


**ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»**

МЕТАЛУРГІЙНІ ПЕЧІ:

**методичні рекомендації
до виконання практичних робіт
та індивідуальних завдань**

Запоріжжя 2024



УДК 669.046(07)
М54

Рекомендовано Науково-методичною радою
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
(протокол № 3 від 22.11.2024 р.)

Укладачі:

Ягольник М. В., канд. техн. наук, доцент,
Бойко М. М., канд. техн. наук, доцент,
Стоянов О.М., канд. техн. наук, доцент,
Малій Х. В., канд. техн. наук, доцент.

М54 Металургійні печі : методичні рекомендації до виконання практичних робіт та індивідуальних завдань / уклад.: М. В. Ягольник, М. М. Бойко, О. М. Стоянов, Х. В. Малій. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2024. 38 с.

У методичних рекомендаціях наведено поради і методичні підходи до виконання практичних робіт, які виконуються в процесі вивчення дисципліни. Матеріал містить короткі теоретичні викладки за тематикою робіт, завдання для їх виконання, порядок оформлення звіту та питання для підготовки до їх захисту.

УДК 669.046(072)

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТИНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2024



Зміст

ВСТУП	4
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1. Розрахунок кількості теплоти необхідної на запалення аглошихти	5
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 2. Розрахунок характеристик повітрянагрівача доменної печі.....	8
ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ № 1. Розрахунки характеристик металургійних печей	15
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 3. Розрахунок теплового навантаження мартенівської печі	16
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 4. Розрахунок теплового балансу в двохванному сталеплавильному агрегаті.....	21
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 5. Розрахунок теплових втрат кладки печі.....	27
ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ № 2. Аналіз конструкцій та теплової роботи металургійних печей	37
ЛІТЕРАТУРА.....	38

ВСТУП

Металургійні печі – спеціальний курс бакалаврської підготовки для металургів, який дозволить Вам зрозуміти і професійно використовувати знання, необхідні при виборі теплових агрегатів та обладнання при організації технологічних процесів металургійного виробництва.

Відмінною рисою курсу є розгляд технологічних особливостей конструкції та обладнання металургійних печей основних ланок виробництва чорних металів. В рамках даного підходу курс інтегрує знання знань та навички, які стосуються агрегатів та обладнання сучасних металургійних печей. Отримані знання можуть бути корисними при розробці та захисті випускної кваліфікаційної роботи бакалавра.

За освітньою програмою «Металургія чорних металів» цей освітній компонент є обов'язковим спеціалізованим курсом, в іншому випадку – може бути елементом індивідуальної освітньої траєкторії.

Правила виконання практичних робіт

1. Практичні роботи виконуються згідно із затвердженим семестровим графіком, який викладається в Moodle.

2. Звіт про виконання роботи в обов'язковому порядку завантажується в систему Moodle в розділі відповідного курсу.

3. При захисті роботи студент зобов'язаний знати основні теоретичні та практичні положення за даною роботою.

Практичні роботи виконуються безпосередньо на занятті, що є бажаним, однак не обов'язковим; матеріали для виконання практичної роботи доступні в записі, які зберігаються в Microsoft Teams, та викладені в повному обсязі в Moodle. Оцінка за практичну роботу виставляється за фактом виконання та враховуючи правильність розрахунків. Якщо студент виконав роботу з помилками, то він має можливість допрацювати свої розрахунки та підвищити оцінки.

Загальні вказівки щодо оформлення звіту та критерії оцінювання

Звіт повинен містити найменування та мету даної роботи, виконані розрахунки та графіки, за потреби висновки і практичні рекомендації.

Практичні роботи здобувачами виконуються за допомогою обчислювальної техніки. Результатом виконання практичної роботи є оформлений за вимогами та зданий звіт. Максимальна кількість балів, яку здобувач може отримати за виконання кожної практичної роботи – 5.



Практична робота № 1

Розрахунок кількості теплоти необхідної на запалення аглошихти

Мета роботи - отримати знання і навички розрахунків теплових потреб агломераційного процесу.

Запалювання шихти істотно впливає весь хід процесу спікання. При звичайному способі агломерації з просмоктуванням повітря високі температури в зоні горіння досягаються в результаті горіння твердого палива шихти і регенерації теплоти розжареного агломерату, що передається повітрям, яке засмоктується в шар.

Запалювання відповідає вимогам технології, якщо воно забезпечує стійке горіння твердого палива. Ця умова є необхідною, але не достатньою. Якщо до початку стійкого горіння виявиться, що шихта акумулювала необхідну кількість теплоти, то з погляду температурно-теплогового режиму процес пройде нормально. Якщо теплоти виявиться недостатньо (хоча і встановилося стійке горіння твердого палива), запалення не можна вважати задовільним. Тому від запалення вимагається не тільки займання твердого палива, а й забезпечення теплотою реакцій декарбонізації, дегідратації.

У початковій стадії процесу шар розжареного агломерату відсутній, що унеможлиблює надходження регенованої теплоти в зону горіння. Тому у верхніх елементарних шарах, що спікаються, є значний дефіцит теплоти ($\approx 60\%$ від загальної теплотребности). Покриватись цей дефіцит повинен за рахунок теплоти запалення.

Для нормального перебігу процесу спікання потрібна при запаленні витрата від $145 \cdot 10^3$ до $170 \cdot 10^3$ кДж теплоти на 1 тону отриманого агломерату. Ця величина називається інтенсивністю запалювання (I):

$$I = \frac{Q_{\text{зап}}}{P}, \quad (1.1)$$

де Q – кількість теплоти на запалювання, кДж;
 P – продуктивність агломераційної машини, т/год;

$$P = 60 \cdot B \cdot H \cdot v \cdot \gamma_{\text{ш}} \cdot m_{\text{e}}, \quad (1.2)$$

де B – ширина палет, м; v – швидкість руху палет, м/хв; H – висота шару шихти, м; $\gamma_{\text{ш}}$ – насипна маса шихти, т/м³; m_{e} – вихід годного агломерату за шихти, т/т.

$$I = \frac{Q_{\text{апж}}}{60 \cdot B \cdot H \cdot v \cdot \gamma_{\text{ш}} \cdot m_{\text{e}}}, \quad \text{кДж/т.} \quad (1.3)$$

При одному і тому ж значенні $Q_{\text{зап}}$ однаковою величину I можна отримати або при високій швидкості руху палет v , малих значеннях $\gamma_{\text{ш}}$ і m_{e}

(наприклад, при спіканні офлюсованої шихти), або при великих значеннях $\gamma_{ш}$ і m_e , але малому значенні u (спікання багатих магнетитових концентратів) В обох випадках знаменник рівняння (1.3), а значить і величина I можуть бути однаковими, тоді як тепловий вплив запалювання на шихту буде різним через неоднаковий час перебування шихти під запальним горном.

Приклад. Нехай запальний горн постачає за 1 год $20,8 \cdot 10^6$ кДж. На машині з площею спікання 50 м^2 ($B = 2 \text{ м}$) спікаються дві різні шихти:

а) концентрат магнітного збагачення при $\gamma_{ш} = 2,1 \text{ т/м}^3$; $m_e = 0,9$; $H = 0,2 \text{ м}$; $u = 2,8 \text{ м/хв}$; $P = 130 \text{ т/год}$ (включаючи зворот);

б) офлюсована шихта з криворізької руди при $\gamma_{ш} = 1,7 \text{ т/м}^3$; $m_e = 0,8$; $H = 0,25 \text{ м}$; $u = 3,2 \text{ м/хв}$; $P = 130 \text{ т/год}$ (включаючи зворот).

Для обох випадків $I = 160 \cdot 10^3$ кДж/т, проте вплив запалювання на шихту буде різним, тобто одиниця поверхні шихти отримує при проходженні під горном різну кількість теплоти.

У першому випадку

$$q_1 = \frac{Q_{заж}}{60Bv} = \frac{20,8 \cdot 10^6}{60 \cdot 2 \cdot 2,8} = 62000 \text{ кДж/м}^2.$$

У другому випадку

$$q_2 = \frac{Q_{заж}}{60Bv} = \frac{20,8 \cdot 10^6}{60 \cdot 2 \cdot 3,2} = 54000 \text{ кДж/м}^2.$$

Таким чином, для офлюсованої шихти, незважаючи на нормальне значення I , тепловий вплив запального горна буде в 1,15 рази меншим порівняно з випадком спікання неофлюсованої шихти з концентрату магнітного збагачення.

Результати запалення залежать від питомої витрати теплоти q , яка прямо пропорційна тривалості запалення τ та його інтенсивності I :


$$q = I \tau, \text{ кДж/м}^2. \quad (1.4)$$

Під інтенсивністю запалення слід розуміти кількість теплоти, що виділяється в одиницю часу одиницею площі дзеркала запалювання горна, іншими словами, - це кількість теплоти, яку може отримати 1 м^2 площі шихти від запального горна в одиницю часу.

Обчислюється I за рівнянням:

$$I = \frac{Q_{зап}}{60S}, \text{ кДж/м}^2 \cdot \text{хв}; \quad (1.5)$$

$$Q_{зап} = \eta Q_H^p V, \text{ кДж/год}, \quad (1.6)$$



де V - витрата палива запалення, м³/год (кг/год); Q_H^p - нижча теплотворна здатність палива, кДж/м³ (кДж/кг); η – тепловий коефіцієнт корисної дії теплоти.

Враховуючи те, що тривалість запалення τ дорівнює приватному від поділу довжини дзеркала запалення горна L_G на швидкість руху палет u (м/хв), з (1.4) знаходимо:

$$I = \frac{q}{\tau} = \frac{q}{L_G} u. \quad (1.7)$$

Прирівнюючи праві частини рівнянь (5) та (7), визначаємо годинну витрату тепла запалювання:

$$Q_{заж} = \frac{60Sq}{L_G} u. \quad (1.8)$$

Підставляючи $S = B_G L_G$, отримаємо

$$Q_{заж} = 60B_G q u. \quad (1.9)$$

Таким чином, кількість теплоти, яка необхідна на запалювання шихти в одиницю часу, пропорційно питомій його витраті q і швидкості руху палет u .

Запальний пристрій повинен надати шихті таку кількість теплоти, якої вистачило б не тільки на покриття теплових витрат, пов'язаних з випаровуванням гігроскопічної вологи, підігрівом шихти та повітря до температури займання твердого палива, але й для підтримки стійкого процесу у верхній частині шару. Для цього необхідно деяку кількість теплоти витратити на перебіг ендотермічних процесів. Прихід теплоти від запального пристрою значною мірою визначається також фізико-хімічними властивостями шихти.

