

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра матеріалознавства та ливарного виробництва

«Допущено до захисту»
Зав. кафедри МЛВ
канд. техн. наук, доцент
_____ Олександр КУЗИК
« ____ » _____ 20__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти на тему:
“Проектування і розрахунок вагранки з підігрівом дуття
продуктивністю 11 т/год.”

Виконав здобувач вищої освіти
IV курсу, групи ПМ-22-1
спеціальності 131
«Прикладна механіка»
_____ Володимир БОТНАРЕНКО
« ____ » _____ 20__ р.

Керівник бакалаврської роботи
Старший викладач
_____ Микола БОСИЙ
« ____ » _____ 20__ р.

Рецензент
канд. техн. наук, доцент
_____ Любов ОЛІЙНІЧЕНКО
« ____ » _____ 20__ р.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет: механіко-технологічний

Кафедра: матеріалознавства та ливарного виробництва

Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський)

Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність: 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма: «Комп'ютерний інжиніринг технологій, робототехніка і 3D друк»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри МЛІВ

канд. техн. наук, доцент

_____ Олександр КУЗИК

« ____ » _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Ботнаренка Володимира Олександровича

1. Тема роботи: Проектування і розрахунок вагранки з підігрівом дуття продуктивністю 11 т/год.
2. Керівник роботи: Старший викладач Босий Микола Вікторович
3. Строк подання роботи до захисту
4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: вивчення конструкції роботи вагранки з підігрівом дуття та розрахувати основні її розміри. Визначити матеріальний і тепловий баланси проектного обладнання.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Опрацювання навчальної та наукової літератури		
2	Проведення розрахунку основних розмірів, матеріальний та тепловий баланси проектного обладнання, обробка фактичного матеріалу		

3	Написання першого варіанта тексту, подання його на ознайомлення керівнику		
4	Усунення недоліків, написання останнього варіанта тексту		
5	Перевірка роботи на плагіат		
6	Зовнішнє рецензування роботи		
7	Захист випускної кваліфікаційної роботи на засіданні екзаменаційної комісії		

Дата видачі завдання

«___»_____20__р.

Підпис керівника

_____ Микола БОСИЙ

Завдання прийнято до виконання

«___»_____20__р.

Підпис здобувача

_____ Володимир БОТНАРЕНКО

АНОТАЦІЯ

Ботнарєнко В.О. "Проектування і розрахунок вагранки з підігрівом дуття продуктивністю 11 т/год.", спеціальність 131 «Прикладна механіка», ОПП – «Комп'ютерний інжиніринг технологій, робототехніка і 3D друк», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2026. 39 с. Матеріали ілюстрації 2 іл.

Мета кваліфікаційної бакалаврської роботи полягає у вивченні, конструкції та роботи вагранки з підігрівом дуття, а також розрахунок розмірів вагранки і розрахунок матеріального і теплового балансу проєктованої вагранки ємністю 11 т/год.

Процес проектування вагранки з функцією підігріву дуття охоплює визначення ключових геометричних параметрів плавильної установки, а також складання матеріального і теплового балансів.

Графічна частина вагранки з підігрівом дуття – загальний вигляд.

Вагранка, рекуператор, кокс, чавун, матеріальний баланс, тепловий баланс

ABSTRACT

Botnarenko V.O. " Design and calculation of a cupola with a blast heating capacity of 11 t/h.", specialty 131 "Applied Mechanics", OPP – "Computer Engineering Technologies, Robotics and 3D Printing", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026. 39 p. Illustration materials 2 ill.

The purpose of the qualification bachelor's thesis is to study, design and operation of a cupola with blast heating, as well as calculate the dimensions of the cupola, and calculate the material and heat balance of the designed cupola with a capacity of 11 t/h.

The design process of a cupola furnace with a blast heating function includes determining the key geometric parameters of the melting unit, as well as compiling material and heat balances.

The graphic part of the recuperative cupola – general view.

Cupola, recuperator, coke, cast iron, material balance, heat balance

З м і с т

Вступ	7
РОЗДІЛ 1. Вагранка	8
1.1. Конструкція вагранки.....	9
1.2. Робота вагранки	12
1.3. Особливості роботи вагранки з підігрівом дуття	14
1.4. Розрахунок горіння палива у вагранці	16
РОЗДІЛ 2. Розрахунок матеріального балансу	23
РОЗДІЛ 3. Розрахунок теплового балансу.....	26
РОЗДІЛ 4. Розрахунок розмірів вагранки.....	28
РОЗДІЛ 5.Розрахунок рекуператора	30
Висновки.....	35
Література	36
Додатки	37
Додаток 1. Загальний вид вагранки.....	38

Вступ

Серед усього різноманіття сплавів саме чавуну надають перевагу в машинобудуванні, що пояснюється його надійними механічними та технологічними якостями. Плавильний процес для чавуну здійснюється у вагранках, дугових або індукційних електропечах, а також у полумєневих і тигельних установках. Але плавильним агрегатом, наприклад, для переплаву чавуну, починаючи з кінця XVII ст., є вагранка. Перевага вагранки в порівнянні з іншими плавильними печами є її простота конструкції, а також обслуговування та можливість отримання чавуну відповідно різних марок в необхідній кількості, а також безперервність процесу плавлення і випуску металу та економічність процесу.

Не дивлячись на великий розвиток електроплавки чавуну в дугових і індукційних печах, ваграночна плавка продовжує розвиватись, а сам плавильний агрегат удосконалюватись.

Наприклад, інтенсифікація ваграночної плавки при підігріванні повітря та збагачення киснем дало змогу підвищити температуру чавуну, а також покращити показники механічних властивостей. Використання установок для допалювання чадного газу та очищення колошникових газів від пилу дозволяє експлуатувати вагранки з дотриманням екологічних та санітарних вимог.

Вагранка справедливо вважається енергоефективним обладнанням для виробництва чавуну. Максимальна ефективність досягається через впровадження дуплекс-процесу, який об'єднує переваги ваграночної та електричної плавки шляхом послідовної роботи обох агрегатів.

Вагранка являє собою комплексний агрегат, до складу якого входять системи допалювання та очищення відхідних газів, підігріву дуття, а також складні автоматизовані комплекси для моніторингу та управління плавкою.

РОЗДІЛ 1. ВАГРАНКА [1-6]

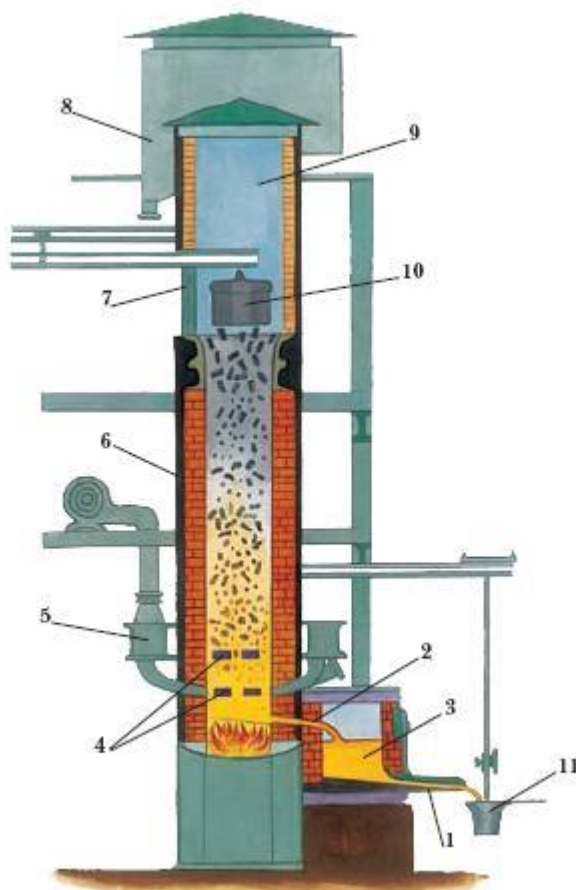
Принцип дії вагранки базується на зустрічних потоках (протитоці), властивому шахтним печам. З огляду на особливості теплообміну між шихтою, коксом та газовим потоком, конструкцію умовно класифікують на чотири температурні зони. Початкова зона – це область підігріву завантажених матеріалів, яка охоплює простір від завантажувального вікна до рівня, де температура металу досягає меж розплавлення (1150–1200°C).

