \text{ м}^3/\text{год.}$

Непогодження балансу, %

$$\frac{98834 - 98831}{98831} \cdot 100 = 0,003.$$

Тепловий баланс печі зведений в таблицю 2.8.

Таблиця 2.8 - Тепловий баланс печі до модернізації

Стаття	Прихід тепла		Стаття	Витрата тепла	
	мДж за два періоди	%		мДж за два періоди	%
Тепло відгоріння палива $2972000 \cdot 0,035 =$	90180	99.24	Тепло засвоєне металом	40570	41,04
Фізичне тепло повітря $22810 \cdot 0,035 =$	8651	0.76	Втрати тепла теплопровідністю	3728	3.77
			Тепло акумульоване кладкою печі	9610	9.72
			Втрати тепла випромінюванням	1406	1.42
			Втрати тепла з газами, що йдуть $143400 \cdot 0,035 =$	43520	44,03
Разом	98831	100	Разом	98834	100

### 2.5.3 Теплова потужність і витрата палива

Коефіцієнт використання палива при  $t_{\text{ср.ух.д}} = 985 \text{ }^\circ\text{C}$

Фізичне тепло повітря, кДж/м<sup>3</sup>

$$Q_{\text{физ. в.}} = L_{\text{д}} \cdot C_0^{\text{тв}} \cdot t_{\text{в}},$$

$$Q_{\text{физ. в.}} = 10,681 \cdot 1,315 \cdot 250 = 3511,4,$$

де  $C_0^{\text{тв}}$  (при 250°C) = 1,315 - тепловміст повітря, кДж/(кг · °C) .

Фізичне тепло димових газів, кДж/м<sup>3</sup>

$$Q_{\text{д. вих.}} = V_{\text{д}} \cdot C_{\text{д}}^{985} \cdot t_{\text{д}}^{\text{ср}},$$

$$Q_{\text{д. вих.}} = 11,7958 \cdot 1,519 \cdot 985 = 17640,4.$$

Коефіцієнт використання хімічної енергії палива

$$\eta = \frac{Q_{\text{р}}^{\text{н}} + Q_{\text{физ. в.}} - Q_{\text{д. вих.}}}{Q_{\text{р}}^{\text{н}}},$$

$$\eta = \frac{36603 + 3511,4 - 17640,4}{36603} = 0,614 .$$

Засвоєня теплової потужності, кВт

$$M_{\text{засв.}} = \frac{Q_{\text{м}}}{\tau_{\text{загал.}}} = \frac{40570000}{81201} = 499,62.$$

Корисна тепла потужність (середня), кВт

$$M_{\text{кор. ср.}} = \frac{M_{\text{засв.}}}{\eta_{\text{ср.}}} = \frac{499620}{0,614} = 813,7.$$

Потужність холостого ходу (середня), кВт

$$M_{\text{х . х. ср.}} = \frac{Q_{\text{пот.}}}{\tau_{\text{загал.}} \cdot \eta_{\text{ср.}}} = \frac{14740000}{81201 \cdot 0,614} = 295,6.$$

Загальна плова потужність, кВт

$$M_{\text{загал. ср.}} = M_{\text{кор. ср.}} + M_{\text{х . х. ср.}},$$

$$M_{\text{загал. ср.}} = 813,7 + 295,6 = 1109,3.$$

Середньо - годинна витрата палива, м<sup>3</sup>/год

$$V_{\text{ср.}} = \frac{M_{\text{загал. ср.}}}{Q_{\text{р}}^{\text{н}}} = \frac{1109300}{36603000} = 0,0303 \text{ м}^3/\text{с} = 109,1.$$

Витрата тепла на одну тону металу (середній), мДж/т

$$q = \frac{M_{\text{загал. ср.}}}{E_{\text{слит.}}} = \frac{1109300}{49,847} = 22254.$$

Витрата умовного палива, кг/тон

$$V_{\text{усл.}} = \frac{q}{\text{умов. паливо}} = \frac{22254}{29,3} = 759,5,$$

де 29,3 – теплота згорання умовного палива, мДж/кг.

Коефіцієнт корисної дії печі, %

$$\eta = \frac{M_{\text{засв.}}}{M_{\text{загал. ср.}}} \cdot 100 = \frac{499,62}{1109,3} \cdot 100 = 45.$$

## 2.6 Розробка заходів з модернізації печі

### 2.6.1 Вибір теплоізоляційного матеріалу

Футеровка печі складається зі стін, склепіння і пода і є найбільш відповідальною частиною металургічних печей, від якості і стійкості якої залежать тривалість кампанії та основні техніко-економічного показника. Тому необхідно правильно підбирати матеріали для спорудження стін, склепіння і пода і ретельно виконувати роботу по кладці.

Вогнетривкі вироби застосовують для будівництва робочого простору і інших елементів печей, що працюють в умовах високих температур і впливу агресивних середовищ розплавів, окалини, газів. Щоб зменшити втрати теплоти, футеровку печі по товщині роблять, як правило, комбінованою.



Робочий шар виконують з вогнетривких, зовнішній шар з теплоізоляційних виробів.

Розрізняють формовані вогнетривкі вироби у вигляді цегли, блоків, панелей і неформовані: порошки, набивні маси, суміші для виготовлення вогнетривкої бетону.

Для теплової ізоляції металургійних печей застосовуються два видивиробів:

- легковагі пористі вогнетривкі цеглини: шамот, діатомітовий і інші;
- вироби у вигляді плит, вати, повсті, картону, виготовлені на основі керамічного волокна в суміші з матеріалом, так звані волокнисті вогнетриви.

Легкові вогнетривкі цеглини мають велику пористість і тому меншою щільністю і теплопровідністю, ніж звичайні вогнетривкі цеглини. Марка цегли пртведені в таблиці 2.9 розшифровується так: Д - динас, Ш - шамот, Л - легковагі, числа після тире означають щільність. Чим менше щільність цегли, тим краще його теплоізоляційні властивості, але нижче максимальна робоча температура.

Таблиця 2.9 - Властивості легких вогнетривких виробів

Тип і марка вироби	Щільність, $\rho$ , т/м <sup>3</sup>	$T_{\text{раб}}^{\text{max}}$ , °С	Теплопровідність, $\lambda$ , Вт/(м·К)	Теплоємність, кДж/(кг·К) в інтервалі 0-1400 °С	Вартість
Динас ДЛ-1,2	1,2	1500	$0,58 + 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot t$	1,19	от 9 000 грн./т
Шамот ШЛ-1,3	1,3	1350	$0,47 + 0,14 \cdot 10^{-3} \cdot t$	1,19	от 8000 грн./т
ШЛ-0,9	0,9	1200	$0,29 + 0,20 \cdot 10^{-3} \cdot t$	1,17	
ШЛ-0,4	0,4	1100	$0,06 + 0,14 \cdot 10^{-3} \cdot t$	1,17	
Діатомітова цегла	0,5	1000	0,15 (при $t=350^{\circ}\text{C}$ )	1,0	от 9 000 грн./т

У порівнянні зі звичайними вогнетривками шамот вогнетривкий і інші легковісні матеріали мають більш низьку міцність, шлакостійкість і термостійкість. Їх можна застосовувати не тільки для теплоізоляційного шару футеровки, а й для робочого шару, в термічних печах. Діатомітовий цегла

застосовують тільки для зовнішнього шару теплової ізоляції стін і огорожень нагрівальних печей.

У таблиці 2.10 представлені деякі види волокнистих вогнетривких виробів і їх властивості. При цьому зменшуються два видивтрат: на акумуляціютеплотифутеровкою і теплопровідністю через футеровку в навколишнєсередовище.

Залишається існуючий фундамент печі, механізм заслінки.

Вдосконалення печі включає:

1. Заміну існуючої футеровки шамотною цеглою марки ШЛБ-1,3 по ГОСТ 8691-73 і цегла хромомагnezитового по ГОСТ 5381-72;
2. Футерування бічних стін замінюється на футеровку з вогнетривкого керамічного волокна «ковдра керамоволокністої LYGX - 512» виробництва Чехії.

Таблиця 2.10 – Властивості волокнистих вогнетривких виробів.

Тип і марка виробу	Товщина, мм	Щільність, $\rho$ , т/м <sup>3</sup>	$T_{\text{роб}}^{\text{max}}$ , °С	Теплопровідність, $\lambda$ , Вт/(м·К)	Теплоємність, кДж/(кг·К) в інтервалі 0-1400 °С	Вартість
Плита ШПГ - 450	100	0,45	1300	0,20	1,0	250 грн/шт
Вата МКРР-130	15; 20	0,13	1250	0,22	1,0	40 грн/кг
Войлок МКРВЦ-150	15; 20	0,15	1400	0,14	1,0	40 грн/кг
Фетр МКРВЦФ - 130	0,13	0,13	1400	0,18	1,0	50 грн/кг
Керамоволокно LYGX- 512	50	0,96	1400	0,210	1,0	1140 грн за 128 кг/м <sup>3</sup>
Плита Базальтова	100	0,10	1400	0,045	1,0	169,53 грн/м <sup>2</sup>
Ізолятор алюмінієвий армований	10		від - 60 до +150	0,97	1,0	45 грн/м <sup>2</sup>

Для печей періодичної дії переваги волокнистої футерування полягають в наступному:

- швидкий розігрів і охолодження печі внаслідок малої теплоінерційності, що дозволяє знизити витрату газу за рахунок скорочення режимів нагріву і охолодження;
- стійкість футеровки до різких коливань температури;
- скорочення витрати палива на 15 - 20 % за рахунок зниження втрат тепла на акумуляцію в кладці.

Обрана:

1. Ковдра керамоволокнистої LYGX – 512, розміри 3600/7200 x 610/1220 x 12,7 – 50, IS09001 - 2000, IS014001 - 1996 ;
2. Плита базальтова «ТЕХНО»;
3. Ізолятор алюмінієвий армований «АРМОФОЛ».

Под печі:

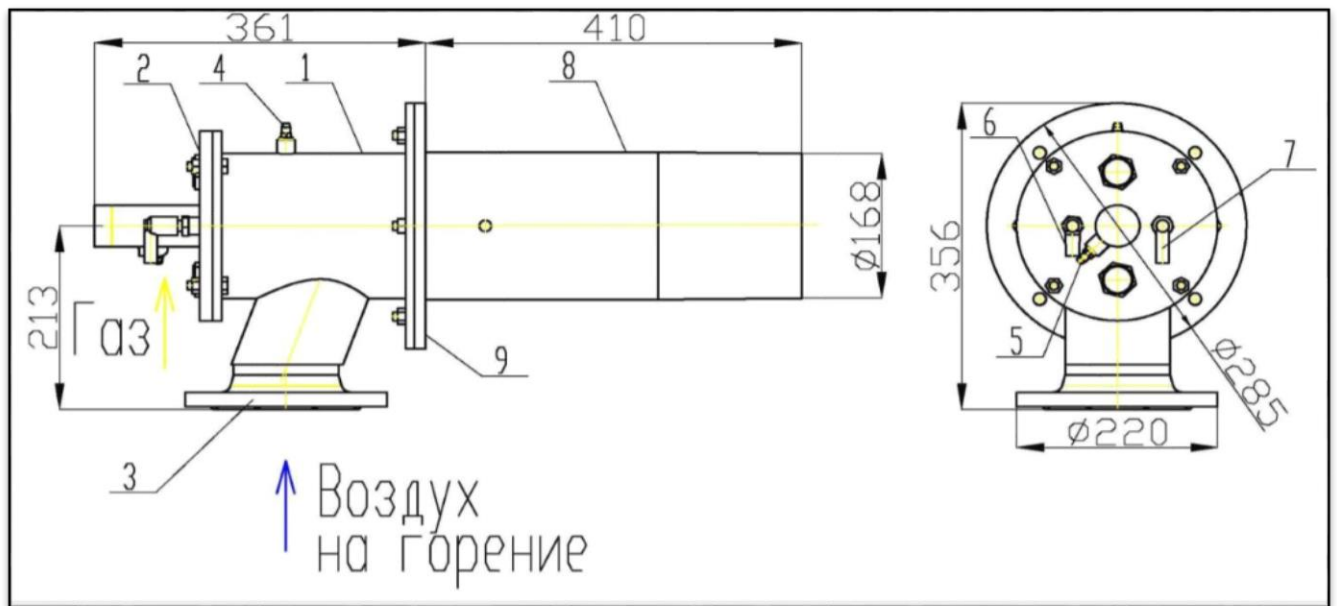
1. Цеглина хромомагнетитової (253 шт.);
2. Шамот ШЛ-1,3 (h=65 мм) (230x113x65) (1140 шт.) (ГОСТ 5691-73);
3. Шамот ШЛ-1,3 (h=40 мм) (230x113x65) (1328 шт.).

Поди є вельми відповідальною частиною металургічних печак, так як, крім впливу великих температур, вони повинні протистояти механічним навантаженням та хімічного окислу, шлаку і розплавів. Зазвичай поди викладають особливо ретельної кладкою з високосортної цегли. Нижні ряди пода розташовують на плашку, а верхніна ребро або торець. Плоский підвісний под складається з металевих секцій і футерований: блити базальтової та ковдри керамоволокнистої LYGX - 512. Шілини ущільнюються фетром після укладання секцій склепіння.

### 2.6.2 Система опалення печі

В системі опалення печі застосовані 6 швидкісних пальників ZIO 165 виробництва фірми ElsterKromschroder, Німеччина одиничної тепловою потужністю 630 кВт, що працюють в імпульсному режимі(див.рисунок 2.5).

Корпус 1 призначений для кріплення пальника до печі за допомогою фланця 9, для установки пальникової частини і пальникової труби 8. На корпусі патрубок для подачі повітря на горіння 3, також є вбудований штуцер 4 призначений для відбору (виміру) тиску повітря на пальник. На кришці 2, що закриває корпус з торця, встановлюються патрубок 5 для подачі газу на горіння, електрод розпалу 6 і контрольний електрод 7.



1 – корпус пальника; 2 – торцева кришка; 3 - патрубок для подачі повітря; 4 – повітрянийштуцер; 5 - патрубок для подачі газу; 6 - запальний електрод; 7 - контрольний електрод; 8 - керамічна пальникова труба; 9 - вмантований фланець.

Рисунок 2.5 – Конструкція пальника ZIC 165.

У якому відбувається підігрів повітря подаваного на горіння. Теплота, яка раніше викидалась в атмосферу, повертається в піч, що значно скорочує витрату природного газу.

Замінюються газові пальники ГНПЗ-4 шт. і ГНП5-2 шт. на газові пальники типу ZIO PROMSCHRODER 165 HB 300/35. Теплова потужність пальників ZIO становить 630 кВт (кожний).

Горіння газу імпульсне, опозитне, в роботі одночасно знаходиться по 2 пальника на кожній печі. Усього в нагріванні приймають участь 2

пальника по черзі в кожній зоні бокової стіні в печі на протязі певних часових інтервалів.

Утворені продукти згорання (до 80 %) видаляються з робочого простору печі крізь пальниковий канал протилежного пальника і проходять крізь вбудований теплоутилізаторпальника, де віддають теплоту і видаляються димовсмоктувачем в запроектовану трубу. Димові гази що залишились і не використовуються в теплообміні, щоб уникнути перегріву теплоутилізатора і росту тиску в печі вище за норму, відводяться крізь розвантажний димопровід виконаний в зводі печі, з наступним видаленням у запроектовану димову трубу з природною тягою.

При зміні напрямку подачі палива – повітря проходить крізь нагріту насадку теплоутилізатора пальника і повертає в піч – (90...95 %) теплоти продуктів згорання.

Використання нової технології імпульсного згорання палива і використання регенеративних пальників ZIO 165 НВ призводить до зменшення витрати газу на нагрівальній печі цеху.

Регулювання теплової потужності печі підведення потужності здійснюється за допомогою змінюваного співвідношення часу роботи й відключення пальника працюючого на максимальній витраті.

Пальники при цьому відключаються й включаються. Завдяки такому способу керування завжди максимально використовується кінетична енергія струменя пальника для створення циркуляції продуктів згорання в печі й тому досягається максимальна конвективна складова теплообміну, навіть при низькому загальному тепловому навантаженні. Це забезпечує рівномірне поле температур у робочому просторі печі, а відповідно і якісне нагрівання.

Так само при імпульсному керуванні відсутні обмеження в діапазоні регулювання потужності печі. При розподілі пальників по окремих зонах і завдяки відповідному програмуванню режиму імпульсного керування виникла можливість зміни кількості й розмірів теплових зон.