При виробництві офлюсованого агломерату, внаслідок збільшення потреби в теплоті одиниці поверхні шихти, запальний горн повинен в одиницю часу розвивати більше теплоти, ніж при виробництві неофлюсованого агломерату. З іншого боку, спікання офлюсованих шихт протікає з більшою вертикальною швидкістю, тобто при скороченій тривалості запалення. З рівняння (1.4) видно, що при скороченні зберегти однакове значення q можна тільки шляхом відповідного збільшення I .

Задовільне запалювання при спіканні рудних агломераційних шихт відбувається при витраті теплоти – 58000-75000 кДж/м² для неофлюсованої та 75000-92000 кДж/м² для шихти офлюсованої.



Практична робота № 2

Розрахунок характеристик повітрянагрівача доменної печі

Мета роботи - отримати знання і навички розрахунків характеристик повітрянагрівача доменної печі.

Загальні відомості

Високоєфективна робота сучасних доменних печей забезпечується безперервною подачею величезної кількості атмосферного повітря. Примусова подача дуття здійснюється спеціальними машинами високої продуктивності. Вони виділяються простотою конструкції, високою надійністю в роботі, відносно невисокими витратами енергетичних ресурсів.

Важливим є і те, що стиснуте в повітродувці дуття перед подачею в піч попередньо нагрівається до високих температур. Необхідність нагріву дуття визначається тим, що в зв'язку з безперервним ростом виробництва чавуну та недоліком коксівного вугілля особливо гостро стоїть питання зниження витрати коксу в доменних печах. Саме підвищення температури дуття є важливою умовою зменшення витрати коксу та збільшення подачі в піч його замінників (природного газу, коксівного газу, вугільного пилу та ін.) Від нагріву дуття залежить також і продуктивність доменної печі. Економічний рівень нагріву дуття – 1400-1500⁰С. На сучасних печах температура дуття 1250-1300⁰С.

Сучасний нагрівач повітря – це дуже коштовна споруда, тому необхідно намагатись знижувати капітальні витрати на його спорудження та експлуатацію. Виконання даної задачі покладається на технологічний персонал, який повинен знати конструкцію агрегату та умови його експлуатації.

Дуттєвий режим доменної плавки характеризується, в основному, кількістю та складом дуття, його тиском та температурою.

Сучасна доменна піч споживає величезну кількість повітря, необхідного для спалювання в горні твердого палива. Так, на одну піч корисним обсягом 2002 м³, що працює на атмосферному дутті (вміст кисню ~ 21%) з коефіцієнтом використання корисного об'єму 0,5 м³·доба/т чавуну й витратою коксу 0,5 т/т чавуну, добова витрата повітря становить близько 6 млн м³, або близько 7700 т. При збагаченні дуття киснем і застосуванні природного газу та інших замінників коксу питома витрата повітря коливається в межах від 1,6 до 2,0 м³/хв. на 1 м³ корисного об'єму печі. Слід зазначити, що подача дуття повинна здійснюватися безперервно. При цьому основним завданням повітродувних засобів є подача в піч заданої вагової кількості кисню, яка визначається питомою витратою дуття на 1 т палива (м³/т палива).

Загальну витрату дуття за хвилину на фурмах доменної печі можна визначити за формулою:

$$V_d = g \cdot k \cdot \frac{T}{24} \cdot 60, \text{ м}^3/\text{хв.} \quad (2.1)$$

де: g – питома витрата вологого дуття на 1 т палива ($\text{м}^3/\text{т}$);
 k – питома витрата палива для виплавки 1 т чавуну, $\text{т}/\text{т}$;
 T – продуктивність доменної печі, $\text{т}/\text{добу}$.

Витрата дуття на 1кг вуглецю:

$$V_d = 22,4 \cdot \frac{100}{2 \cdot 12 \cdot (w \cdot (1 - \frac{f}{100}) + 0,5 \cdot f)}, \text{ м}^3/\text{кг } C_{\text{ф}}, \quad (2.2)$$

де: w – вміст кисню в сухому дутті, %;
 f – вологість дуття, %

Вуглець, що горить в потоці дуття на фурмах, визначається наступним чином:

$$C_{\text{ф}} = C_{\text{к}} - C_{\text{д}} - C_{\text{ч}} - C_{\text{скп}}, \text{ кг/т чавуну}, \quad (2.3)$$


де: $C_{\text{к}}$ – вуглець, який вноситься у піч коксом, $\text{кг}/\text{т}$ чавуну;
 $C_{\text{ч}}$ – вуглець, розчинений у чавуні, $\text{кг}/\text{т}$ чавуну;
 $C_{\text{д}}$ – вуглець, що витрачається на пряме відновлення Fe, Si, Mn, P $\text{кг}/\text{т}$ чавуну;
 $C_{\text{скп}}$ – вуглець, що виноситься газом з колошниковим пилом, $\text{кг}/\text{т}$ чавуну.

При питомій витраті повітря (вміст кисню 21%) на 1 т коксу близько 2900 м^3 , і беручи до уваги, що $k \cdot T$ у виразі (2.1) це добова витрата коксу (K), одержуємо $V_g = 2K$, $\text{м}^3/\text{хв.}$, тобто хвилинна витрата повітря приблизно становить 2 вагових добових витрати коксу.

Важливою особливістю роботи доменної печі є примусова подача дуття з тиском, що перевищує опір газодинамічної системи – повітродувка, повітро- та газопроводи, доменна піч і газоочистка. Так, наприклад, при надлишковому тиску газу на колошнику доменної печі $196 \text{ кН}/\text{м}^2$ (2 атм.) абсолютний тиск дуття, що подається в піч, коливається в межах $430\text{-}450 \text{ кН}/\text{м}^2$ (4,4-4,6 атм.).

Забезпечення повітродувними агрегатами заданих параметрів дуття (кількість і тиск) вимагає і певних витрат енергетичних ресурсів. Так, витрата палива на стискання повітря (дуття) дорівнює в тепловому еквіваленті 9-12 % від витрати коксу на виплавку 1т чавуну. Вартість холодного дуття становить 5-8 % від вартості усього доменного переділу.

В сучасному комплексі доменної печі для нагрівання дуття використовують як регенеративні теплообмінники (повітронагрівачі), так і теплообмінники рекуперативного типу.



Елементом рекуператора є металічна або керамічна труба. Один з теплоносіїв рухається всередині труб, а інший – омиває їх зовні. Ці теплоносії рухаються одночасно і безперервно впродовж великого проміжку часу. В регенераторі основним теплообмінним елементом служить вогнетривка кладка. В цьому випадку рух теплоносіїв посунуте в часі. Такий нагрівач працює циклічно – спочатку продукти спалювання палива проходять через вогнетривку кладку насадки зверху вниз, нагріваючи її, а потім холодне повітря рухається через нагріту насадку знизу вгору, нагріваючись за рахунок теплоти, акумульованою вогнетривкою кладкою.

Основними перевагами рекуператорів у порівнянні з регенераторами є:

- незмінність температури теплоносія, що нагрівається (повітря, доменний газ), на виході з теплообмінника. В системі регенератора ця температура в часі знижується, ось чому її треба стабілізувати, використовуючи спеціальні пристрої;
- необхідна поверхня нагрівання нижче, тому матеріалоемність і габарити рекуператорів значно менші.

В той же час слід зазначити, що сучасні рекуперативні теплообмінники не дозволяють нагрівати повітря вище 800⁰С (металічні) або 1100⁰С (керамічні), причому останні мають низьку газоцільність.

Важливою перевагою регенеративних теплообмінників є те, що вони надають можливість нагрівати повітря до 1200-1400⁰С.

Особливістю доменних повітрянагрівачів є те, що:

- це є регенератори, які самостійно обігріваються, через що вони оборудуються спеціальною камерою спалювання та газовим пальником;
- вони призначені для нагрівання значної кількості повітря (120-140 тис. м³/год.) під тиском 0,3-0,5 МПа. У зв'язку з цим повітрянагрівачі мають великі габарити, спеціальні конструкції і різні види матеріалів кожуха і кладки;
- через значний об'єм робочого простору повітрянагрівачів є необхідність їх вентиляції при переводі з режиму нагрівання насадки на режим нагрівання дуття, при цьому має місце значна пауза (6-15 хв.), коли теплообмінник не опалюється.

Враховуючи особливості нагрівання повітря в апаратах різних типів, в сучасних умовах розроблено і запропоновано до впровадження комплексну систему нагріву дуття, яка передбачає на першому етапі нагрів дуття до температур 700-800⁰С здійснювати в рекуператорах сучасної конструкції, а подальше нагрівання дуття до 1200-1400⁰С проводити за рахунок теплоти від спалювання газу в повітропроводі гарячого дуття. Реалізацію даної схеми нагрівання повітря можна очікувати в недалекому майбутньому.

Розрахунок повітрянагрівача

Описати конструктивні особливості і пристрій проектного повітрянагрівача. Указати марку сталі і товщину кожуха, вид вибраного вогнетриву для кладки стін, тип насадки, вид вогнетриву в різних частинах по висоті насадки, припустимий рівень нагрівання купола. Навести схему повітрянагрівача у масштабі 1:300 і проставити основні розміри.

У технологічний розрахунок повітрянагрівача входить вибір висоти, поверхні нагрівання, розмірів камер насадки і горіння, вибір вогнетривів, продуктивності пальників по повітрю, а також кількості повітрянагрівачів за варіантами, наведеними у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Вихідні дані за варіантами

№	Об'єм доменної печі, $V_p, \text{м}^3$	Поверхня нагрівання $S_n, \text{м}^2/\text{м}^3$	Зовнішній діаметр каупера, $D_n, \text{м}$	Тип насадки, $S_{уд}, \text{м}^2/\text{м}^3$	Доля перерізу камери насадки, $a, \text{м}^2/\text{м}^2$	Товщина кожуху, $B_1, \text{мм}$	Висота піднасадочного простору, $h_1, \text{м}$
1	1033	60	8,0	24,9	0,78	20	2,2
2	1386	60	8,5	32,7	0,78	20	2,2
3	1513	62	9,0	24,9	0,80	20	2,3
4	1719	64	9,0	32,7	0,80	25	2,3
5	2000	64	9,0	24,9	0,80	25	2,4
6	2300	65	9,2	32,7	0,80	25	2,4
7	2700	65	9,5	24,9	0,82	30	2,5
8	3000	67	9,9	32,7	0,82	30	2,5
9	3200	70	10,0	24,9	0,85	30	2,6
10	5005	100	12	32,7	0,85	30	2,6
11	1033	62	8,2	32,7	0,79	20	2,3
12	1386	62	8,6	24,9	0,79	20	2,3
13	1513	63	8,9	32,7	0,78	20	2,3
14	1719	65	9,0	24,9	0,78	20	2,4
15	2000	65	9,1	32,7	0,80	25	2,4
16	2300	66	9,3	24,9	0,80	25	2,4
17	2700	67	9,6	32,7	0,83	25	2,5
18	3000	67	10,5	24,9	0,84	30	2,5
19	3200	71	11,0	32,7	0,84	30	2,5
20	5005	105	12,0	32,7	0,85	30	2,5
21	5500	107	12,0	32,7	0,85	30	2,6

Дані, однакові для усіх варіантів:

- кількість повітрянагрівачів $n = 4$ шт;
- теплоізоляційний шар (трепельна цегла) $v_2 = 65$ мм;
- товщина кладки стін (шамотна і високоглиноземна цегла в два ряди по 230 мм) $v_3 = 460$ мм;
- відстань від верха насадки до верха стін каупера $h_2 = 0.5$ м;
- відстань від фундаменту до осі штуцера газового пальника (орієнтовно приймається як відстань від рівня заводської підлоги до робочої площадки печі плюс 1,5 м) $h_3 = 11,5$ м;

- товщина стін камери горіння (складається з двох шарів: зовнішнього із шамоту - 230 мм і внутрішнього з високоглиноземної цегли – 345 мм) $v_4 = 575$ мм.