Розміри даної області не є сталими, оскільки залежать від багатьох умов, серед яких – втрати повітря, кількість коксу та розмір часток шихтових матеріалів. *Друга зона* – це зона плавки, в ній відбувається плавка шматків металевої шихти. Кожний шматок металу повинен розплавитися. Тривалість плавки буде 5-15 хвилин, в залежності від розміру шматків шихти та її складу і умов теплообміну. Металева шихта за цей час встигає опуститися в холосту колошу. *Третя зона* – це зона перегрівання рідкого чавуну, вона починається з того місця, де утворюються краплини рідкого чавуну та простягається до нижнього ряду фурм печі. *Четверта зона* – це зона, яка розташована в нижній частині шахти вагранки та простягається від нижньої кромки, тобто нижнього ряду фурм, звісно до лещаді. В цій зоні кокс та його продукти горіння будуть мати більш низьку температуру – все це через недолік кисню. Чавун при охолодженні насичується вуглецем та сіркою, отже необхідно, щоб час перебування чавуну в горні звісно був мінімальним.

У процесі плавки у вагранці протікає низка хімічних перетворень, що залежать від температурного режиму та атмосфери в печі. Основними з них є угар металевих елементів та формування шлаку, до складу якого входять флюси, продукти окиснення, частинки футеровки та коксової зони. Рідкий метал при цьому насичується сіркою та вуглецем, взаємодіючи зі шлаком. Усі ці процеси тісно пов'язані між собою та визначаються складом шихти.

1.1. КОНСТРУКЦІЯ ВАГРАНКИ [1-6]

Конструкція вагранки включає опорну частину, обладнану механізмом для відкривання днища, робочу шахту з трубою та іскрогасником, фурменну коробку, а також систему завантаження сировини (рис. 1.1).



1 – жолоб для випуску чавуну із копильника; 2 – льотка; 3 – копильник;
4 – фурми для дуття; 5 – повітряний колектор; 6 – шахта; 7 – завантажувальне
вікно; 8 – іскроуловлювач; 9 – труба; 10 – завантажувальна баддя;
11 – розливний ківш

Рис 1.1. Вагранка шахтного типу з копильником

Конструкція опори вагранки спроектована для сприйняття як статичної ваги самої печі, так і динамічних впливів, що виникають під час завантаження шихти. До складу цієї опорної системи входять фундамента плита, чотири колони, опорна рама, подова плита, днище, а також пристрій

для його відкриття та закриття. Висоту опорної конструкції печі проектують такою, щоб під нею вільно розміщувалося обладнання для приймання розплаву (міксери, ковші), а також забезпечувався вільний простір для механізованого видалення відходів після завершення плавки. Днище вагранки має дві кришки, вони за допомогою цапф повинні підвішуватися на вісі, яка проходить через підшипники, вони повинні кріпитися до подової плити. Напівднища повинні закриватися та відкриватися за допомогою гідравлічного, електромеханічного або пневматичного приводу. В закритому положенні напівднища треба надійно кріпити за допомогою запорів.

Простір вагранки, розташований між завантажувальним вікном та подовою плитою, називається шахтою. Вона може мати конічну, циліндричну або комбіновану геометричну форму. Завдяки специфічній конфігурації шахти, горна та фурменої зони, ця вагранка спроектована для тривалої безперервної роботи, що дозволяє уникнути повної зупинки для ремонту футеровки. На різних висотах шахти вагранки футеровка зношується звісно неоднаково. В зоні вікна завантаження шихти футеровка сприймає ударну дію завантажувальної шихти. Зону шахти від чавунних блоків до плавильного поясу печі викладають з шамотної цегли. Внутрішній діаметр шахти вагранки буде визначати її продуктивність.

Фурменний пояс. Повітряний потік подається у спеціальну фурмену коробку, завдання якої — рівномірно розподілити його по фурмах вагранки. Цей вузол конструктивно об'єднує самі фурми, поворотний шиберний патрубок та систему з'єднувальних труб. Патрубок фурми звісно має відкидну кришку та наглядове вікно, виконане з вогнестійкого скла. У вікно можна спостерігати процес плавки металу і відкривається воно при припиненні подачі повітря, а також при розпалюванні вагранки.

Для випуску металу та шлаку призначені льотки, перекидні канали, сифонні металоприймачі або компресійні шлаковідділювачі. Льотка для металу призначена для періодичного випуску металу з вагранки. Перекидні канали між піччю та накопичувачем викладають вогнетривкою цеглою, через

те, що вони працюють у важких умовах, тобто під дією високих температур чавуну та шлаку. Вагранки довготривалої дії володіють компресійними відділювачами шлаку. Застосування такого відділювача шлаку дозволяє звісно зменшення роз'єднання футеровки горна шлаками, бо шлак в ньому не накопичується, а повинен стікати до металоприймача.

Вузол завантаження шихтових матеріалів (шихти) і видалення ваграночних газів повинен розташовуватися у верхній частині шахти вагранки.

Для захисту футеровки вагранки від механічних пошкоджень, спричинених падінням шихти, верхню зону шахти (безпосередньо під завантажувальним вікном) облаштовують захисною воронкою, викладеною з чавунної цегли.

Щоб уникнути загазованості робочої зони та гарантувати вентиляцію колошникового майданчика, димова труба вагранки повинна мати конструкцію, яка забезпечує повне видалення газів.

1.2. РОБОТА ВАГРАНКИ [1-6]

Підготовка вагранки розпочинається із закриття днища та формування поду з формовочної суміші. Після цього завантажується перший шар коксу («холоста колоша»), який розпалюють дровами або природним газом. Після розгоряння коксу робоче вікно закривають і починають завантаження робочих колош (суміш шихтових матеріалів, флюсу та коксу). Завантаження триває до рівня завалочного вікна. По завершенню, через фурми в нижній частині шахти подається повітря для активізації горіння.

Високотемпературні продукти згоряння коксу (ваграночні гази), рухаючись угору по шахті, здійснюють попередній нагрів шихтових матеріалів. При згоряння коксу робочі колоші будуть опускатися донизу та прогріватися сходженим потоком ваграночних газів. Металеві компоненти треба прогрівати до температури плавлення. Плавка на висоті 500-800 мм над фурмами і окремими краплинами здійснюються по розпеченій поверхні коксу, перегріваючись і накопичуючись в шахті вагранки нижче фурм або стікають з вагранки до накопичувача для рідкого металу. Коли рівень шлаку досягає необхідної висоти, треба відкривати шлакову льотку і шлак випускають з накопичувача. Потім випускають чавун через льотку.

До моменту розплаву першої металевої колоші шихти, рівень холостої колоші буде знижуватися. Для випуску з вагранки чавуну з сталою температурою та сталим хімічним складом висота робочої коксової колоші повинна дорівнювати висоті, на яку відповідно зменшилась холоста колоша. Тоді кожна наступна вже металева колоша буде плавитися на однаковій висоті. Рух металевих колош звісно відбувається безперервно.

