

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 рекуперативної вагранки
продуктивністю 3 т/год."

Виконав здобувач вищої освіти
IV курсу, групи ПМ-23мб-1
спеціальності 131
«Прикладна механіка»
_____ Олександр РУДЕНКО
« ____ » _____ 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**

Руденка Олександра Миколайовича

1. Тема роботи: Проектування і розрахунок рекуперативної вагранки продуктивністю 3 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 рекуперативної вагранки 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

_____ Олександр РУДЕНКО

АНОТАЦІЯ

Руденко О.М. "Проектування і розрахунок рекуперативної вагранки продуктивністю 3 т/год.", спеціальність 131 «Прикладна механіка», ОПП – «Комп'ютерний інжиніринг технологій, робототехніка і 3D друк», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2026. 38 с. Матеріали ілюстрації 2 іл.

Мета кваліфікаційної бакалаврської роботи полягає у вивченні конструкції та роботи рекуперативної вагранки, а також розрахунку її розмірів, матеріального і теплового балансів.

Під час розробки рекуперативної вагранки виконуються розрахунки матеріального і теплового балансів, що дозволяє визначити конструктивні розміри та спроектувати ефективний плавильний агрегат.

Графічна частина рекуперативної вагранки – загальний вигляд.

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

ABSTRACT

Rudenko O.M. "Design and calculation of a recuperative cupola with a capacity of 3 t/h.", specialty 131 "Applied Mechanics", OPP – "Computer Engineering Technologies, Robotics and 3D Printing", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026. 38 p. Illustration materials 2 ill.

The purpose of the qualifying bachelor's thesis is to study the design and operation of a recuperative cupola, as well as calculate its dimensions, material and heat balances.

During the development of a recuperative cupola, material and heat balance calculations are performed, which allows determining the structural dimensions and designing an efficient melting unit.

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 рекуперативної вагранки	14
1.4. Розрахунок горіння палива у вагранці	15
1.4.1. Визначення коефіцієнта надлишку повітря	15
1.4.2. Методика розрахунку кількості повітря для горіння коксу	16
1.4.3. Методика розрахунку кількості і хімічного складу відхідних газів	18
РОЗДІЛ 2. Розрахунок матеріального балансу	21
РОЗДІЛ 3. Розрахунок теплового балансу.....	24
РОЗДІЛ 4. Розрахунок розмірів вагранки.....	26
РОЗДІЛ 5. Розрахунок рекуператора	28
Висновки.....	32
Література	33
ДОДАТКИ	34
Додаток 1. Загальний вигляд вагранки	35
Додаток 2. Установка рекуператора з окремою топкою	36

ВСТУП

У галузі машинобудування саме чавун вважається ключовим сплавом, що зумовлено його чудовими експлуатаційними характеристиками порівняно з іншими матеріалами.

Для виробництва чавуну використовують широкий спектр обладнання, включаючи індукційні, дугові, тигельні та полуменеві печі, а також вагранки. Попри це, саме вагранка залишається провідним агрегатом у цій галузі з XVII століття. До її ключових переваг належать: легкість конструкції та обслуговування, здатність видавати чавун різних марок у потрібних обсягах, безперервний цикл плавки та висока економічна ефективність.

При розвитку електроплавки чавуну в дугових і індукційних печах, ваграночна плавка все ж таки продовжує розвиватись, а сам агрегат удосконалюватись.

Інтенсифікація ваграночної плавки за рахунок підігріву повітря, збагачення його киснем дозволила значно підняти температуру чавуну, покращити показники його механічної міцності. Створення установок для допалу окислу вуглецю і очищення колошникових газів від пилу дозволило використовувати вагранки, не порушуючи санітарних норм.

З точки зору енерговитрат вагранка вважається найбільш ощадливим агрегатом для переплаву чавуну. Максимально розкрити потенціал вагранкової та електроплавки дозволяє дуплекс-процес, що базується на послідовному використанні двох плавильних пристроїв.

Вагранка являє собою інженерно складний агрегат, що включає комплексну систему для очищення та допалювання відхідних газів, підігрів дуття, а також високотехнологічні механізми для автоматизованого контролю та управління плавкою.

РОЗДІЛ 1. ВАГРАНКА

У вагранці, яка є шахтною піччю, теплообмін між коксом, металом і газами відбувається у протитоці. Процес плавки дозволяє умовно виділити в шахті апарату чотири окремі зони. **Зона підігріву (верхня):** Починається від завантажувального вікна і триває до зони початку плавлення чавуну (1150-1200 °С). Її протяжність не є сталою та регулюється інтенсивністю дуття, витратою коксу і фракцією шихти. **Зона плавлення:** Ділянка, де безпосередньо розплавляються шматки металу. Процес триває близько 5-15 хвилин, упродовж яких шихта опускається в «холошу», а тривалість залежить від умов теплообміну та складу матеріалів. **Зона перегріву:** Охоплює простір від місця утворення крапель розплаву до рівня нижнього фурменого поясу. **Горнова зона (нижня):** Розташована нижче фурм. Через знижений вміст кисню температура тут нижча. У цій зоні розплав насичується сіркою та вуглецем, тому важливо мінімізувати час перебування чавуну в горні. [1,2].

У вагранці проходить ряд хімічних реакцій. Основні з них – угар елементів чавуну під дією окислювальної атмосфери і створення шлаку із флюсів, окислів елементів чавуну, частинок неметалевих матеріалів, які пристали до шматків шихти, футеровки печі і зони коксу, крім того, рідкий чавун взаємодіє зі шлаком і насичується сіркою і вуглецем із коксу. Усі металургійні процеси, які протікають у вагранці взаємозв'язані. На них впливають температурні умови в печі, характер газової атмосфери, склад металу і шлаку.

1.1. КОНСТРУКЦІЯ ВАГРАНКИ

Згідно з рис. 1, будова вагранки базується на таких вузлах: механізм завантаження шихти, шахта з іскрогасною трубою, фурмена коробка та опорна частина, яка має функцію відкривання днища.