Приблизний розрахунок повітрянагрівача для доменної печі корисним об'ємом 2000 м³

1. Необхідна поверхня нагрівання одного повітрянагрівача
 $S = V_n \cdot S_n / n = 2000 \cdot 64 / 4 = 32000 \text{ м}^2$.
2. Визначення внутрішнього діаметра повітрянагрівача
 $D_e = D_n - 2(\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3) = 9 - 2 \cdot (0,02 + 0,065 + 0,460) = 7,946 \text{ м}$.
3. Визначення корисного перетину камери насадки
 $F_n = \pi D_e^2 \cdot a / 4 = 3,14 \cdot 7,946^2 \cdot 0,8 / 4 = 39,65 \text{ м}^2$.
4. Визначення необхідного об'єму насадки
 $V_n = S / S_{y\partial} = 32000 / 32,7 = 978,6 \text{ м}^3$.
5. Визначення висоти насадки
 $H_n = V_n / F_n = 978,6 / 39,65 = 24,7 \text{ м}$.
6. Загальна висота повітрянагрівача
 $H = H_n + h_1 + h_2 + D_n / 2 = 24,7 + 2,4 + 0,5 + 9,0 / 2 = 32,1 \text{ м}$.
7. Загальний перетин камери горіння
 $F_{ke} = \pi D_e^2 (1 - a) / 4 = 3,14 \cdot 7,946^2 \cdot (1 - 0,8) / 4 = 9,9 \text{ м}^2$.
8. Висота камери горіння
 $H_{ke} = H_n + h_1 - h_3 = 24,7 + 2,4 - 11,5 = 15,6 \text{ м}$.
9. Визначимо зовнішній гідравлічний радіус камери горіння, вважаючи, що форма її – напівкруг-напівеліпс
 $R_{нкг} = \sqrt{F_{кр} / \pi} = (9,9 / 3,14)^{0,5} = 1,775 \text{ м}$
 $R_{нкг}$ – гідравлічний радіус – гідравлічна характеристика поперечного перетину потоку рідини (газу), що виражається відношенням площі цього перетину до його так званого змоченого периметра (тобто до тієї частини периметра, на якій відбувається зіткнення потоку з твердими стінками).
10. Внутрішній гідравлічний радіус камери горіння
 $R_{вкг} = R_{нкг} - v_4 = 1,775 - 0,575 = 1,2 \text{ м}$.

11. Внутрішня поверхня камери горіння
 $S_{ке} = 2 \pi R_{ке} H_{ке} = 2 \cdot 3,14 \cdot 1,2 \cdot 15,6 = 117,56 \text{ м}^2.$

12. Загальна поверхня нагрівання повітрянагрівача
 $S_{общ} = S + S_{кг} + \pi D_B (h_2 + D_B / 2) =$
 $= 32000 + 117,56 + 3,14 \cdot 7,946 \cdot (0,5 + 7,946/2) = 32229,14 \text{ м}^2.$

13. Оскільки продуктивність газових пальників для різних доменних печей досягає 80 000 – 200 000 м³/година, то вибираємо відповідно до обсягу печі

$$P_r = 120\ 000 \text{ м}^3/\text{година} (33,3 \text{ м}^3/\text{с}).$$

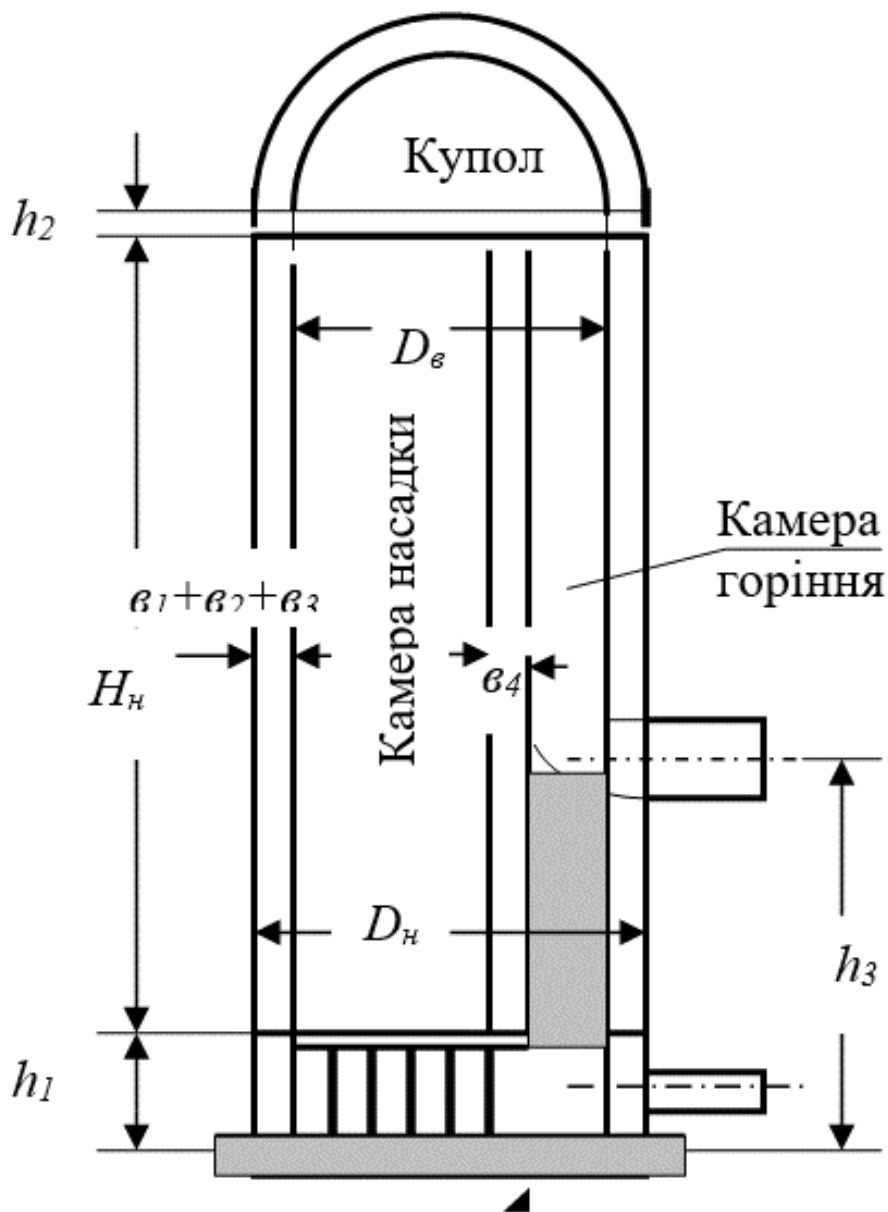



Рисунок 2.1 - Схема основних розмірів повітрянагрівача

Таблиця 2.2 - Характеристика розрахованих (запроектованих) повітрянагрівачів

№	Показник	Одиниця вимірювання	Чисельна величина
1	Число повітрянагрівачів, n	шт.	4
2	Поверхня нагрівання: одного повітрянагрівача, S на m^3 корисного об'єму печі, S_H	m^2	32000
		m^2/m^3	64
3	Висота повітрянагрівача, H	м	32,1
4	Діаметр повітрянагрівача, D_H	м	9,0
5	Камера насадки: висота, H_H розміри каналів, V_K товщина цегли, h_K	м	24,7
		мм	41
		мм	80
6	Камера горіння: висота, H_{KF} гидравлічний радіус, R_B	м	15,6
		м	1,2
7	Продуктивність пальників по повітрю, P_r	m^3/c	33,3



Індивідуальне завдання № 1

Розрахунки характеристик металургійних печей

Варіант завдання для виконання індивідуального завдання студент обирає з переліку таблиці 2.1 (див. вище) у відповідності до його номеру за списком студентської групи. У окремих випадках студент узгоджує обрану самостійно тему з лектором (викладачем).

Індивідуальне завдання має бути надруковане шрифтом Times New Romans 14 розміру з інтервалом 1,5, нумерація формул, наведених у роботі, має бути наскрізною.

Виконане індивідуальне завдання захищається у вигляді пояснення (виступу) на практичному занятті - для отримання максимально можливої кількості балів.

Завдання

Описати конструктивні особливості і пристрій проектного повітрянагрівача. Указати марку сталі і товщину кожуха, вид вибраного вогнетриву для кладки стін, тип насадки, вид вогнетриву в різних частинах по висоті насадки, припустимий рівень нагрівання купола.

Навести схему повітрянагрівача і проставити основні розміри. У технологічний розрахунок повітрянагрівача входить вибір висоти, поверхні нагрівання, розмірів камер насадки і горіння, вибір вогнетривів, продуктивності пальників по повітрю, а також кількості повітрянагрівачів за варіантами, наведеними у таблиці 2.1.

Дані, однакові для усіх варіантів:

- кількість повітрянагрівачів $n = 4$ шт;
- теплоізоляційний шар (трепельна цегла) $v_2 = 65$ мм;
- товщина кладки стін (шамотна і високоглиноземна цегла в два ряди по 230 мм) $v_3 = 460$ мм;
- відстань від верха насадки до верха стін каупера $h_2 = 0.5$ м;
- відстань від фундаменту до осі штуцера газового пальника (орієнтовно приймається як відстань від рівня заводської підлоги до робочої площадки печі плюс 1,5 м) $h_3 = 11,5$ м;
- товщина стін камери горіння (складається з двох шарів: зовнішнього із шамоту - 230 мм і внутрішнього з високоглиноземної цегли – 345 мм) $v_4 = 575$ мм.



Практична робота № 3

Розрахунок теплового навантаження мартенівської печі

Мета роботи - ознайомитися з методикою розрахунку теплового навантаження мартенівської печі та розрахувати витрати палива і збагаченого киснем повітря, які забезпечують потрібне теплове навантаження печі.