Завантаження шихти (металу, коксу та флюсу) у вагранку здійснюється для підтримки стабільного рівня матеріалів у шахті. Робота печі базується на принципі протитоку: гарячі продукти згоряння коксу підіймаються, тоді як тверда шихта опускається. Це забезпечує ефективний теплообмін, у результаті чого метал нагрівається і плавиться.

Охолодження газів відбувається через їхню взаємодію з холоднішою металозавалкою під час руху вгору. Завдяки використанню тепла відхідних газів підвищується ефективність роботи вагранки. Кокс витрачається у кількості 10-15% до маси металу.

Щоб уникнути накопичення вибухонебезпечних газів (оксиду вуглецю) у повітропроводі, фурми вагранки відкривають одразу після припинення подачі повітря, що є обов'язковою вимогою безпеки..

1.3. ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ВАГРАНКИ З ПІДГРІВОМ ДУТТЯ [1-6]

Введення підігрітого повітря в піч сприяє зростанню температури чавуну на випуску. Це підвищує тепловий рівень холостої колоші вагранки. При цьому підвищується температура газів, які повинні проходити крізь холосту колошу, а також температура шлаків коксу в холостій колоші. Процес підігрівання та плавлення шихтових матеріалів прискорюється в міру підвищення підігрівання повітря. При цих умовах краплини металу, які відриваються від шматків чавуну, при проходженні холостої колоші звісно повинні встигати перегрітися ще до більш високої температури, ніж звісно при холодному дутті повітря.

Скорочення витрати коксу на робочу колошу та, як наслідок, зниження рівня холостої колоші, забезпечує менший час перебування розплаву в зоні високих температур, коли перегрів чавуну не є необхідним.

При роботі на гарячому дутті повітря звісно підвищується питомий зйом чавуну з 1 м² перерізу вагранки. Продуктивність вагранки при цьому буде збільшуватися до 40%. Використання гарячого дуття повітря буде добре впливати на металургійні процеси, які протікають у вагранці. При цьому зменшується угар елементів, а також з'являється можливість використовувати звісно дешевші низькосортні відходи металу замість доменних чавунів, внаслідок цього будуть покращуватися економічні показники. Для підігрівання повітря дуттям використовують ваграночні гази або можна і додатково паливо. Для підігрівання повітря використовують ваграночні гази, які треба відбирати вище завантажувального вікна.

Для підігріву повітря переважно обирають окремі рекуператори або повітрянагрівачі. Через обмеження простору вбудовані рекуператори використовують рідко, лише якщо неможливо встановити автономний агрегат. За методом теплопередачі виділяють три типи рекуператорів: конвективні, радіаційні та радіаційно-конвективні.

Як приклад, ми розглядаємо радіаційний трубчастий рекуператор. За умови, що температура продуктів згоряння перевищує 900-1000°C, теплообмін відбувається переважно через випромінювання, а не конвекцію. Тому рекуперативні теплообмінники, що функціонують у високотемпературному режимі, класифікують як радіаційні. Переваги і недоліки цього радіаційного рекуператора, а також його конструкцію розглянемо у розділі “Розрахунок рекуператора”.

1.4. РОЗРАХУНОК ГОРІННЯ ПАЛИВА У ВАГРАНЦІ [2-6]

Ваграночний кокс має забезпечувати достатню теплотворну здатність для плавлення та витримувати навантаження шихти. Ключовими вимогами до палива є висока механічна міцність (при кімнатній та високій температурах), пористість близько 45%, низька реакційна здатність і мінімальний вміст сірки. Кокс вважається оптимальним паливом для вагранок, а продуктивність та економічність процесу безпосередньо залежать від розміру його шматків. Використання великої, фракційно однорідної коксової сировини забезпечує отримання високотемпературного чавуну. Дослідним шляхом встановлено, що збільшення розміру шматків з 25 до 100 мм сприяє зростанню температури розплаву з 1300 до 1450 °С. Оптимальним вибором для плавлення є кокс із діаметром шматків 100–150 мм..

Процес горіння коксу відбувається у «холостій колоші» вагранки. У місці подачі повітря фурмами відбувається інтенсивна реакція між вуглецем коксу та киснем, що забезпечує необхідну температуру. Дослідження горіння шарів коксу показує, що в першому шарі буде витрачатися біля 50 % всього кисню, що вміщується в повітрі. А вже в наступних шарах коксу буде витрачатися решта кисню. Шар, в якому звісно повністю засвоюється кисень повітря, буде називатися кисневою зоною.

Визначення коефіцієнта надлишку повітря. Коефіцієнт надлишку повітря α , наприклад, для коксової вагранки визначається двома методами.

Перший метод буде ґрунтуватися на наступній емпіричній формулі.

$$\alpha = 2,4/m_k + 0,58, \quad (1.1)$$

де m_k – відносна витрата коксу в % до металозавалки шихтових матеріалів, або у кг/100 кг металозавалки.

Другий метод визначення α полягає в наступному.

Спочатку треба прийняти питому витрату повітря L'_α у м^3 повітря на м^2 площі поперечного перерізу вагранки за хв. Приймаємо, що повітря буде

складатися з 79 об'ємних % азоту і 21 об'ємних % кисню та визначаємо фактичну витрату кисню за годину:

$$v_{O_2} = 0,21L'_\alpha \cdot F \cdot 60 \text{ нм}^3\text{O}_2/\text{год.} \quad (1.2)$$

Приймаємо витрату коксу $m_{c,k}$ і вихід рідкого металу B у % від металозавалки для прийнятої продуктивності вагранки Π - т/год та визначаємо витрату коксу

$$g_c = 0,01m_{c,k} \frac{\Pi}{0,01B} \cdot 1000 \text{ кгС/год.} \quad (1.3)$$

При окисленні цієї кількості С при $\alpha = 1$ необхідний кисень визначаємо за реакцією



$$v_{O_2, \alpha=1} = 0,01m_c q_c \cdot 1000 \cdot 22,4 / (0,01B \cdot 100 \cdot 12) 60 = 31,11q_c m_c / B \text{ нм}^3\text{O}_2/\text{год.} \quad (1.5)$$

Фактичний коефіцієнт надлишку повітря буде становити відношення $v_{O_2} / v_{O_2, \alpha=1}$, після підстановки в яке рівнянь (1.2) і (1.5), отримаємо:

$$\alpha = 0,00675 \cdot L'_\alpha B / m_c q_c, \quad (1.6)$$

де $q = \Pi / F$ – відносний вихід рідкого металу, т/(м²год).

Методика розрахунку кількості повітря для процесу горіння коксу.

Розрахунки виконуємо на 1 кг коксу.

Наводимо хімічний склад палива на робочу масу:

$$C^P + H^P + O^P + N^P + S^P + A^P + W^P = 100, \quad (1.7)$$

де C^P, H^P, O^P, N^P, S^P – вміст в паливі С, Н, О, N, S і т.ін., %% на робочу масу;

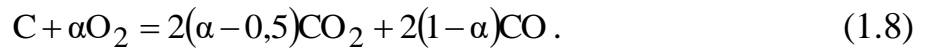
A^P, W^P – вміст на робочу масу відповідно золи та вологи у % за масою.

Кисень необхідний для окислення вуглецю коксу звісно до CO_2 і CO .

При цьому кількість С, який має окислитися за рахунок кисню дуття, буде

все ж таки меншою в порівнянні з загальною кількістю вуглецю в 1 кг коксу на величину тієї ж кількості С, яка буде витратитися на взаємодію з С коксу кисню та S коксу, а також S вологи дуття.