Повітря подається на горіння, може підігріватися в зовнішньому рекуператорі до температури 400 °С, надходить в повітряну порожнину корпусу, а потім в камеру змішання.

Природний газ подається через газову головку і по центрально розташованому газовому колектору потрапляє в змішувач. Займання відбувається за рахунок запального електрода 6, наявність полум'я контролюється електродом 7. Завдяки наявності конфузора, утворюється високошвидкісний факел продуктів горіння (до 150 м/с). Пальник забезпечує широкий діапазон, як коефіцієнта надлишку повітря, так і теплової потужності.

На вході в газову головку є вимірювальна діафрагма, призначена для контролю витрат газу.

Відпрацьовані гази видаляються з внутрішнього простору печі через отвір, розташоване на задній торцевій стінці печі. Далі димові гази надходять в загальний вертикальний димар де встановлюється рекуператор (перед рекуператором дим розбавляється повітрям). Після рекуператора димові гази розбавляються атмосферним повітрям і направляються в димосос встановлений на печі. За допомогою тяги димососа дим направляється в існуючу димову трубу що використовується також для печі.

Таким чином рекуператор ОПТ дозволяє:

- економити до 40 % споживаної енергії, за рахунок повернення теплової енергії назад в технологічний цикл;
- знизити витрату палива за рахунок збільшення температури що подається на горіння повітря;
- покращення горіння палива в печі, за рахунок використання підігрітого повітря замість повітря навколишньої температури і, тим самим, знижувати його хімічний недожог. В результаті, при тій же витраті палива кількість теплоти, одержуваної в процесі горіння, збільшується на (10...15 %).

- охолоджувати димові гази для забезпечення санітарних норм і екологічних вимог.

Застосування швидкісних пальників дозволяє істотно знизити питомі витрати палива і зменшити експлуатаційні витрати.

Кожен пальник обладнана індивідуальним пультом управління, системою автоматичного розпалу, і системою контролю полум'я, що забезпечує її безпечну роботу. В обв'язки кожного пальника на підводі газу передбачені два електромагнітних клапана, які забезпечують герметичне перекриття подачі газу до пальника (клас герметичності - А) при виникненні аварійної ситуації, в тому числі згасання факела пальника.

Піч умовно розділена на чотири віртуальні зони теплового регулювання. У кожній умовній зоні печі встановлено по дві термопари: термопара (основна), за показаннями якої відбувається регулювання і контрольна термопара. При виході з ладу основний термопари регулювання триває за показаннями контрольної термопари до тих пір, поки не буде замінена основна термопара.

### 2.6.3 Імпульсне опалення печей.

На металургійні підприємства сталеві злитки і поковки перед куванням піддають нагріванню в камерних нагрівальних газових печах. Опалення цих печей здійснюється за допомогою пальників, встановлених в бічних стінах печі. Наявність зон опалення забезпечує двостороннє підведення теплоти до заготовок, розташованих на викотній поді. У той же час, при безперервній системі спалювання палива така схема розміщення пальників, що реалізує одностороннє бічне опалення, не сприяє формуванню умов для рівномірного нагріву металу в напрямку руху газів, що горять.

Виконанні завдання зовнішнього теплообміну з використанням спрощеного резольвентного зонального методу при наступних припущеннях:

1) сталеві заготовки прямокутного перетину, що укладаються на викотний поді. робочої камери печі в один шар без зазорів, представили у вигляді нескінченної пластини;

2) наявність в печі трьох зон опалення забезпечує симетричний нагрів заготовок;

3) термоелектричний термометр представляє собою двошарову кулю (зовнішній шар виконаний з корунда, внутрішня порожнина кулі заповнена металом робочого спаю датчика);

4) тіла, які беруть участь у променевому теплообміні, є сірими, а випромінювання і відображення променевої енергії поверхнями металу.

Зональну модель зовнішнього теплообміну представили як замкнута система, що відповідає верхній частині робочого простору пічної камери. Вона утворена поверхнями металу, кладки, термоелектричного перетворювача і заповнена середовищем палаючих газів. Для обліку зміни складу продуктів горіння і оптичних властивостей середовища, в напрямку розвитку факела, виділену частину робочого простору пічної камери (див. рисунок 2.6) розділили на двадцять сім зон: п'ять об'ємних зон факела і продуктів згорання ( $I = 1 \dots 5$ ), п'ять плоских поверхневих зон металу ( $I = 6 \dots 10$ ), сімнадцять плоских поверхневих зон кладки ( $I = 11 \dots 27$ ) і одну сферичну поверхневу зону термоелектричного термометра ( $I = 28$ ).

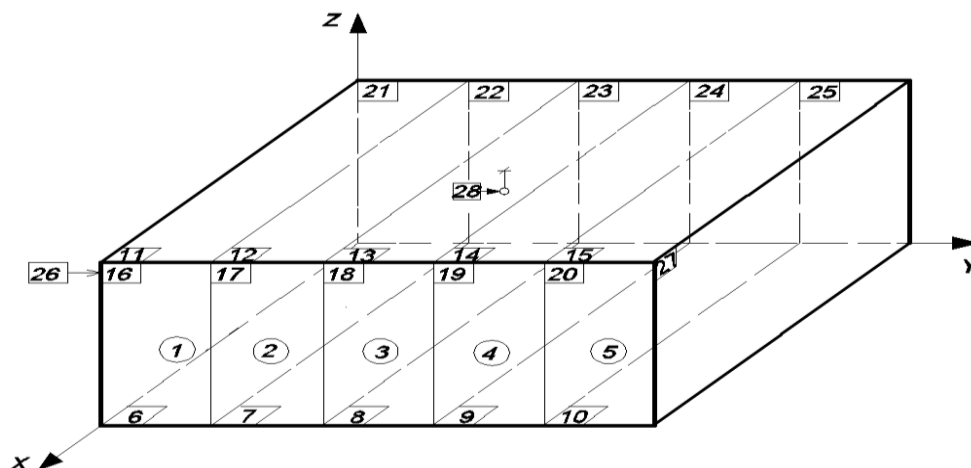


Рисунок 2.6 - Схема зональної моделі теплообміну в робочій камерній нагрівальній печі.



Розрахунок довжини факела залежно від зміни теплового навантаження відповідно до рекомендацій роботи і з урахуванням співвідношень, представлених у вигляді:

$$l_n \approx 0,7 \cdot l_\phi,$$

$$l_{\phi.n.} \approx 2 \cdot l_n,$$

де  $l_n$  - довжина шляху підсосу факела (відстань від пальника до поперечного перерізу на осі факела, в якому в середньому в зону горіння підсмоктується кількість повітря, теоретично необхідного для горіння палива, при цьому враховується, що в межах довжини підсосу факела ступінь вигорання палива становить 0,85), м;

$l_\phi$  - довжина факела (відстань від виходу з пальника до поперечного перерізу на його осі, в якому середній хімічний недопал палива складає  $q_3 = 2 \%$ ), м;

$l_{\phi.n.}$  - повна довжина факела (відстань від виходу з пальника до точки на його осі, в якій кінцевий хімічний недопал палива складає  $q_{3к} = 2 \%$ ), м.

Концентрацію палива, ступінь його вигорання, підсмоктування повітря в зону горіння, а також концентрації випромінюючих компонентів продуктів згорання по довжині факела розраховували з використанням рекомендацій роботи.

У межах кожної розрахункової зони значення її абсолютної температури, ступеня чорноти і концентрації випромінюючих компонентів продуктів згорання ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) брали постійними, а об'ємне випромінювання газового середовища замінювали еквівалентним дифузійним випромінюванням уявної поверхні, що обмежує газовий обсяг. Крім того, вводили умовні абсолютно чорні поверхні, які відокремлюють об'ємну газову зону від суміжних, об'ємних газових зон, що дозволяє уявити зональну модель теплообміну у вигляді окремих підсистем.

Взаємодія суміжних підсистем здійснюється через відповідні умовні абсолютно чорні поверхні, які мають таку температуру, при якій щільності потоків результуючого випромінювання на кордонах підсистеми зберігають своє дійсне значення. Визначення зазначених температур справили шляхом розрахунку радіаційного теплообміну в окремих підсистемах і узгодження їх величин на кордонах суміжних підсистем

$$q_{J,I} = -q_{I,J} = \sigma_0 \cdot [T_{J,I}^4 - T_{I,J}^4],$$

де  $q_{J,I}$  - щільність потоку результуючого випромінювання, що проходить через умовну поверхню, що відокремлює першу об'ємну газову зону від суміжної другої об'ємної газової зони, Вт/м<sup>2</sup> • К;

$T_{J,I}, T_{I,J}$  - температура умовних поверхонь, що відокремлюють відповідно другу об'ємну газову зону від суміжної першої об'ємної газової зони і об'ємну газову зону від суміжної об'ємної газової зони, К;

$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  - постійна Стефана-Больцмана, Вт/м<sup>2</sup> • К<sup>4</sup>.

Розрахунок радіаційного теплообміну в межах окремої підсистеми справили зональним методом, дозволяючи систему рівнянь, яка містить зональне рівняння для об'ємної газової зони

$$\sum_{k=1}^n a_{k,i} \cdot T_k^4 + g_i \cdot T_i + g_i^0 + Q_i^v = 0,$$

і зональні рівняння для поверхневих зон металу, кладки і термоелектричного термометра

$$Q_i = \sum_{k=1}^n a_{k,i} \cdot T_k^4, \quad i = 1, \dots, n-1,$$

де  $Q$  - результуючий тепловий потік, Вт;

$T$  - зональна температура, К;

$a$  - коефіцієнт радіаційного обміну, Вт/К<sup>4</sup>;

$g_i$  - коефіцієнт конвекційного теплообміну, Вт/К;

$g_i^0$  - сума доданків, що не залежать від температури зони, Вт;

$Q_i^v$  - виділення теплоти в об'ємній зоні, Вт;

$n$  - число розрахункових зон в складі даної підсистеми.

При відомих значеннях температури поверхневих зон і виділення теплоти в об'ємних газових зонах, рішення системи зональних рівнянь дозволяє визначати на кожному часовому кроці величину температури об'ємних газових зон і результуючі теплові потоки для поверхневих зон.

Поверхневі зони моделі є межами, що відділяють об'ємні газові зони робочого простору пічної камери від об'ємних зон металу, кладки і термоелектричного термометра. Сталість величин, що характеризують теплообмін в межах кожної розрахункової поверхневої зони, дозволяє описувати нагрів об'ємних зон металу, кладки і термоелектричного термометра одновимірними диференціальними рівняннями нестационарної теплопровідності, доповненими відповідними крайовими умовами.

Рішення завдання внутрішнього теплообміну виконали методом кінцевих різниць по неявній чотирьох точною схемою, при цьому на кожному часовому кроці здійснили визначення дискретних температурних полів об'ємних зон металу, кладки і термоелектричного термометра, а також температури відповідних їм поверхневих зон.

Процедура вирішення пов'язана із завданням забезпечення узгодження рішень взаємозалежних завдань зовнішнього і внутрішнього теплообміну.

На представлений математичній моделі проведені чисельні дослідження режимів опалення камерної нагрівальної печі з вискотним подом та аналіз впливу довжини факела на якісні та кількісні показники її роботи.

Моделльні розрахунки виконані при наступних вихідних даних:

- паливо природний газ з теплою згоряння = 35,6 мДж/м<sup>3</sup>;
- температура підігріву повітря - 250 °С;
- температура витримки печі - 1250 °С;
- нагрівається матеріал заготовки перерізом 630×630 мм зі сталі Р6М5;

- кладка печі складається з одно - і двох шарових стінок, шари яких виконані з керамоволокна і плити базальтової.

Загальний витрата палива на піч в період підйому температури становить 250 м<sup>3</sup>/год. Теплофізичні властивості нагрівання металу і кладки печі ставили за даними робіт.

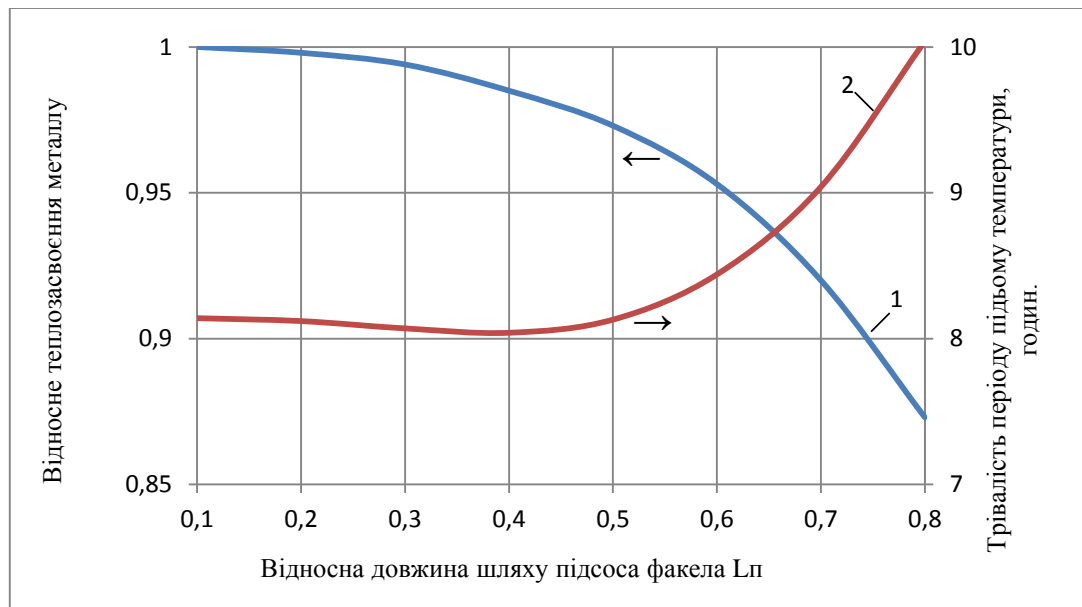
Оцінку впливу довжини факела на якісні та кількісні показники роботи печі виконували при досягненні показаннями пічного термоелектричного термометра рівня температури витримки. Довжину факела оцінювали по відносній довжині шляху підсосу факела, де  $l_n/b$  - відповідно, довжина шляху підсосу факела і геометричний розмір робочої камери печі в напрямку розвитку факела.

В результаті проведених розрахунків визначили середні по зонах температури поверхневих і об'ємних розрахункових зон газу, металу і кладки, сумарне засвоєння теплоти садкою сталевих заготовок, а також променисті осьові результуючі теплові потоки через перетин робочого простору печі, перпендикулярні до поздовжньої осі факела.

Для кількісної характеристики впливу довжини факела на інтенсивність процесів теплообміну в робочому об'ємі печі використовували відносне тепло засвоєння садки сталевих заготовок (за час рівне восьми годинах)  $Q = Q_{\phi}/Q_{max}$ , де  $Q_{\phi}$  - сумарне тепло засвоєння металу для факела певної довжини,  $Q_{max}$  - максимальна (в інтервалі зміни відносної довжини подсоса факела) сумарне тепло засвоєння металу.

Аналіз зміни величини  $Q$  зображений на рисунку 2.7, що в дослідженому інтервалі значень параметра максимальною тепловіддачею володіє факел найменшої довжини. Зі збільшенням довжини газового факела спостерігали монотонне зменшення загального теплосвоєння металу, що, мабуть, пов'язано з розтягуванням зони інтенсивного вигорання палива і зниженням температурного напору між факелом і поверхнею нагрівається металу. В інтервалі значень параметра  $L_n = 0,1 \dots 0,5$  величина  $Q$  знижується незначно (приблизно на 3 %). Зі збільшенням величини даного параметра

більш  $L_n = 0,5$  факел виходить за межі робочої камери печі, що призводить до появи хімічного недопалу палива і істотного зниження рівня загальної тепловіддачі, при цьому відносне тепло засвоєння металу для найбільш довгого факела зменшується на 13 % в порівнянні з факелом найменшою довжини.



1 - відносне теплосвоєння металу; 2 - тривалість періоду підйому температури печі

Рисунок 2.7 - Характер зміни тривалості періоду підйому температури в печі і відносного теплосвоєння металу в залежності від відносної довжини підсосу факела.