Загальні відомості

Мартенівська піч опалюється висококалорійним паливом (природний газ, мазут), що не підігрівається, а подається прямо з магістралі через головки в робочий простір печі за допомогою форсунок або пальників. Головки печі розташовані по торцях робочого простору й призначені для підводу палива, повітря й відводу продуктів згоряння. У зв'язку з реверсивним характером роботи печі голівки працюють поперемінно: то на підведення палива й повітря, то на відведення продуктів згоряння. Конструкція головок повинна забезпечувати інтенсивне перемішування палива з повітрям з метою спалювання всього палива в межах робочого простору з одержанням високотемпературного твердого і настільного факела певної форми й мати мінімальний опір при відведенні продуктів згоряння з робочого простору.

Близько 90 % тепла від факелу до ванни передається випромінюванням і лише 5-15 % – конвекцією. Частка тепла, що передається конвекцією збільшується зі збільшенням потужності факела. Відповідно до рівняння Стефана-Больцмана кількість тепла Q , яке передано шихті випромінюванням визначається за формулою

$$Q = C_o \varepsilon \left[\left(\frac{T_\phi}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт}, \quad (3.1)$$

де $C_o = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла (стала Стефана-Больцмана); ε – ступінь чорноти системи «факел-шихта»; T_ϕ , T_w – температура відповідно факела і шихти, К.

Отже, збільшенню інтенсивності нагрівання шихти та зменшенню тривалості плавки сприяє збільшення температури і ступеня чорноти факела. Перше досягається підігрівом повітря і рідше газу в регенераторах та збагаченням повітря киснем, друге – карбюризацією полум'я. Двоатомні гази (O_2 , N_2 , H_2) практично прозорі в усьому діапазоні довжин хвиль. Триатомні (CO_2 , H_2O , SO_2) мають певну спроможність до випромінювання. Ступінь їх чорноти становить близько 0,1-0,2. Підвищенню ступеня чорноти факелу сприяє наявність у ньому твердих чорних часток, зокрема вуглецевистих, які можуть утворитися в полум'ї

внаслідок розкладу вуглеводнів, а також за рахунок добавок рідких і твердих палив (мазуту, кам'яновугільного пеку). Ступінь чорноти факелу повинна бути щонайменше 0,5 (зазвичай 0,55-0,75).

В період завалки і на початку періоду плавлення внаслідок низької температури і високого ступеня чорноти (0,92-0,95) шихти тепловий потік в системі «факел-шихта» максимальний, тому теплове навантаження печі максимальне. Впродовж нагріву шихти її температура збільшується, а сама шихта вкривається шлаком, віддзеркалюючи теплові промені. Для запобігання перегріву і оплавлення вогнетривів теплове навантаження зменшують. Графік змінення теплового навантаження печі наведено на рис. 3.1.

Частка від поділу загальної витрати тепла палива на плавку на її тривалість називають *середнім тепловим навантаженням*. Її величина коливається в межах 23-70 МВт в залежності від ємності печі. Відношення максимального теплового навантаження до середнього називають *коефіцієнтом форсування*.

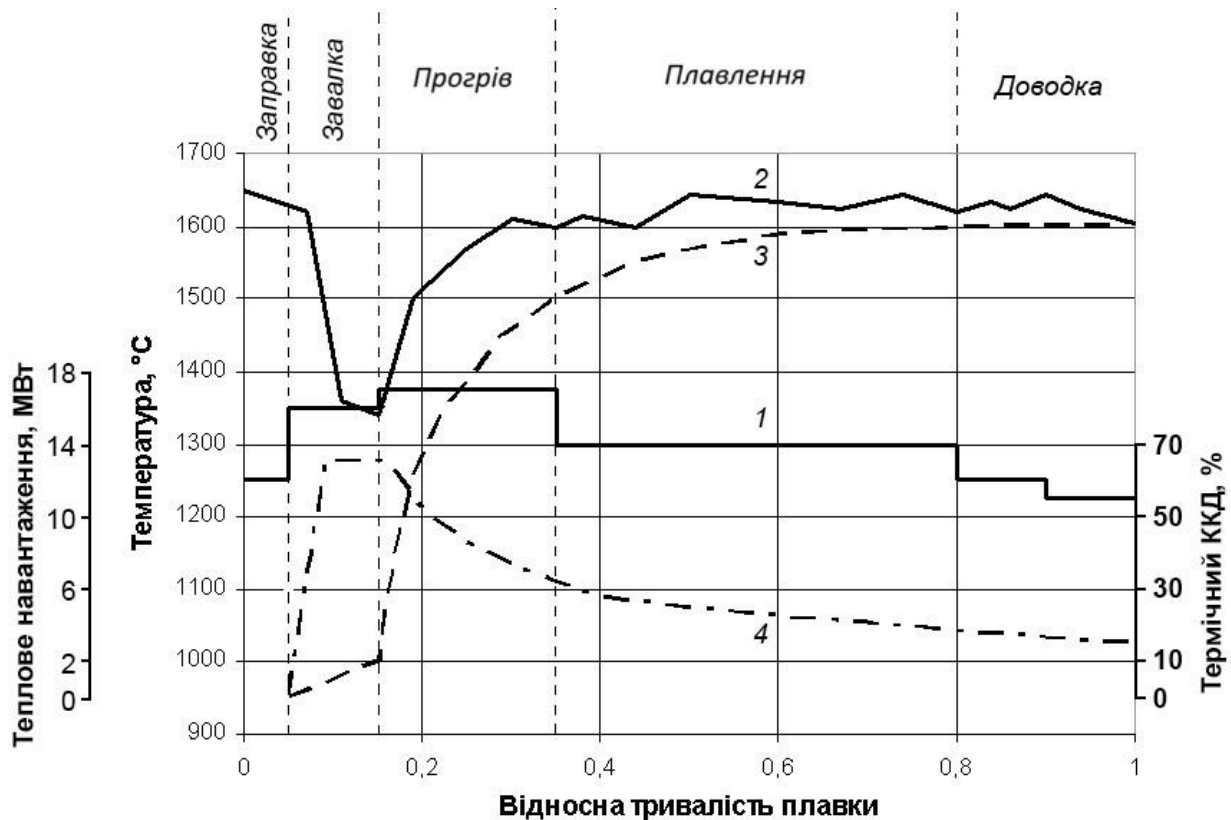


Рисунок 3.1 - Графік зміни теплового навантаження мартенівської печі впродовж плавки: 1 – теплове навантаження; 2 – температура склепіння; 3 – температура ванни; 4 – термічний ККД

Порядок виконання роботи

При заданих витратах (по теплу) мазуту (C , %), частка газу по теплу в газо-мазутному паливі складає $0,01 \cdot (100 - C)$. Тоді теплотворна здатність 1 м^3 газо-мазутної суміші складає

$$Q_{\text{сум}} = \frac{100Q_{\text{н.п.г.}}^p}{100 - C}, \text{ кДж/м}^3, \quad (3.2)$$

де $Q_{\text{н.п.г.}}^p$ – нижня теплота згоряння природного газу, кДж/м³ (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 - Хімічний склад та теплота згоряння природного газу з різних родовищ

№ з/п	Родовище	Хімічний склад, %			Нижня теплота згоряння $Q_{\text{н.п.г.}}^p$, МДж/м ³
		CH_4	C_2H_6	C_3H_8	
1	Шебелінське	91,7	4,6	0,9	37,44
2	Дашавське	98,3	0,3	0,12	35,73
3	Мелітопольське	98,0	0,0	0,0	35,38
4	Ухтинське	88,0	1,9	0,2	31,61
5	Саратовське	83,5	4,3	1,9	36,30
6	Ставропольське	98,9	0,4	0,18	35,95

Питома витрата мазуту на 1 м^3 газу

$$m_m = \frac{Q_{\text{сум}} - Q_{\text{н.п.г.}}^p}{Q_{\text{н.п.г.}}^p}, \text{ кг/м}^3. \quad (3.3)$$

Для розпилення мазуту використовують перегріту пару з коефіцієнтом $k_n = 1 \dots 2$ кг/кг мазуту. Питома витрата пари становить:

$$m_n = k_n \cdot m_m, \text{ кг/м}^3. \quad (3.4)$$

Теоретично необхідна кількість кисню для спалювання газо-мазутної суміші розраховується по стехіометрії реакцій окислення компонентів палива. Витрати кисню на спалення 1 м^3 природного газу ставлять:

$$V_{O_2}^{n.z.} = 0,01(2CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8), \text{ м}^3/\text{м}^3\text{газу}, \quad (3.5)$$

де CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 – об'ємна частка вуглеводнів у природному газі залежно від родовища (див. табл. 3.).

Витрати кисню на спалення мазуту у складі газо-мазутної суміші складають:

$$V_{O_2}^M = \frac{22,4}{100} m_m \cdot \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O_2}{32} \right), \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газу.} \quad (3.6)$$

де C, H, S, O_2 – масова частка вуглецю, водню, сірки та кисню в мазуті, що залежить від марки мазуту (таблиця 3.2 Таблиця 3).

Таблиця 3.2 - Хімічний склад мазуту різних марок

№ з/п	Марка	Елементарний склад, %			
		C	H	S	O ₂
1	M40	86,14	10,86	2,51	0,54
2	M100	85,69	10,51	2,23	1,32

Теоретичні витрати кисню на спалення 1 м³ газо-мазутної суміші складають:

$$V_{O_2}^T = V_{O_2}^{n.z.} + V_{O_2}^M, \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газу.} \quad (3.7)$$

Фактичні витрати повітря з урахуванням його збагачення киснем ϵ та коефіцієнту надміру α становлять:

$$V_{пов}^{факт} = \alpha \cdot V_{O_2}^T / 0,01\epsilon, \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газу.} \quad (3.8)$$

Для збагачення повітря потрібно технічно чистого (97%) кисню

$$V_{техн.O_2} = 1,03 V_{пов}^{факт} 0,01(\epsilon - 21), \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газу,} \quad (3.9)$$

та вентиляторного повітря

$$V_{вент} = V_{пов}^{факт} - V_{техн.O_2}, \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газу.} \quad (3.10)$$

Для забезпечення теплового навантаження витрати газо-мазутної суміші повинні складати

$$V_{сум} = 3600 \cdot \frac{Q_{т.н}}{Q_{сум}}, \text{ м}^3/\text{год.}, \quad (3.11)$$

де $Q_{т.н}$ – теплове навантаження, МВт.