Взаємодія вуглецю коксу з киснем проходить за реакцією



За цією реакцією з киснем коксу прореагує відповідна кількість вуглецю:

$$g_{C, O^P} = \frac{0,01 \cdot O^P}{\alpha 32} \cdot 12 = 0,00375 \cdot O^P / \alpha \text{ кгС/кг коксу.} \quad (1.9)$$

Сірка коксу у кількості 55 % повинна переходити в газову фазу при взаємодії з вуглецем коксу за наступною реакцією



Решта сірки далі переходить в метал біля 40% і шлак біля 5%.

Витрата вуглецю

$$g_{C, S^P} = \frac{0,01 \cdot 0,55 \cdot S^P}{64} \cdot 12 = 1,0313 \cdot 10^{-3} S^P \text{ кгС/кг коксу.} \quad (1.11)$$

Волога повітря буде взаємодіяти з вуглецем коксу за реакцією $C + H_2O = CO + H_2$, з витратою вуглецю:

$$g_{C, \text{ВОЛ.ПОВ.}} = \frac{g_{H_2O}^{c.п.} L_{\alpha}^{c.п.} \cdot 12}{1000 \cdot 18} = 6,6667 \cdot 10^{-4} g_{H_2O}^{c.п.} L_{\alpha}^{c.п.}, \quad (1.12)$$

де $g_{H_2O}^{c.п.}$ – вологість повітря, гН₂О/(нм³сух.пов.);

$L_{\alpha}^{c.п.}$ – витрата сухого повітря, нм³/(кг коксу).

Величину $g_{H_2O}^{c.п.}$ можна задавати або приймати, виходячи з того, що вона може змінюватися в інтервалі $g_{H_2O}^{c.п.} = 10-30 \text{ гН}_2\text{О}/(\text{нм}^3\text{сух.пов.})$.

Величину $L_{\alpha}^{c.п.}$ для розрахунку $g_{C, \text{ВОЛ.ПОВ.}}$ за виразом (1.12) приймаємо в діапазоні $L_{\alpha}^{c.п.} = 5,3-5,5 \text{ нм}^3/(\text{кг коксу})$, а потім, в разі необхідності її уточнюємо.

Кількість вуглецю (в 1 кг коксу), який окислюється за рахунок кисню дугтя, буде становити

$$g_c = 0,01 \cdot C^P - \left(0,0037 \cdot O^P / \alpha + 1,03 \cdot 10^{-3} S^P + 6,67 \cdot 10^{-4} g_{H_2O} L_\alpha^{c.n.} \right) \text{кгС}/(\text{кгкоксу}). \quad (1.13)$$

Знаючи g_c (вираз 1.13) і α (вираз (1.1) і (1.6), за допомогою виразу (1.8) визначаємо кількість сухого повітря $L_\alpha^{c.n.}$

$$L_\alpha^{c.n.} = g_c \alpha 22,4 / (12 \cdot 0,21) = 8,8889 \alpha g_c \text{ нм}^3 / (\text{кг коксу}). \quad (1.14)$$

Витрату вологого повітря розраховуємо за рівнянням:

$$L_\alpha^{b.n.} = (1 + 0,001244 g_{H_2O}) L_\alpha^{c.n.} \quad (1.15)$$

Методика розрахунку кількості та хімічного складу відхідних газів.

Згідно з виразом (1.8) буде утворюватися CO_2 і CO :

$$V_{CO_2,к} = g_c 2(\alpha - 0,5) \cdot 22,4 / 12 = 3,7333(\alpha - 0,5) g_c \text{ нм}^3 CO_2 / (\text{кг коксу}); \quad (1.16)$$

$$V_{CO,к} = g_c 2(1 - \alpha) \cdot 22,4 / 12 = 3,7333(1 - \alpha) g_c \text{ нм}^3 CO / (\text{кг коксу}). \quad (1.17)$$

Вапняк виступає додатковим джерелом CO_2 у відхідних газах, поряд із вуглецем.

Якщо відносна витрата вапняку становить $g_{вапн}$, % від металозавалки, вуглецю коксу – $m_{с,к}$ % від металозавалки, вміст С в коксі – C^P , % за масою, а вапняк – чистий карбонат кальцію $CaCO_3$, то при розкладі останнього утворюється CO_2 , в розрахунку на 1 кг коксу:

$$V_{CO_2,вапн} = \frac{g_{вапн} \cdot 0,01 C^P}{m_c \cdot 100} \cdot 22,4 = 2,24 \cdot 10^{-3} g_{вапн} C^P / m_c \frac{\text{нм}^3 CO_2}{\text{кг коксу}}, \quad (1.18)$$

де 100 – відносна молекулярна маса карбонату кальцію ($CaCO_3$).

Утворення вуглекислого газу

$$V_{CO_2} = V_{CO_2,к} + V_{CO_2,вапн} = 3,733(\alpha - 0,5) g_c + 2,24 \cdot 10^{-3} g_{вапн} C^P / m_c \frac{\text{нм}^3 CO_2}{\text{кг коксу}}. \quad (1.19)$$

При реакції $H_2O + C = CO + H_2$ утворюється чадний газ в розрахунку на 1 кг коксу.

$$V_{CO,в.п.} = (g_C \cdot g_{C,O^p}) \cdot 2(1-\alpha)22,4/12 + g_{H_2O} L_\alpha^{c.п.} \cdot 22,4/1000 \cdot 18 =$$

$$= 3,733(1-\alpha)(g_C \cdot g_{C,O^p}) + 1,2444 \cdot 10^{-3} g_{H_2O} L_\alpha^{c.п.} \text{ нм}^3/(\text{кг коксу}). \quad (1.20)$$

Водень також буде утворюватися при взаємодії вологи дуття з С коксу

$$V_{H_2,в.п.} = g_{H_2O} L_\alpha^{c.п.} \cdot 22,4/(1000 \cdot 18) + 0,01N^p 22,4/2 =$$

$$= 1,2444 \cdot 10^{-3} g_{H_2O} L_\alpha^{c.п.} + 0,112N^p \text{ нм}^3/(\text{кг коксу}). \quad (1.21)$$

Загальна кількість СО дорівнює

$$V_{CO} = V_{CO,к} + V_{CO,в.п.} = 3,7333(1-\alpha)g_c + 1,2444 \cdot 10^{-3} g_{H_2O} L_\alpha^{c.п.} \text{ нм}^3/(\text{кг коксу}). \quad (1.22)$$

Азот може поступати до відхідних газів як з повітря так і коксу:

$$V_{N_2,пов} = 0,79L_\alpha^{c.п.} \text{ нм}^3/(\text{кг коксу}); \quad (1.23)$$

$$V_{N_2,к} = 0,01 \cdot N^p / 28 \cdot 22,4 = 0,008N^p \text{ нм}^3/(\text{кг коксу}). \quad (1.24)$$

Визначення загальної кількості N в продуктах згорання коксу:

$$V_{N_2} = V_{N_2,пов} + V_{N_2,к} = 0,79L_\alpha^{c.п.} + 0,008N^p \text{ нм}^3/(\text{кг коксу}). \quad (1.25)$$

Прийmemo, що вся волога коксу буде переходити у відхідні гази:

$$V_{H_2O} = 0,01W^p \cdot 22,4/18 = 1,2444 \cdot 10^{-2} W^p \text{ нм}^3/\text{кг коксу}. \quad (1.26)$$

Кількість CS_2 звісно за реакцією (1.10) та з урахуванням умови, що до газу буде переходити 55 % сірки коксу, дорівнює

$$V_{CS_2} = \frac{0,01 \cdot S^p \cdot 0,55}{64} \cdot 22,4 = 1,925 \cdot 10^{-3} S^p \text{ нм}^3 CS_2 / \text{кг коксу}. \quad (1.27)$$