Тривалість періоду підйому температури  $\tau_n$  характеризується часом виходу показань пічного термоелектричного термометра на заданий рівень температури витримки печі і залежить від положення області максимальної температури гріючого середовища. При зміні довжини факела відбувається зміщення високотемпературної зони гріючого середовища щодо пічного термоелектричного термометра, що зображені на рисунку 2.7, призводить до деякого зменшення (при  $L_p = 0,1 \dots 0,4$ ), а потім і підвищенню  $\tau_n$  (при  $L_p = 0,4 \dots 0,5$ ). Подальше збільшення довжини факела супроводжується, як

зазначено вище, зниженням інтенсивності процесів теплообміну в робочому об'ємі печі і зменшенням тепловіддачі, в тому числі до тепло сприймаючої поверхні термоелектричного термометра. Зниження рівня тепловіддачі і зміщення зони максимальної температури гріючого середовища призводить до зменшення швидкості росту показань термоелектричного термометра і, як наслідок, значно збільшує тривалість періоду підйому температури.

Розподіл температури гріючого середовища і осьового результуючого теплового випромінювання в робочому об'ємі печі представлені в таблиці 2.11.

Таблиця 2.11 - Значення відносної щільності осьового результуючого теплового випромінювання в робочому просторі камерної нагрівальної печі.

Відносна довжина шляху підсосу факела $L_n$ , м	Температура гріючого середовища $t_g$ , °C					Відносна щільність променистого осьового теплового потоку *			
	Номер об'ємної газової зони					Кордон між об'ємними зонами			
	1	2	3	4	5	1-2	2-3	3-4	4-5
0,1	1409	1221	1168	1140	1123	2,42	2,62	2,05	1,29
0,2	1350	1253	1173	1141	1123	1,35	2,44	2,02	1,28
0,3	1218	1307	1189	1143	1123	-0,55	1,81	1,89	1,24
0,4	1092	1314	1219	1152	1126	-1,68	0,69	1,58	1,18
0,5	990	1287	1246	1174	1137	-2,28	-0,53	0,98	1,03
0,6	911	1249	1261	1201	1158	-2,65	-1,60	0,18	0,77
0,7	850	1209	1265	1226	1183	-2,99	-2,55	-0,7	0,39
0,8	805	1174	1262	1244	1206	-3,44	-3,53	-1,65	-0,074

Для порівняння варіантів зміни довжини факела променисті осьові результуючі теплові потоки визначили в чотирьох перетинах, які поділяють об'ємні розрахункові газові зони печі. Як величини, що характеризує рівень осьового випромінювання, брали відносну щільність осьового результуючого теплового потоку, тобто ставлення межзонами щільності променистого осьового результуючого теплового потоку до щільності відповідного

зонального променистого результуючого теплового потоку для поверхні нагрівається металу. Встановлено що таблиці 2.11 для факелів максимальної довжини осьові результуючі теплові потоки спрямовані до пальникових пристроїв (знак «-»), для факелів мінімальної довжини - в сторону розвитку факела (знак «+»). Коли факели мають довжину  $L_n = 0,3 \dots 0,7$ , осьові результуючі теплові потоки спрямовані в протилежні сторони від перетину, в якому температура гріючого середовища досягає свого максимального значення, при цьому їх найбільш рівномірний розподіл має місце при факелі довжиною  $L_n = 0,5 \dots 0,6$ .

Досягнення максимального теплопоглинання в нагрівальних печах лімітується вимогою забезпечення заданої якості нагріву металу, показники якого оцінюються температурою, рівномірністю і стандартністю нагріву. Температура і рівномірність нагріву характеризують досягнутий рівень температури поверхні і перепад температури між поверхнею і тепловим центром металу. Стандартність нагріву характеризує забезпечення ідентичності температури поверхні і рівномірності нагріву окремих заготовок садки нагрівається металу. Для кількісної характеристики впливу факела на умови теплообміну в робочому об'ємі печі використовували критерій нерівномірності розподілу теплових потоків  $K_q = q_{max}/q_{cp}$ , де  $q_{max}$ ,  $q_{cp}$  - відповідно (для факела певної довжини) максимальна і середня по поверхні садки нагрівається металу щільність результуючого теплового потоку. Якість нагріву металу оцінили критеріями  $\sigma_{1\Delta t}$  і  $\sigma_{2\Delta t}$ , де  $\sigma_{1\Delta t}$ ,  $\sigma_{2\Delta t}$  - середньоквадратичні відхилення від середнього значення відповідно різниць температури між показанням термоелектричного термометра і зональними температурами поверхні металу  $t_n$  і зональних перепадів температури між поверхнею  $t_n$  і тепловим центром садки нагрівається металу  $t_{ц}$ . Розрахункові дані про вплив довжини факела на якісні показники роботи печі представлені в таблиці 2.12.

Таблиця 2.12 - Якісні показники роботи камерної нагрівальної печі при спалюванні палива в факелах різної довжини

Величина	Відносна довжина шляху підсосу факела $L_n$							
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$K_q$	1,26	1,25	1,21	1,17	1,11	1,07	1,11	1,13
$\sigma_{1\Delta t}, ^\circ\text{C}$	45,00	40,10	31,00	22,40	18,40	22,50	29,30	34,40
$\sigma_{2\Delta t}, ^\circ\text{C}$	12,50	11,30	9,20	7,00	4,60	3,50	3,70	3,40

Як показують отримані результати:

1) залежність зміни критеріїв, що характеризують нерівномірний нагрів металу, від довжини факела має екстремальний характер;

2) в дослідженому інтервалі зміни параметра найбільшу нерівномірність нагріву зафіксували для факела мінімальної довжини;

3) при збільшенні довжини факела критерії нерівномірності нагріву монотонно зменшуються і досягають своїх мінімальних значень, коли  $L_n = 0,5 \dots 0,6$ ;

4) факел з відносною довжиною підсосу  $L_n > 0,6$  характеризується зростанням нерівномірності розподілу результуючих теплових потоків, що, в свою чергу, призводить до зниження якісних показників нагріву металу.

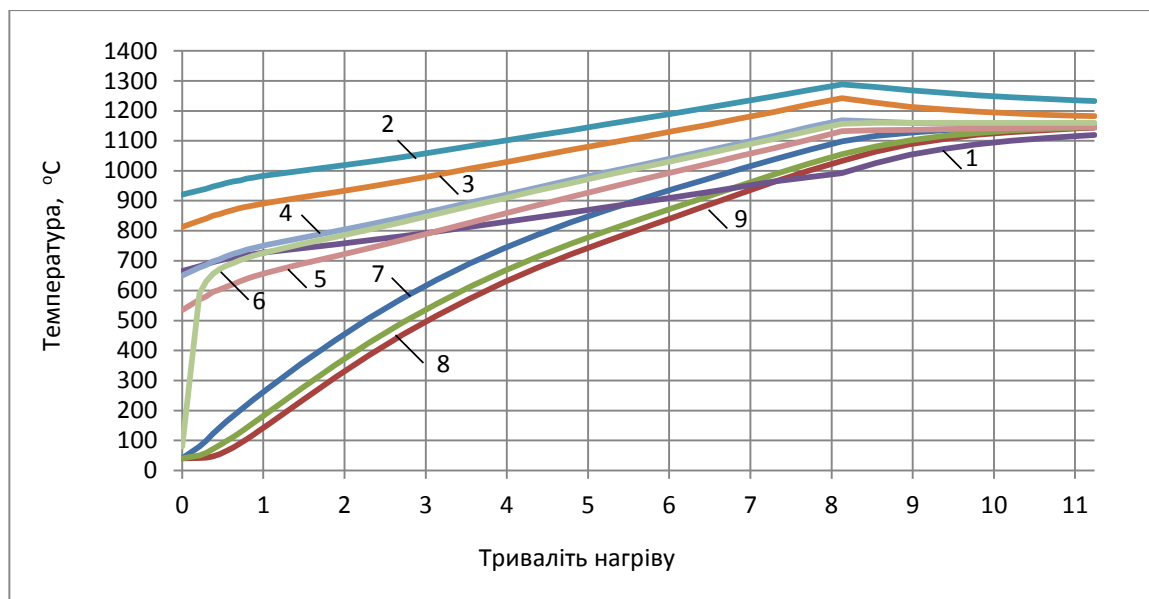
Оцінка результатів чисельного дослідження теплообміну в камерній нагрівальній печі з одностороннім бічним опаленням, дозволяє зробити наступний висновок: незважаючи на деяке зниження тепловіддачі (не більше 3% від максимально можливого рівня) для досягнення високої якості нагріву металу в печах даного типу найбільш кращою є система опалення, забезпечує спалювання палива в факелах з відносною довжиною підсосу  $L_n \approx 0,5$ .

Режим складається з двох періодів: періоду підйому температури печі та періоду витримки. Перший період нагріву реалізують при постійній витраті палива протягом 8,5 години: спостерігають монотонне збільшення, як температури металу, так і температури розрахункових газових зон при незмінному характері розподілу температури гріючого середовища по



довжині факела. Виняток становить перша розрахункова газова зона, де, крім спалювання палива, здійснюється підігрів до температури горіння всього обсягу палива і повітря, що подаються через пальники.

На рисунку 2.8 представлений розрахунковий температурний режим нагріву металу в камерному нагрівальній печі при спалюванні палива в факелі з  $L_n = 0,5$ .



1 - 5 - температура відповідних об'ємних газових зон; 6 - температура пічного термоелектричного перетворювача; 4 - середня по садке температура нагрівається металу; 7 - поверхні, 8 - середньо - вагова, 9 - теплового центру.

Рисунок 2.8 - Розрахунковий температурний режим нагріву металу в камерному нагрівальній печі.

Додаткові витрати тепла знижують швидкість зміни температури газу і сприяють зниженню рівня зональної температури по відношенню до інших газових зонам. Протягом періоду витримки печі система автоматичного регулювання реалізує підтримку показань пічного термоелектричного термометра на рівні заданого значення температури, що супроводжується безперервним зниженням витрати палива і, відповідно, зменшенням довжини факела. У період витримки металу спостерігається вирівнювання умов

тепловіддачі в робочому об'ємі печі, яке характеризується монотонним зниженням нерівномірності поля температури гріючого середовища.

Одним з напрямків підвищення якості нагріву металу є застосування імпульсного режиму опалення, заснованого на періодичній зміні процесів теплообміну в робочому об'ємі печі. Імпульсний режим опалення передбачає подачу постійної витрати палива в період підйому температури в печі та його імпульсну подачу в період витримки. Паливо подають в піч при зниженні температури до мінімально допустимого рівня і припиняють при її підвищенні до максимально допустимої температури. Тривалість подачі палива при імпульсному режимі опалення визначається автоматично: в початковий період витримки характеризується максимальною величиною, в кінці даного періоду має мінімальне значення.

Порівняльну оцінку якості нагріву металу при імпульсному і традиційному режимі опалення, що передбачає безперервне зміна витрати палива в період витримки печі, виробляли по завершенні періоду витримки однакової тривалості. При цьому для варіанта імпульсного опалення величину допустимого відхилення температури робочої камери печі ставили в діапазоні  $\pm 10$  °С. Розрахункові значення по зонам печі температури газу  $t_r$ , поверхні  $t_n$  і теплового центру нагрівається металу  $t_c$ , наведені в таблиці 2.13.

Аналіз представлених результатів показує, що імпульсна подача палива забезпечує ступеневу зміна довжини факела від максимального до мінімально допустимого значення, а, отже, дозволяє використовувати переваги довгого факела в період витримки печі. Наявність пульсуючого факела сприяє зниженню нерівномірності розподілу температури газового середовища в зонах печі і, відповідно, збільшення рівномірності розподілу теплових потоків по поверхні нагрівається металу.

Таблиця 2.13 - Розподіл температури при завершенні періоду витримки по зонам печі

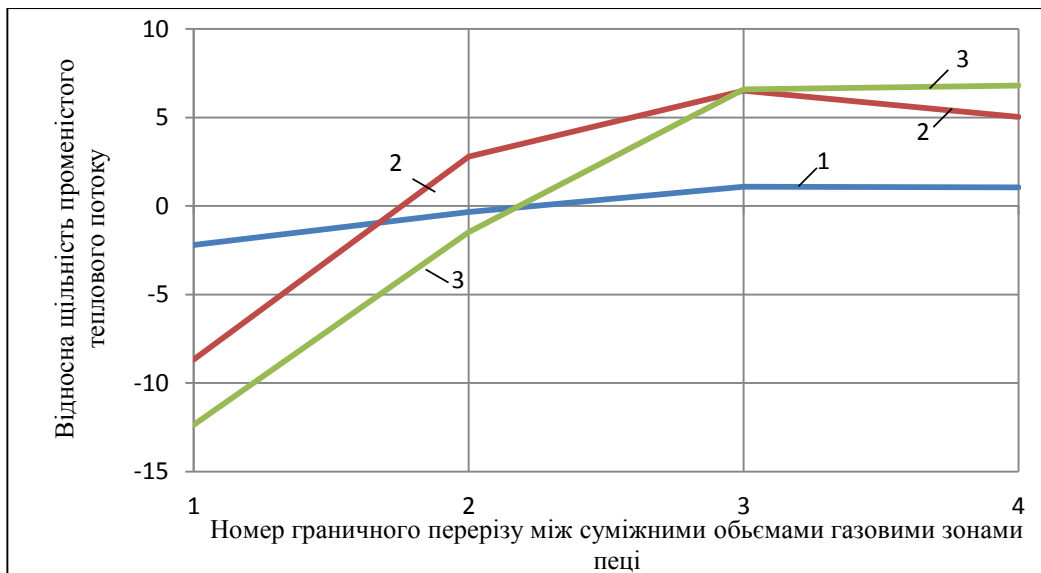
Параметри	Режим нагріву з безперервно змінюється витратою палива в період витримки печі					Режим нагріву з імпульсною подачею палива в період витримки печі				
	Номер зони					Номер зони				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
$t_z, ^\circ\text{C}$	1119	1233	1183	1155	1145	1109	1218	1197	1169	1155
$t_n, ^\circ\text{C}$	1145	1163	1157	1147	1140	1146	1162	1163	1155	1148
$t_y, ^\circ\text{C}$	1135	1157	1153	1141	1131	1137	1158	1159	1148	1139

Застосування імпульсного опалення підвищує температуру в останніх по ходу факела об'ємних газових зонах, що, незважаючи на збільшення втрат теплоти та відходять продуктами згоряння, сприяє збільшенню теплотасвоєння металу.

На завершальній стадії періоду витримки через значне зниження теплоспоживання металу відносний рівень променистих осьових результуючих теплових потоків істотно зростає. Однак при імпульсній подачі палива характер розподілу осьового випромінювання залишається незмінним.

У той же час, при безперервному зменшенні витрати палива в разі традиційного режиму опалення, зміна довжини факела і зміщення максимуму його температури супроводжується монотонним спотворенням поля випромінювання і зниженням рівномірності розподілу променистих осьових результуючих теплових потоків в робочому об'ємі печі.

При завершенні періоду підйому температури осьовий випромінювання в робочому об'ємі печі можна порівняти з тепловими потоками, що йдуть безпосередньо на нагрівання металу рисунку 2.9.



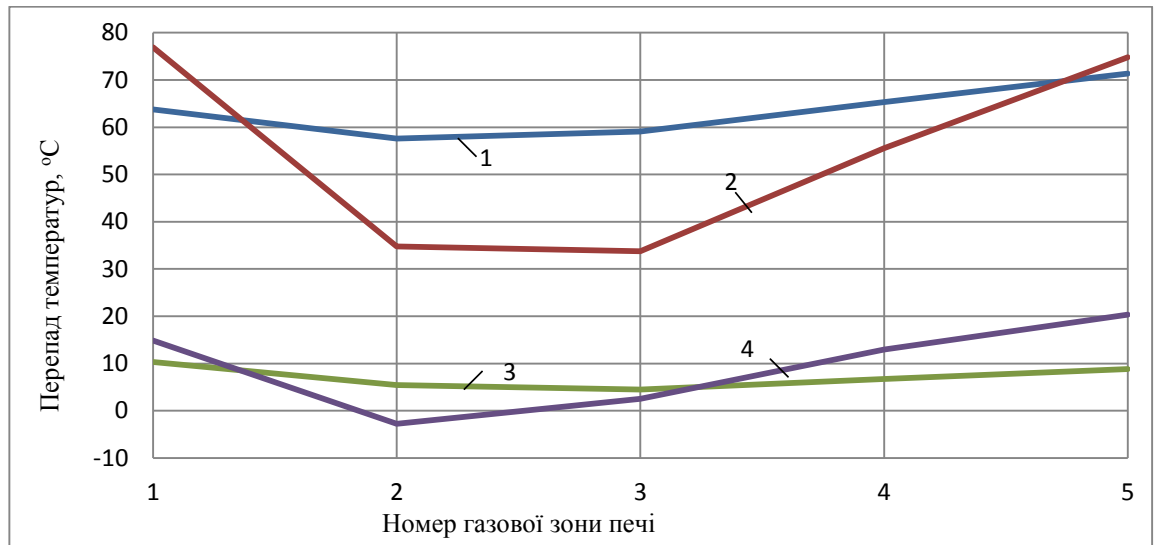
1 - завершення періоду підйому температури печі; 2 - завершення процесу нагріву при традиційному режимі опалення в період витримки; 3 - завершення процесу нагріву при імпульсному режимі опалення в період витримки.