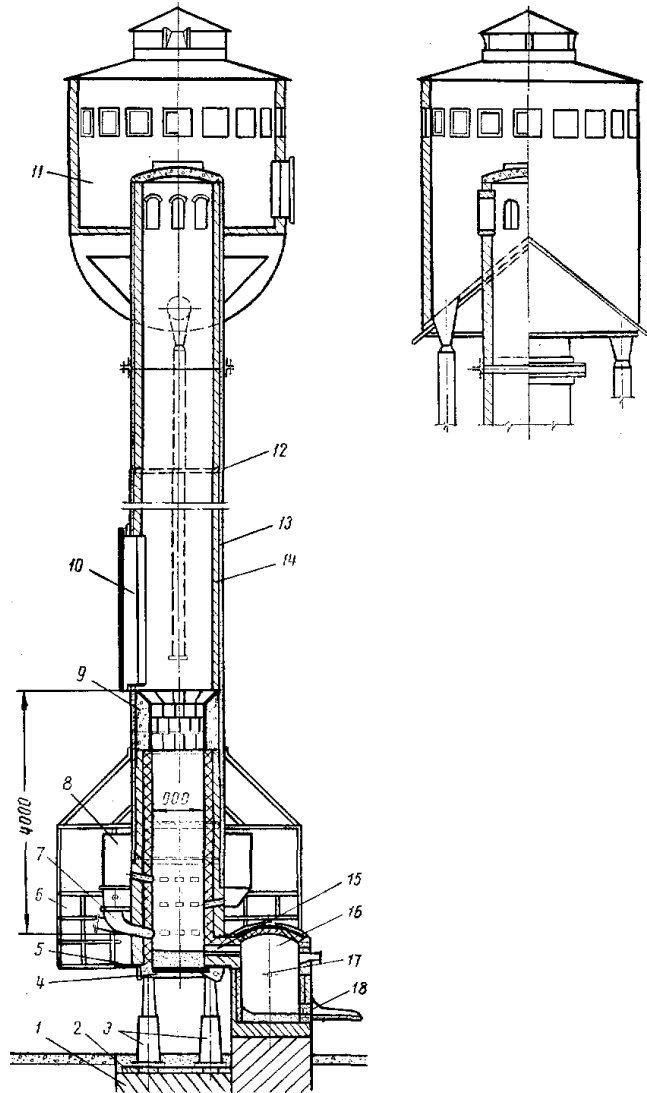


Рис. 1. Вагранка з накопичувачем

- 1 – фундамент; 2 – фундаментна плита; 3 – колони; 4 – відкидне днище;
5 – подова плита; 6 – робоча площадка; 7 – фурменний рукав; 8 – повітряна
коробка; 9 – захисні елементи колошника; 10 – завантажувальне вікно;
11 – іскрогасник; 12 – опорне кільце; 13 – засипка; 14 – футеровка;
15 – перехідна льотка; 16 – накопичувач; 17 – випускний отвір для шлаку;
18 – випускний отвір для чавуну

Опорна частина сприймає статичне навантаження від усієї вагранки і динамічне від завантаженої шихти. Вона складається з фундаментної плити, чотирьох колон, опорної рами, подової плити, днища, механізму відкривання і закривання днища. Висота опорної частини повинна бути достатньою для розташування перед вагранкою міксерів або ковшів для прийому рідкого металу, а також для механізації прибирання з під вагранки відходів після плавки. Днище вагранки складається з двох кришок, які за допомогою цапф підвищуються на вісі, яка проходить через підшипники, що закріплені до подової плити. Напівднища закриваються і відкриваються за допомогою гідравлічного, електромеханічного чи пневматичного привода. В закритому положенні напівднища надійно закріплюються за допомогою запорів.

Частину вагранки від завантажувального вікна до подової плити називають шахтою. Шахта має циліндричний, конічний або складний профіль. Вагранка з таким профілем шахти з фурмами, горном розрахована на довготривалу експлуатацію без вибивки для спеціального ремонту футеровки.

Футеровка шахти вагранки має різний ступінь зносу по висоті. Область завантажувального вікна піддається інтенсивним ударним навантаженням від шихти. Ділянка, що розміщена між чавунними блоками та зоною плавки, футерується шамотною цеглою. Продуктивність агрегату безпосередньо залежить від внутрішнього діаметра шахти.

Фурмений пояс. Повітря у вагранку подається до фурменої коробки, яка розподіляє його між фурмами. Фурмена коробка з фурмою складається з патрубків поворотного шибера і з'єднаних труб. Патрубок фурми має відкидну кришку з наглядним вікном з вогнестійкого скла. Вікно служить для нагляду за процесом плавки і відкривається при припиненні подавання повітря і при розпалюванні вагранки.

Випуск розплавлених металу та шлаку з вагранки здійснюється через спеціальні пристрої: льотки, перекидні жолоби, сифонні металоприймачі або компресійні шлаковідділювачі. Чавун періодично випускають крізь металеву льотку. Перекидні канали, що з'єднують піч із накопичувачем, захищають

вогнетривкою цеглою, оскільки вони функціонують в умовах інтенсивного термічного впливу. Тривалий режим роботи вагранки передбачає використання компресійних шлаковідділювачів, які запобігають руйнуванню футеровки горна, забезпечуючи постійний стік шлаку до металоприймача. [2,3].

Верхня частина вагранки обладнана системою для подачі шихтових матеріалів та видалення газоподібних продуктів горіння.

Верхня частина шахти під завантажувальним вікном виконується у вигляді захисної воронки із чавунної цегли, яка охороняє футеровку шахти від ударів кусків шихти при завантаженні.

Конструкція і розміри димової труби повинні забезпечити надійне віддалення з цеху усіх ваграночних газів, сприяти вентиляції колошникового майданчику ваграночного відділення і не допускати вибивання ваграночних газів.

1.2. РОБОТА ВАГРАНКИ

Перед початком роботи закривають днища, набивають подину вагранки формовочним складом. Потім на неї завантажують шар коксу, який називається холостою колошою і розпалюють його природним газом або дровами. Коли кокс розгориться, закривають робоче вікно і на холосту колошу шарами завантажують робочі колоші, які складаються з механічних компонентів шихти, коксу і флюсу. Завантаження ведуть до заповнення шахти до завалочного вікна, після чого крізь отвори в шахті в нижній частині (фурми) подають повітря, яке викликає інтенсивне горіння коксу.