Сума всіх компонентів газу становить:

$$V_\alpha = V_{CO_2} + V_{CO} + V_{N_2} + V_{H_2} + V_{H_2O} + V_{CS_2} =$$

$$\begin{aligned}
&= \underbrace{3,7333(\alpha - 0,5)g_c + 2,24 \cdot 10^{-3} g_{\text{вапн}} \cdot C^P / m_c}_{\text{CO}_2} + \\
&+ \underbrace{3,7333(1 - \alpha)g_c + 1,2444 \cdot 10^{-3} g_{\text{H}_2\text{O}} L_\alpha^{\text{с.п.}}}_{\text{CO}} + \underbrace{0,79 L_\alpha^{\text{с.п.}} + 0,008 N^P}_{\text{N}_2} + \\
&+ \underbrace{1,2444 \cdot 10^{-3} g_{\text{H}_2\text{O}} L_\alpha^{\text{с.п.}}}_{\text{H}_2} + \underbrace{1,2444 \cdot 10^{-2} W^P}_{\text{H}_2\text{O}} + \underbrace{1,925 \cdot 10^{-3} S^P}_{\text{CS}_2} \text{ нм}^3/\text{кг коксу}. \quad (1.28)
\end{aligned}$$

Вміст компонентів у відхідних газах, наприклад, в об'ємних відсотках розраховується за формулою:

$$i = \frac{V_i}{V_\alpha} \cdot 100, \% \text{ за об'ємом}. \quad (1.29)$$

Розв'язок. Продуктивність вагранки $\Pi = 15$ т/год, площа поперечного перерізу вагранки $F_B = 1,8$ м², температура чавуну при випуску з вагранки $t_{\text{ч}} = 1430^\circ\text{C}$, відносна витрата C коксу становить $m_{\text{с,к}} = 13\%$ від металозавалки, питома витрата повітря становить $L'_\alpha = 122$ нм³/(м²хв), вологість повітря дорівнює $g_{\text{H}_2\text{O}} = 25$ гH₂O/(нм³сух.пов), відносна витрата вапняку становить $m_{\text{вапн}} = 3\%$ від металозавалки, вихід рідкого металу дорівнює $B = 98$ % від маси металозавалки, хімічний склад коксу наступний, у відсотках за масою:

C ^P	H ^P	O ^P	N ^P	S ^P	A ^P	W ^P	Σ
81,7	0,8	0,2	0,2	0,6	12,5	4,0	100,0

Коефіцієнт надлишку повітря розраховуємо за виразами (1.1) і (1.6)

$$\begin{aligned}
\alpha &= 2,4 / m_{\text{к}} + 0,58 = 2,4 \cdot 0,01 C^P / m_{\text{с,к}} + 0,58 = 2,4 \cdot 0,01 \cdot 81,7 / 13 + 0,58 = 0,73 \\
\alpha &= 6,75 \cdot 10^{-3} L'_\alpha B / (m_c g) = 6,75 \cdot 10^{-3} L'_\alpha B F / (m_c \Pi) = \\
&= 6,75 \cdot 10^{-3} \cdot 122 \cdot 98 \cdot 1,8 / (13 \cdot 15) = 0,71
\end{aligned}$$

Результати розрахунків за формулами (1.1) і (1.6) майже практично співпадають. Прийнемо для подальших розрахунків $\alpha = 0,73$. Розраховуємо величину g_c за виразом (1.13), при $L_\alpha^{\text{с.п.}} = 5,4$ нм³/кг кг коксу

$$\begin{aligned}
g_c &= 0,01 \cdot C^p - \left(3,75 \cdot 10^{-3} O^p / \alpha + 1,03 \cdot 10^{-3} S^p + 6,67 \cdot 10^{-4} g_{H_2O} L_\alpha^{c.p.} \right) = \\
&= 0,01 \cdot 81,7 - \left(3,75 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2 / 0,73 + 1,03 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6 + 6,67 \cdot 10^{-4} \cdot 25 \cdot 5,4 \right) = \\
&= 0,7254 \text{ кгС/кг коксу}
\end{aligned}$$

Витрата сухого повітря за виразом (1.14)

$$L_\alpha^{c.p.} = 8,8889 \alpha_c = 8,8889 \cdot 0,73 \cdot 0,7254 = 4,707 \text{ нм}^3/\text{кг коксу}$$

Витрата вологого повітря за рівнянням (1.15)

$$L_\alpha^{b.p.} = (1 + 0,001244 \cdot 25) \cdot 4,707 = 4,8534 \text{ нм}^3/\text{кг коксу}$$

За рівнянням (1.28) визначаємо кількість окремих компонентів у відхідних газах та звісно загальну їх кількість:

$$\begin{aligned}
V_\alpha &= \underbrace{3,7333(0,73 - 0,5) \cdot 0,7254 + 2,24 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 81,7 / 13}_{CO_2} + \\
&+ \underbrace{3,7333(1 - 0,73) \cdot 0,7254 + 1,2444 \cdot 10^{-3} \cdot 25 \cdot 4,707}_{CO} + \underbrace{0,79 \cdot 4,707 + 0,008 \cdot 0,2}_{N_2} + \\
&+ \underbrace{1,2444 \cdot 10^{-3} \cdot 25 \cdot 4,707}_{H_2} + \underbrace{1,2444 \cdot 10^{-2} \cdot 4}_{H_2O} + \underbrace{1,925 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6}_{CS_2} = \\
&= 0,090 + 0,8776 + 3,720 + 0,1464 + 0,0498 + 0,0012 = 4,885 \text{ нм}^3/\text{кг коксу}
\end{aligned}$$

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК МАТЕРІАЛЬНОГО БАЛАНСУ ВАГРАНКИ [2-6]

На основі аналізу чинників, що впливають на витрати коксу та собівартість металу, виконаємо розрахунок матеріального та теплового балансів печі.

При складанні матеріального балансу важливо визначити витрати всіх компонентів та їхніх складників, що зазнають трансформацій під час ваграночного процесу. Також необхідно врахувати теплові ефекти (виділення або поглинання), обсяг та хімічний склад отриманих продуктів згоряння.

Визначення матеріального балансу треба проводити на 100 кг металозавалки.

Прибуток:

- 1) металозавалка – 100 кг;
- 2) кокс, приймаємо $L'_\alpha = 122 \text{ н м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{хв})$ і $t = 1430^\circ \text{C}$, по номограмі знаходимо $m_k = 13\%$, тобто витрата коксу $m_k = 13 \text{ кг}/(100 \text{ кг металозавалки})$;
- 3) вапняк – витрата вапняку становить $m_B = 3,0 \text{ кг}/(100 \text{ кг м/з})$;
- 4) повітря – витрата повітря визначається за виразом

$$m_{\text{п}} = 6L'_\alpha F_B \rho_{\text{п}} / \Pi,$$

де F_B – це площа поперечного перерізу печі, яка для 11-тонної вагранки дорівнює $1,8 \text{ м}^2$; $\rho_{\text{п}}$ – приймаємо густину повітря $1,29 \text{ кг}/\text{м}^3$; Π – продуктивність вагранки становить $11 \text{ т}/\text{год}$.

Маємо

$$m_{\text{п}} = 6,122 \cdot 1,8 \cdot 1,29 / 11 = 129,2 \text{ кг}/(100 \text{ кг м/з})$$

- 5) футеровка – врахувавши виробничі данні приймаємо витрату футеровки

$$m_{\text{ф}} = 0,74 \text{ кг}/(100 \text{ кг м/з}).$$

Видаток

1) Чавун – при виході з вагранки кількість чавуну становить масі металозавалки та мінус угар вуглецю $\pm m_C$, угар кремнію m_{Si} , угар марганцю m_{Mn} , та угар заліза m_{Fe} , а також ще мінус кількість неметалевих включень у самій металозавалці $m_{МЗ}$.