Рисунок 2.9 - Зміна відносної щільності теплових потоків в робочому просторі камерної нагрівальної печі в напрямку руху газів, що горять.

При імпульсному режимі опалення характер зміни перепадів температури по зонах печі в кінці періоду витримки по відношенню до значення даних показників в момент завершення періоду підйому температури печі залишається незмінним. У той же час, при традиційному режимі опалення зменшення довжини факела на стадії витримки печі супроводжується зміщенням зони максимальної температури гріючого середовища до кореня факела і зниженням рівномірності поля випромінювання. Зниження рівня тепловіддачі в другій половині робочого простору печі знижує теплосвоєння металу і досягнутий рівень температури його поверхні.

Якісні показники нагріву металу оцінили за величиною перепадів температури по поверхні (різниці температур між показанням термоелектричного термометра і температурами поверхні металу  $t_n$  по зонам

печі) і по перетину нагрівається металу в об'ємних газових зонах печі (див.рис. 2.10).



1 - перепади температури по перетину металу при імпульсному опаленні; 2 - перепади температури по перетину металу при безперервній зміні витрати палива; 4 перепади температури при завершенні процесу нагріву для режиму з безперервною зміною витрат палива в період витримки; 3 - перепади температури при завершенні процесу нагріву для режиму з безперервною зміною витрат палива.

Рисунок 2.10 - Перепади температури по перерізу металу, що нагрівається в зонах печі.

Піставлення рівномірності нагріву металу в розглянутих випадках показує поліпшення якості нагріву при імпульсному режимі опалення печі: різниця температури на поверхні металу в момент видачі з печі не перевищує 12 °С, тоді як при традиційному режимі опалення досягає 20 °С (див. рис. 2.10).

## 2.7 Розрахунок теплового балансу печі, після модернізації

Одним з важливих показників паливо-використання в печі є коефіцієнт використання хімічної енергії палива, що показує, яка доля хімічної енергії палива залишається в робочому просторі печі.

Тепловий баланс камерної печі складається на весь період нагріву і витримки.

Нижче наводяться витратні статті теплового балансу.

Витрата тепла на нагрів металу, мДж

$$Q_M = E \cdot (i_{t_{cp}} - i_{t_0}),$$

$$Q_M = 49\,847 \cdot (863,36 - 8,92) = 40570,$$

де  $E = V_M \cdot \rho = 6,35 \cdot 7850 = 49847$  - маса садки кг;

$V_M = 6,35 \text{ м}^3$  – об'єм садки;

$i_{t_{cp}} (\text{при } 1300) = 863,36$  - тепломісткість металу, кДж/кг;

$i_{t_0} (\text{при } 20) = 8,92$  - тепломісткість металу, кДж/кг, [19].

### 2.7.1 Перший період

Середня температура внутрішньої поверхні футеровки за перший період,  $^{\circ}\text{C}$

$$t_{\phi} = \frac{t_{\phi 0} + t_{\phi 1} + t_{\phi 2} + t_{\phi 3}}{4},$$

$$t_{\phi} = \frac{468,444 + 608,047 + 1032 + 1309}{4} = 854,37,$$

де  $t_{\phi 0} = 468,4$  – температура футеровки на початку нагріву  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{\phi 1} = 608,05$  – температура футеровки в першому інтервалі нагріву,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{\phi 2} = 1030$  – температура футеровки в другому інтервалі нагріву,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{\phi 3} = 1309$  – температура футеровки в третьому інтервалі нагріву,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_B = 20$  – температура повітря повітря,  $^{\circ}\text{C}$ .

При двошаровій футеровці середня температура перетину кладки,  $^{\circ}\text{C}$

$$t_1 = \frac{t_{\phi} + t_B}{2} = \frac{854,37 + 20}{2} = 437,2.$$

Середня температура зовнішнього шару, °С

$$t_{\text{ср.ф.}}^1 = \frac{t_1 + t_{\text{ф}}}{2} = \frac{854,37 + 437,2}{2} = 645,5.$$

Середня температура внутрішнього шару, °С

$$t_{\text{ср.ф.}}^2 = \frac{t_1 + t_{\text{в}}}{2} = \frac{437 + 20}{2} = 229.$$

Два шари ізоляції.

Коефіцієнт теплопровідності керамоволокнистого матеріалу, Вт/(м · °С)

$$\lambda_1 = 0,0002 \cdot t_{\text{ср.ф.}}^1 + 0,020 = 0,0002 \cdot 645,5 + 0,020 = 0,1491.$$

Теплоємність керамоволокнистого матеріалу, кДж/(кг · °С)

$$C_1 = 0,87 + 2,1 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\text{ср.ф.}}^1 = 0,87 + 2,1 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 645,5 = 1,006.$$

Коефіцієнт теплопровідності базальтової плити, Вт/(м · °С)

$$\lambda_2 = 0,0328 + 0,0002 \cdot t_{\text{ср.ф.}}^2 = 0,0328 + 0,0002 \cdot 229 = 0,079.$$

Теплоємність базальтової плити, кДж/(кг · °С)

$$C_2 = 0,87 + 2,1 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\text{ср.ф.}}^2 = 0,87 + 2,1 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 229 = 0,918.$$

Приводимо двошарову футеровку до еквівалентної одношарової.

Еквівалентний коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м · °С)

$$\lambda_{\text{екв}} = \frac{\delta_{\text{загал.}}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}},$$

$$\lambda_{\text{екв}} = \frac{0,700}{\frac{0,450}{0,149} + \frac{0,250}{0,079}} = 0,113,$$

де  $\delta_1 = 0,45$  - товщина керамоволокнистого матеріалу, м;

$\delta_2 = 0,25$  - товщина базальтової плити, м.

Еквівалентна щільність, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_{\text{екв.}} = \frac{\delta_1 \cdot \rho_1 + \delta_2 \cdot \rho_2}{\delta_{\text{загал}}},$$

$$\rho_{\text{екв.}} = \frac{0,450 \cdot 128 + 0,250 \cdot 100}{0,700} = 118,$$

де  $\rho_1 = 128$  – щільність керамоволокнистого матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_2 = 100$  - щільність базальтової плити, кг/м<sup>3</sup>.

Еквівалентна теплоємність, кДж/(кг · °С)

$$C_{\text{екв.}} = \frac{\delta_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1 + \delta_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2}{\delta_{\text{загал}} \cdot \rho_{\text{екв.}}},$$

$$C_{\text{екв.}} = \frac{0,450 \cdot 128 \cdot 1,006 + 0,250 \cdot 100 \cdot 0,918}{0,700 \cdot 118} = 0,979.$$

Тепло акумульоване футеровкою, мДж

$$Q_{\text{ак.1}} = 0,75 \cdot (t_{\text{ф.з}} - t_{\text{ф.0}}) \cdot \sqrt{\lambda_{\text{екв.}} \cdot C_{\text{екв.}} \cdot \rho_{\text{екв.}} \cdot \tau_{\text{общ.1п.}}} \cdot F_{\text{фут.}},$$

$$Q_{\text{ак.1}} = 0,75 \cdot (1309 - 468,444) \cdot \sqrt{0,133 \cdot 979 \cdot 118 \cdot 69303} \cdot 62,504 = 1185,7,$$

Втрати тепла випромінюванням при посаді.

Розміри вікна:

- ширина  $b = 2,992 + 2 \cdot 70 = 3,123$  м;

- висота  $a = 2,336$  м;

- товщина футеровки  $L = 0,446$  м;

$$\frac{L}{a} = \frac{0,446}{2,336} = 0,191; \frac{a}{b} = \frac{2,336}{3,123} = 0,748;$$

Коефіцієнт діафрагмування  $\Phi = 0,85$ , [19].

Час посаду 8 заготівель  $= 10$  хв.  $= \tau_{\text{пос.}} = 600$  с.

Втрати випромінюванням при посаді металу, мДж

$$Q_{\text{пос}} = 5,67 \cdot \Phi \cdot \tau_{\text{пос.}} \cdot \left[ \left( \frac{t_{\text{г0}} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{\text{в}} + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot b \cdot a,$$



$$Q_{\text{пос.}} = 5,67 \cdot 0,85 \cdot 600 \cdot \left[ \left( \frac{510,5+273}{100} \right)^4 - \left( \frac{20+273}{100} \right)^4 \right] \cdot 3,123 \cdot 2,336 = 77,94.$$

Втрати випромінюванням при видачі металу, мДж

$$Q_{\text{вид.}} = 5,67 \cdot \Phi \cdot \tau_{\text{пос.}} \cdot \left[ \left( \frac{t_{r4}+273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{в}+273}{100} \right)^4 \right] \cdot b \cdot a ,$$

$$Q_{\text{вид.}} = 5,67 \cdot 0,85 \cdot 600 \cdot \left[ \left( \frac{1311+273}{100} \right)^4 - \left( \frac{20+273}{100} \right)^4 \right] \cdot 3,123 \cdot 2,336 = 13280.$$

Втрати тепла з вихідними газами, мДж

$$Q_{\text{вихід.}} = V_{\text{д}} \cdot C_{\text{д.}} \cdot t_{\text{д.}}^{\text{ср.}} \cdot V \cdot \tau_{\text{загал.}}$$

де  $t_{\text{д.ср.}}$  – тепловміст димових газів при середній температурі дима за період нагріву, °С

$$t_{\text{д.}}^{\text{ср.}} = \frac{t_{r0} + t_{r1} + t_{r2} + t_{r3} + t_{r4}}{5} ;$$

$$t_{\text{д.}}^{\text{ср.}} = \frac{510,5 + 677 + 1081 + 1345 + 1311}{5} = 985,1.$$

Коефіцієнт випромінювання димових газів, кДж/м<sup>3</sup>

$$C_{\text{д.}} (\text{при } 985) = \frac{(2,21 \cdot 8,6 + 1,71 \cdot 18,1 + 1,45 \cdot 1,7 + 1,39 \cdot 71,6)}{100} = 1,519,$$

де  $\tau_{\text{загал.}} = 81201$  – час нагріву за перший і другий період, с;

$$Q_{\text{вих.}} = 11,8 \cdot 1,519 \cdot 985,072 \cdot V \cdot 81201 = 1434,73 \cdot 10^6 \cdot V.$$

Втрати тепла теплопровідністю через стіни в першому періоді, мДж

$$Q_{\text{ст.}}^1 = \frac{t_{\phi} - t_{в}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_1}} \cdot F_{\text{фут.}} \cdot \tau_1,$$

$$Q_{\text{ст.}}^1 = \frac{857,47 - 20}{\frac{0,450}{0,149} + \frac{0,250}{0,079} + \frac{1}{16}} \cdot 62,504 \cdot 69303 = 577,2,$$

### 2.7.2 Другий період

Середня температура внутрішньої поверхні футеровки за другий період, °С

$$t_{\phi 2} = \frac{t_{\phi 3} + t_{\phi 4}}{2} = \frac{1309 + 1302}{2} = 1306,$$

де  $t_{\phi 4} = 1302$  – температура футеровки в другому періоді, °С.

При двошаровій футеровці середня температура перетину кладки, °С

$$t_1 = \frac{t_{\phi} + t_{\text{в}}}{2} = \frac{1306 + 20}{2} = 662,8.$$

Середня температура зовнішнього шару, °С

$$t_{\text{ср.ф.}}^1 = \frac{t_1 + t_{\phi}}{2} = \frac{1306 + 662,86}{2} = 984,3.$$

Середня температура внутрішнього шару, °С

$$t_{\text{ср.ф.}}^2 = \frac{t_1 + t_{\text{в}}}{2} = \frac{662,86 + 20}{2} = 341,4.$$

Два шари ізоляції.

Коефіцієнт теплопровідності керамоволокнистого матеріалу, Вт/(м · °С)

$$\lambda_1 = 0,0002 \cdot t_{\text{ср.ф.}}^1 + 0,020 = 0,0002 \cdot 984,295 + 0,020 = 0,217.$$

Теплоємність керамоволокнистого матеріалу, кДж/(кг · °С)

$$C_1 = 0,87 + 2,1 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\text{ср.ф.}}^1 = 0,87 + 2,1 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 984,295 = 1,077.$$

Коефіцієнт теплопровідності базальтової плити, Вт/(м · °С)

$$\lambda_2 = 0,0328 + 0,0002 \cdot t_{\text{ср.ф.}}^2 = 0,0328 + 0,0002 \cdot 341,43 = 0,101.$$

Теплоємність базальтової плити, кДж/(кг · °С)

$$C_2 = 0,87 + 2,1 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\text{ср.ф.}}^2 = 0,87 + 2,1 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 341,43 = 0,942.$$

Еквівалентний коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м · °С)

$$\lambda_{\text{екв}} = \frac{\delta_{\text{загал.}}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}},$$

$$\lambda_{\text{екв}} = \frac{0,700}{\frac{0,450}{0,217} + \frac{0,250}{0,101}} = 0,154,$$

де  $\delta_1 = 0,45$  - товщина керамоволокнистого матеріалу, м;

$\delta_2 = 0,25$  - товщина базальтової плити, м;

$\delta_{\text{загал.}} = 0,700$  - загальна товщина кладки, м.

Еквівалентна щільність, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_{\text{екв.}} = \frac{\delta_1 \cdot \rho_1 + \delta_2 \cdot \rho_2}{\delta_{\text{загал}}},$$

$$\rho_{\text{екв.}} = \frac{0,450 \cdot 128 + 0,250 \cdot 100}{0,700} = 118,$$

де  $\rho_1 = 128$  – щільність керамоволокнистого матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_2 = 100$  - щільність базальтової плити, кг/м<sup>3</sup>.

Еквівалентна теплоємність, кДж/(кг · °С)

$$C_{\text{екв.}} = \frac{\delta_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1 + \delta_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2}{\delta_{\text{загал.}} \cdot \rho_{\text{екв.}}},$$

$$C_{\text{екв.}} = \frac{0,450 \cdot 128 \cdot 1,077 + 0,250 \cdot 100 \cdot 0,941}{0,700 \cdot 118} = 1,036.$$

Тепло акумульоване футеровкою, мДж

$$Q_{\text{ак.2}} = 0,75 \cdot (t_{\text{кл 4}} - t_{\text{кл 3}}) \cdot \sqrt{\lambda_{\text{екв.}} \cdot C_{\text{екв.}} \cdot \rho_{\text{екв.}} \cdot \tau_{\text{общ.2п.}}} \cdot F_{\text{фут.}},$$

$$Q_{\text{ак.2}} = 0,75 \cdot (1302 - 1309) \cdot \sqrt{0,154 \cdot 1036 \cdot 118 \cdot 11898} \cdot 62,504 = -4,82,$$

де  $\tau_{\text{загал. 2 п}} = 11898$  - час нагріву за другий період, с;

$F_{\text{фут.}} = 62,504$  - площа стін футерування,  $\text{м}^2$ .

Втрати тепла теплопровідністю через стіни в другому періоді, мДж

$$Q_{\text{ст. 2}} = \frac{t_{\text{ф2}} - t_{\text{в}}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_1}} \cdot F_{\text{фут.}} \cdot \tau_{\text{загал. 2 п.}},$$

$$Q_{\text{ст. 2}} = \frac{1306 - 20}{\frac{0,45}{0,217} + \frac{0,250}{0,1} + \frac{1}{16}} \cdot 62,504 \cdot 11898 = 207,4,$$

де  $\alpha_1 = 16 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

Втрати тепла через зведення в першому періоді.

Приводимо двошарову футеровку до еквівалентної одношарової.