Продукти горіння коксу – ваграночні гази мають високу температуру, піднімаючись до верху по шахті, вони нагрівають шихту. По мірі згорання коксу робочі колоші опускаються донизу, прогріваються сходженим потоком ваграночних газів. Металеві компоненти прогріваються до температури плавлення. Плавлення на висоті 500-800 мм над фурмами і окремими краплинами проходять по розпеченій поверхні коксу, перегріваються і накопичуються в шахті вагранки нижче фурм або стікають з вагранки в накопичувач для рідкого металу. Коли рівень шлаку досягне необхідної висоти, відкривають шлакову льотку і шлак випускають із накопичувача. Потім випускають метал крізь металеву льотку.

Зниження рівня початкової (холостої) колоші триває до початку плавлення першої металевої завалки. Щоб забезпечити стабільну температуру та хімічний склад чавуну, висоту робочої коксової колоші підбирають рівною величині зниження холостої колоші. Це гарантує плавлення кожної наступної металевої порції на незмінному рівні, забезпечуючи безперервність процесу.

Для підтримки постійної висоти стовпа матеріалів в шахту завантажують метал, кокс і флюс. У вагранці гарячі гази, які виникають при горінні коксу, піднімаються, а матеріали опускаються (принцип протитоку). Внаслідок цього відбувається інтенсивна теплопередача між газами і матеріалами. Металева колоша поступово нагрівається до температури плавлення і плавиться [3].

Під час підйому гарячі гази контактують із холоднішими металевими заготовками (колошами), внаслідок чого знижується їхня температура. Утилізація тепла відхідних газів дозволяє збільшити коефіцієнт корисної дії вагранки. Типова витрата коксу для цього процесу становить від 10 до 15% від ваги металевого навантаження.

Згідно з правилами безпеки, відразу після зупинки дуття у варганці необхідно відкрити фурми. Цей захід запобігає утворенню вибухонебезпечної суміші в повітропроводі, блокуючи потрапляння вуглецевих газів із печі.

1.3. ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ РЕКУПЕРАТИВНОЇ ВАГРАНКИ

Використання гарячого дуття у вагранці сприяє зростанню температури в зоні холостої колоші, а також підвищує нагрів газів і коксового шлаку. Інтенсифікація підігріву повітря прискорює плавлення та нагрівання шихтових матеріалів. За таких умов краплі розплавленого чавуну, проходячи крізь кокс, набувають вищої температури порівняно з режимом холодного дуття. Якщо не потрібне підвищення температури рідкого металу, знижують висоту холостої колоші, щоб зменшити тривалість прибуття краплини в зоні високих температур. Це може бути досягнуто зниженням витрати коксу на робочу колошу.

Завдяки роботі на гарячому дутті зростає питома виплавка чавуну з 1м² перерізу печі. Продуктивність вагранки збільшується до 40%. Застосування гарячого дуття добре впливає і на металургійні процеси, які протікають у вагранці. Зменшується угар елементів, з'являється можливість використовувати дешеві низькосортні металовідходи замість доменних чавунів, внаслідок чого покращуються економічні показники. Для підігріву дуття використовують ваграночні гази або додатково паливо. Для підігріву повітря використовують ваграночні гази, які відбираються вище завантажувального вікна.

Стандартним рішенням для нагрівання повітряних мас є використання автономних теплообмінників або рекуператорів. Інтегровані моделі рекуператорів є менш поширеними і використовуються переважно в умовах обмеженого простору, що унеможлиблює монтаж окремого обладнання. За принципом теплообміну рекуператори класифікують на конвективні, радіаційні та змішані (радіаційно-конвективні). Розглянемо радіаційний трубчастий рекуператор. При температурі продуктів горіння вище 900-1000 °С основна маса теплоти передається випромінюванням (радіацією), а не конвекцією. Тому рекуператори, які працюють при високих температурах продуктів горіння, називаються радіаційними [3].

1.4. РОЗРАХУНОК ГОРІННЯ ПАЛИВА У ВАГРАНЦІ [1, 2]

Якісне ваграночне паливо повинно відповідати таким параметрам: забезпечувати необхідний температурний режим, витримувати тиск стовпа шихти, мати пористість на рівні 45% та високу механічну міцність. Також важливими є низька реакційна здатність і незначний вміст сірки.

Для ефективної роботи вагранок найкраще підходить кокс. Для максимальної продуктивності та вищої температури чавуну слід використовувати великі шматки однакового розміру. Збільшення фракції коксу від 25 до 100 мм дозволяє підвищити температуру чавуну з 1300 °С до 1450 °С. Найкращі результати демонструє кокс із шматками діаметром 100-150 мм.

Плавлення коксу у вагранці відбувається в межах холостої колоші. Повітряний потік, що подається крізь фурми, стикається з нагрітим паливом, спричиняючи активне окиснення вуглецю. Згідно з даними про горіння палива, початковий шар споживає близько половини кисню, а решта об'єму витрачається вище. Ділянка, де кисень повітря повністю вступає в реакцію, класифікується як киснева зона.

1.4.1. Визначення коефіцієнта надлишку повітря

Коефіцієнт надлишку повітря α для коксової вагранки можна визначити двома способами. Перший з них ґрунтується на емпіричній формулі.

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

де m_k – відносна витрата коксу у відсотках до металозавалки, або у кг/100 кг металозавалки.

Другий спосіб визначення α полягає в наступному.

Спочатку приймаємо питому витрату повітря L'_α у нм^3 повітря на м^2 площі поперечного перерізу вагранки за хвилину. Далі, прийнявши, що повітря складається з 79 об'ємних відсотків азоту і 21 об'ємних відсотків кисню, знаходимо фактичну витрату кисню за годину:

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

Далі прийнявши витрату коксу $m_{c,к}$ і вихід рідкого металу B у відсотках від металозавалки для заданої продуктивності печі Π т/год знаходимо витрату коксу

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

Для окислення цієї кількості вуглецю при $\alpha = 1$ потрібен кисень за реакцією



$$v_{O_2, \alpha=1} = 0,01m_c \Pi \cdot 1000 \cdot 22,4 / (0,01B \cdot 12) \text{ нм}^3 O_2 / \text{год.} \quad (1.5)$$

Фактичний коефіцієнт надлишку повітря буде дорівнювати відношенню $v_{O_2} / v_{O_2, \alpha=1}$, після підстановки в яке виразів (2) і (5) маємо:

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

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

1.4.2. Методика розрахунку кількості повітря для горіння коксу

Розрахунки проводимо на 1 кг коксу.