Витрати всіх складових паливної суміші, яка подається через головки мартенівської печі заносять в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 - Витрата складових паливної суміші

Компонент	Витрата, кг(м ³)/год
природний газ	$V_{n.g} = V_{сум}$
мазут	$M_m = m_m V_{сум}$
перегріта пара	$M_n = k_n M_m$
вентиляторне повітря	$Q_{пов} = V_{пов}^{факт} V_{n.g}$
технічний кисень	$Q_{техн.O_2} = V_{техн.O_2} \cdot V_{n.g}$

Таблиця 3.4 - Вихідні дані для розрахунку практичної роботи №3

№ з/п	Теплове навантаження $Q_{т.н}$, МВт	Родовище природного газу	Марка мазуту	Частка мазуту у суміші по теплу, %	Коефіцієнт надлишку повітря α	Вміст кисню в повітрі, %
1	20	1	1	15	1,05	32
2	25	2	2	16	1,06	31
3	30	3	1	17	1,07	30
4	35	4	2	18	1,08	29
5	40	5	1	19	1,09	28
6	45	6	2	20	1,10	27
7	50	1	1	21	1,11	26
8	55	2	2	22	1,12	25
9	60	3	1	23	1,13	24
10	65	4	2	24	1,14	23
11	70	5	1	25	1,15	22
12	22	6	2	26	1,16	23
13	27	1	1	27	1,17	24
14	32	2	2	28	1,18	25
15	37	3	1	29	1,19	26
16	42	4	2	30	1,20	27
17	47	5	1	30	1,21	28
18	52	6	2	29	1,22	29
19	57	1	1	28	1,23	30
20	62	2	2	27	1,24	31



Практична робота № 4 Розрахунок теплового балансу в двухванному сталеплавильному агрегаті

Мета роботи - навчитися правильно розраховувати прихід та витрату тепла в двухванному сталеплавильному агрегаті прямооточного типу.

Робота розраховується з використанням мікрокалькуляторів або ЕРМ з використанням електронних таблиць. Початкові данні розміщені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Дані для виконання теплового балансу

Варіант	Температура, °С		Варіант	Температура, °С	
	чавуну	сталі		чавуну	сталі
1	1315	1600	14	1315	1620
2	1310	1590	15	1325	1620
3	1305	1610	16	1315	1615
4	1310	1620	17	1310	1620
5	1315	1620	18	1305	1630
6	1320	1630	19	1310	1620
7	1315	1620	20	1320	1625
8	1320	1620	21	1315	1610
9	1315	1625	22	1305	1600
10	1320	1630	23	1310	1600
11	1310	1640	24	1315	1610
12	1300	1620	25	1320	1600
13	1305	1620			

Розрахунок теплового балансу плавки

Недолік тепла для процесу компенсується подачею природного газу. Склад газу: CH_4 – 93.9%, C_2H_6 – 1.3%, C_3H_8 – 0.2%, CO_2 – 0.3%, N_2 – 4,3%. Температура чавуну, заливаемого у піч, 1300°C . Температура сталі перед випуском 1610°C . Тепловий баланс робочого простору двухванної печі розраховуємо для однієї камери.

Прихід тепла

1. Фізичне тепло чавуну, тобто чавун що поступає в конвертер при температурі 1300°C , вносить

$$Q_1 = 65[0,755 \times 1180 + 218 + 0,92(1300 - 1180)] = 79254 \text{ кДж}$$

де 65 – кількість (маса) чавуну в металошихті, кг;

0,755 – середня теплоємність твердого чавуну від 0°C до температури плавлення, $\text{кДж/кг} \times 1180$ – температура плавлення чавуну, 0°C (у залежності хімічного складу коливається в межах 1150 - 1200°C);

218 – прихована теплота плавлення твердого чавуну, кДж/кг ;

0,92 – середня теплоємність рідкого чавуну, $\text{кДж/кг} \times \text{град}$.

2. Тепло екзотермічних реакцій

$\text{C} - \text{CO}_2$	$34090 \times 2,647$	$= 90236$
$\text{Si} - \text{SiO}_2$	$31000 \times 0,567$	$= 17577$
$\text{Mn} - \text{MnO}$	$7370 \times 0,844$	$= 6220$
$\text{P} - \text{P}_2\text{O}_5$	$25000 \times 0,101$	$= 2525$
$\text{S} - \text{SO}_2$	$9280 \times 0,004$	$= 37$
$\text{Fe} - \text{Fe}_2\text{O}_3$ (у шлак)	$7370 \times 0,398$	$= 2933$
$\text{Fe} - \text{FeO}$	$4820 \times 1,167$	$= 5625$
$\text{Fe} - \text{Fe}_2\text{O}_3$ (у дим)	$7370 \times 1,100$	$= 8107$

$$Q_2 = 133260 \text{ кДж}$$

де перший стовбчик - теплові ефекти, відносимо до 1 кг окислюючого елемента, кДж/кг ;

другий стовпчик – кількість окислюючих домішок чавуну /дивись матеріальний баланс ДСА/.

3. Тепло шлакоутворення

При формуванні шлаку в ньому утворюються з'єднання

$(\text{CaO})_2 \times \text{SiO}_2$ і $(\text{CaO})_2 \times \text{P}_2\text{O}_5$ і виділяє тепло:

$$\text{SiO}_2 + 2\text{CaO} = (\text{CaO})_2 \times \text{SiO}_2 \quad 2320 \times 1,215 \quad = 2819$$

$$\text{P}_2\text{O}_5 + 4\text{CaO} = (\text{CaO})_4 \times \text{P}_2\text{O}_5 \quad 4740 \times 0,231 \quad = 1095$$

$$Q_3 = 3914 \text{ кДж}$$

4. Хімічне тепло палива позначаємо через «X» (Q_4)

Загальний прихід тепла дорівнює, кДж

$$Q_{\text{прих}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$$

$$Q_{\text{прих}} = 79254 + 133260 + 3914 + X = 216428 + X$$

Витрати тепла

1. Фізичне тепло стали, тобто сталь нагріта до 1610°C відносить тепло

$$Q_1 = (92,968 + 0,284) \times [0,70 \times 1530 + 272 + 0,84 (1625 - 1530)] = 131205 \text{ кДж,}$$

де $93,252 = 92,968 + 0,284$ маса рідкої сталі і корольки

0,7 – середня теплоємність твердої сталі, кДж/кг×град.

1530 – температура плавлення металу, $^\circ\text{C}$, визначається

$$1540 - 85 \times 0,12 = 1530$$

де 1540 – температура плавлення чистого заліза, $^\circ\text{C}$;

85 – зниження температури плавлення на 1% вуглецю, $^\circ\text{C}$;

272 – прихована теплота плавлення твердої сталі, кДж/кг×град.

2. Фізичне тепло шлаку, тобто шлак відносить тепло

$$Q_2 = 9,465 (1,2 \times 1610 + 210) = 20274 \text{ кДж}$$

де 9,465 маса шлаку, кг;

1,2 – теплоємність шлаку, кДж/кг×град.;

210 – теплота плавлення шлаку, кДж/кг× град.

3. Тепло, уносимо продуктами згорання

Виконуємо розрахунок горіння природного газу на 100 м^3

Таблиця 4.2 - Розрахунок горіння природного газу

Складові газу, м^3	Рівняння реакції горіння	Витрата $\text{O}_2, \text{м}^3$	Продукти згорання, м^3		
			CO_2	H_2O	N_2
CH_4 - 93,9	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 =$ $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	187,80	93,90	187,80	-
C_2H_6 - 1,3	$\text{C}_2\text{H}_6 + 3,5\text{O}_2 = 2\text{CO}_2$ $+ 3\text{H}_2\text{O}$	4,55	2,60	3,90	-
C_3H_8 - 0,2	$\text{C}_3\text{H}_8 + 5$ $\text{O}_2 = 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$	1,00	0,60	0,80	-
CO_2 - 0,3		-	0,3	-	-
N_2 - 4,3		-	-	-	4,3
Всього		193,35	97,4	192,5	731,66

Визначаємо теплоту згорання природного газу

$$Q^3_{\text{н}} = 35988 \times 93,9 + 63721 \times 1,3 + 90554 \times 0,2 = 3480221 \text{ кДж/100 м}^3$$

$$3480221 \text{ кДж/100 м}^3 = 34802,2 \text{ кДж/м}^3$$

Кількість природного газу, м³

$$X/34802,2 = 0,0000287 \times X$$

Кількість продуктів згорання, м³

$$\text{CO}_2 \quad 0,0000287 \times X \times 0,974 = 0,0000280X$$

$$\text{H}_2\text{O} \quad 0,0000287 \times X \times 1,925 = 0,0000552X$$

$$\text{N}_2 \quad 0,0000287 \times X \times 7,317 = 0,0002100X$$

Тепло, уносимо продуктами згорання, кДж

$$\text{CO}_2 \quad 2,38 \times 0,0000280 \times X \times 1580 = 0,105X$$

$$\text{H}_2\text{O} \quad 1,86 \times 0,0000552 \times X \times 1580 = 0,162X$$

$$\text{N}_2 \quad 1,45 \times 0,0002100 \times X \times 1580 = 0,481X$$

$$Q_3 = 0,748X$$

4. Видаляючись з ванни газу уносять тепло при середній температурі, дорівняй 1600°C

$$\text{CO}_2 \quad 3818 \times 9,949 \times 22,4/44 = 19338$$

$$\text{H}_2\text{O} \quad 2981 \times 0,059 \times 22,4/18 = 300$$

$$\text{N}_2 \quad 3818 \times 0,008 \times 22,4/64 = 11$$

$$Q_4 = 20715 \text{ кДж}$$

де перший стовпчик чисел – тепловміст 1 м³ газів при температурі 1600°C, кДж/м³

5. Тепло, уносимо частками Fe₂O₃ в дим

$$Q_5 = 1,571(1,2 \times 1600 + 210) = 3346 \text{ кДж}$$

6. Тепло, затрачене на встановлення бокситу та футеровки :

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ до FeO} \quad (0,147 \times 0,9) \times 824000/160 = 681$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ до FeO} \quad (0,147 \times 0,1) \times 290000/160 = 27$$

$$Q_6 = 708 \text{ кДж.}$$

7. Втрати тепла на випромінювання через відкриті вікна, гляделки, кладку, охолоджених елементів печі і др.. Звичайно складають 36-38% тепла. Приймаємо 38%

$$Q_7 \quad 133260 \times 0,38 = 49306 \text{ кДж;}$$

де 133260 = Q₂ пріхіда тепла

Загальний розхід тепла дорівнює, кДж

$$Q_{\text{рас}} = 131205 + 20274 + 0,748X + 19649 + 3346 + 708 + 49306 = 224488 + 0,748X$$

Прирівнявши пріхід тепла к розхіду, визначаємо величину «X»:

$$216428+x=224488+0,748x; 1x-0,748x=224488-216428$$

$$0.252x = 8060; x=8060/0,252; x=31984\text{кДж}$$

Таблиця 4.3 - Тепловий баланс робочого простору ванни двохванної печі

<i>Статті балансу</i>	<i>кДж</i>	<i>%</i>	<i>Статті балансу</i>	<i>кДж</i>	<i>%</i>
<u>Прихід тепла</u>			<u>Витрата тепла</u>		
Фізичне тепло чавуну	79254	31,90	Фізичне тепло:		
Екзотермічна Шлакоутворення	133260	53,64	Сталі	131205	52,82
Хім. тепло прир. газу	3914	1,58	Шлаку	20274	8,16
	31984	12,86	Виноситься з пр зг	23924	9,63
			Газами з ван. унос. тепло	19649	7,91
			Тепло уносиме		
			Fe ₂ O ₃	3346	1,35
			Тепло на вост Fe ₂ O ₃	708	0,28
			Fe ₂ O ₃	49306	19,85
			Втрати тепла		
Всього	248412	100%		248412	100%



Практична робота № 5

Розрахунок теплових втрат кладки печі

Мета роботи - ознайомитися з методикою розрахунку теплових втрат через футеровку металургійної печі.