Еквівалентний коефіцієнт теплопровідності,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$

$$\lambda_{\text{екв}} = \frac{\delta_{\text{загал.}}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}},$$

$$\lambda_{\text{екв}} = \frac{0,700}{\frac{0,450}{0,149} + \frac{0,250}{0,079}} = 0,113,$$

де  $\delta_1 = 0,45$  - товщина керамоволокнистого матеріалу, м;

$\delta_2 = 0,25$  - товщина базальтової плити, м;

$\delta_{\text{загал.}} = 0,700$  - загальна товщина кладки, м;

$\lambda_1 = 0,149$  - коефіцієнт теплопровідності керамоволокнистого матеріалу,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ;

$\lambda_2 = 0,079$  - коефіцієнт теплопровідності базальтової плити,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ .

Еквівалентний коефіцієнт щільності,  $\text{кг}/\text{м}^3$

$$\rho_{\text{екв.}} = \frac{\delta_1 \cdot \rho_1 + \delta_2 \cdot \rho_2}{\delta_{\text{загал.}}},$$

$$\rho_{\text{екв.}} = \frac{0,450 \cdot 128 + 0,250 \cdot 100}{0,700} = 118.$$

Еквівалентний коефіцієнт теплоємності, кДж/(кг · °С)

$$C_{\text{эқв.}} = \frac{\delta_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1 + \delta_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2}{\delta_{\text{загал.}} \cdot \rho_{\text{эқв.}}},$$

$$C_{\text{эқв.}} = \frac{0,450 \cdot 128 \cdot 1,006 + 0,250 \cdot 100 \cdot 0,918}{0,700 \cdot 118} = 0,979,$$

де  $C_1 = 1,006$  – теплоємність вогнетривкого керамоволокнистого матеріалу, кДж/ (кг · °С);

$C_2 = 0,918$ - теплоємність базальтової плити, кДж/(кг · °С).

Тепло акумульоване футеровкою, мДж

$$Q_{\text{ак.1}} = 0,75 \cdot (t_{\text{ф3}} - t_{\text{ф0}}) \cdot \sqrt{\lambda_{\text{эқв.}} \cdot C_{\text{эқв.}} \cdot \rho_{\text{эқв.}} \cdot \tau_{\text{загал.1п.}}} \cdot F_{\text{звед.}},$$

$$Q_{\text{ак.1}} = 0,75 \cdot (1309 - 468,444) \cdot \sqrt{0,113 \cdot 979 \cdot 118 \cdot 69303} \cdot 21 = 398.19,$$

де  $\tau_{\text{загал.1п}} = 69303$ - час за період, с.

Втрати тепла теплопровідністю через зведення в першому періоді, мДж

$$Q_{\text{звед.}}^1 = \frac{t_{\text{ф}} - t_{\text{в}}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_1}} \cdot F_{\text{звед.}} \cdot \tau_{\text{загал.2п}},$$

$$Q_{\text{звед.}}^1 = \frac{854,47 - 20}{\frac{0,450}{0,149} + \frac{0,250}{0,079} + \frac{1}{16}} \cdot 21 \cdot 69303 = 194.4,$$

де  $\alpha_1 = 16$  Вт/(м<sup>2</sup> · °С).

Втрати тепла через зведення в другому періоді.

Середня температура внутрішньої поверхні футеровки за другий період, °С

$$t_{\text{ф2}} = \frac{t_{\text{ф3}} + t_{\text{ф4}}}{2} = \frac{1306 + 1302}{2} = 1306,$$

де  $t_{\text{ф4}}$  – температура футеровки в другому періоді, °С.

При двошаровій футеровці середня температура перетину кладки, °С

$$t_1 = \frac{t_{\phi} + t_{\text{в}}}{2} = \frac{1306 + 20}{2} = 662,8.$$

Середня температура зовнішнього шару, °С

$$t_{\text{ср.ф.}}^1 = \frac{t_1 + t_{\phi}}{2} = \frac{1306 + 662,86}{2} = 984,3.$$

Середня температура внутрішнього шару, °С

$$t_{\text{ср.ф.}}^2 = \frac{t_1 + t_{\text{в}}}{2} = \frac{662,86 + 20}{2} = 341,4.$$

Два шари ізоляції.

Коефіцієнт теплопровідності керамоволокнистого матеріалу, Вт/(м · °С)

$$\lambda_1 = 0,0002 \cdot t_{\text{ср.ф.}}^1 + 0,020 = 0,0002 \cdot 984,295 + 0,020 = 0,217.$$

Теплоємність керамоволокнистого матеріалу, кДж/(кг · °С)

$$C_1 = 0,87 + 2,1 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\text{ср.ф.}}^1 = 0,87 + 2,1 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 984,295 = 1,077.$$

Коефіцієнт теплопровідності базальтової плити, Вт/(м · °С)

$$\lambda_2 = 0,0328 + 0,0002 \cdot t_{\text{ср.ф.}}^2 = 0,0328 + 0,0002 \cdot 341,43 = 0,101.$$

Теплоємність базальтової плити, кДж/(кг · °С)

$$C_2 = 0,87 + 2,1 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot t_{\text{ср.ф.}}^2 = 0,87 + 2,1 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 341,43 = 0,942.$$

Приводимо двошарову футеровку до еквівалентної одношарової.

Еквівалентний коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м · °С)

$$\lambda_{\text{екв}} = \frac{\delta_{\text{загал.}}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}},$$

$$\lambda_{\text{екв}} = \frac{0,700}{\frac{0,450}{0,217} + \frac{0,250}{0,101}} = 0,154,$$

де  $\delta_1 = 0,45$  - товщина керамоволокнистого матеріалу, м;

$\delta_2 = 0,25$  - товщина базальтової плити, м;

$\delta_{\text{загал.}} = 0,700$  - загальна товщина кладки, м.

Еквівалентна щільність, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_{\text{екв.}} = \frac{\delta_1 \cdot \rho_1 + \delta_2 \cdot \rho_2}{\delta_{\text{загал.}}},$$

$$\rho_{\text{екв.}} = \frac{0,450 \cdot 128 + 0,250 \cdot 100}{0,700} = 118,$$

де  $\rho_1 = 128$  – щільність керамоволокнистого матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_2 = 100$  - щільність базальтової плити, кг/м<sup>3</sup>.

Еквівалентна теплоємність, кДж/(кг · °С)

$$C_{\text{екв.}} = \frac{\delta_1 \cdot \rho_1 \cdot C_1 + \delta_2 \cdot \rho_2 \cdot C_2}{\delta_{\text{загал.}} \cdot \rho_{\text{екв.}}},$$

$$C_{\text{екв.}} = \frac{0,450 \cdot 128 \cdot 1,077 + 0,250 \cdot 100 \cdot 0,942}{0,700 \cdot 118} = 1,036.$$

Тепло акумульоване футеровкою, мДж

$$Q_{\text{ак.2}} = 0,75 \cdot (t_{\text{ф.4}} - t_{\text{ф.3}}) \cdot \sqrt{\lambda_{\text{екв.}} \cdot C_{\text{екв.}} \cdot \rho_{\text{екв.}} \cdot \tau_{\text{загал.2п.}}} \cdot F_{\text{звед.}},$$

$$Q_{\text{ак.2}} = 0,75 \cdot (1302 - 1309) \cdot \sqrt{0,154 \cdot 1036 \cdot 118 \cdot 11898} \cdot 21 = -1,618,$$

де  $\tau_{\text{заг. 2 п}} = 11898$  - час нагріву за другий період, с;

$F_{\text{звед.}} = 21$  - площа зведень, м<sup>2</sup>.

Втрати тепла теплопровідністю через зведення в другому періоді, мДж

$$Q_{\text{звед.}}^2 = \frac{t_{\text{ф.2}} - t_{\text{в}}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_1}} \cdot F_{\text{звед.}} \cdot \tau_{\text{загал. 2п.}},$$

$$Q_{\text{звед.}}^2 = \frac{1306 - 20}{\frac{0,45}{0,217} + \frac{0,25}{0,101} + \frac{1}{16}} \cdot 21 \cdot 11898 = 69,68,$$

де  $\alpha_1 = 16$  Вт/(м<sup>2</sup> · °С).

Початкові дані теплових втрат за 1 і 2 період зведені в таблицю 2.14.

Таблиця 2.14 - Теплові втрати теплопровідністю за 1 і 2 період.

Кладка	1 період	2 період
Стіни	$Q_{ак.} = 1185.7$ мДж	$Q_{ак.2} = -4.817$ мДж
	$Q_{ст.}^1 = 577.2$ мДж	$Q_{ст.}^2 = 207.8$ мДж
Зведення	$Q_{ак.} = 398,19$ мДж	$Q_{ак.} = -1,618$ мДж
	$Q_{звед.}^1 = 194,4$ мДж	$Q_{звед.}^2 = 69,68$ мДж

$Q_{вихід.} = 1434 \cdot 10^6$  - втрати тепла с відхідними газами, мДж;

$Q_{випром.} = 316,44$  - втрати тепла від випромінювання, мДж.

Сумарні втрати тепла теплопровідністю, мДж

$$Q_{тепл.} = Q_{ст.}^1 + Q_{ст.}^2 + Q_{звед.}^1 + Q_{звед.}^2,$$

$$Q_{тепл.} = 580,68 + 206,28 + 194,4 + 69,68 = 1048.$$

Загальні втрати тепла і витрата тепла на акумуляцію, мДж

$$\Sigma Q_{втр.} = Q_{ак.загал.} + Q_{випр.} + Q_{тепл.} \cdot V,$$

$$\Sigma Q_{втр.} = 1577 + 1406 + 1048 \cdot V = 40311 \cdot V,$$

де  $V$  – витрата палива,  $m^3/c$ .

Загальні витрата тепла на акумуляцію, мДж

$$Q_{ак.загал.} = Q_{ак1.} + Q_{ак2.} + Q_{ак1зв.} + Q_{ак2зв.} = 1577.$$

Нижче наводяться прибуткові статті теплового балансу.

Хімічне тепло палива, мДж

$$Q_{хим.} = Q_{н.р.} \cdot \tau_{загал.} = 36,6 \cdot V \cdot 81201 = 2972180 \cdot V.$$

Фізичне тепло повітря при  $t_{в} = 250$  °С, мДж

$$Q_{физ.пов.} = V_{п.} \cdot C_{п.} \cdot t_{п.} \cdot V \cdot \tau_{загал.},$$



$$Q_{\text{физ.пов.}} = 10,681 \cdot 1,315 \cdot 250 \cdot 81201 \cdot V = 285127 \cdot V,$$

де  $t_v = 250$  – температура підігрітого повітря,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$C_v$  (при  $250^{\circ}\text{C}$ ) = 1,315 - теплоємність повітря,  $\text{кДж}/\text{м}^3$ .

Фізичне тепло димових газів при  $t_v = 985^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{мДж}$

$$Q_{\text{физ.дим.}} = L_d \cdot C_d \cdot t_d \cdot V \cdot \tau_{\text{загал.}},$$

$$Q_{\text{физ.пов.}} = 11,8 \cdot 1,519 \cdot 985,072 \cdot V \cdot 81201 = 1434 \cdot 10^6 \cdot V,$$

де  $t_d = 985,072$  – середня температуру димових газів,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$C_d$  (при  $985^{\circ}\text{C}$ ) = 1,519 - теплоємність димових газів,  $\text{кДж}/\text{м}^3$ .

Прирівнюючи прибуткові статті і витратні теплового балансу, визначаємо середнє часову витрату палива,  $\text{м}^3/\text{с}$

$$V = \frac{Q_{\text{втр.}} + Q_{\text{м}}}{Q_{\text{хим.}} + Q_{\text{повит.}} - Q_{\text{ух.}}} = 0,024,$$

де  $V = 0,024 \text{ м}^3/\text{с} = 88,081 \text{ м}^3/\text{год.}$

Непогодження балансу печі, %

$$\frac{79690 - 79691}{79690} \cdot 100 = 0,0012.$$

Коефіцієнт використання палива при  $t_{\text{ср.ух.д}} = 985^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{кДж}/\text{м}^3$

$$Q_{\text{физ. в}} = L_d \cdot C_0^{\text{тв.}} \cdot t_v,$$

$$Q_{\text{физ. в}} = 10,681 \cdot 1,315 \cdot 250 = 3511.$$

Тепловий баланс печі зведений в таблицю 2.15

Таблиця 2.15 - Тепловий баланс печі після заміни футерування.

Стаття	Прихід тепла		Стаття	Витрата тепла	
	мДж за два періоди	%		мДж за два періоди	%
Тепло відгоріння палива $2972000 \cdot 0,024 =$	72720	91,25	Тепло засвоєне металом.	40570	51,5
Фізичне тепло повітря $285127 \cdot 0,024 =$			6976		
			Тепло з акумульоване кладкою печі.	1577	1,97
			Втрати тепла випромінюванням.	1406	1,76
			Втрати газами тепла з, відхідними газами $143400 \cdot 0,024 =$	35090	44,0
Разом	79690	100	Разом	79691	100

### 2.7.3 Теплова потужність і витрата палива

Коефіцієнт використання палива при  $t_{\text{ср.ух.д}} = 985 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{кДж/м}^3$

$$Q_{\text{физ. в}} = L_{\text{д}} \cdot C_0^{\text{тв}} \cdot t_{\text{в}},$$

$$Q_{\text{физ. в}} = 10,681 \cdot 1,315 \cdot 250 = 3511,$$

де  $C_0^{\text{тв}}$  (при  $250^{\circ}\text{C}$ ) = 1,315 - теплоємність повітря,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$ .

Фізичне тепло димових газів,  $\text{кДж/м}^3$

$$Q_{\text{д. вих.}} = V_{\text{д}} \cdot C_{\text{д}}^{985} \cdot t_{\text{д. ср.}},$$

$$Q_{\text{д. вих.}} = 11,8 \cdot 1,519 \cdot 985,072 = 17656,6.$$

Коефіцієнт використання хімічної енергії палива,  $\text{кДж/м}^3$

$$\eta = \frac{Q_{\text{р}}^{\text{н}} + Q_{\text{физ. в}} - Q_{\text{д. вих.}}}{Q_{\text{р}}^{\text{н}}},$$

$$\eta = \frac{36603 + 3511,4 - 17656,6}{36603} = 0,614.$$

Засвоєна теплова потужність, кВт

$$M_{\text{засв.}} = \frac{Q_{\text{м}}}{\tau_{\text{загал.}}} = \frac{40570000}{81201} = 499,62.$$

Корисна теплова потужність (середня), кВт

$$M_{\text{кор.ср.}} = \frac{M_{\text{засв.}}}{\eta_{\text{ср.}}} = \frac{499620}{0,614} = 814,3.$$

Потужність холостого ходу (середня), кВт

$$M_{\text{х.х. ср.}} = \frac{Q_{\text{втр.}}}{\tau_{\text{загал.}} \cdot \eta_{\text{ср.}}} = \frac{40310}{81201 \cdot 0,614} = 80,84.$$

Загальна теплова потужність, кВт

$$M_{\text{загал. ср.}} = M_{\text{кор.ср.}} + M_{\text{х.х. ср.}}$$

$$M_{\text{загал. ср.}} = 814,3 + 80,84 = 895,14.$$

Середньо годинна витрата палива

$$V_{\text{ср.}} = \frac{M_{\text{загал.ср.}}}{Q_{\text{р}}^{\text{н}}} = \frac{895140}{366030000} = 0,02445 \text{ м}^3/\text{с} = 82,5 \text{ м}^3/\text{ГОД}.$$

Витрата тепла на одну тону металу (середній), мДж/т

$$q = \frac{M_{\text{загал.ср.}}}{E_{\text{слит.}}} = \frac{895140}{49.847} = 17958.$$

Витрата умовного палива, кг/тон

$$V_{\text{усл.}} = \frac{q}{\text{умов.паливо}} = \frac{17\,958}{29,3} = 613,$$

де 29,3 – теплота згорання умовного палива, мДж/кг.