Прийmemo вміст у чавуні $[Si]=2,6\%$, $[Mn]=1,0\%$. Крім того, приймаємо угари $V_{Si}=20\%$, $V_{Mn}=30\%$, $V_C=0\%$. Далі на підставі виробничих даних прийmemo, що $m_{Fe}=0,4$ кг/(100 кг м/з), а $m_{М.з.}=0,2$ кг/(100 кг м/з).

Визначасмо кількість окислених кремнію та марганцю, а також ще кількість рідкого чавуну:

$$m_{Si} = 2,6 \cdot 20 / (100 - 20) = 0,65 \text{ кг/(100 кг м/з);}$$

$$m_{Mn} = 1,0 \cdot 30 / (100 - 30) = 0,43;$$

$$m_{ч} = 100 - 0,65 - 0,43 - 0,4 - 0,2 = 98,32.$$

2) Розраховуємо загальний обсяг шлаку, підсумовуючи всі джерела його утворення:

$$m_{ш} = m_{шSi} + m_{шMn} + m_{шFe} + m_{шМ.з.} + m_{шВ} + m_{шФ} + m_{шК},$$

У попередньому виразу окремі доданки правої частини – це надходження у шлак за рахунок: окислення кремнію, марганцю, заліза, далі неметалевих включень металозавалки, а також вапняку, футеровки і коксу.

Прийmemo наступне, що вапняк звісно складається із карбонату кальцію, вміст золи у коксі дорівнює 12,5%, отримаємо:

$$m_{ш} = 0,65 \cdot 60 / 28 + 0,43 \cdot 71 / 55 + 0,4 \cdot 72 / 56 + 0,2 + 3 \cdot 56 / 100 + \\ + 0,74 + 13 \cdot 12,5 / 100 = 6,71 \text{ кг/(100 кг м/з)}$$

3) Відхідні гази – кількість газів будемо визначати як суму кількості повітря, коксу (звісно за мінусом золи), CO_2 із вапняку та мінус кисень, він іде на окислення кремнію, марганцю, заліза:

$$m_{г} = 129,2 + 13 \cdot 87,5 / 100 + 3 \cdot 44 / 100 - 0,65 \cdot 32 / 28 - 0,43 \cdot 16 / 55 - 0,4 \cdot 16 / 56 = 140,93 \\ \text{кг/(100кг м/з).}$$

Визначення матеріального балансу наводимо в таблиці 2.1

Таблиця 2.1

Матеріальний баланс процесу плавлення чавуну у вагранці ємністю 11 т/год

№ статті	Статті прибутку	Кг/(100 кг м/з)	№ статті	Статті видатку	Кг/(100 кг м/з)
1	Металозавалка	100,00	1	Чавун	98,32
2	Кокс	13,00	2	Шлак	6,71
3	Вапняк	3,00	3	Відхідні гази	140,93
4	Повітря	129,2		Всього	245,94
5	Футеровка	0,74			
	Всього	245,94			

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ [2-6]

Прибуток теплоти. Прийmemo наступний хімічний склад коксу, % за масою:

C ^p	H ^p	O ^p	N ^p	S ^p	A ^p	W ^p	Σ
81,7	0,8	0,2	0,2	0,6	12,5	4,0	100,0

Теплотворність коксу розраховуємо за рівнянням:

$$Q_H^p = 339C^p + 1256H^p + 109(S^p - O^p) - 25(9H^p + W^p) =$$

$$= 339 \cdot 81,7 + 1256 \cdot 0,8 + 109(0,6 - 0,2) - 25(9 \cdot 0,8 + 4,0) = 28465 \text{ кДж/кг}$$

Хімічна теплота коксу $Q_{x,h} = 28465 \text{ В, кВт}$

Так як кокс, а також й інші шихтові матеріали спеціально не треба підігрівати, дорівнюють $Q_{\phi} = 0, Q_{\psi} = 0$.

Фізична теплота повітря визначається при $t_{\text{пов}} = 700^{\circ}\text{C}$

$$Q_{\phi,\text{пов}} = (129,2/1,29) \cdot 1,35 \cdot 700 \cdot (11000)/(0,9832 \cdot 3600) = 2941,39 \text{ кВт.}$$

Визначимо теплоту екзотермічних реакцій окислення домішок чавуну, а ще заліза та прийmemo теплові ефекти реакцій окислення кремнію, марганцю і заліза, що становлять 31430, 7000 і 4810 кДж/кг:

$$Q_{\text{екз}} = \frac{(31430 \cdot 0,65 + 7000 \cdot 0,43 + 4810 \cdot 0,4) \cdot 11000}{3600 \cdot 0,9832 \cdot 100} = 788 \text{ кВт.}$$

Видаток теплоти. Теплота металу та шлаку на виході з вагранки при тепловмісті їх становить, $h_{\psi} = 0,88t_{\psi} + 105$; $h_{\text{ш}} = 1,46t_{\text{ш}} + 209$ кДж/кг при температурі шлаку на 50° більшою за температуру металу:

$$Q_{\psi} = (0,88 \cdot 1400 + 105) \cdot 11000 / 3600 = 4085,27 \text{ кВт.}$$

$$Q_{\text{ш}} = 0,0671 \cdot (1,46 \cdot 1450 + 209) \cdot 11000 / (0,9832 \cdot 3600) = 485 \text{ кВт.}$$

Фізична та хімічна теплота відхідних газів, при $t_{\Gamma} = 900^{\circ}\text{C}$ і $\text{CO} = 10\%$

$$Q_2 = 140,93/1,29 \cdot 1,5 \cdot 900 \cdot 11000 / (3600 \cdot 0,9832 \cdot 100) = 3055,65 \text{ кВт}$$

$$Q_3 = 140,93/1,29 \cdot 0,10 \cdot 12750 \cdot 11000 / (3600 \cdot 0,9832 \cdot 100) = 4320,61 \text{ кВт}$$

Втратами теплоти при фізичному недопалі палива нехтуємо: $Q_4 = 0$

Втрати теплоти теплопровідністю через кладку визначаємо для таких умов: зовнішній діаметр вагранки $D_{\text{зовн}} = 1,5 \text{ м}$, корисна висота робочого

простору печі $H = 5,2$ м; температура кожуха печі $t_k = 100^\circ\text{C}$; температура повітря становить $t_{II} = 20^\circ\text{C}$, ефективний коефіцієнт тепловіддачі від кожуха печі до довкілля повітря $\alpha = 15 \cdot 10^{-3}$ кВт/(м²К). Маємо:

$$Q_{5\text{кл}} = \alpha(t_k - t_{II}) \cdot F = 15 \cdot 10^3 (100 - 20) \cdot 15 \cdot 1,5(5,2 + 1,5) = 217 \text{ кВт.}$$

Втрати теплоти з охолоджуючою водою визначаємо з умови, що вони становлять 5 % від хімічної теплоти палива: $Q_{5\text{охол}} = 0,05B \cdot 28465 = 1423B$, кВт

Всі інші статті втрат Q_5 , а також ще статті Q_6 і ΔQ відсутні:

$$Q_{5,\text{випр}} = Q_{5\text{вви}} = Q_{5\text{обл}} = Q_6 = \Delta Q = 0.$$

Підставимо знайдені значення статей прибутку та видатку теплоти у рівняння теплового балансу печі:

$$28465B + 2941,32 + 788 = 4085,27 + 485 + 3055,65 + 4328,84 + 217 + 1423B$$

$$27039B = 8442,44; B = 0,312 \text{ кг/с.}$$

Витрата металозавалки за секунду $\Pi' = 11000 / (3600 \cdot 0,9832) = 3,107$ кг/с.