В інженерних розрахунках часто доводиться визначати теплові втрати через футерівку (кладку) теплового агрегату. Не менший інтерес представляє визначення температури зовнішньої поверхні футерівки і температури на стику її шарів, знання якої необхідно для забезпечення нормальної служби вогнетривів і роботи обслуговуючого персоналу.

З теорії теплопередачі відомо, що питомий тепловий потік через плоску стінку при стаціонарних умовах дорівнює:

$$q = \frac{t_{вн} - t_{зов}}{R_{вн} + R_{кл} + R_{зов}}, \text{ Вт/м}^2, \quad (5.1)$$

де $R_{вн} = \frac{1}{\alpha_{вн}}$ – внутрішній опір теплопередачі від димових газів до футерівки печі, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$;

$\alpha_{вн}$ – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням і конвекцією від димових газів до внутрішньої поверхні футерівки печі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

$R_{зов} = \frac{1}{\alpha_{зов}}$ – зовнішній опір теплопередачі від стінки в навколишнє середовище, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$;

$\alpha_{зов}$ – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням і конвекцією від зовнішньої поверхні футерівки в навколишнє середовище, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

$R_{кл} = \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{\lambda_i}$ – тепловий опір багат шарової футерівки;

$\bar{\lambda}_i$ – середній коефіцієнт теплопровідності i -ого шару футерівки, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

S_i – товщина i -ого шару футерівки, м.

Оскільки $\alpha_{вн}$ і $\alpha_{зов}$ залежать, відповідно, від невідомих температур внутрішньої і зовнішньої поверхні футерівки, а коефіцієнт теплопровідності i -го шару – від невідомої середньої i -ої температури, то визначення щільності теплового потоку через плоску стінку і розподіл температур в футерівці в стаціонарному тепловому стані здійснюється методом послідовних наближень при заданих температурах димових газів (t_1) і навколишнього середовища (t_5). Суть методу викладена у наведеному нижче прикладі розрахунку.

Якби $\alpha_{вн}$, $\alpha_{зов}$ і λ_i не залежали від температури, то для розрахунку q було б достатньо формули (5.1).

Приклад розрахунку

Визначити питомий тепловий потік q , що проходить через двошарову плоску футерівку металургійної печі і розподіл температур по товщині футерівки.

Схема печі та її футерівка показані на рис. 5.1.

Вихідні дані для виконання розрахунку наведені в таблиці 5.1.

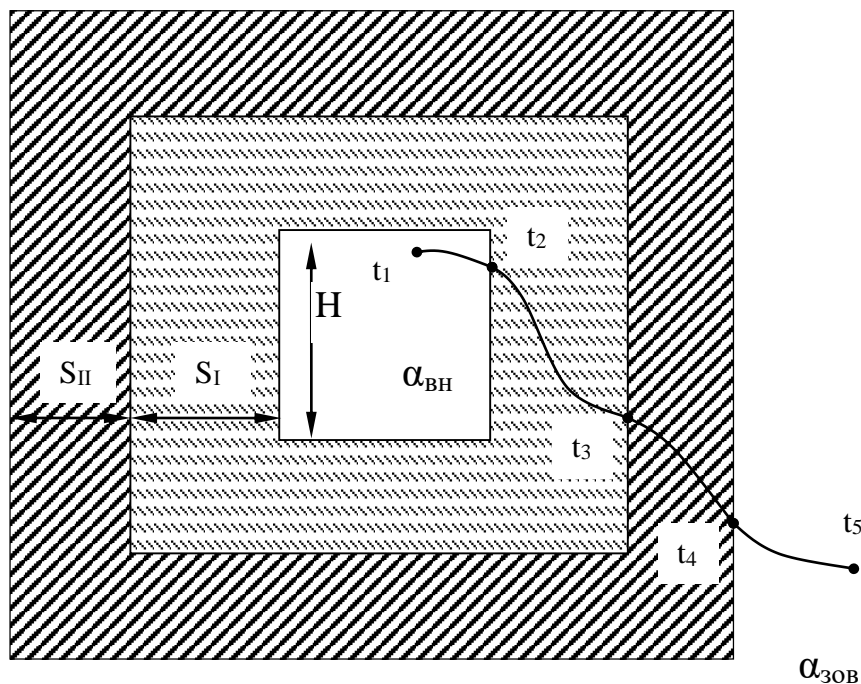


Рисунок 5.1 - Схема двошарової футерівки

Вихідні дані:

- 1) температура диму в робочому просторі печі $t_1 = 1200$ °С;
- 2) температура навколишнього середовища $t_5 = 20$ °С;
- 3) внутрішній (робочий) шар футерівки виконаний з вогнетривкої шамотної цегли. Товщина шару $S_I = 0,575$ м;
- 4) зовнішній (теплоізоляційний) шар футерівки виконаний з високопористого шамоту. Товщина шару $S_{II} = 0,115$ м;
- 5) висота робочого простору печі $H = 1,5$ м ;
- 6) швидкість димових газів у робочому просторі печі $W_o = 10$ м/с;
- 7) вміст випромінюючих газів у димі: % $CO_2 = 18$; % $H_2O = 10$.
- 8) тиск димових газів у робочому просторі печі $P_k = 100$ кН/м².

Таблиця 5.1 - Вихідні дані для розрахунку

№ вар.	t ₁ , °C	t ₅ , °C	S _I , м	S _{II} , м	H, м	CO ₂ , %	H ₂ O, %	W ₀ , м/с
1	1150	30	0,7	0,1	3,0	20	10	5
2	1100	25	0,65	0,12	2,0	10	20	7
3	1050	20	0,6	0,15	2,5	22	8	9
4	1000	15	0,55	0,12	1,5	18	10	11
5	1050	10	0,5	0,1	1,7	16	14	13
6	950	5	0,45	0,07	1,8	15	15	15
7	850	0	0,4	0,05	1,9	12	18	14
8	800	- 5	0,35	0,02	2,8	8	22	12
9	1150	- 10	0,3	0,15	2,2	6	24	10
10	1100	- 20	0,25	0,2	2,4	22	8	8
11	1200	- 25	0,2	0,27	2,6	19	11	6
12	1200	- 30	0,15	0,25	1,8	17	13	4
13	1150	30	0,25	0,2	0,6	7	23	15
14	1100	- 25	0,3	0,15	1,6	15	15	5
15	1050	25	0,35	0,17	0,8	8	20	14
16	1000	- 20	0,4	0,12	1,4	13	17	6
17	950	20	0,45	0,1	1,0	9	10	13
18	900	- 15	0,5	0,07	1,2	11	13	7
19	850	15	0,55	0,05	2,5	22	5	12
20	800	- 10	0,25	0,05	0,5	5	15	8

Визначимо в першому наближенні щільність теплового потоку q^* з одного газового середовища з t_1 в інше газове середовище з t_5 (індекс (*) означає, що обчислення ведуться в першому наближенні):

$$q^* = \frac{t_1 - t_5}{\sum R^*} = \frac{t_1 - t_5}{R_1^* + R_2^* + R_3^* + R_4^*} = \frac{t_1 - t_5}{\frac{1}{\alpha_{вн}^*} + \frac{S_I}{\lambda_I^*} + \frac{S_{II}}{\lambda_{II}^*} + \frac{1}{\alpha_{зов}^*}}, \text{ Вт/м}^2.$$

Тут $\alpha_{вн}^*$ і $\alpha_{зов}^*$ – коефіцієнти тепловіддачі від газів усередині та зовні печі, обчислені в першому наближенні, Вт/(м²·К);

λ_I^* і λ_{II}^* – середні коефіцієнти теплопровідності матеріалу першого і другого шарів футерівки, обчислені в першому наближенні, Вт/(м·К).

Орієнтовне значення коефіцієнта тепловіддачі від газів до внутрішньої поверхні футерівки:

$$\alpha_{вн}^* = \alpha_{вн.пром}^* + \alpha_{вн.кон}^*$$

$$\text{де } \alpha_{вн.пром}^* = \frac{C_o \cdot \varepsilon_{зф}}{25} \left(\frac{t_1 + 273}{100} \right)^3, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$C_o = 5,67$ – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$;

$\varepsilon_{зф}$ – ступінь чорноти системи «газ – футерівка».

$$\varepsilon_{зф} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{ф}} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1};$$

$\varepsilon_{ф} = 0,8$ – ступінь чорноти футерівки;

ε_2 – ступінь чорноти CO_2 і H_2O , яка залежить від парціальних тисків CO_2 , H_2O і середньої ефективної товщини газового шару у робочому просторі печі ($\overline{S_{эф}}$).

$$\overline{S_{эф}} = 0,9 \cdot H = 0,9 \cdot 1,5 = 1,35 \text{ м}$$

Сила поглинання CO_2 і H_2O :

$$P_{\text{CO}_2} \cdot \overline{S_{эф}} = \frac{\% \text{CO}_2}{100} \cdot P_{\kappa} \cdot \overline{S_{эф}} = \frac{18}{100} \cdot 100 \cdot 1,35 = 24,3 \text{ кПа} \cdot \text{м};$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \overline{S_{эф}} = \frac{\% \text{H}_2\text{O}}{100} \cdot P_{\kappa} \cdot \overline{S_{эф}} = \frac{10}{100} \cdot 100 \cdot 1,35 = 13,5 \text{ кПа} \cdot \text{м}.$$

По рис. 5.2 та 5.3 при $t_1 = 1200$ °С знаходимо:

$$\varepsilon_{\text{CO}_2}(t_1; P_{\text{CO}_2} \cdot \overline{S_{эф}}) = \varepsilon_{\text{CO}_2}(1200; 24,3) = 0,125,$$

$$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}(t_1; P_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \overline{S_{эф}}) = \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}(1200; 13,5) = 0,105,$$

$$\beta(P_{\text{H}_2\text{O}}; P_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \overline{S_{эф}}) = \beta(10; 13,5) = 1,025.$$