Хімічний склад палива задається на робочу масу у масових відсотках:

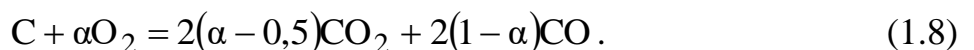
$$C^P + H^P + O^P + N^P + S^P + A^P + W^P = 100, \quad (1.7)$$

де $C^P, H^P \dots$ – вміст в паливі вуглецю, водню і т.ін., %% на робочу масу;

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

Процес окислення вуглецю коксу до CO та CO₂ забезпечується киснем повітря. При цьому маса вуглецю, що взаємодіє з дуттям, розраховується як різниця між його загальним вмістом у коксі та часткою, яка витрачається на відновлення вологи дуття і сполуки з киснем та сіркою самого палива.

Взаємодія вуглецю коксу з киснем відбувається за реакцією



Згідно цієї реакції з киснем коксу прореагує така 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 % переходить в газову фазу внаслідок взаємодії з вуглецем коксу за реакцією



Решта сірки переходить в метал (40%) і шлак (5%).

При цьому витрачається 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 взаємодіє з вуглецем коксу за реакцією, при цьому витрачається 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).

Величина $g_{H_2O}^{c.п.}$ задається або приймається, виходячи з того, що вона змінюється в межах $g_{H_2O}^{c.п.} = 10\text{-}30 \text{ гН}_2\text{О}/(\text{нм}^3\text{сух.пов.})$.

Величину $L_{\alpha}^{c.п.}$ для розрахунку $g_{c, \text{вол. пов.}}$ за формулою (1.12) слід прийняти в межах $L_{\alpha}^{c.п.} = 5,3\text{-}5,5 \text{ нм}^3/(\text{кг коксу})$, а потім, в разі необхідності її варто уточнити.

Отже, кількість вуглецю (в 1 кг коксу), який має бути окислений за рахунок кисню дуття, становить

$$g_c = 0,01 \cdot C^p - \left(0,0037 \cdot O^p / 2 + 1,0313 \cdot 10^{-3} S^p + 6,67 \cdot 10^{-4} g_{H_2O}^{c.п.} L_{\alpha}^{c.п.} \right) \text{ кгС}/(\text{кг коксу}). \quad (1.13)$$

Знаючи g_c (формула 1.13) і α (формула (1.1) і (1.6), за допомогою рівняння (1.8) знаходимо кількість сухого повітря $L_{\alpha}^{c.п.}$

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

Витрату вологого повітря знаходимо за відомою формулою:

$$L_{\alpha}^{b.п.} = \left(1 + 0,001244 g_{H_2O} \right) L_0^{c.п.}. \quad (1.15)$$

1.4.3. Методика розрахунку кількості і хімічного складу відхідних газів

Згідно з рівнянням (10) утворюється вуглекислий та чадний газ:

$$V_{\text{CO}_2, \text{к}} = g_c 2(\alpha - 0,5) \cdot 22,4/12 = 3,7333(\alpha - 0,5)g_c \text{ нм}^3\text{CO}_2/(\text{кг коксу}). \quad (1.16)$$

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

Джерелом CO_2 у відхідних газах, крім вуглецю, є також вапняк.

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

$$V_{\text{CO}_2, \text{вапн}} = \frac{g_{\text{вапн}} \cdot 0,01C^P}{m_c \cdot 100} \cdot 22,4 = 2,24 \cdot 10^{-3} g_{\text{вапн}} C^P / m_c \frac{\text{нм}^3\text{CO}_2}{\text{кг коксу}}, \quad (1.18)$$

де 100 – відносна молекулярна маса CaCO_3 .

Всього вуглекислого газу утворюється

$$V_{\text{CO}_2} = V_{\text{CO}_2, \text{к}} + V_{\text{CO}_2, \text{вапн}} = 3,7333(\alpha - 0,5)g_c + 2,24 \cdot 10^{-3} g_{\text{вапн}} C^P / m_c \frac{\text{нм}^3\text{CO}_2}{\text{кг коксу}}. \quad (1.19)$$

Завдяки реакції $\text{H}_2\text{O} + \text{C} = \text{O} + \text{H}_2$ утворюється чадного газу і вуглецю, в розрахунку на 1 кг коксу:

$$V_{\text{CO, в.п.}} = V_{\text{H}_2, \text{ в.п.}} = g_{\text{H}_2\text{O}} L_{\alpha}^{\text{с.п.}} \cdot 22,4 / (1000 \cdot 18) = 1,2444 \cdot 10^{-3} g_{\text{H}_2\text{O}} L_{\alpha}^{\text{с.п.}} \text{ нм}^3/(\text{кг коксу}). \quad (1.20)$$

Загальна кількість CO становить

$$V_{\text{CO}} = V_{\text{CO,к}} + V_{\text{CO, в.п.}} = 3,7333(1 - \alpha)g_c + 1,2444 \cdot 10^{-3} g_{\text{H}_2\text{O}} L_{\alpha}^{\text{с.п.}} \text{ нм}^3/(\text{кг коксу}). \quad (1.21)$$

Азот надходить до відхідних газів із повітря і коксу:

$$V_{\text{N}_2, \text{пов}} = 0,79 L_{\alpha}^{\text{с.п.}} \text{ нм}^3/(\text{кг коксу}); \quad (1.22)$$

$$V_{\text{N}_2, \text{к}} = 0,01 \cdot N^P / 28 \cdot 22,4 = 0,008 N^P \text{ нм}^3/(\text{кг коксу}). \quad (1.23)$$

Загальна кількість азоту в продуктах згорання коксу:

$$V_{\text{N}_2} = V_{\text{N}_2, \text{пов}} + V_{\text{N}_2, \text{к}} = 0,79 L_{\alpha}^{\text{с.п.}} + 0,008 N^P \text{ нм}^3/(\text{кг коксу}). \quad (1.24)$$

Приймаємо, що вся волога коксу переходить у відхідні газ:

$$V_{H_2O} = 0,01W^P \cdot 22,4/18 = 1,2444 \cdot 10^{-2} W^P \text{ нм}^3/\text{кг коксу}. \quad (1.25)$$