Коефіцієнт корисної дії печі, %

$$\eta = \frac{M_{\text{усв.}}}{M_{\text{загал.ср.}}} \cdot 100 = \frac{499,62}{895,14} \cdot 100 = 58,41.$$

## 2.8 Аналіз теплової роботи печі після запропанованих модернізій

Аналіз теплової роботи модернізованої печі (див. рис. 2.7- 2.10) показав, що запропоновані технічні рішення дозволяють значно покращити показники роботи печі:

Результати розрахунку теплового балансу за весь період нагрівання в камерної нагрівательной печі з викатним подом зведені в таблицю 2.16

Таблиця 2.16 - Тепловий баланс за весь період нагрівання

	$Q_{\text{мет.}}$ мДж/%	$Q_{\text{від.газ}}$ мДж/%	$Q_{\text{ак}}$ мДж/%	$Q_{\text{тепл.}}$ мДж/%	$Q_{\text{общ}}$ мДж/%	Час роботи печі, год	Витрата м <sup>3</sup> /год	ККД печі, %
Тепловий баланс печі до модернізованя	40570/ 41,04	43520/44 ,03	9610/9,7 2	3728/3,7 7	98834/10 0	13,53	109,1	45
Тепловий баланс печі після модернізованя	40570/ 51,5	35090/44	1577/1,9 7	1048/1,3 1	79691/10 0	8,43	82,5	58,41

1. При розігріві печі з холодного стану до робочої температури витрата природного газу знизити середньо – годину витрату палива на 19 %, при цьому час виходу печі на робочу температуру скорочується на 5,5 годин.

2. При нагріві металу в розігрійтій печі витрата природного газу скорочується від 109,1 до 82.5 м<sup>3</sup>/год, при незмінній тривалості нагріву.

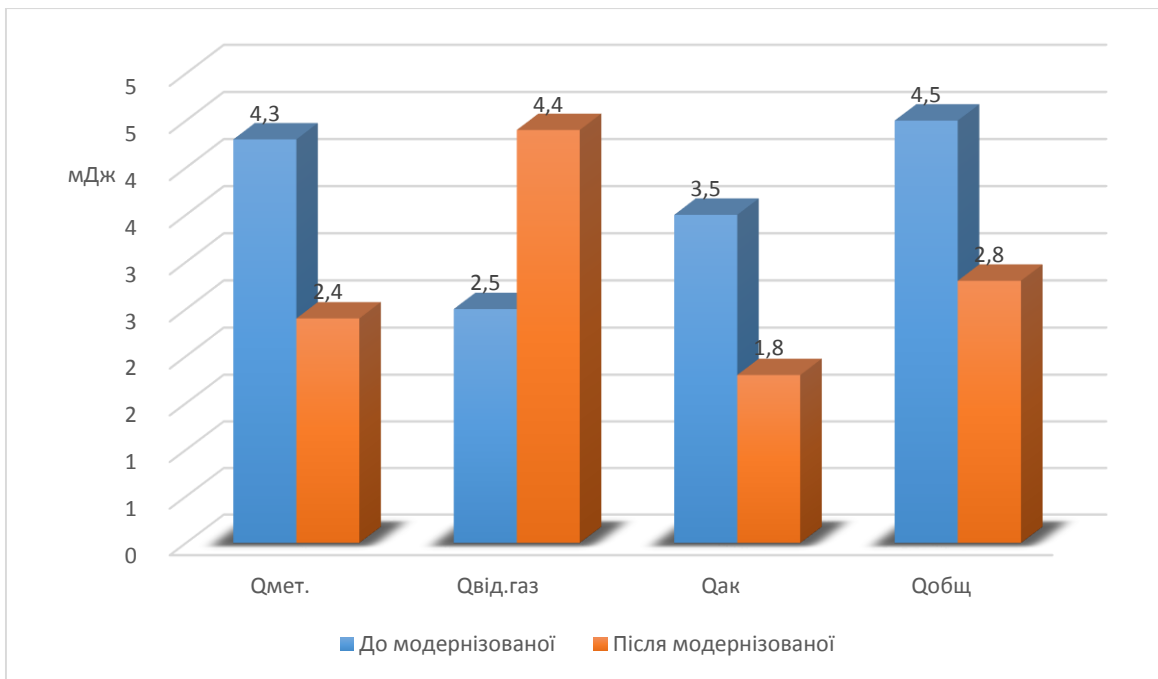


Рисунок 2.7 - Тепловий баланс печі до та після модернізації.

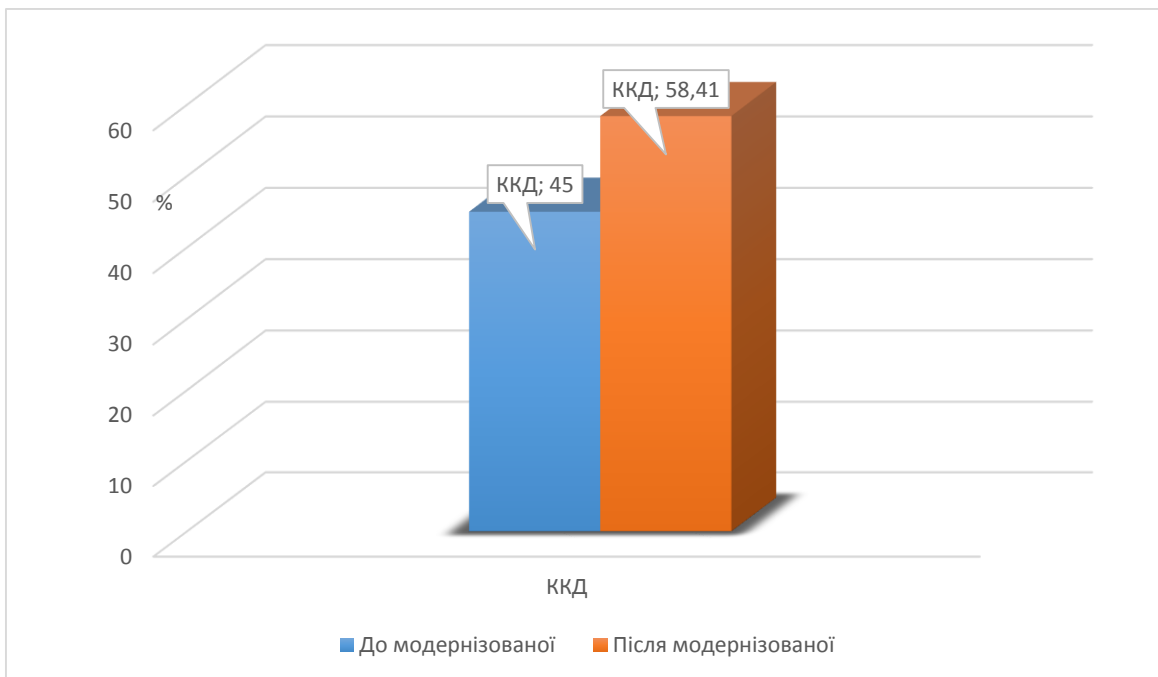


Рисунок 2.8 - Коефіцієнт корисної дії печі до та після модернізації.

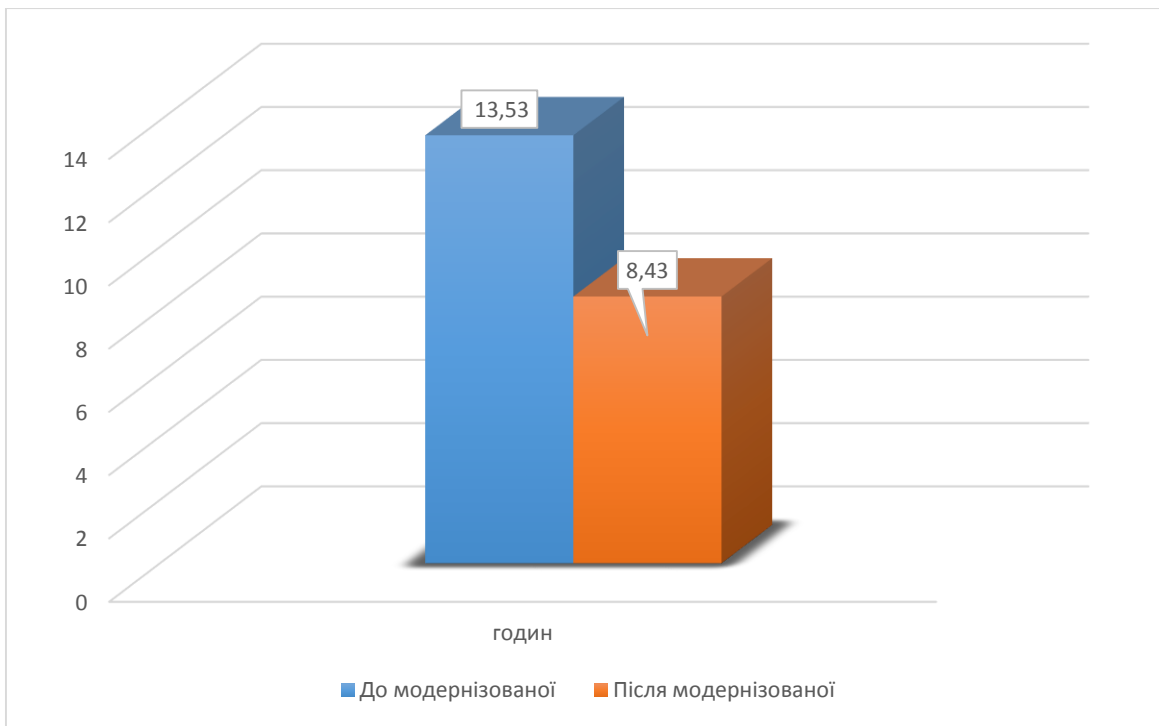


Рисунок 2.9 - Час роботи печі за весь період нагріву.

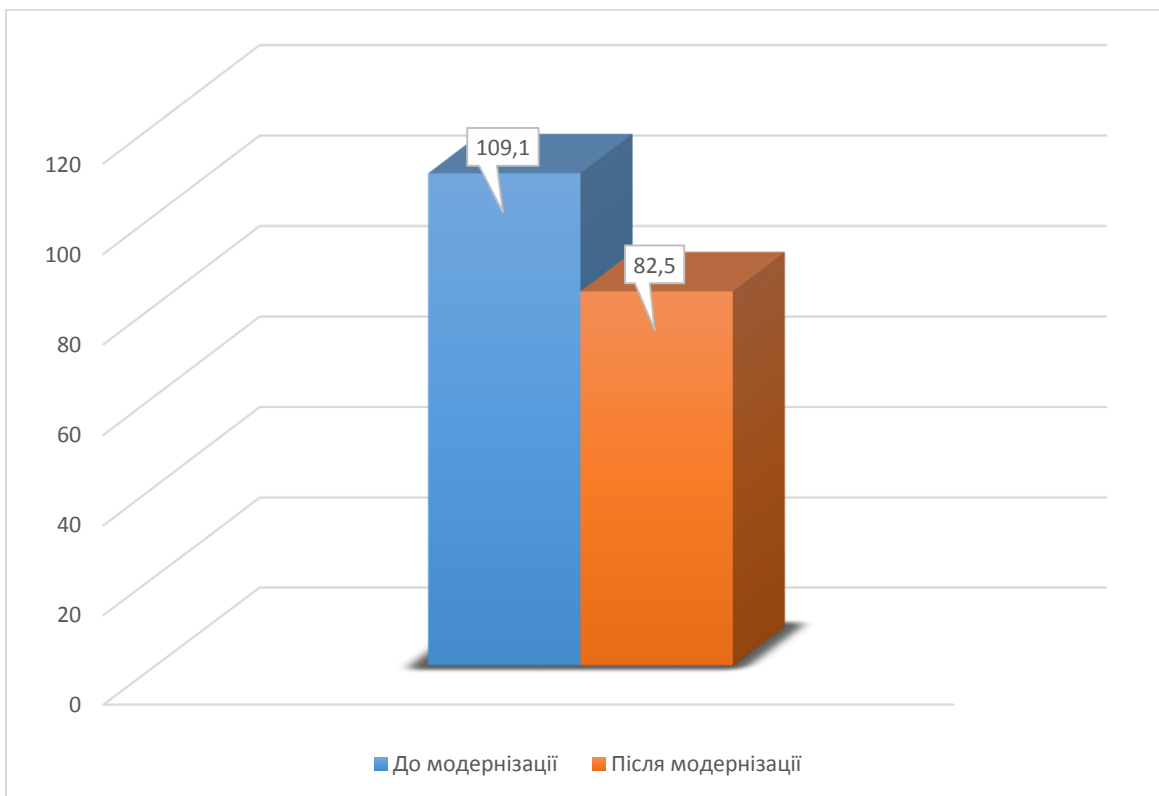


Рисунок 2.10 - Витрата палива на нагрів металу м³/год.

## 2.9 Система автоматизації печі

Об'єктом автоматизації є нагрівальна камерна піч. Після впровадження системи в камерну піч повинна відповідати таким основним показникам роботи:

- пуск, розігрів, нагрів за обраною програмою з заздалегідь заданою швидкістю підйом температури зі швидкістю 60 °С/год до 1160 °С, витримуючи перепад температур по пічним термопар не більше 10 °С в межах температур від 400 до 1300 °С;

- витримка в часі при заданій температурі від 400 до 1300 °С, зберігаючи різницю показань температур по пічним і гнучким (на виробі) термопар не більше 10 °С;

- автоматичний режим роботи процесу нагріву за заданою програмою;

- підтримка заданої температури в зонах печі;

- управління роботою вентилятора і димососа;

- автоматичний запис і архівування всіх параметрів роботи печі;

- забезпечення безпечної і безаварійної роботи печі.

Піч умовно розділена на три віртуальні зони теплового регулювання. Опалюється природним газом за допомогою швидкісних пальників типу ZIO виробництва фірми «Elster Kromschroeder». У кожній умовній зоні печі встановлено по дві термопари: термопара (основна), за показаннями якої відбувається регулювання і контрольна термопара. При виході з ладу основний термопари регулювання триває за показаннями контрольної термопари до тих пір, поки не буде замінена основна термопара.

Пальники встановлені на бічних стінках печі в один ярус по висоті. У кожній зоні печі встановлено по два пальники. Природний газ надходить до печі через пічної вузол безпеки від цехового газопроводу.

Повітря на горіння подається від вентилятора, частота обертання робочого колеса якого регулюється частотним перетворювачем, підтримуючи задану оператором тиск повітря в трубопроводі. Після

вентилятора по ходу повітря є запірні арматури з електричним приводом. Управління роботою приводу запірної арматури проводиться з загального пульта керування піччю. Підігрів повітря, що подається на горіння, здійснюється в загальному рекуператорі за межами печі.

Видалення продуктів згоряння здійснюється димососом і димарем. Підтримує заданий температурного режиму в печі здійснюється зміною часу між включеннями пальників і тривалістю їх роботи (імпульсний режим).

Оператор повинен мати можливість ввести в пам'ять системи всі необхідні технологічні режими, що визначають часові та температурні характеристики.

Управління приводами пода печі і заслінки має здійснюється з місцевого пульта управління (розташування місцевого пульта управління має бути узгоджено), для заслінки печі використовується пристрій плавного пуску, для пода - частотний перетворювач.

Щоб уникнути пошкодження елементів печі при русі пода необхідно в системі застосувати 3 датчики кінцевого положення. Перший буде визначати момент зниження швидкості руху поду в піч (швидкість руху регулюється частотним перетворювачем), другий визначає момент припинення руху поду в піч, а третій датчик визначає крайнє положення викочування пода поза печі.

Положення (піднята або опущена) заслінки печі визначається двома датчиками положення.

Крім того, система повинна визначати такі параметри:

- положення поду (в печі, за межами печі);
- положення заслінки печі (опущена, піднята);
- робота кожного пальника (включена, вимкнена);
- положення елементів в обв'язки кожного пальника (відкритий, закритий);
- стан вентиляторів і димососа (включений, вимкнений).



Таблиця 2.17 - Вимірювані параметри роботи печі

	Найменування параметру	Єдиниця вимірювання	Мінімальне значення	Максимальне значення	Похибка вимірювання
1	2	3	4	5	6
1	Температура печі у всіх зонах печі	°С	20	1300	0,5%
2	Тиск газу перед печью	кПа	2,0	200	0,5%
	Тиск повітря перед печью	кПа	7,0	10,0	0,5%
4	Витрата природного газу	м <sup>3</sup> /год	0	245	0,5%
5	Витрати повітря (в режимі нагрівання садки)	м <sup>3</sup> /год	0	2900	6
6	Тиск в печі	Па	0	50	0,5%
7	Температура продуктів горіння перед димососом	°С	0	200	0,5%
8	Положення исполнительных х механизмов	%	0	100	0,5%
9	Температура підігріву повітря	°С	0	450	0,5%
10	Наявність факела на кожній пальнику		є	нема	
11	Частота обертання робочого колеса вентилятора	об/хв.	0	3000	0,5%

Датчики вимірювання витрати, встановити на горизонтальних або вертикальних ділянках трубопроводів. Для забезпечення заданих метрологічних характеристик, необхідно витримати прямі ділянки трубопроводів до і після датчиків витрати, згідно технічного опису по монтажу приладів приведені в додатку Г.