Тоді

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \beta \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}};$$

$$\varepsilon_2 = 0,125 + 1,025 \cdot 0,105 = 0,23;$$

$$\varepsilon_{гф} = \frac{1}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,23} - 1} = 0,22;$$

$$\alpha_{вн.пром}^* = \frac{4 \cdot 5,67 \cdot 0,22}{100} \left(\frac{1200 + 273}{100} \right)^3 = 159,47, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

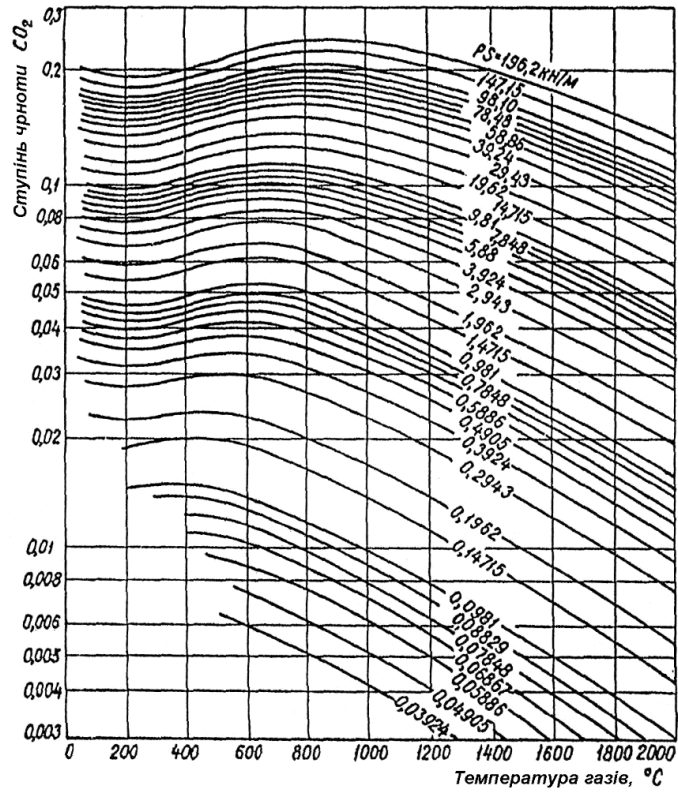


Рисунок 5.2 - Ступінь чорноти при випромінюванні CO_2

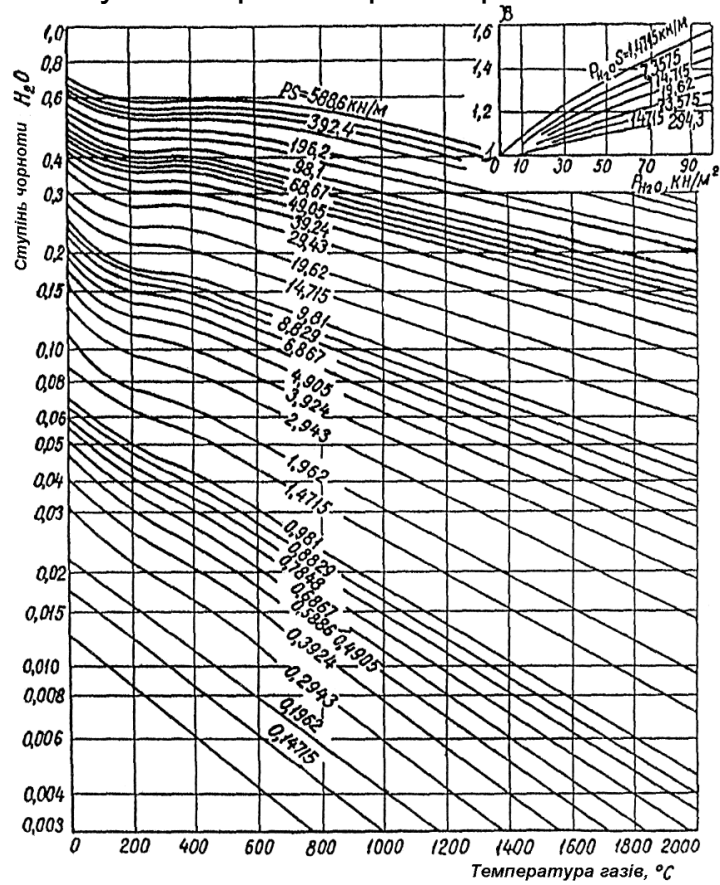


Рисунок 5.3 - Ступінь чорноти при випромінюванні H_2O

Визначаємо характер руху димових газів при температурі $t_1 = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$.

З таблиці 5.2 знаходимо: коефіцієнт кінематичної в'язкості димових газів – $\nu_{t_1} = 221 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, коефіцієнт теплопровідності димових газів – $\lambda_{t_1} = 12,35 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, критерій Прандтля $Pr^{t_1} = 0,563$.

Гідрравлічний діаметр каналу, вздовж якого рухаються димові гази:

$$d_r = \frac{4 \cdot F}{\Pi} = \frac{4 \cdot H^2}{4 \cdot H} = H = 1,5 \text{ м}$$

де Π – периметр робочого простору печі.

Таблиця 5.2 - Фізичні константи повітря і димових газів

№ з/п	Температура, $^\circ\text{C}$	Кінематичний коефіцієнт в'язкості при $P = 760 \text{ мм.рт.ст.}$ $\nu \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$		Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda \cdot 10^2 \text{ Вт}/(\text{м К})$		Число Pr	
		повітря	димових газів	повітря	димових газів	повітря	димових газів
1	0	13,3	12,2	2,47	2,27	0,723	0,719
2	100	23,2	21,54	3,17	3,12	0,722	0,690
3	200	34,9	32,80	3,81	4,02	0,722	0,669
4	300	48,3	45,81	4,44	4,82	0,722	0,653
5	400	63,11	60,38	5,21	5,68	0,722	0,640
6	500	79,2	76,30	5,61	6,54	0,722	0,629
7	600	96,8	93,61	6,17	7,40	0,723	0,619
8	700	115,1	112,1	6,70	8,24	0,724	0,609
9	800	134,7	131,8	7,21	9,12	0,725	0,600
10	900	155,2	152,5	7,70	9,98	0,726	0,590
11	1000	176,7	174,3	8,17	10,80	0,727	0,581
12	1100	199,2	197,2	8,61	11,76	0,728	0,572
13	1200	222,7	221,0	9,05	12,35	0,730	0,563

Число Рейнольдса:

$$Re_{t_1} = \frac{W_{t_1} \cdot d_z}{\nu_{t_1}} = \frac{W_o \cdot (1 + \alpha \cdot t_1) \cdot d_z}{\nu_{t_1}} = \frac{10 \cdot \left(1 + \frac{1200}{273}\right) \cdot 1,5}{221 \cdot 10^{-6}} = 366217,5,$$

де $\alpha = \frac{1}{273} \text{ К}^{-1}$ – коефіцієнт об'ємного розширення.

Так як $Re_{t_1} > (Re_{кр} = 2300)$, то рух димових газів носить турбулентний характер.

Число Нуссельта визначаємо за формулою:

$$Nu^* = 0,023 \cdot Re_{t_1}^{0,8} \cdot Pr_{t_1}^{0,4}.$$

Число Нуссельта в першому наближенні:

$$Nu^* = 0,023 \cdot 366217,5^{0,8} \cdot 0,563^{0,4} = 516,324.$$

Оскільки $Nu^* = \frac{\alpha_{вн.кон}^* \cdot d_z}{\lambda^*}$, то коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від

димових газів до внутрішньої поверхні футерівки знаходимо за формулою:

$$\alpha_{вн.кон}^* = \frac{Nu^* \cdot \lambda^*}{d_z} = \frac{516,324 \cdot 12,35 \cdot 10^{-2}}{1,5} = 42,51 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Загальний коефіцієнт тепловіддачі на димовій стороні:

$$\alpha_{вн}^* = \alpha_{вн.пром}^* + \alpha_{вн.кон}^* = 159,47 + 42,51 = 201,98 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Тепловий опір між димовими газами і футерівкою в робочому просторі установки:

$$R_1^* = \frac{1}{201,98} = 0,00495 (\text{м}^2 \cdot \text{К}) / \text{Вт}.$$

Визначаємо орієнтовні теплові опори шарів футерівки – R_2^* і R_3^* в першому наближенні.

Приймаємо, що $t_2^* = t_1$ і $t_4^* = t_5$.

Тоді орієнтовна температура на стику шарів складе:

$$t_3^* = 0,5 \cdot (t_2^* + t_4^*) = 0,5 \cdot (t_1 + t_5) = 0,5 \cdot (1200 + 20) = 610 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Обчислюємо в першому наближенні середні температури шарів футерівки:

$$t_{I}^* = 0,5 \cdot (t_2^* + t_3^*) = 0,5 \cdot (1200 + 610) = 905 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{II}^* = 0,5 \cdot (t_3^* + t_4^*) = 0,5 \cdot (610 + 20) = 315 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Середні значення коефіцієнтів теплопровідності шарів:

$$\bar{\lambda}_I^* = 0,696 + 0,638 \cdot \frac{t_{I}^*}{1000} = 0,696 + 0,638 \cdot \frac{905}{1000} = 1,273 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К});$$

$$\bar{\lambda}_{II}^* = 0,232 + 0,232 \cdot \frac{t_{II}^*}{1000} = 0,232 + 0,232 \cdot \frac{315}{1000} = 0,305 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К}).$$

Теплові опори шарів у першому наближенні:

$$R_2^* = \frac{S_I}{\bar{\lambda}_I^*} = \frac{0,575}{1,273} = 0,4517 (\text{м}^2 \cdot \text{К}) / \text{Вт};$$

$$R_3^* = \frac{S_{II}}{\bar{\lambda}_{II}^*} = \frac{0,115}{0,305} = 0,377 (\text{м}^2 \cdot \text{К}) / \text{Вт}.$$

Орієнтовний тепловий опір між футерівкою та навколишнім середовищем в першому наближенні приймаємо:

$$R_4^* = \frac{1}{\alpha_{30B}^*} = 0,0517 (\text{м}^2 \cdot \text{К}) / \text{Вт}.$$

Орієнтовний сумарний тепловий опір при теплопередачі з одного газового середовища в друге через двошарову плоску футерівку печі:

$$\begin{aligned} \sum R_i^* &= R_1^* + R_2^* + R_3^* + R_4^* = \\ &= 0,00495 + 0,4517 + 0,377 + 0,0517 = 0,885 (\text{м}^2 \cdot \text{К}) / \text{Вт}. \end{aligned}$$

Орієнтовне значення коефіцієнта теплопередачі:

$$K^* = \frac{1}{\sum R_i^*} = \frac{1}{0,885} = 1,13 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Орієнтовне значення питомого теплового потоку:

$$q^* = K^* (t_1 - t_5) = 1,13 \cdot (1200 - 20) = 1333 \text{ Вт} / \text{м}^2.$$