Кількість CS_2 за реакцією (1.10) з урахуванням того, що до газу переходить 55 % сірки коксу, становить

$$V_{CS_2} = \frac{0,01 \cdot S^P \cdot 0,55}{64} \cdot 22,4 = 1,925 \cdot 10^{-3} S^P \text{ нм}^3 CS_2 / \text{кг коксу}. \quad (1.26)$$

Складаємо всі компоненти газу:

$$\begin{aligned} V_{\alpha} &= V_{CO_2} + V_{CO} + V_{N_2} + V_{H_2} + V_{H_2O} + V_{CS_2} = \\ &= \underbrace{3,7333(\alpha - 0,5)g_c + 2,24 \cdot 10^{-3} g_{\text{вапн}} \cdot C^P / m_c}_{CO_2} + \\ &+ \underbrace{3,7333(1 - \alpha)g_c + 1,2444 \cdot 10^{-3} g_{H_2O} L_{\alpha}^{c.п.}}_{CO} + \underbrace{0,79 L_{\alpha}^{c.п.} + 0,008 N^P}_{N_2} + \\ &+ \underbrace{1,2444 \cdot 10^{-3} g_{H_2O} L_{\alpha}^{c.п.}}_{H_2} + \underbrace{1,2444 \cdot 10^{-2} W^P}_{H_2O} + \underbrace{1,925 \cdot 10^{-3} S^P}_{CS_2} \text{ нм}^3/\text{кг коксу}. \end{aligned} \quad (1.27)$$

Вміст того чи іншого компонента у відхідних газах в об'ємних відсотках визначається за формулою:

$$i = \frac{V_i}{V_{\alpha}} \cdot 100, \% \text{ за об'ємом} \quad (1.28)$$

Продуктивність вагранки $\Pi = 3$ т/год, площа поперечного перерізу вагранки $F_B = 0,517 \text{ м}^2$, температура чавуну на випуску з вагранки $t_{\text{ч}} = 1415^{\circ}\text{C}$, відносна витрата вуглецю коксу $m_{c,к} = 9,5\%$ від металозавалки, питома витрата повітря $L'_{\alpha} = 85 \text{ нм}^3/(\text{м}^2\text{хв})$, вологість повітря $g_{H_2O} = 10 \text{ гH}_2\text{O}/(\text{нм}^3\text{сух.пов})$, відносна витрата вапняку $m_{\text{вапн}} = 3\%$ від металозавалки, вихід рідкого металу $B = 98\%$ 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 за формулами (1.1) і (1.6)

$$\alpha = 2,4/m_{c,к} + 0,58 = 2,4 \cdot 0,01 C^P / m_{c,к} + 0,58 = 2,4 \cdot 0,01 \cdot 81,7 / 9,5 + 0,58 = 0,78$$

$$\alpha = 6,75 \cdot 10^{-3} L'_\alpha B / (m_c g) = 6,75 \cdot 10^{-3} L'_\alpha BF / (m_c \Pi) =$$

$$= 6,75 \cdot 10^{-3} \cdot 85 \cdot 98 \cdot 0,517 / (9,5 \cdot 3) = 0,76.$$

Як видно, результати розрахунків за формулами (1.1) і (1.6) практично співпадають. Приймаємо для подальших розрахунків $\alpha = 0,78$. Визначаємо величину g_c за формулою (1.13), прийнявши попередньо $L_\alpha^{c.\Pi} = 5,4 \text{ нм}^3/\text{кг коксу}$

$$g_c = 0,01 \cdot C^p - \left(3,75 \cdot 10^{-3} O^p / \alpha + 1,03 \cdot 10^{-3} S^p + 6,67 \cdot 10^{-4} g_{H_2O} L_\alpha^{c.\Pi} \right) =$$

$$= 0,01 \cdot 81,7 - \left(3,75 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2 / 0,78 + 1,03 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6 + 6,67 \cdot 10^{-4} \cdot 10 \cdot 5,4 \right) =$$

$$= 0,757 \text{ кгС}/(\text{кг коксу}).$$

Витрата сухого повітря за формулою (1.14)

$$L_\alpha^{c.\Pi} = 8,8889 \alpha_c = 8,8889 \cdot 0,78 \cdot 0,757 = 5,24 \text{ нм}^3/\text{кг коксу}.$$

Витрата вологого повітря за формулою (1.15)

$$L_\alpha^{B.\Pi} = (1 + 0,001244 \cdot 10) \cdot 5,24 = 5,305 \text{ нм}^3/\text{кг коксу}.$$

За формулою (1.27) знаходимо кількість окремих компонентів у відхідних газах та загальну їх кількість:

$$V_\alpha = \underbrace{3,7333(0,78 - 0,5) \cdot 0,757 + 2,24 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 81,7 / 9,3}_{CO_2} +$$

$$+ \underbrace{3,7333(1 - 0,78) \cdot 0,757 + 1,2444 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 5,24}_{CO} + \underbrace{0,79 \cdot 5,24 + 0,008 \cdot 0,2}_{N_2} +$$

$$+ \underbrace{1,2444 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 5,24}_{H_2} + \underbrace{1,2444 \cdot 10^{-2} \cdot 4}_{H_2O} + \underbrace{1,925 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6}_{CS_2} =$$

$$= 0,848 + 0,687 + 4,141 + 0,0652 + 0,0498 + 0,0012 = 5,792 \text{ нм}^3/\text{кг коксу}.$$

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК МАТЕРІАЛЬНОГО БАЛАНСУ ВАГРАНКИ

Щоб оцінити, як різні чинники впливають на споживання коксу та собівартість чавуну, розраховують матеріальний і тепловий баланси вагранки.

У межах матеріального балансу визначають обсяг усіх шихтових матеріалів та їхніх компонентів, що зазнають перетворень, а також вираховують кількість і склад продуктів згоряння.

Розрахунок матеріального балансу проводимо на 100 кг металозавалки [1-4].