Для забезпечення заданих меж вимірювання датчиків витрати, використовувати звуження трубопроводів.

Для забезпечення проведення ремонтних і повірочних робіт, передбачити можливість відключення ділянок трубопроводів з датчиками, запірною арматурою.

Для установки датчиків тиску використовуват стандартні відбірні пристрої з кульковимикраномі або клапан блоком.

Шафа управління з контролером встановити біля печі в цеху. Степень захисту шафи управління НЕ менше IP 54

У місцях установки датчиків повинні забезпечуватися умови експлуатації відповідно до технічних вимог для кожного приладу.

Електроживлення системи повинно здійснюватися від одно / трифазної мережі змінного струму 220/380 В 50 Гц. Якість електроенергії повинно відповідати ГОСТ 13109-97. Напруга має бути взято від точок, до яких не підключено Потужнострумові обладнання, що створює перешкоди в мережі. Додатково шафа управління системою обладнати джерелом безперебійного живлення.

Прилади знаходяться на трубопроводах, повинні живитися напругою 24 В DC.

При організації електроживлення використовувати 5-дротову схему електроживлення з організацією нульового захисного провідника (Pe).

Каркаси і інші нетоковедущие металеві конструкції шаф повинні бути заземлені (занулені) відповідно до ПУЕ та Інструкцією з улаштування мереж заземлення та занулення в електроустановках.

До місця установки датчиків, вимірювальним блокам, блокам управління, повинна бути підведена магістраль заземлення з опором не більше 4 Ом.

Умови, при яких допускається експлуатація приладів температура навколишнього повітря (-10 до + 50 °С) для обладнання системи управління (- 0 .. + 30 °С), для АРМ - приміщення офісного типу(+10 .. + 25 °С).

Відносна вологість повітря 90% при температурі 25 °С, без утворення конденсату.

## 3 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ І ОХОРОНА ПРАЦІ

### 3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Цех КПЦ ПрАТ «Дніпроспецсталь» є зоною підвищеної небезпеки. До небезпечних чинників кузнечно-пресового виробництва відносять: наявність розжарених матеріалів, рухомих машин і механізмів, рухомих деталей устаткування і так далі. Тут виконуються такі роботи, включені в список робіт з підвищеною небезпекою: обслуговування нагрівальних печей, що працюють на газоподібному паливі, ножиць та інші.

Нагрівальні печі опалюються природним газом. При попаданні в повітря газоподібного палива утворюється вибухо небезпечна суміш.

Не можна виключити попадання оксиду вуглецю в повітря робочої зони при неповному згоранні палива і надмірному тиску в печі. Це загрожує гострим отруєнням персоналу.

Основними чинниками небезпеки безпосередньо при плющенні металу є порушення режиму плющення, що викликаються поломками або несправністю пресів, зажимних пристроїв, що направляють дрот і ін. Додатковими чинниками небезпеки є температура нагріву металу, швидкість його охолодження при зміні геометричних розмірів під час плющення і так далі.

При різанні металу на ножицях небезпечними є локальні зони рухомих частин механізму, що обертаються. Площа небезпечної зони різко збільшується при різанні металу дисковими пилами.

Наявність і інтенсивність тих або інших шкідливих виробничих чинників в кузнечно-пресовому цеху залежить від ділянки. На ділянці нагрівальних печей основними шкідливими чинниками інфрачервоне випромінювання і висока температура повітря. У теплий період року температура повітря в робочій зоні досягає 35 °С .

Потенційно небезпечні виробничі чинники устаткування кузнечно-пресового цеху зведені в таблиці 3.1

Таблиця 3.1 - Потенційно небезпечні виробничі чинники і у цеху КПЦ.

Устаткування	Небезпечні чинники	Можливі події	Заходи захисту
Нагрівальні печі	Висока температура повітря Загазованість  Нагріті заготовки в зоні вивантаження	Тепловий удар  Гостре отруєння  Опіки, механічні травми	Вентиляція, теплоізоляція Дотримання режиму горіння Автоматизація, огорожі
Подаючий механізм	Рухомі ролики	Механічні травми	Огорожі
Цех КПЦ	Механізми, що обертаються,  Рухомі заготовки  Висока температура повітря, інфрачервоне випромінювання  Електричний струм	Опіки, механ.трав  Механіч. травми  Тепловий удар  Електричний удар, місцеві електротравми	Огорожі  Огорожі,борти  Теплоізоляція кабіни оператора, вентиляція або кондиціонування  Електроізоляція, занулення.
Дискова пила	Відлітаючі іскри, частинки металу	Механічні травми	Автоматизація, огорожі
Кантувальник	Рухомі частини	Механічні травми	Механізація, огорожі
Мостовий кран	Переміщувані маси металу	Механічні травми	Дотримання правил транспортування вантажів краном

Інтенсивність теплового випромінювання максимальна в періоди посадки і видачі злитків і досягає 3500 Вт/м<sup>2</sup>. У разі неправильної організації горіння палива в робочу зону може потрапляти продукт неповного згорання оксид вуглецю СО. Потрапляючи в організм людини, СО реагує з гемоглобіном, утворюючи карбоксигемоглобін. При цьому різко знижується здатність крові переносити кисень до тканин, може наступити кисневе голодування. Симптоми отруєння: сонливість, головний біль, у важких

випадках втрата свідомості. ГДК оксиду вуглецю для повітря робочої зони -  $20\text{мг/м}^3$ .

У повітря робочої зони у відділенні нагрівальних печей потрапляють також оксиди азоту, які утворюються при окисленні азоту повітря в зонах високих температур. Потрапляючи в організм, оксиди азоту викликають роздратування і опік слизових оболонок. З'єднуючись з гемоглобіном крові, оксид азоту NO, перешкоджаючи перенесенню кисню кров'ю. У потерпілих наголошується кашель, задуха, задишка, головні болі, серцева недостатність. У важких випадках може розвинутися набряк легенів. ГДК оксидів азоту -  $5\text{мг/м}^3$ .

Пил, що виділяється в повітря робочої зони при завантаженні і вивантаженні злитків, а також що заноситься з інших ділянок і цехів, складається в основному з оксидів заліза і інших металів. Тривала дія підвищеної запиленої зони, може привести до розвитку захворювань органів дихання - пневмоконіозів, фіброзів, хронічних бронхітів, а також до шкірних захворювань. ГДК пилу -  $4\text{мг/м}^3$ .

Плющення злитків проводиться на пресі 6 тис.тон та 3 тис. тон. На ділянці плющення шкідливими чинниками є шум, вібрація, висока температура повітря, інфрачервоне випромінювання. Оцінка чинників виробничого середовища і трудового процесу дана в таблиці 3.2.

Джерелами шуму є кантувальник, ножиці, роторні пили. Рівень звукового тиску на робочому місці досягає 90 дБ, що перевищує норму (80дБ).

Шум поділяють на механічний, широкосмуговий, середньочастотний, переривистий. Робота в умовах підвищеного шуму може викликати головний біль, зниження рівня уваги, безсоння, надалі - неврози. На ґрунті останніх розвивається гіпертонічна хвороба, виразка шлунку, серцеві захворювання.

Таблиця 3.2 - Оцінка чинників виробничого середовища і трудового процесу на робочому місці нагрівальщика

Чинники виробничого середовища і трудового процесу	Нормативні значення	Фактичні значення	III клас - шкідливі умови праці			Час дії чинника, %
			I ст.	II ст.	III ст.	
1	2	3	4	5	6	7
1. Шкідливі хімічні речовини, мг/м <sup>3</sup> : 3 - 4 клас небезпеки						
- масло мінеральне	5	7	9,8			90
- вуглецю оксид	20	25	31			
- азоту оксиди	5	6	7,5			
- азоту діоксид	2	2,5	3			
2. Пил переважно фіброгенної дії, мг/м <sup>3</sup>	4	4,6	5,29			90
3. Вібрація загальна, дБ	92	94	2			90
4. Шум, дБА	80	90			25	90
5. Мікроклімат в приміщенні						
- температура повітря, °С	16-27	26-32		5		90
- відносна вологість, %	60	50				
- швидкість руху повітря, м/с	0,5	0,3				
- інфрачервоне випромінювання, Вт/м <sup>2</sup>	140	2000		1860		
6. Тяжкість праці	Середній тяжкості					
7. Напруженість праці	Напружений					

Тривала робота при дії сильного шуму веде до зниження гостроти слуху. Сильний шум підвищує вірогідність нещасного випадку, оскільки працівник в таких умовах може не розчутити застережливий сигнал або іншу звукову інформацію, застережну про можливу небезпеку.

Вібрацію викликають ті ж технологічні агрегати, які є джерелами шуму. Постійна дія вібрації викликає спазми судин, у важких випадках вібраційну хворобу. Патологічна дія вібрації виявляється в загальних порушеннях вегетативної нервової системи пітливість, тремтіння пальців, оніміння, підвищена чутливість до холоду. З'являються болі в суглобах, наступають зміни в серцево - судинній системі. Вібрація в кузнечно-пресовому цеху відноситься до загальної, технологічної, категорії За (виробничі приміщення з джерелами вібрації). Рівень віброшвидкості на робочому місці нагрівальщика досягає 94 дБ при нормі для частотних діапазонів 16.63 Гц 92 дБ. Тобто, спостерігається невелике перевищення допустимих значень.

Джерелом інфрачервоного випромінювання і конвективного тепла при ковці є нагрітий до 1250 °С метал. Інтенсивність випромінювання досягає 2000 Вт/м<sup>2</sup>, що в 14,3 разів перевищує норму (140 Вт/м<sup>2</sup>).

### 3.2 Заходи для поліпшення умов праці

Конструктивні особливості нагрівальних печей з достатнім ступенем надійності, виключають вірогідність вибуху газу в їх робочому просторі. Проте, передбачається автоматичне відключення подачі палива при згасанні факела або падінні тиску повітря нижче певної межі.

Для запобігання отруєнню персоналу оксидом вуглецю передбачається автоматична система регулювання співвідношення газ - повітря і підтримка розрідження в робочому просторі колодязя.

При обслуговуванні кузнечно-пресових цехів найчастіше зустрічаються механічні травми. Щоб уникнути травмування робочих механізмами, що обертаються, всі сполучні шпінделі, муфти і корінні вали кузнечно-пресорних

цехів захищають з боків щитами або кожухами. Оскільки може виникнути небезпека розриву сполучних муфт, запобіжні кожухи мають бути дуже міцними. Шпінделі станів захищають міцним бар'єром і влаштовують майданчики з поручнями для обслуговування.

Для зменшення рівня виробничих шумів застосовують звукоізоляцію і звукопоглинання. Наприклад, могутнє джерело шуму (вентилятор, насос) закривають кожухом, а між корпусом і кожухом закладають повстяні прокладки або прокладки з ультратонкого скловолокна. Звукоізолюють окремі приміщення, пости управління, кімнати відпочинку. Екстаустери, вентилятори розташовують в ізольованих приміщеннях або в окремих будівлях. Для зниження аеродинамічного шуму на вихлопні і всмоктуючі отвори машин встановлюють глушники, в місцях зміни перетину або напряму потоку роблять плавні переходи.

Оскільки звукоізолювати кузнечно-пресовий цех, ножиці, роторні пили не представляється можливим, обмежують до мінімуму час перебування в зонах, де рівень шуму перевищує допустимий. При знаходженні в зоні, де рівень звукового тиску перевищує 80 дБА, використовують засоби індивідуального захисту: «Беруші» груп А і Б.

Джерела вібрації встановлюють на віброізольовані фундаменти. При роботі з джерелами локальної вібрації використовують подвійні рукавиці.

### 3.3 Виробнича санітарія

Мірою захисту від конвективного тепла, виділень пилу і шкідливих речовин є виробнича вентиляція. У кузнечно-пресовому цеху як загальна вентиляція, використовується аерація. На постах управління встановлюються кондиціонери КД - 26 для створення метеоумов, близьких до оптимальних.

З метою захисту від інфрачервоного випромінювання пости управління обладнані теплозахисними екранами. Розрізняють екрани віддзеркалення і екрани поглинання. Екрани віддзеркалення роблять з матеріалів з малим ступенем чорноти в інфрачервоному діапазоні і відповідно з великим



коефіцієнтом віддзеркалення - алюмінієва фольга. Екрани віддзеркалення можна робити переносними, встановлювати і прибирати в міру необхідності.

Екрани поглинання повинні мати високий ступінь чорноти (малий коефіцієнт віддзеркалення). Такі екрани виконуються порожнистими, з підведенням проточної технічної води.. Вода, нагріваючись в порожнині екрану, здійснює функцію тепловідводу. Екрани поглинання роблять стаціонарними. Пости управління в прокатному цеху обладнані екранами поглинання.

У кузнечно-пресовому цеху застосовується природне і штучне освітлення. Розряд зорових робіт - VII - робота з матеріалами, що світяться, в гарячих цехах.

У цеху застосовується бічне і верхнє природне освітлення. Коефіцієнт природної освітленості для 3-го світлового поясу

$$e''' = 1,8.$$

Нормоване значення коефіцієнта природної освітленості (КЕО)

$$e_n = e'''mC,$$

$$e_n = 1,8 \cdot 0,9 \cdot 0,7 \approx 1,1 \%,$$

де  $m = 0,9$  - коефіцієнт світлового клімату для району м. Запоріжжя;

$C = 0,7$  - коефіцієнт сонячності клімату.

Значення  $e_n$  слід округляти до десятих доль відсотка. Освітленість від штучних джерел світла має бути не менше 200 лк для газорозрядних ламп і 150 лк для ламп розжарювання .

Джерелами світла в цеху служать лампи розжарювання Г 220 - 750, розраховані на напругу 220 В, споживана потужність 750 Вт. Світильники УПД, закриті, пило – газонепроникні.

Для забезпечення питного режиму у виробничих приміщеннях влаштовують сатураторні установки для приготування питної підсоленої

газованої води (0,5% розчин NaCl). Кількість води – 5 л на людину в зміну. Температура води повинна бути в межах (8 – 20 °C). Відстань від робочих місць до питних установок не повинна перевищувати 75 м. Одна сатураторна установка організовується на 100 чоловік тих, що працюють в найбільш численній зміні.

### 3.4 Електро безпека

Кузнечно-пресовий цеху є споживачем електроенергії і має розвинене електрогосподарство. Електроенергія йде на привід різних агрегатів: електричних механізмів, ножиць для різання металу, роторних пил, поворотної платформи, верстатів абразивної зачистки, правильної машини, мостових кранів, вентиляторів системи аспірації, вентиляторів, що подають повітря на пальники нагрівальних печей, димососів.

До споживачів змінного струму напругою 380-220 В відносяться електродвигуни верстатів, пил, ножиць серії АИР, АОЗ, 4 А, СД.

До споживачів постійного струму напругою 220В відносяться електродвигуни серії П, а також електродвигуни трансферкар ЕД-118А. Для живлення мережі постійного струму використовуються перетворювачі КВПП-2000, для електрифікованого цехового транспорту - перетворювачі УВКП-1.

Змінний струм напругою 220 В споживають освітлювальні прилади. Змінний струм напругою 42 В і 12 В використовується для живлення ручного електроінструменту і світильників переносного і ремонтного освітлення.

До приміщень без підвищеної небезпеки поразки струмом відносяться в цеху приміщення пультів управління, кімнати майстрів.

До приміщень з підвищеною небезпекою відносяться приміщення майстерень (чинник підвищеної небезпеки - струмопровідні підлоги).

До особливо небезпечним відносяться , нагрівальні печі і прес (висока температура повітря), травильне відділення (хімічно активне середовище і висока температура повітря).

Для живлення виробничого устаткування 380/220 В.

В цеху застосовують чотири дротяну мережу трифазного струму з глухозаземленою нейтраллю. Для живлення електродвигунів потужністю більше 200 кВт використовується напруга 6000 В і трипровідна мережа з ізолюваною нейтраллю.

Для захисту у разі дотику до струмопровідної частини, що знаходиться під напругою, ефективно використовується пристрій автоматичного відключення, що реагує на струм нульової послідовності. Такий пристрій забезпечує відключення також і у разі дотику до заземленого (зануленому) корпусу при замиканні на нього фази.