Відносна витрата коксу $K = 0,312 \cdot 100 / 3,107 = 10,04\%$.

Результати розрахунку теплового балансу наводимо у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Тепловий баланс вагранки

№ п/п	Прибуток теплоти	кВт	%	№ п/п	Видаток теплоти	кВт	%
1	$Q_{\text{х.п.}}$	8881,08	82,6	1	$Q_{\text{чав}}$	4085,27	29,4
2	$Q_{\text{ф.пов.}}$	2941,39	11,7	2	$Q_{\text{шл}}$	488	3,5
3	$Q_{\text{екз}}$	788	5,7	3	Q_2	3055,65	32,2
	Всього	12610,5	100,0	4	Q_3	4320,61	30,4
				5	$Q_{5,\text{кл}}$	217	0,4
				6	$Q_{5,\text{охол}}$	443,97	4,1
					Всього	12610,5	100,0

Коефіцієнт корисної дії вагранки

$$\eta = (4085,27 + 488) \cdot 100 / 8881,08 = 51,4\%.$$

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК РОЗМІРІВ ВАГРАНКИ [2-6]

Визначення основних геометричних розмірів вагранки буде виконано з використанням емпіричних залежностей.

Діаметр вагранки, м

$$D = 1,1\sqrt{G/q},$$

де G – задана продуктивність вагранки, т/год.;

q – питома продуктивність вагранки, т/м²год

$$G = 11 \text{ т/год}; q = 8 \text{ т/(м}^2\text{год)}; D = 1,1\sqrt{11/8} = 1,3 \text{ м.}$$

Висота робочого простору вагранки вимірюється як відстань від рівня основного ряду фурм до нижнього краю завантажувального вікна, м

$$H_0 = 4,25\sqrt{D}, H_0 = 4,25\sqrt{1,3} = 4,84 \text{ м.}$$

Загальна висота вагранки, м

$$H_{\text{заг}} = H_0 + H_1 + H_2,$$

де H_1 – це відстань від вісі основного ряду фурм печі до її поду, м; H_2 – відстань від поду вагранки до полу приміщення, м: $H_1 = 0,5$; $H_2 = 2$ м

$$H_{\text{заг}} = 4,84 + 0,5 + 2 = 7,04 \text{ м.}$$

Діаметр металеві лютки, мм

$$d_{\text{м.л.}} = 1,1\sqrt{G/3600\rho\omega},$$

де ρ – густина металу, кг/м³; ω – швидкість чавуну, м/с

$$d_{\text{м.л.}} = 1,1\sqrt{11/3600 \cdot 7,2 \cdot 1} = 0,022 \text{ м.}$$

Діаметр шлакової лютки приймемо біля 60 мм. Сумарний розріз фурм вагранки основного ряду, м²

$$f_1 = 0,15F \quad f_1 = 0,15 \cdot 1,8 = 0,27 \text{ м}^2$$

Розріз (площа поперечного перерізу) вагранки

$$F = \pi D^2 / 4, \quad F = 3,14 \cdot 1,3^2 / 4 = 1,32 \text{ м}^2.$$

Розріз іскрогасника в горизонтальній площині

$$F_i = k 10GV_{\text{п.п}} (1 + \alpha/t) / 3600 \omega_{\text{п.п}},$$

де $k = (2-3)$ – коефіцієнт, який враховує збільшення об'єму газів за рахунок підсмоктування повітря через завантажувальне вікно; $\omega_{\text{п.п}}$ – швидкість газів в іскрогаснику, м/с; α – температурний коефіцієнт об'ємного розширення газів, дорівнює $1/273$; t – температура газів в іскрогаснику, °С

$$F_i = 2 \cdot 10 \cdot 11 \cdot 60,73 (1 + 1/273 \cdot 500) / 3600 \cdot 1 = 10,51 \text{ м}^2.$$

Діаметр повітропроводів при швидкості повітря 15 м/с

$$D_n = 1,1 \sqrt{10GV_{\text{в}} (1 + \alpha) / 3600 \omega_{\text{в}}},$$

де $\omega_{\text{в}}$ – швидкість повітря у повітропроводі, становить 15 м/с

$$D_n = 1,1 \sqrt{10 \cdot 11 \cdot 56 (1 + 1/273) / 3600 \cdot 15} = 0,114 \text{ м}.$$

Кожух вагранки, подова плита, колони і днище треба розраховувати звичайним шляхом. Конструкція колони та кожуха перевіряється на поздовжню стійкість, а днище і подова плита — на стійкість до поперечного згинання. Колони будуть приймати все навантаження від кожуха печі, футеровки, шихти та іскрогасника.

РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНОК РЕКУПЕРАТОРА [2-6]

Для збільшення структурної міцності радіаційних рекуператорів, що працюють під високим тиском або мають великий діаметр, рекомендовано застосовувати трубчасті конструкції. У такому виконанні повітря (або інший агент) проходить не в кільцевому просторі між сталевими циліндрами, а через систему труб малого діаметра, розташованих уздовж стінок газоходу великого перерізу, яким рухаються димові гази.

Радіаційні рекуператори вигідно відрізняються від конвективних тим, що дозволяють нагрівати повітря чи гази до вищих температур. При цьому вони забезпечують підвищене теплове навантаження на поверхню обміну, потребуючи меншої кількості дорогої жароміцної сталі. Але, велике теплове навантаження поверхні нагрівання радіаційного рекуператора не повинно викликати підвищення максимальної температури стінки, через яку буде передаватися теплота, при одних і тих же температурах підігрівання повітря (газу). Пояснюється це більш простою конфігурацією шляху повітря, ніж в конвективних рекуператорах, в радіаційних використовують підвищені швидкості підігрівання повітря, це сприяє, звісно ж, значному відведенню теплоти від стінок та зниження їх температури.

Відхилення від середньої температури стінки в сторону максимуму або мінімуму у радіаційних рекуператорах звісно менше, ніж у конвективних, бо відбувається деяке вирівнювання температур стінок в результаті взаємовипромінювання між окремими ділянками поверхні нагрівання, які в радіаційних рекуператорах повинні знаходитися в одному каналі та однаково віддалені від вісі димового потоку газу.

Згідно експериментальних та виробничих даних відомо, що максимальна температура стінки радіаційного рекуператора звісно перевищує температуру підігрівання повітря або газу не більше, ніж на 150-250 °С, а от в конвективних рекуператорах це значення більше на 300-450 °С.

При використанні найбільш жароміцних марок сталі звісно гранична температура димових газів для конвективних рекуператорів становить 1100 °С, а для радіаційних рекуператорів її треба підвищувати до 1600 °С.

Функціонування конвективних рекуператорів зазвичай вимагає використання штучної тяги, оскільки ефективність теплопередачі в них безпосередньо зумовлена високою швидкістю руху димових газів. Натомість радіаційні рекуператори, що мають прямі та широкі канали, працюють без примусової тяги, адже швидкість потоку в них суттєво не впливає на коефіцієнт теплообміну і відповідає швидкості в стандартних борах.

Важливою властивістю радіаційних рекуператорів є значно менша засмічуваність поверхні нагрівання, ніж у конвективних рекуператорів. Крім того, стінки радіаційних рекуператорів виготовляють вертикальними, що також буде перешкоджати осіданню на них пилу.

Отже, радіаційні рекуператори є менш чутливі до відкладання пилу, а очищати їх від нього також простіше, ніж в конвективних рекуператорах.

Недолік радіаційних рекуператорів полягає в тому, що відповідно при однаковій тепловій продуктивності вони будуть більш громіздкі і за зовнішніми габаритами будуть займати об'єм в 2-3 рази більший, ніж в конвективних рекуператорах.