Прибуток

1) металозавалка – 100 кг;

2) кокс, прийнявши $L'_\alpha = 85 \text{ нм}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{хв})$ і $t = 1415^\circ\text{С}$, за номограмою знаходимо $m_e = 9,5\%$, тобто витрата коксу $m_k = 9,5 \text{ кг}/(100 \text{ кг металозавалки})$;

3) вапняк – витрату вапняку приймаємо $m_B = 3,0 \text{ кг}/(100 \text{ кг м/з})$;

4) повітря – витрату повітря знаходимо за формулою

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

де F_B – площа поперечного перерізу вагранки, яка для тритонної вагранки становить $0,517 \text{ м}^2$; ρ_{Π} – густина повітря, яку приймаємо $1,29 \text{ кг}/\text{м}^3$; Π – продуктивність вагранки 3 т/г .

Маємо

$$m_{\Pi} = 6 \cdot 85 \cdot 0,517 \cdot 1,29 / 3 = 113,28 \text{ кг}/(100 \text{ кг м/з}).$$

5) футеровка – згідно з виробничими даними приймаємо витрату футеровки

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

Видаток

1) чавун – кількість чавуну на виході із вагранки дорівнює масі металозавалки мінус угар кремнію m_{Si} , угар марганцю m_{Mn} , угар заліза m_{Fe} , угар (пригар) вуглецю $\pm m_{\text{C}}$, а також мінус кількість неметалевих включень у металозавалці $m_{\text{МЗ}}$.

Приймаємо вміст у готовому чавуні $[Si] = 2,6\%$, $[Mn] = 1,0\%$. Крім того, приймаємо угари $Y_{Si} = 20\%$, $Y_{Mn} = 30\%$, $Y_C = 0\%$. Далі на підставі заводських даних приймаємо $m_{Fe} = 0,4 \text{ кг}/(100 \text{ кг м/з})$, $m_{м.з.} = 0,2 \text{ кг}/(100 \text{ кг м/з})$.

Розраховуємо кількості окислених кремнію і марганцю, а також кількості рідкого чавуну:

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

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

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

2) шлак – визначаємо кількість шлаку, враховуючи всі статті надходження до нього:

$$m_{ш} = m_{шSi} + m_{шMn} + m_{шFe} + m_{шм.з.} + m_{шв} + m_{шф} + m_{шк},$$

де окремі доданки правої частини є надходженням у шлак за рахунок: окислення кремнію, марганцю, заліза неметалевих включень металозавалки, вапняку, футеровки, коксу.

Прийнявши, що вапняк складається із карбонату кальцію і, що вміст золи у коксі становить 12,5%, маємо:

$$m_{ш} = 0,65 \cdot 60 / 28 + 0,43 \cdot 71 / 55 + 0,4 \cdot 72 / 56 + 0,2 + 3 \cdot 56 / 100 + \\ + 0,74 + 9,5 \cdot 12,5 / 100 = 6,25 \text{ кг}/(100 \text{ кг м/з}).$$

3) обсяг відхідних газів визначається як сума витрат повітря та коксу (за вирахуванням зольної частини), додана до обсягу CO_2 , що виділився з вапняку, з подальшим відніманням кисню, витраченого на окислювальні процеси кремнію, марганцю та заліза

$$m_{г} = 113,3 + 9,5 \cdot 87,5 / 100 + 3 \cdot 44 / 100 - 0,65 \cdot 32 / 28 - 0,43 \cdot 16 / 55 - 0,4 \cdot 16 / 56 = 121,95 \text{ кг}/(100 \text{ кг м/з}).$$

Складаємо таблицю матеріального балансу (табл. 2.1)

Таблиця 2.1

Матеріальний баланс плавки чавуну у вагранці продуктивністю 3 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	9,5	2	Шлак	6,25
3	Вапняк	3,00	3	Відхідні гази	121,95
4	Повітря	113,28		Всього	226,52
5	Футеровка	0,74			
	Всього	226,52			

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ

Прибуток теплоти. Приймаємо такий 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 визначаємо за формулою:

$$Q_{\text{H}}^{\text{P}} = 339C^{\text{P}} + 1256H^{\text{P}} + 109(S^{\text{P}} - O^{\text{P}}) - 25(9H^{\text{P}} + W^{\text{P}}) = \\ = 339 \cdot 81,7 + 1256 \cdot 0,8 + 109(0,6 - 0,2) - 25(9 \cdot 0,8 + 4,0) = 28465 \text{ кДж/кг.}$$

Хімічна теплота коксу $Q_{\text{х.н}} = 28465 \text{ В, кВт}$

Оскільки кокс, а також інші шихтові матеріали спеціально не підігріваються, $Q_{\text{ф}} = 0, Q_{\text{ч}} = 0$.

Фізична теплота повітря, якщо прийняти $t_{\text{пов}} = 700^{\circ}\text{C}$

$$Q_{\text{ф.пов}} = (113,3/1,29) \cdot 1,35 \cdot 700 \cdot (10000/100) / (0,9832 \cdot 3600) = 2489,9 \text{ кВт.}$$

Знаходимо теплоту екзотермічних реакцій окислення домішок чавуну, а також заліза, прийнявши теплові ефекти реакцій окислення кремнію, марганцю і заліза, відповідно 31430, 7000 і 4810 кДж/кг:

$$Q_{\text{екз}} = \frac{(31430 \cdot 0,65 + 7000 \cdot 0,43 + 4810 \cdot 0,4) \cdot 10000}{3600 \cdot 0,9832 \cdot 100} = 717 \text{ кВт.}$$

Видаток теплоти. Теплота чавуну і шлаку на виході із вагранки при тепловмісті їх, відповідно, $i_{\text{ч}} = 0,88t_{\text{ч}} + 105$; $i_{\text{ш}} = 1,46t_{\text{ш}} + 209$ кДж/кг і температурі шлаку на 50° більшою за температуру металу:

$$Q_{\text{ч}} = (0,88 \cdot 1400 + 105) \cdot 10000 / 3600 = 3714 \text{ кВт};$$

$$Q_{\text{ш}} = 0,0671 \cdot (1,46 \cdot 1450 + 209) \cdot 10000 / (0,9832 \cdot 3600) = 441 \text{ кВт.}$$

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

$$Q_2 = 125,02/1,29 \cdot 1,5 \cdot 900 \cdot 10000 / (3600 \cdot 0,9832 \cdot 100) = 3696,4;$$

$$Q_3 = 125,02/1,29 \cdot 0,10 \cdot 12750 \cdot 10000 / (3600 \cdot 0,9832 \cdot 100) = 3491,05.$$

Втратами теплоти внаслідок фізичного недопалу палива нехтуємо: $Q_4 = 0$.