### 3.5 Пожежна безпека

У кузнечно-пресовому цеху пожежі можуть виникати з наступних причин: несправність або неправильна експлуатація електроустаткування; зіткнення розжарених або нагрітих предметів з горючими матеріалами; вибухи горючих газів і пари легкозаймистих рідин.

У кузнечно-пресовому цеху звертаються наступні речовини, небезпечні в пожежному відношенні.

1) природний газ (область займання (5...17) %, температура самозаймання 530 °С) використовується як паливо в нагрівальних колодязях і методичних печах;

2) мінеральні масла (температура спалаху 150...180 °С) використовуються в системах гідроприводу, мастила, а також у складі рідин, що змащує-охолоджує, при плющенні;

3) ацетилен (область займання 3,5 %, температура самозаймання 335 °С) - використовується при газовій зварці і різанні металів;

4) електрична ізоляція - гумова, бавовняна, пластикова.

У кузнечно - пресовому цеху до категорії А відносяться газорозподільні і газорегуляторні пункти, в яких можливе утворення газоповітряної вибухонебезпечної суміші.

До категорії Б (вибухонебезпечна) відносяться майстрові ревізії підшипників, в яких використовуються газ і змащувальні масла.

До категорії В відносяться в кузнечно-пресовому цеху склади змащувальних рідин, приміщення масляних трансформаторів, маслотуннелі гідравлічних систем, електрокабельні приміщення, насосно-акумуляторні станції.

До категорії Г відносяться відділення нагрівальних печей .

До категорії Д відносяться відділення приміщення щитів управління, механічні і електроремонтні майстерні.

Ступінь вогнестійкості будівлі цеху – II. Межа вогнестійкості стін - 2 години, решти будівельних конструкцій - від 0,25 до 2 годин.

Протипожежні заходи можна розділити на організаційних і технічних. До організаційних заходів відносяться: організація добровільної пожежної дружини, створення пожежно-технічної комісії, організація евакуації на випадок пожежі, проведення протипожежного інструктажу, навчання персоналу прийомам гасіння пожеж.

До технічних заходів відноситься дотримання необхідного ступеня вогнестійкості (II) - всі конструкції будівлі цеху складаються з матеріалів, що не згорають.

Майстрові ревізії підшипників необхідно розташовувати на першому поверсі, переважно в торцях будівлі. Зовнішні конструкції, що захищають, необхідно виконувати легкокоруйнівними. Майстрові ревізії підшипників повинні відділятися від інших приміщень і коридорів протипожежними перегородками. У дверних отворах необхідно передбачати тамбури-шлюзи. У приміщеннях майстерень електричне устаткування, прилади, світильники встановлюються у вибухозахищеному виконанні.

Щоб уникнути пожежі на газових комунікаціях забороняється: користуватися факелом для відігрівання газопроводу і замочної арматури, а також для визначення місця витoku газу; застосовувати дерев'яні пробки для закриття штуцерів і отворів на газопроводах; витратити газ у разі падіння його

тиску в газопроводі до значення  $< 500$  Па; складати поблизу газопроводу горючі матеріали; підпалювати газ, що випускається при продуванні газопроводу.

Електрокабельне господарство має бути надійно захищене від контакту з розжареними поверхнями і від механічного пошкодження.

Для одноповерхових будівель категорії Г, ступені вогнестійкості II площа поверху в межах пожежного відсіку не обмежується, тобто в протипожежних стінах немає необхідності.

Протипожежні розриви між будівлею цеху і довколишніми будівлями і спорудами складають: для будівель і споруд I, II і IIIa ступеня вогнестійкості, категорій А, Б, В - 9м, категорій Г і Д - не нормується; III ступені вогнестійкості - 9 м для всіх категорій, для останніх – 12 м.

З урахуванням великих площ кузнечно-пресових цехів особлива увага при проектуванні повинна приділятися заходам щодо забезпечення безпечної евакуації людей на випадок пожежі.

Кількість евакуаційних виходів з будівель, приміщень і з кожного поверху будівель приймається не менше два, за деякими виключеннями. Евакуаційні виходи розташовуються розосереджено.

Двері на шляхах евакуації повинні відкриватися по напрямленню виходу з будівлі. Висота дверей в світлу на шляхах евакуації має бути не менше 2 м. Зовнішні евакуаційні двері будівель не повинні мати замків, які не можуть бути відкриті зсередини без ключа.

Вибір засобу гасіння пожежі і вогнегасної речовини диктується, перш за все, класом пожежі, тобто які речовини і матеріали можуть горіти в даному приміщенні.

У приміщеннях кузнечно-пресовому цеху можуть горіти тверді речовини - пластик, електроізоляція (пожежі класу А), рідини - мінеральні масла, змащувальні емульсії, гас (пожежі класу В), горючі гази - і природний, доменний і їх суміші (пожежі класу З) і електроустановки під напругою (пожежі класу Е).

При пожежах класу А найчастіше застосовується вода у вигляді компактних, розпорошених і тонкораспиленних струменів.

Витрата води на зовнішнє пожежогасіння складає для будівлі кузнечно-пресового цеху 35 л/с. Зовнішнє пожежогасіння здійснюється від пожежних гідрантів. Розстановка гідрантів повинна забезпечувати гасіння пожежі в будівлі цеху не менше ніж від двох гідрантів.

Для гасіння пожеж класів А і В застосовують також легко-механічну і хімічну піни. Легко-механічна піна утворюється в піногенераторах або легко-пінних вогнегасниках (ОВП-10).

Для гасіння електроустановок під напругою використовуються інертні гази, вуглекислота. Ефективно застосовувати вуглекислотні вогнегасники (ОУ-5, ОУ-8).

У виробничих приміщеннях обладнанні протипожежні куточки, забезпечені ящиками з піском, ємностями з водою і пожежним щитом з набором інвентарю: лопат, крюків, сокир, багрів, відер.

### 3.6 Засоби індивідуального захисту.

Нагрівальщик повинен користуватися справним, чистим спецодягом, спец. взуттям. Спецодяг має бути застебнутий на усі гудзики і зав'язки, черевики добре зашнуровані. При підвищеному рівні шуму застосовувати беруші. Перелік видів спеціального одягу, спеціального взуття і інших засобів індивідуального захисту, що підлягають до видачі згідно ГОСТ 12.4.011-89, ГОСТ 12.4.103-83, по професії нагрівальщик:

- костюм бавовняний з вогнетривким просоченням;
- черевики шкіряні;
- куртка ватна;
- рукавиці суконні;
- рукавиці брезентові;
- вачеги;
- щіток с прозорим склом.

## ВИСНОВКИ

В роботі запропоновано виконати заміну режиму безперервної витрати палива на систуму імпульсного спалення газу та заміну футеровки камерної нагрівательної печі на сучасні волокнисті вогнетривкі матеріали і заміну польнікі. У зв'язку з цим в роботі виконані: розрахунок імпульсного опалення печі, нагріву метала і теплового балансу печі та проведений аналіз вогнетривких матеріалів. Ці розрахунки підтвердили ефективність використання імпульсної системи та використання нових вогнетривких матеріалів, можливість істотного зниження питомої витрати палива на одиницю метала, що нагрівається.

При аналізі камерної нагрівальної печі з викотним подом цеху КПЦ ПрАТ «ДНІПРОСПЕЦТАЛЬ» виконані наступні розрахунки:

- нагріву металу;
- теплового балансу печі до модернізації;
- розрахунки імпульсного опалення печі;
- теплового балансу після модернізації.

Проектом пропонується декілька варіантів рішення задачі енергозбереження, що дозволяє істотно понизити енергоспоживання при експлуатації печі – застосування імпульсної системи спалювання палива, та застосування волокнистих вогнетривких матеріалів і сучасних пальників з імпульсним опаленням.

Розрахунковим методом встановлено, що імпульсне опалення разом з іншими вдосконаленнями дозволить:

- зменшити втрати тепла на теплопровидність через огороження печі на 2,5 %;
- скоротити тепло акумульоване клаткою печі 7,8 %;
- знизити середньо – годину витрату палива на 26 %;
- збільшити ККД печі на 13,5 %.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

- 1.Теплотехнічні розрахунки металургійних печей. Навчальний посібник для студентів вузів. Видавництво 2-е / Б. Ф.Зобнін, М. Д. Казяєв, Б. І. Китаєв та інші - М: Металургія, 1982 - 360 с.
2. Высокотемпературныетеплотехнологическиепроцессы и установки в металлургии: учебноепособие / [М.П. Ревун, Б.Б. Потапов, В.М. Ольшанский, А. В. Бородулин] - Запорожье: ЗГИА, 2002. – 444 с.
3. Губинский В.И. Нагревательныепечиметаллургии – сегодня и завтра / В.И. ГубинскийТеория и практика металлургии. – 2004. – № 6. - С. 56
4. Губінський В.І. -нагревальні печі металургії сьогодні і завтра. Теорія і практика металургії. - 2004. - № 6. - С. 56 - 60.
5. Высокотемпературныетеплотехнологическиепроцессы и установки в металлургии: учебноепособие / [М.П. Ревун, Б.Б. Потапов, В.М. Ольшанский, А. В. Бородулин] - Запорожье: ЗГИА, 2002. – 444 с.
6. Тебеньков Б.П. Рекуператоры для промышленных печей / Б.П. Тебеньков - М.: Металлургия, 1967. - 358 с.
7. Скворцов А.А. Нагревательныеустройства: учебноепособие / А.А. Скворцов, А.Д. Акименко, М.Я. Кузелев - М.: Высшая школа, 1965. - 440с.
8. Телегин А. С. Теплотехника и нагревательныеустройства / А.С.Телегин, В.Г. Авдеева - М.: Машиностроение, 1985.- 247с.
9. Карп І.Н. Енергозбереження в Україні: проблеми і шляхи вирішення Екотехнології і ресурсозберігання.-2004.-№ 4. С.3-13.
10. Лисиенко В.Г. Интенсификациятеплообмена в пламенных печах: монография / Лисиенко В.Г. - Москва: Металлургия, 1979. – 224с.
11. Тайцн.Ю., Розенгарт Ю.І. Методичні нагрівальні печі. - М.: Металургвиздат, 1964. - 408 с.
12. Глинков М.А. Основыобщейтеориейтепловойработы печей: монография / Глинков М.А. - М.: Металлургиздат, 1959.- 416с.



13. Розрахунок нагрівальних і термічних печей: Справ. Узд. Під ред. Тимчака С. М., Гусовського С. Л., Авт.: Василькова С. Би., Генкина М. М., Гусовської С. Л. та інші - М: Металургія, 1983 - 480 с.

14. Гусовский В.Л. Сожигательные устройства нагревательных и термических печей: справочник / Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е., Тымчак В.М. - Москва: Металлургия, 1981. – 272с.

15. Дружинин Г.М. Анализ состояния горелочного парка отрасли / Г.М. Дружинин, В.П. Каратаев, А.Л. Чехович // Горелочные устройства в черной металлургии – опыт разработки, изготовления и эксплуатации, перспективы развития: Материалы научно-технической конференции.- Свердловск: ВНИИМТ, 1988.- С.9-11.

16. Лисиенко В.Г. Теплофизика металлургических процессов: учебное пособие / В.Г. Лисиенко, В.И. Лобанов, Б.И. Китаев - Москва: Металлургия, 1982. – 239с.

17. Лисиенко В.Г. Влияние длины факела на теплообмен в методической печи / В.Г. Лисиенко, В.В. Волков, Ю.А. Журавлев // Известия вузов. Черная металлургия. - 1974. - №12. - С. 123-127.

18. Лисиенко В.Г. Математическое моделирование теплообмена в печах и агрегатах: монография / Лисиенко В.Г., Волков В.В., Гончаров А.Л.: под ред. Лисиенко В.Г. - Киев: Наукова думка, 1984. – 230с.

19. Аверин С.И., Гольдфарб Э.М., Тайц Н.Ю., и др. Расчеты нагревательных печей. Издание 2-е. Под редакцией докт. техн. наук проф. Тайц Н.Ю. Издательство «Техника» Киев -1969г.- 540 с.

20. Расчет нагревательных и термических печей: Справ. изд. / Василькова С.Б., Генкина М.М., Гусовский В.Л. и др. / Под ред. Тымчака В.М. и Гусовского В.Л. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.

## ДОДАТКИ

## КОВДРА КЕРАМОВОЛОКНИСТА LYGX– 512

Таблиця А.1- Технічні показники ковдри керамоволокнистої LYGX - 512

Температура класифікаційна	1400 °С	
Температура застосування	1350 °С	
Марка продукції	LYGX - 512	
Лінійна усадка (%)	1350 °Сx24h≤3	
Коефіцієнт теоретичною теплопровідності Вт/(м·к) ((128 кг/м <sup>3</sup> ))	При середній температурі 200 °С	0,052 - 0,070
	При середній температурі 400 °С	0,095 - 0,120
	При середньою температурі 600 °С	0,164 - 0,210
Щільність (кг/м <sup>3</sup> )	96/128	
Міцність при розтягуванні, МПа	≥ 0,04	
Розмір продукції, мм	3600 /7200 x 610/1220x12,7 - 50	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	38 - 40	
ZrO <sub>2</sub> , %	15 - 17	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +SiO <sub>2</sub> , %		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +SiO <sub>2</sub> +ZrO <sub>2</sub> , %	≥ 99	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	≤ 0,2	
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O, %	≤ 0,2	
Вид упаковки	Усередині пластмасовий мішок, зовні картонна коробка	
Система управління якістю і навколинім середовищем	ISO9001 - 2000, ISO14001 - 1996.	

## ПЛИТА БАЗАЛЬТОВА "ТЕХНО"

Таблиця Б.1 – Фізико – механічні властивості

Найменування показника	Значення
Щільність, кг/м <sup>3</sup>	100
Міцність на стискування при 10% деформації, не менше кПа	15
Міцність на відрив шарів, не менше, кПа	8
Теплопровідність при 10 °С, не більше, Вт/(м·°С)	0,035
Теплопровідність при 25 °С, не більше, Вт/(м·°С)	0,037
Теплопровідність за умов експлуатації А, не більше, Вт/(м·°С)	0,043
Теплопровідність за умов експлуатації Б, не більше, Вт/(м·°С)	0,045
Паропроникнення, не менше мілг/(м.ч.Па)	0,30
Вологість по масі, не більше, %	0,5
Водопоглинання за об'ємом, не більше, %	1,5
Вміст органічних речовин, не більше, %	3,0
Горючість, міра	НГ

Таблиця Б.2 – Технічні характеристики «АРМОФОЛ»

Найменування показника	Значення
Коефіцієнт теплового віддзеркалення, %	90
Температура застосування	від - 60 до +150 °С
Опір теплопередачі R <sub>0</sub> , м <sup>2</sup> .0 С/Вт	1,1
Коефіцієнт оптичного віддзеркалення поверхні, не менше, %	97
Коефіцієнт паропропицаемости ш, не більше (міліграм/м · кПа)	0,001

## ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАМЕРНИХ НАГРІВАЛЬНИХ ПЕЧЕЙ З ПОДОМ

Таблиця В.1 - Технічні характеристики камернихнагрівальних печей з ПОДОМ

№ п/п	Найменування параметрів		Одиниці вимірюван	Проектні дані печі
1	2		3	4
1.	Тип печі			Камерна нагрівальна з подом викочування
2.	Призначення печі			Нагрів зливків і поковок перед обтиском
3.	Корисна площа печі		м <sup>2</sup>	13,9
4.	Продуктивність печі (max)		т/год.	5,0
5.	Теплова потужність		10 <sup>6</sup> ккал/год.	2,2
6.	Паливо			Природний газ
7.	Об'ємна теплота згорання		ккал/м <sup>3</sup>	8170
8.	Тиск повітря перед піччю		кгс/м <sup>2</sup>	500
9.	Що нагріваються вироб	Найменування		Зливки, заготівлі
10.		довжина	мм	600 - 4000
11.		переріз	мм	300 x 480
12.		Вес заготівлі	кг	750 - 3900
13.		Марка стали		Нержавіюча жароміцна

## Продовження таблиці В.1.

1	2	3	4
14.	Садіння в печі	форма	прямокутна
15.		вага	тон
16.		габаритні розміри	мм
17.	Температура що нагрівається металу	при посаді	°С
18.		при видачі	°С
19.	Спосіб нагріву		відкритий нагрів продуктами згорання
20.	Тиск газу перед піччю		кг/м <sup>2</sup>
21.	Тиск в печі		мм вод.ст.
22.	Тиск повітря перед піччю		кг/м <sup>2</sup>