Також радіаційні рекуператори є набагато чутливішими до зміни навантаження, ніж конвективні рекуператори.

Аналіз технічних характеристик радіаційних рекуператорів дозволяє зробити висновок, що вони є оптимальним вибором для високотемпературного нагріву повітря чи газу в умовах значного забруднення димових газів пилом, сажею, шлаками або окалиною.

Конструкція та принцип дії радіаційного трубчастого рекуператора наступні. Трубчастий радіаційний рекуператор, наприклад, для ваграночного комплексу складається з топки, в яку через пальник буде подаватися очищений від пилу ваграночний газ. Запалювання ваграночних газів та

подача додаткового тепла, необхідного для підігрівання повітря, забезпечується пальниками, які працюють на природному газі.

Обсяг подачі газу коригуватиметься автоматично, базуючись на температурі повітря після рекуператора. Відхідні гази з топки послідовно проходять крізь радіаційну та конвективну частини рекуператора перед викидом в атмосферу. Повітряний потік спрямовується спочатку в конвективну, а потім у радіаційні секції. При цьому в конвекційній та першій радіаційній секціях реалізовано протитік, тоді як у наступній радіаційній секції – прямотік.

Тепловий розрахунок рекуператора полягає в наступному. Розрахунок виконується на основі розрахунку теплопередачі між продуктами палива та повітрям. Кількість переданої теплоти від продуктів палива до повітря визначається за виразом, одиниці вимірювання в Дж/с.

$$Q = kF\Delta t_{cp},$$

де k – коефіцієнт теплопередачі рекуператора, Вт/(м²К); F – поверхня нагрівання рекуператора, м²; Δt_{cp} – середня логарифмічна різниця температур між продуктами палива та повітрям в рекуператорі, °С.

З цього виразу можна буде отримати два рівняння для визначення необхідної поверхні рекуператора в м² або коефіцієнта теплопередачі в Вт/(м²К)

$$F = Q/k\Delta t_{cp}; k = Q/F\Delta t_{cp}.$$

При розрахунку рекуператора найбільш складна задача – розрахунок коефіцієнта теплопередачі k . Коефіцієнт теплопередачі металевого рекуператора біля 10-30 Вт/(м·К).

Функціонування рекуператора базується на трьох послідовних етапах теплообміну: конвективному переході тепла від продуктів згоряння до поверхні стінки, теплопровідності крізь матеріал стінки та передачі тепла від стінки до повітряного потоку.

Середня логарифмічна різниця температур розраховується за виразом

$$\Delta t_{cp} = (\Delta t^n - \Delta t^k) / \ln(\Delta t^n / \Delta t^k),$$

де Δt^n і Δt^k – різниця температур продуктів горіння і повітря на початку і в кінці рекуператора.

$$\Delta t_{II} = t_{II,II}^{Поч} - t_{II,II}^П; \quad \Delta t_K = t_{II,II}^K - t_{II,II}^{Пов}.$$

Схему руху треба розглядати по ходу продуктів палива.

Розрахунки. Вихідні дані: $F = 1,8 \text{ м}^2$, приймаємо $k = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$

1. Розраховуємо Δt_{II} і Δt_K :

$$\Delta t_{II,II}^H = 500 \text{ }^\circ\text{C}; \quad \Delta t_{II,II}^H = 1200 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\Delta t_{II,II}^K = 20 \text{ }^\circ\text{C}; \quad \Delta t_{II,II}^K = 60 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\Delta t_{II} = 1200 - 500 = 700 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\Delta t_K = 60 - 20 = 40 \text{ }^\circ\text{C}.$$

2. Середню логарифмічну різницю температур розраховуємо за виразом

$$\Delta t_{cp} = (\Delta t^II - \Delta t^K) / \ln(\Delta t^II / \Delta t^K);$$

$$\Delta t_{cp} = (500 - 40) / \ln(700/40) = 160 \text{ }^\circ\text{C}.$$

3. Кількість переданої теплоти відповідно від продуктів палива до повітря

$$Q = kF\Delta t_{cp};$$

$$Q = 25 \cdot 18 \cdot 160 = 7200 \text{ Дж/с}.$$

4. Необхідна поверхня рекуператора

$$F = Q / k\Delta t_{cp};$$

$$F = 7200 / 25 \cdot 160 = 1,8 \text{ м}^2.$$

5. Теплота, яка необхідна для нагріву повітря

$$Q_{\Pi} = c_{\Pi} (t_{\Pi}^{\Pi} - t_{\Pi}^{\text{к}}) V_{\text{пов}},$$

де V_{Π} – витрата повітря, яке нагрівається в рекуператорі, $\text{нм}^3/\text{с}$

C_{Π} – питома теплоємність повітря при температурі $t_{\Pi}^{\text{к}}$, $\text{кДж}/(\text{нм}^3\text{К})$

$$Q_{\Pi} = 1,005(500 - 20) \cdot 6,07 = 2929,6 \text{ кДж.}$$

Об'єм повітря треба визначати при розрахунку горіння палива в плавильній печі. При врахуванні втрат від рекуператора до плавильної печі розрахунковий об'єм повітря треба збільшити на 10-15 %, тобто

$$V_{\Pi} = (1,1 - 1,15) V_{\text{розр}}$$

$$V_{\Pi} = 1,10 \cdot 2929,615 = 3222,576 \text{ нм}^3/\text{с.}$$

Рекуператори виготовляються з металу, а також з керамічних матеріалів. Керамічні рекуператори мають низький коефіцієнт теплопередачі, наближено (3...5 Вт/(мК)). Металеві рекуператори будуть забезпечувати кращу теплопередачу в порівнянні з керамічними рекуператорами. Коефіцієнт теплопередачі металевих рекуператорів становить (10-30 Вт/(мК)). Металеві рекуператори виготовляють з чавуну та вуглецевої сталі при підігріванні повітря до температури 300°C , а також і з жароміцних сталей та сплавів – при підігріванні до температури 700°C .

ВИСНОВКИ

В даній бакалаврській роботі розраховано вагранку з підігрівом дуття продуктивністю 11 т/год. Виконано розрахунки теплового та матеріального балансів, розглянуто особливості спалювання палива. Наведено ґрунтовний аналіз конструкції вагранки, описано її функціонування та визначено основні конструктивні параметри.

Проведено розрахунок рекуператора та здійснено детальний огляд виносного радіаційно-трубчастого типу. Висвітлено конструктивні особливості, принцип функціонування, а також розглянуто сильні та слабкі сторони використання радіаційних рекуператорів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кропивний В.М., Кузик О.В., Босий М.В., Молокост Л.А. Технологія основних виробництв: навч. посіб. для студентів денної та заочної форм навчання. Кропивницький: Видавництво ТОВ «КОД», 2021. 196 с.
2. Сабірзянов Т.Г. Печі ливарних цехів: навч. посіб. для студ. вищих навчальних закладів. Кіровоград: КНТУ, 2007. 280 с.
3. Павленко Т.П., Петренко О.М., Лукашова Н.П. Електротехнологічні установки: Конспект лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 130 с.
4. Верховлюк А.М., Нарівський А.В., Могилатенко В.Г. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва: навч. посіб. / За ред. академіка НАН України Найдека В.Л. Київ: Видавничий дім "Вініченко", 2016. 224 с.
5. Методичні вказівки для самостійної роботи з дисципліни «Виробництво виливків із кольорових металів» Печі для плавлення кольорових сплавів для студентів напряму "Ливарне виробництво". [укл.: Сігарьов М.К., Стороженко С.А.]. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2014. 30с.
6. Турич В.В., Руткевич В.С. Матеріалознавство: навч. посіб. Вінниця: РВВ ВНАУ, 2012. 100с.

ДОДАТКИ