Втрати теплоти теплопровідністю через кладку знаходимо для таких умов: зовнішній діаметр вагранки $D_{\text{зовн}} = 1,2$ м, корисна висота робочого простору $H = 3,83$ м; температура кожуха $t_{\text{к}} = 100^{\circ}\text{C}$; температура повітря $t_{\text{п}} = 20^{\circ}\text{C}$, ефективний коефіцієнт тепловіддачі від кожуха до навколишнього повітря $\alpha = 15 \cdot 10^{-3}$ кВт/(м²К). Маємо:

$$Q_{5\text{кл}} = \alpha(t_{\text{к}} - t_{\text{п}}) \cdot F = 15 \cdot 10^{-3}(100 - 20) \cdot 15 \cdot 1,2(3,83 + 1,2) = 21,5 \text{ кВт.}$$

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

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

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

Підставляємо знайдені значення статей прибутку і видатку теплоти у рівняння теплового балансу:

$$28465B + 2489,9 + 717 = 3714 + 441 + 3696 + 3491 + 315 + 1423B;$$

$$27042B = 8450; B = 0,3124 \text{ кг/с.}$$

Витрата металозавалки за секунду $\Pi' = 3000/(3600 \cdot 0,9832) = 0,8476$ кг/с.

Відносна витрата коксу $K = 0,3124 \cdot 100/0,8475 = 37\%$.

Результати розрахунку зводимо у таблицю 3.1.

Таблиця 3.1

Тепловий баланс вагранки

№ п/п	Прибуток теплоти	кВт	%	№ п/п	Видаток теплоти	кВт	%
1	$Q_{\text{х.п.}}$	8539,5	82,6	1	$Q_{\text{чав}}$	3714	29,4
2	$Q_{\text{ф.пов.}}$	2489,9	11,7	2	$Q_{\text{шл}}$	441	3,5
3	$Q_{\text{екз}}$	717	5,7	3	Q_2	3696	32,2
	Всього	11746	100,0	4	Q_3	3491,05	30,4
				5	$Q_{5,\text{кл}}$	21,5	0,4
				6	$Q_{5,\text{охол}}$	426,9	4,1
					Всього	11779	100,0

Коефіцієнт корисної дії вагранки $\eta = (3714 + 441) \cdot 100/8539,5 = 48,65\%$.

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК РОЗМІРІВ ВАГРАНКИ

Основні розміри вагранок розраховуються по емпіричним формулам, в яких відображається досвід їх експлуатації [2-6].

Діаметр вагранки, м

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

де G – задана продуктивність вагранки, т/г;

q – питома продуктивність вагранки

$$G = 3 \text{ т/год}; \quad q = 5,5 \text{ т/(м}^2\text{год)};$$

$$D = 1,1\sqrt{3/5,5} = 0,812.$$

Корисна висота вагранки, тобто відстань від вісі основного ряду фурм до порогу завантажувального вікна, м

$$H_0 = 4,25\sqrt{D}, \quad H_0 = 4,25\sqrt{0,812} = 3,83 \text{ м.}$$

Загальна висота вагранки (без труби), м

$$H_{\text{заг}} = H_0 + H_1 + H_2,$$

де H_1 – відстань від вісі основного ряду фурм до поду, м; H_2 – відстань від поду до полу цеху, м: $H_1 = 0,5$; $H_2 = 2$ м

$$H_{\text{заг}} = 3,83 + 0,5 + 2 = 6,33 \text{ м}$$

Діаметр металеві льотки, мм

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

де ρ – щільність чавуну, м/м³; ω – швидкість руху потоку чавуну, м/с

$$d_{\text{м.л.}} = 1,1\sqrt{3/3600 \cdot 7,2 \cdot 1} = 0,02 \text{ м}$$

Діаметр шлакової льотки приймаємо 40 мм. Сумарний розріз фурм основного ряду, м²

$$f_1 = 0,15F \quad f_1 = 0,15 \cdot 0,517 = 0,077 \text{ м}^2.$$

Розріз вагранки

$$F = \pi D^2 / 4 ; \quad F = 3,14 \cdot 0,812^2 / 4 = 0,517 \text{ м}^2.$$

Розріз іскрогасника при температурі 350 °С, збільшенні об'єму газів за рахунок підсосу повітря через завантажувальне вікно в 2 рази і швидкості газів 1 м/с

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

$$F_i = 2 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 60,73 (1 + 350/500) / 3600 \cdot 1 = 5,7 \text{ м}^2.$$

Діаметр повітропроводів при швидкості повітря 15 м/с

$$D_{\text{п}} = 1,1 \sqrt{10 G V_{\text{в}} (1 + \alpha) / 3600 \omega_{\text{в}}},$$

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

$$D_{\text{п}} = 1,1 \sqrt{10 \cdot 3 \cdot 56 (1 + 500/273) / 3600 \cdot 15} = 0,59 \text{ м}.$$

Розрахунок корпусу вагранки, подини, колон та днища здійснюється за стандартними методиками. При цьому для колон і кожуха основними є розрахунки на поздовжній вигин, тоді як днище та подова плита перевіряються на поперечний вигин. На колони припадає сумарне навантаження від власної ваги кожуха, футеровки, шихтових матеріалів та іскрогасника..

РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНОК РЕКУПЕРАТОРА [2-6]

Для збільшення конструктивної міцності радіаційних рекуператорів в умовах високого тиску або значних діаметрів ефективно використовувати трубчасті конструкції. У таких моделях робоче середовище (повітря чи газ) рухається не крізь щілину між сталевими циліндрами, а через труби малого діаметра, розміщені поблизу стінок основного каналу з димовими газами.

Ключова перевага радіаційних рекуператорів полягає у здатності ефективно підігрівати робоче середовище до високих температур при меншій металоемності (економії жаростійких сталей) порівняно з конвективними аналогами, що досягається завдяки вищій питомій теплонапруженості. Попри інтенсивний теплообмін, максимальна температура стінок у радіаційних апаратах не перевищує показників конвективних за аналогічного нагріву повітря. Це пояснюється простішою геометрією потоків та вищими швидкостями руху повітря, що забезпечує ефективне охолодження стінок.

Поряд з цим, радіаційні рекуператори забезпечують менший розкид температур стінок порівняно з конвективними. Це пояснюється інтенсивним взаємним випромінюванням між ділянками поверхні: оскільки вони розміщені в єдиному каналі та рівновіддалені від осі газового потоку, відбувається автоматичне вирівнювання температурних максимумів і мінімумів.

Взагалі, згідно експериментальних і виробничих даних, максимальна температура стінки радіаційного рекуператора перевищує температуру підігріву повітря (газу) не більше, ніж на 150-250 °С, а в конвективних рекуператорах – на 300-450 °С.

Внаслідок, якщо при застосуванні найбільш жароміцних марок сталі гранична температура димових газів для конвективних рекуператорів складає 1100 °С, то для радіаційних її підвищують до 1600 °С.

На відміну від конвективних рекуператорів, де висока швидкість димових газів є необхідною для підвищення коефіцієнта теплопередачі (що зумовлює потребу у штучній тязі), радіаційні рекуператори зазвичай функціонують без

неї. Це пояснюється конструктивними особливостями: широкі та прямі димоходи радіаційних апаратів забезпечують низькі швидкості руху газів, які слабо впливають на ефективність теплообміну.

Дуже важливою властивістю радіаційних рекуператорів є значно менша, ніж у конвективних рекуператорів, засмічуваність поверхні нагріву. Крім того, стінки радіаційних рекуператорів зазвичай вертикальні, що також перешкоджає осіданню на них пилу.

Таким чином, радіаційні рекуператори значно менше, ніж конвективні, чутливі до відкладання пилу, а очищати їх від нього простіше.

Основний мінус радіаційних рекуператорів полягає в їхніх значних розмірах: за аналогічної теплової потужності вони у 2-3 рази об'ємніші за конвективні аналоги.

На відміну від конвективних аналогів, радіаційні рекуператори краще реагують на коливання навантаження.

З огляду на це, вони є оптимальним вибором для високотемпературного нагріву, особливо якщо димові гази мають високий вміст домішок — пилу, сажі, окалини чи шлаку.

Конструкція і принцип дії радіаційного трубчастого рекуператора. Трубчастий радіаційний рекуператор для ваграночного комплексу складається з топки 1, в яку через пальник 2 подається очищений від пилу ваграночний газ. Запалювання ваграночних газів і подача додаткової теплоти, необхідної для підігріву повітря, забезпечується пальниками 3, працюючими на природному газі. подача природного газу регулюється в залежності від температури повітря на виході із рекуператора. Продукти горіння з топки 1 надходять в радіаційну частину 4 рекуператора, а потім в конвективну частину 5 і викидаються в атмосферу. Повітря надходить в конвективну секцію 6, а потім в радіаційні секції 7 і 8. В секціях 6 і 7 здійснюється принцип протитока, а в секції 8 — прямотока.

Тепловий розрахунок рекуператора [1]. Розрахунок будується на основі розрахунку теплопередачі між продуктами палива і повітрям. Кількість переданої теплоти від продуктів палива до повітря в Дж за с

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

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

З цього рівняння можуть бути отримані два рівняння для визначення необхідної поверхні рекуператора в м² чи коефіцієнта теплопередачі в Вт/(м²К)

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

При розрахунку рекуператора найбільш складна задача – визначення коефіцієнта теплопередачі k . Коефіцієнт теплопередачі металевого рекуператора 10-30 Вт/(мК).

Теплопередача в рекуператорі визначається трьома процесами: теплопередачею від продуктів палива до стінки рекуператора, теплопередачею через стінку рекуператора; теплопередачею від стінки до повітря.

Середня логарифмічна різниця температур визначається за формулою

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

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

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

Слід відмітити, що схему руху розглядають по ходу продуктів палива.

Розрахунки. Вихідні дані: $F = 0,517$ м², приймаємо $k = 25$ Вт/(м²К)

1. Розраховуємо Δt_{II} і Δt_K :

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

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

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

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

2. Визначаємо середню логарифмічну різницю температур за формулою

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

3. Розраховуємо кількість переданої теплоти від продуктів палива до повітря

$$Q = kF\Delta t_{\text{cp}};$$
$$Q = 25 \cdot 0,517 \cdot 160 = 2068 \text{ Дж/с}.$$

4. Необхідна поверхня рекуператора

$$F = Q / k\Delta t_{\text{cp}};$$
$$F = 2068 / 25 \cdot 160 = 0,517 \text{ м}^2.$$

5. Теплота, необхідна для нагрівання повітря

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

де $V_{\text{п}}$ – об'єм повітря, який нагрівається в рекуператорі, $\text{м}^3/\text{с}$;

$c_{\text{п}}$ – питома теплоємність повітря при температурі $t_{\text{п}}^{\text{к}}$, $\text{кДж}/(\text{м}^3\text{К})$

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

Об'єм повітря визначають при розрахунку горіння палива в печі. З урахуванням втрат від рекуператора до печі розрахунковий об'єм повітря необхідно збільшити на 10-15 %, тобто

$$V_{\text{п}} = (1,1 - 1,15) V_{\text{розр}};$$
$$V_{\text{п}} = 1,10 \cdot 2929,615 = 3222,576 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Рекуператори виготовляють з металу або з керамічних матеріалів. Керамічні рекуператори мають низький коефіцієнт теплопередачі (3...5 Вт/(мК)).

Металеві рекуператори забезпечують кращу теплопередачу в порівнянні з керамічними. Коефіцієнт теплопередачі металевого рекуператора (10-30 Вт/(мК)). Металеві рекуператори виготовляють з чавуну і вуглецевої сталі при підігріві повітря до температури $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ і жароміцних сталей і сплавів – при підігріві до температури $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$

ВИСНОВКИ

В даній бакалаврській роботі виконано проектування і розрахунок рекуперативної вагранки продуктивністю 3 т/год, проведений розрахунок матеріального і теплового балансів та процесу горіння палива в печі, що є основою для її проектування. Проаналізовано будову та функціонування плавильної вагранки, а також визначено її ключові габаритні розміри.

Окрему увагу приділено розрахунку та конструктивним особливостям виносного радіаційно-трубчастого рекуператора, висвітлено принцип його роботи, переваги та недоліки.

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