Визначаємо значення температур футерівки – t_i^{**} у другому наближенні (індекс (**)) означає, що обчислення ведуться у другому наближенні):

$$t_2^{**} = t_1 - q^* \cdot R_1^* = 1200 - 1333 \cdot 0,00495 = 1193 \text{ }^\circ\text{С};$$

$$t_3^{**} = t_2^{**} - q^* \cdot R_2^* = 1193 - 1333 \cdot 0,4517 = 591 \text{ }^\circ\text{С};$$

$$t_4^{**} = t_3^{**} - q^* \cdot R_3^* = 591 - 1333 \cdot 0,377 = 88,5 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Визначаємо питомий тепловий потік q^{**} у другому наближенні. Уточнимо коефіцієнти тепловіддачі в робочому просторі печі:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{вн.пром}}^{**} &= \frac{C_o \cdot \varepsilon_2 \phi}{t_1 - t_2^{**}} \left[\left(\frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_2^{**} + 273}{100} \right)^4 \right] = \\ &= \frac{5,67 \cdot 0,22}{1200 - 1193} \left[\left(\frac{1200 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{1193 + 273}{100} \right)^4 \right] = 158,34 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}). \end{aligned}$$

В уточненні $\alpha_{\text{вн.кон}}^*$ нема необхідності, так як він, в основному, залежить від швидкості димових газів і гідравлічного діаметру d_{Γ} .

$$\alpha_{\text{вн}}^{**} = \alpha_{\text{вн.пром}}^{**} + \alpha_{\text{вн.кон}}^* = 158,34 + 42,51 = 200,85 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Тоді тепловий опір між димовими газами і футерівкою складе:

$$R_1^{**} = \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}^{**}} = \frac{1}{200,85} = 0,00498 (\text{м}^2 \cdot \text{К}) / \text{Вт}.$$

Уточнимо теплові опори футерівки R_2 и R_3 :

$$t_I^{**} = 0,5 \cdot (t_2^{**} + t_3^{**}) = 0,5 \cdot (1193 + 591) = 892 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\lambda_I^{**} = 0,696 + 0,638 \cdot t_I^{**} = 0,696 + 0,638 \cdot \frac{892}{1000} = 1,265 \text{ Вт / (м} \cdot \text{К)};$$

$$R_2^{**} = \frac{S_I}{\lambda_I^{**}} = \frac{0,575}{1,265} = 0,4545 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)} / \text{Вт};$$

$$t_{II}^{**} = 0,5 \cdot (t_3^{**} + t_4^{**}) = 0,5 \cdot (591 + 88,5) = 339,75 \approx 340 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\lambda_{II}^{**} = 0,232 + 0,232 \cdot t_{II}^{**} = 0,232 + 0,232 \cdot \frac{340}{1000} = 0,311 \text{ Вт / (м} \cdot \text{К)};$$

$$R_3^{**} = \frac{S_{II}}{\lambda_{II}^{**}} = \frac{0,115}{0,311} = 0,3698 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)} / \text{Вт}.$$

Для визначення теплового опору між футерівкою і навколишнім середовищем визначимо коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні футерівки в навколишнє середовище:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{зов}}^{**} &= \frac{C_o \cdot \varepsilon_{\text{ст}}}{t_4^{**} - t_5} \left[\left(\frac{t_4^{**} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_5 + 273}{100} \right)^4 \right] + 2,55 \cdot \sqrt[4]{t_4^{**} - t_5} = \\ &= \frac{5,67 \cdot 0,85}{88,5 - 20} \left[\left(\frac{88,5 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] + \\ &+ 2,55 \cdot \sqrt[4]{88,5 - 20} = 14,166 \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{К)}. \end{aligned}$$

Тепловий опір «футерівка – навколишнє середовище»:

$$R_4^{**} = \frac{1}{14,166} = 0,0706 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)} / \text{Вт}.$$

Сума теплових опорів:

$$\begin{aligned} \sum R_i^{**} &= R_1^{**} + R_2^{**} + R_3^{**} + R_4^{**} = \\ &= 0,00498 + 0,4545 + 0,3698 + 0,0706 = 0,899 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)} / \text{Вт}. \end{aligned}$$

Коефіцієнт теплопередачі у другому наближенні:

$$K^{**} = \frac{1}{\sum R_i^{**}} = \frac{1}{0,899} = 1,112 \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Питомий тепловий потік у другому наближенні:

$$q^{**} = K^{**} \cdot (t_1 - t_5) = 1,112 \cdot (1200 - 20) = 1312,16 \approx 1312 \text{ Вт / м}^2.$$

Визначаємо температури футерівки в третьому наближенні (індекс (**)) означає, що обчислення ведуться в третьому наближенні).

Температура внутрішньої поверхні футерівки:

$$t_2^{***} = t_1 - q^{**} \cdot R_1^{**} = 1200 - 1312 \cdot 0,00498 = 1193,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура на стику шарів футерівки:

$$t_3^{***} = t_2^{***} - q^{**} \cdot R_2^{**} = 1193,5 - 1312 \cdot 0,4545 = 597 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура зовнішньої поверхні футерівки:

$$t_4^{***} = t_3^{***} - q^{**} \cdot R_3^{**} = 597 - 1312 \cdot 0,3698 = 112 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Визначення дійсних значень питомого теплового потоку (питомих втрат теплоти через футерівку печі) q_d і температури зовнішньої поверхні футерівки t_{4d} .

Питомий тепловий потік від поверхні кладки в навколишнє середовище при $t_4^{**} = 88,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ дорівнює:

$$q_{\text{зов}}^{**} = \alpha_{\text{зов}}^{**} (t_4^{**} - t_5) = 14,166 \cdot (88,5 - 20) = 970,5 \text{ Вт/м}^2.$$

3Питомий тепловий потік від футерівки в навколишнє середовище $q_{\text{зов}}^{***}$ при $t_4^{***} = 112 \text{ } ^\circ\text{C}$:

$$\alpha_{\text{зов}}^{***} = \frac{5,67 \cdot 0,85}{112 - 20} \left[\left(\frac{112 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] +$$

$$+ 2,55 \cdot \sqrt[4]{112 - 20} = 15,546 \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{K)};$$

$$q_{\text{зов}}^{***} = \alpha_{\text{зов}}^{***} (t_4^{***} - t_5) = 15,546 \cdot (112 - 20) \approx 1430 \text{ Вт/м}^2.$$

По умовам стаціонарності питомий тепловий потік q від газів з температурою t_1 до внутрішньої поверхні футерівки печі з температурою t_2 дорівнює питомому тепловому потоку $q_{\text{зов}}$ від зовнішньої поверхні футерівки з температурою t_4 в навколишнє середовище з температурою t_5 .

При визначенні значень q^* і q^{**} були отримані відповідні їм значення температур t_4^{**} і t_4^{***} , по яким визначені щільності теплових потоків $q_{\text{зов}}^{**}$ і $q_{\text{зов}}^{***}$.

Дійсну щільність теплового потоку q_d і дійсну температуру зовнішньої поверхні футерівки t_{4d} можна визначити графічним шляхом в індивідуальному порядку.

Результати розрахунку розподілення температур у двошаровій плоскій футерівці необхідно нанести на температурну діаграму.

Індивідуальне завдання № 2

Аналіз конструкцій та теплової роботи металургійних печей

Індивідуальні завдання це підготовані самостійно студентом повідомлення на одну з запропонованих тем. Перелік тем приводиться на початку змістовного модуля. Виконане індивідуальне завдання має бути у вигляді реферативного аналізу та розкривати сутність заданої теми.

Обсяг індивідуальної роботи має складати не менше 15 сторінок комп'ютерного тексту формату А4. Індивідуальне завдання має бути надруковане шрифтом Times New Romans 14 розміру з інтервалом 1,5, нумерація формул, таблиць, рисунків наведених у роботі, має бути наскрізною. Оформлення роботи проводиться відповідно до ДСТУ 3008:2015.

Виконане індивідуальне завдання захищається у вигляді пояснення (виступу) на практичному занятті - для отримання максимально можливої кількості балів.

Номер варіанту теми для виконання індивідуального завдання студент обирає з переліку тем у відповідності до його номеру за списком студентської групи. Варіанти індивідуальних завдань наведені в таблиці.

1	Коксова піч.
2	Агломераційна піч (агломераційна машина).
3	Обпалювальна піч (машина) для виробництва окатишів.
4	Обпалювальні печі для виробництва вапна.
5	Доменна піч.
6	Феросплавна піч.
7	Печі твердофазної металізації.
8	Печі рідкофазної металізації.
9	Мартенівська піч.
10	Конвертер.
11	Дугова сталеплавильна піч.
12	Ливарна піч (вагранка).
13	Установки для обробки сталі в ковші.
14	Дугова ковшова піч (ковш-піч).
15	Машина безперервного лиття заготовок (МБЛЗ).
16	Ливарно-прокатні комплекси (ЛПК).
17	Нагрівальні колодязі.
18	Методичні печі.
19	Камерні термічні печі.
20	Прохідні термічні печі.



ЛІТЕРАТУРА

- 1 Основи металургійного виробництва металів і сплавів : підручник / Д.Ф.Чернега та ін. Київ : Вища школа, 2006. 503 с.
- 2 Бочка В. В., Іващенко В. П., Суліменко С. Є. Агрегати для подачі та нагрівання доменного дуття : навчальний посібник з дисципліни "Конструкції технологічних агрегатів" для студентів спеціальності 136 – металургія (бакалаврський рівень). Дніпро : НМетАУ, 2017. 104 с.
- 3 Бойченко Б. М., Охотский В. Б., Харлашин П. С. Конвертерне виробництво сталі. Дніпропетровськ : РВА „Дніпро-ВАЛ”, 2004. 454 с.
- 4 Жук А., Малишев Г., Желябіна Н., Таратута К. Монтаж металургійного обладнання. Київ : Кондор, 2018. 382 с.
- 5 Жук А., Малишев Г., Желябіна Н., Таратута К. Ремонт металургійного обладнання. Київ : Кондор, 2016. 236 с.
- 6 Жук А., Малишев Г., Желябіна Н., Таратута К. Технічне обслуговування металургійного обладнання. Київ : Кондор, 2017. 288 с.
- 7 Робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання до вивчення дисципліни «Металургійні печі» для студентів спеціальності 136 – металургія (бакалаврський рівень) / уклад.: О. В. Гупало, О. О. Єрьомін, Л. О. Воробйова, В. Б. Пульпінський. Дніпро : НМетАУ, 2019. 40 с.



Навчально-методичне видання

**Ягольник Максим Вікторович
Бойко Максим Миколайович
Стоянов Олександр Михайлович
Малій Христина Василівна**

МЕТАЛУРГІЙНІ ПЕЧІ

**методичні рекомендації
до виконання практичних робіт
та індивідуальних завдань**

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції