

Міністерство освіти і науки України

Національний університет водного
господарства та природокористування

Кафедра гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних
машин

01-06-80М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних робіт з навчальної дисципліни
«Високотемпературні теплотехнологічні процеси та установки»
(Розділ «Теплові та матеріальні баланси високотемпературних
теплотехнологічних установок») для здобувачів вищої освіти
першого (бакалаврського) рівня за ОПП «Теплоенергетика»
спеціальності 144 «Теплоенергетика» галузі знань
14 «Електрична інженерія» усіх форм навчання

Рекомендовано
науково-методичною радою
з якості ННІВГП
Протокол №10 від 20.06.2023 р.

Рівне – 2023

Методичні вказівки до виконання практичних робіт з навчальної дисципліни «Високотемпературні теплотехнологічні процеси та установки» (Розділ «Теплові та матеріальні баланси високотемпературних теплотехнологічних установок») для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за ОПП «Теплоенергетика» спеціальності 144 «Теплоенергетика» галузі знань 14 «Електрична інженерія» усіх форм навчання [Електронне видання] / Костюк О. П. – Рівне : НУВГП, 2023 – 36 с.

Укладач: Костюк О. П., к.т.н., доцент кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин.

Відповідальний за випуск: Рябенко О. А., д.т.н., професор, завідувач кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин.

Керівник групи забезпечення спеціальності 144 «Теплоенергетика»

Костюк О. П.

© Костюк О. П., 2023
© НУВГП, 2023

ЗМІСТ

Вступ	3
1 Постановка задачі і методичні поради для вибору виду теплового та матеріального балансів	4
2 Тепловий баланс вогнетехнічної установки	5
3 Матеріальний баланс вогнетехнічної установки	20
4 Приклади складання теплових та матеріальних балансів і їх окремих статей	21
5 Властивості вогнетривких та теплоізоляційних матеріалів	27
6 Особливості складання теплових балансів	29
7 Коефіцієнти корисної дії вогнетехнічних установок	32
Література	35
Додатки	36

ВСТУП

Високотемпературні теплотехнологічні процеси є технологічною основою найважливіших галузей промислового виробництва.

Студенти напряму підготовки бакалаврів 0905 «Енергетика» вивчають дисципліну «Високотемпературні теплотехнологічні процеси і установки» на лекціях, практичних заняттях.

Одним з етапів розв'язання комплексної задачі підготовки фахівців є вміння складати теплові та матеріальні баланси високотемпературних установок.

Розробка, експлуатація високотемпературних установок, інтенсифікація процесів у діючому устаткуванні не мислимі без глибокого знання закономірностей теплотехнологічних процесів, які протікають у ньому, сучасних методик теплових, конструктивних, аеродинамічних і гідродинамічних розрахунків і розрахунків на міцність цього устаткування, тенденцій, що визначають шляхи подальшого вдосконалення й інтенсифікації процесів, апаратів і установок.

Практичні заняття дозволяють закріпити знання, отримані при вивченні теоретичного курсу, активізувати роботу кожного студента, розвивати навички самостійного виконання поставлених задач складання теплових та матеріальних балансів, аналізувати їх результати і вибрати раціональні рішення і за даними методичними вказівками складати теплові та матеріальні баланси різних високотемпературних теплотехнологічних установок.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ І МЕТОДИЧНІ ПОРАДИ ДЛЯ ВИБОРУ ВИДУ ТЕПЛОВОГО ТА МАТЕРІАЛЬНОГО БАЛАНСІВ

Вивчення розділу, присвяченого матеріальним і тепловим балансам, вимагає попередньої проробки наступних питань. Необхідно освоїти методику проведення розрахунків горіння будь-якого палива (рідкого, твердого і газоподібного), способи задання складу палива, вміти їх перераховувати з одного складу на іншій, визначати склад суміші по заданих складах окремих палив і теплоті згоряння суміші, перераховувати склад сухого палива на вологе, визначати теплоту згоряння палива.

Найбільш прийнятний спосіб проведення розрахунку горіння палива – метод мольних об'ємів, описаний у [1; 2]. У результаті проведення розрахунку горіння палива для складання балансів необхідно знати теоретичну і дійсну (при заданому значенні коефіцієнта надлишку повітря з врахуванням вологовмісту палива і повітря) кількості повітря, продуктів згоряння які утворилися в результаті згоряння одиниці маси або об'єму палива, у тому числі водяної пари та трьохатомних газів.

Необхідно повторити порядок визначення кількості переданої теплоти через значення середньої і істинної теплоємностей, що вивчається у дисциплінах теплопередача та технічна термодинаміка.

З курсу хімії варто згадати порядок визначення коефіцієнтів при утворенні екзотермічних реакцій окислення.

Для повного розуміння змісту окремих складових теплових балансів необхідно чітко знати фізичний зміст температур горіння палива (калориметричної, жаропродуктивної здатності палива, теоретичної і дійсної температур печі).

При складанні теплових балансів доцільно користуватися [1: 2], тому що в них наведені теплофізичні властивості різних матеріалів, наведені значення теплоємностей різних газів залежно від температури, представлені різні режими термообробки матеріалів, допустимі значення їх температур нагріву.

Теплові і матеріальні баланси вогнетехнічних установок засновані на законі збереження енергії і збереженні сумарної маси матеріалу, який піддається тепловій обробці та теплоносія.

Аналізуючи складений тепловий баланс з врахуванням питомої продуктивності установки, якості продукції, що випускається, її собівартості можна оцінити ступінь корисного використання внесеної

теплоти, зрозуміти причини малої теплової економічності окремих вузлів або агрегату в цілому і намітити шляхи усунення виявлених недоліків.

Теплові баланси складають для робочого простору печі; робочого простору разом з рекуператорами (регенераторами) для внутрішнього тепловикористання; всієї установки в цілому, включаючи теплоутилізатор для зовнішнього тепловикористання (котел-утилізатор).

За необхідності оцінити теплову ефективність роботи окремих вузлів установки рекомендується складати теплові баланси для рекуператорів (регенераторів), котлів-утилізаторів і т.д.

При складанні балансу для печей періодичної дії доцільно його відносити до робочого циклу, наприклад, для випалу одного завантаження матеріалу, однієї плавки і т.п. Для вогнетехнічних установок безперервної дії, як правило, баланси відносять до однієї години роботи. Значний інтерес представляють баланси, віднесені до одиниці продукції, що випускається, (питомий тепловий баланс) або до одиниці шихти, що завантажуються.

Баланси можуть складатися для вогнетехнічної установки, яка працює (перевірочний тепловий баланс), або установки, яка проектується.

При складанні перевірочного теплового балансу відома реальна витрата палива. По складеному балансу в цьому випадку можна визначити ступінь ефективності розподілу внесеної теплоти по окремих стадіях процесу теплової обробки матеріалу або по окремих вузлах установки.

Мета складання теплового балансу для установок, які проектуються, визначення витрати палива, яка при складанні балансу приймається за невідому величину і визначається розв'язком рівняння з одним невідомим.

Матеріальні баланси складаються для працюючих установок для перевірки виробничих норм витрати матеріалу і виходу готового продукту.

2 ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС ВОГНЕТЕХНІЧНОЇ УСТАНОВКИ

2.1 Загальний вид рівняння теплового балансу

Рівняння теплового балансу в загальному виді можна записати в такий спосіб

$$\sum Q_{\text{прих}} = \sum Q_{\text{витр}}, \quad (2.1)$$

де $\sum Q_{\text{прих}}$, $\sum Q_{\text{витр}}$ - загальна кількість теплоти відповідно внесеної в установку і затраченої в установці, кВт .

При складанні теплового балансу для вогнетехнічних установок, які проектуються, можна не враховувати хімічний і фізичний недопал газоподібного палива, тобто можна вважати, що паливо буде спалюватися з максимальною ефективністю.

2.2 Прихідна стаття теплового балансу

Витрата теплоти в лівій частині рівняння (2.1) - прихідна частина теплового балансу, може бути розбита на декілька складових

$$\sum Q_{\text{прих}} = Q_x + Q_{\text{нов}} + Q_{\text{нал}} + Q_{\text{екз}} + Q'_m, \quad (2.2)$$

де Q_x - хімічна теплота яка утворилась при спалюванні палива, кВт .

$Q_{\text{нов}}$ - фізична теплота яка вноситься повітрям в топку вогнетехнічної установки, кВт .

$Q_{\text{нал}}$ - фізична теплота палива, кВт .

$Q_{\text{екз}}$ - теплота, внесена в установку з технологічними матеріалами (теплота екзотермічних реакцій), кВт .

Q'_m - фізична теплота матеріалу, кВт .

Розглянемо методику визначення окремих складових лівих і правих частин рівняння (2.1) при складанні теплового балансу для установок які проектуються. З цією метою вводиться витрата палива V кілограм за секунду - для твердого палива або кубічний метр за нормальних умов за секунду для газоподібного палива.

Для даного приклада візьмемо тверде паливо.

2.2.1 Хімічна теплота палива Q_x , кВт

$$Q_x = Q_n^p \cdot V, \quad (2.3)$$

де Q_n^p - нижча теплота згоряння одиниці маси палива, кДж/кг

Для твердого палива нижча теплота згоряння робочої маси твердого палива визначається за формулою

$$Q_n^p = 340 \cdot C^p + 1030 \cdot H^p - 109 \cdot (O^p - S^p) - 25,16 \cdot W^p, \quad (2.4)$$

де C^p, H^p, O^p, S^p, W^p – компоненти які входять в склад твердого палива у відсотках в перерахунку на робочу масу палива, % .

Величину Q_n^p для газоподібного палива рекомендується визначати за [1], де приведені екзотермічні ефекти від горіння різних газоподібних вуглеводнів.

2.2.2 Фізична теплота повітря $Q_{\text{в}}$, $\kappa Bт$.

$$Q_{\text{в}} = B \cdot V_{\text{нов}}^o \cdot \alpha \cdot C'_{\text{нов}} \cdot t_{\text{нов}}, \quad (2.5)$$

де $V_{\text{нов}}^o$ – теоретично необхідна кількість повітря для повного горіння палива, $м_н^3 / \kappa г$.

α – коефіцієнт надлишку повітря.

$C'_{\text{нов}}$ – питома ізобарна об'ємна середня теплоємність сухого повітря в проміжку температур від $0^{\circ}C$ до $t_{\text{нов}}$, $\kappa Дж / (м_н^3 \cdot K)$.

$t_{\text{нов}}$ – температура повітря, що надходить для горіння, $^{\circ}C$.

У значення $V_{\text{нов}}^o$ повинна входити волога повітря, а коефіцієнт надлишку повітря повинен враховувати тип вогнетехнічної установки, вид палива і конструкцію пристрою для спалювання палива.

2.2.3 Фізична теплота палива $Q_{\text{нал}}$, $\kappa Bт$.

$$Q_{\text{нал}} = B \cdot C_{\text{нал}} \cdot t_{\text{нал}}, \quad (2.6)$$

де $C_{\text{нал}}$ – питома ізобарна масова середня теплоємність твердого палива в проміжку температур від $0^{\circ}C$ до $t_{\text{нал}}$, $\kappa Дж / (\kappa г \cdot K)$.

$t_{\text{нал}}$ – температура палива, що надходить для горіння, $^{\circ}C$.

2.2.4 Теплота екзотермічних реакцій $Q_{\text{екз}}$, $\kappa Bт$.

У статті враховується теплота, яка виділяється в результаті всіх екзотермічних реакцій, крім хімічної теплоти самого палива. Наприклад, у нагрівальних печах враховується тільки теплота від окислення заліза, для них

$$Q_{\text{екз}} = 5652 \cdot G \cdot a, \quad (2.7)$$

де 5652 – кількість теплоти, яку отримують від окислення одного кілограма заліза, $\kappa Дж / \kappa г$.

G – продуктивність печі, $кг/с$.

a – чад металу, $кг/кг$ (наприклад, якщо чад металу складає 2,5 % вагових, то $a = 0,025$).

Для термічних печей $a = (0,5...1,0) \cdot 10^{-2}$, для нагрівальних $a = (1,0...2,5) \cdot 10^{-2}$ $кг/кг$.

2.2.5 Фізична теплота матеріалу Q'_m , $кВт$.

$$Q'_m = \sum_{i=1}^n g_i \cdot C_i \cdot t_{noc}, \quad (2.8)$$

де g_i – масова витрата i -го матеріалу, що завантажується в піч, $кг/с$.

C_i – середня масова теплоємність i -го матеріалу в проміжку температур від 0^0C до t_{noc} , $кДж/(кг \cdot K)$.

t_{noc} – температура посаду матеріалу в піч, 0C .

При складанні теплового балансу, якщо задано садку печі, тобто кількість матеріалу, що завантажується, у піч, необхідна її значення відносити до часу термічної обробки.

2.3 Витратна стаття теплового балансу

Кількість теплоти правої частини рівняння (2.1) також може бути розкладена на ряд складових

$$\sum Q_{pacc} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9, \quad (2.9)$$

2.3.1 Теплота, витрачена на нагрівання матеріалу, технологічних відходів, і теплота ендотермічних реакцій Q_1 , $кВт$.

$$Q_1 = Q_1' + Q_1'' + Q_1''', \quad (2.10)$$

де Q_1' – теплота, витрачена на нагрівання матеріалу, $кВт$.

$$Q_1' = G_m (h_{mk} - h_{ml}) = G_m (C_{mk} \cdot t_{mk} - C_{ml} \cdot t_{ml}), \quad (2.11)$$

G_m – витрата матеріалу, що нагрівається, $кг/с$.

h_{ml} та h_{mk} – значення ентальпії матеріалу при температурі посаду і при кінцевій температурі нагрівання матеріалу, $кДж/кг$.

C_{mk} та C_{m1} – середня масова теплоємність матеріалу при температурі посаду t_{m1} і при кінцевій температурі t_{mk} , $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

t_{m1} та t_{mk} – температура відповідно посаду матеріалу і температура матеріалу в кінці нагріву, $^{\circ}\text{C}$.

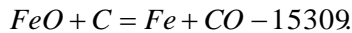
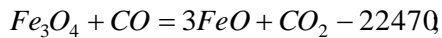
При холодному посаді значенням h_{m1} можна знехтувати. Для плавильних печей враховується прихована теплота плавлення металу.

Q_1'' – теплота, затрачена на нагрівання технологічних відходів (шлаку, недопалків і т.п.), кВт .

Q_1''' – теплота ендотермічних реакцій (реакцій, які протікають з поглинанням теплоти, включаючи теплоту, яка витрачається на поглинання вологи), кВт .

Ця стаття характерна, наприклад, для плавильних печей (теплота, яка витрачається на розкладання вапняку).

При виплавці чавуна з залізних руд у доменних печах, $\text{Дж}/\text{моль}$



Для шлаку (окаліни)

$$Q_1'' = 0,01 \cdot K_q \cdot G_m \cdot C_{ш} \cdot (t_{ш} - t_{m1}) m_{ш}, \quad (2.12)$$

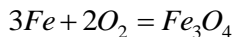
де K_q – чад металу, %. Значення K_q повинне бути задане.

$C_{ш}$ – масова теплоємність шлаку, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; теплоємність шлаку від згоряння заліза можна прийняти рівною $C_{ш} = 1,0465 \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

$t_{ш}$ та t_{m1} – температура шлаку ($t_{ш}$ можна прийняти рівній максимальній температурі поверхні матеріалу) і початкова температура матеріалу відповідно, $^{\circ}\text{C}$.

$m_{ш}$ – питома кількість шлаку (Fe_3O_4), віднесена до 1 кг заліза (Fe), $\text{кг}/\text{кг}$.

Значення $m_{ш}$ легко визначити з рівняння



Звідси

$$3 \cdot 56 - 56 \cdot 3 + 16 \cdot 4;$$

$$1 - m_{ш};$$

$$m_{ш} = 232/168 = 1,38 \text{ кг/кг}.$$

Значення K_q у високотемпературних печах як правило знаходиться в межах 1...3 % .

2.3.2 Випрата теплоти з відхідними газоподібними продуктами Q_2 , κBt

$$Q_2 = Q_2' + Q_2'', \quad (2.13)$$

де Q_2' – теплота, яка витрачається на нагрівання відхідних продуктів згоряння, палива, κBt .

$$Q_2' = B \cdot V_{нз}^q \cdot C_{від} \cdot t_{від}, \quad (2.14)$$

де $V_{нз}^q$ – питомий дійсний (при заданому значенні коефіцієнта надлишку повітря α) об'єм продуктів згоряння палива, $м^3/кг$ (методика визначення $V_{нз}^q$ наведена в [1]).

$C_{від}$ – об'ємна середня теплоємність суміші продуктів згоряння палива в проміжку температур від 0^0C до $t_{від}$, $\kappa Дж/(м^3 \cdot K)$.

$t_{від}$ – температура відхідних продуктів згоряння, палива, 0C .

Q_2'' – теплота, яка витрачається на нагрівання газів, що виділяються з матеріалу (шихти) у процесі його термообробки, κBt .

$$Q_2'' = B \cdot V_2 \cdot C_2 \cdot t_{від}, \quad (2.15)$$

де V_2 – питомий об'єм газів, що виділяються з шихти в процесі теплової обробки матеріалу, $м^3/кг$.

C_2 – об'ємна середня теплоємність газів, що виділяються з матеріалу (шихти) у процесі його термообробки в проміжку температур від 0^0C до $t_{від}$, $\kappa Дж/(м^3 \cdot K)$.

Якщо у вогнетехнічних установках є впрати газу через вікно Q_2''' , то

$$Q_2''' = \sum V_{ок} \cdot C_2 \cdot t_2, \quad (2.16)$$

де C_2 – середня ізобарна об'ємна теплоємність газів в проміжку температур від 0^0C до t_2 , $\kappaДжс/(м_н^3 \cdot K)$.

t_2 – температура газів які вибиваються через вікна вогнетехнічної установки, 0^0C .

$V_{ок}$ – витрата газу, що вибивається через вікно, $м_н^3/с$.

$$\sum V_{ок} = \frac{V_{вер} + V_{гор}}{1 + \beta \cdot t_2}, \quad (2.17)$$

де $V_{вер}$ – витрата газу, що вибивається через вікно або вертикальну щілину при робочих умовах, $м_н^3/с$.

$$V_{вер} = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot H \cdot b \sqrt{\frac{2gH(\rho_{нов}^o - \rho_2^t)}{\rho_2^t}}, \quad (2.18)$$

де μ – коефіцієнт витрати (приймається 0,82 для тонких стінок або 0,62 для товстих).

H – висота вікна або щілини, $м$.

b – ширина вікна або щілини, $м$.

$\rho_{нов}^o$ та ρ_2^t – відповідно густина повітря при 0^0C та газів, що вибиваються через вікно або вертикальну щілину, при t_2 , $\kappaг/м_н^3$.

$V_{гор}$ – витрата газу, що вибивається через верхню горизонтальну щілину (вікно) при робочих умовах, $м_н^3/с$.

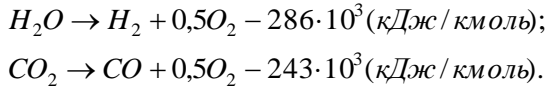
$$V_{гор} = \mu \cdot H \cdot b \sqrt{\frac{2gH(\rho_6^o - \rho_2^t)}{\rho_2^t}}, \quad (2.19)$$

2.3.3 Витрати теплоти від хімічного недопалу і дисоціації газів Q_3 , $\kappaВт$.

$$Q_3 = Q_3' + Q_3'', \quad (2.20)$$

де Q_3' – втрати теплоти від хімічного недопалу, $\kappaВт$.

Q_3'' – втрати теплоти на дисоціацію трьохатомних газів які містяться в продуктах згоряння палива. При температурі $1773K$ та вище має місце дисоціація H_2O та CO_2 .



При безполуменовому спалюванні палива втрати теплоти від хімічного недопалу не повинні враховуватися.

При полуменовому спалюванні, приймаючи до уваги те, що в продуктах згоряння палива як правило міститься 0,5...3 % незгорілих CO і H_2 у співвідношенні $H_2 / CO = 0,5$ по об'єму, кількість затраченої теплоти можна визначити за наступним рівнянням:

$$Q_3' = 0,01(12142 \cdot B \cdot V_{nz}^q \cdot CO), \quad (2.21)$$

де CO – вміст окису вуглецю у продуктах згоряння палива по об'єму, % .
12142 – тепловміст суміші продуктів згоряння, що складаються з CO і H_2 у співвідношенні $H_2 / CO = 0,5$, $\text{кДж} / \text{м}_n^3$.

Отже на дисоціацію H_2O та CO_2 затрачається, кВт .

$$(Q_3'')_{H_2O} = B \cdot V_{H_2O}^q \cdot \rho_{H_2O}^o \cdot 286 \cdot 10^3 / 18 = 15,89 \cdot 10^3 B \cdot V_{H_2O}^q \cdot \rho_{H_2O}^o =$$

$$= 12767,8 B \cdot V_{H_2O}^q, \quad (2.22)$$

$$(Q_3'')_{CO_2} = B \cdot V_{CO_2}^q \cdot \rho_{CO_2}^o \cdot 243 \cdot 10^3 / 44 = 108482 B \cdot V_{CO_2}^q, \quad (2.23)$$

де $V_{H_2O}^q$ та $V_{CO_2}^q$ – відповідно питома кількість H_2O та CO_2 в продуктах згоряння палива за нормальних умов, $\text{м}_n^3 / \text{кг}$.

$\rho_{H_2O}^o$ – густина водяної пари за нормальних термодинамічних умов, $\text{кг} / \text{м}_n^3$ ($\rho_{H_2O}^o = 0,804 \text{ кг} / \text{м}_n^3$).

$\rho_{CO_2}^o$ – густина двоокису вуглецю за нормальних термодинамічних умов, $\text{кг} / \text{м}_n^3$ ($\rho_{CO_2}^o = 1,964 \text{ кг} / \text{м}_n^3$).

2.3.4 Витрати теплоти від механічного недопалу Q_4 , кВт .

Ця стаття витрати характеризує механічний недопал горючої частини палива в провалі, шлаку і виносу з продуктами згоряння палива

$$Q_4 = A \cdot B \cdot Q_n^p, \quad (2.24)$$

де A – коефіцієнт втрат на механічний недопал: для твердого палива $A = 0,03...0,05$; для рідкого палива $A = 0,01$; для газоподібного палива $A = 0,02...0,03$.

2.3.5 Втрати теплоти за рахунок розсіювання його в навколишнє середовище через зовнішні огорожувальні конструкції печі Q_5 , κBm

$$Q_5 = Q'_5 + Q''_5, \quad (2.25)$$

де Q'_5 – втрати теплоти через зовнішні огороження кладки печі

$$Q'_5 = \frac{t_{кл} - t_в}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot F_{кл} \cdot 10^{-3}, \quad (2.26)$$

де $t_{кл} \text{ mat } t_в$ – температура внутрішньої поверхні кладки (визначається з розрахунку або приймається приблизно на $80...50^\circ C$ нижче дійсної температури газів у печі) і навколишнього повітря відповідно, $0^\circ C$.

n – кількість шарів кладки, штук.

δ_i – товщина i -го шару кладки, m .

λ_i – коефіцієнт теплопровідності i -го шару кладки, $Bm/(m \cdot K)$.

α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні стінки (склепіння) у навколишнє середовище, $Bm/(m^2 \cdot K)$.

$F_{кл}$ – площа поверхні кладки печі, m^2 .

Значення α_2 можна прийняти рівним $20 Bm/(m^2 \cdot K)$, тоді $1/\alpha_2$ (термічний опір тепловіддачі) буде рівною $0,05 (m^2 \cdot K)/Bm$.

Складність визначення Q'_5 полягає у визначенні значень λ , що залежать від середніх температур стінок. Значеннями температур стінок доводиться задаватися, потім здійснювати перевірку.

Для визначення втрат Q'_5 студент повинен знати основні розрахункові залежності при розрахунку передачі теплоти через плоску багатшарову стінку. Для полегшення розрахунку рекомендується зобразити поперечний розріз стінки на рисунку. Як приклад поперечного розрізу двошарової плоскої стінки розглянемо рис.2.1. Студентові не обов'язково задаватися якимось масштабом по осях для температури і лінійних розмірів, а досить лише витримувати візуально їхні абсолютні значення. Наприклад відомо, що температура печі буде вище, ніж

температура внутрішньої поверхні кладки, а крапка на малюнку, що відповідає цій температурі, буде знаходитись вище. Рисунок зручний тим, що на ньому можна нанести всі величини, що будуть використані при подальшому розрахунку. Студентові необхідно пам'ятати, що еюра розподілу температур у даний момент часу (у даному випадку процес розглядається як стаціонарний) у поперечному перерізі плоскої стінки має лінійний характер (на рисунку зображається прямою лінією). В обертових циліндричних печах доцільно розглядати багат шарову циліндричну стінку.

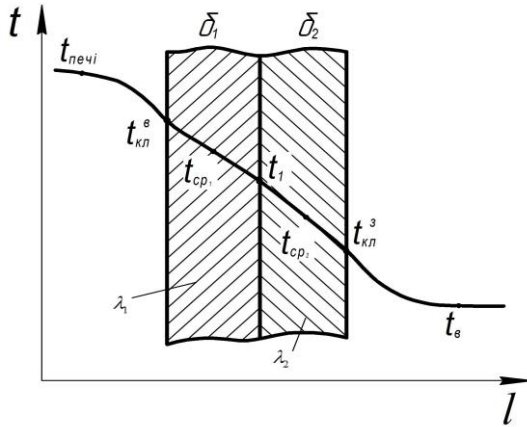


Рис.2.1 До визначення втрат Q'_5 через плоску двошарову стінку

На рис. 2.1 прийняті наступні позначення:

δ_1 та δ_2 – відповідно товщина першої та другої стінки, м .

t_{nechi} – температура всередині робочого простору печі, $^{\circ}C$.

$$t_{nechi} = t_k \cdot \eta, \quad (2.27)$$

де t_k – калориметрична температура горіння палива, $^{\circ}C$.

η – пірометричний коефіцієнт.

t_{nov} – температура навколишнього повітря, $^{\circ}C$.

t_{kl}^6, t_{kl}^3 – температура відповідно внутрішньої і зовнішньої поверхонь кладки печі, $^{\circ}C$.

t_1 – температура в площині дотику шарів ізоляції, $^{\circ}C$.

λ_1 та λ_2 – коефіцієнти теплопровідності матеріалу відповідно першого і другого шарів ізоляції, $Bm/(M \cdot K)$.

Задаємося середньою температурою внутрішнього шару кладки печі ($t_{кл}$ та $t_{нов}$ відомі).

$$t_{cp1} = \frac{t_{кл} + t_{нов}}{2}, \quad (2.28)$$

Задаємося середньою температурою зовнішнього шару

$$t_{cp2} = \frac{t_{cp1} + t_{нов}}{2}, \quad (2.29)$$

За значеннями t_{cp1} і t_{cp2} визначаємо по довідниках (можна користуватися [1]) значення λ_1 і λ_2 .

Визначаємо втрати теплоти через стінку

$$Q'_5 = \frac{t_{кл} - t_{нов}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot F_{кл} \cdot 10^{-3}, \quad (2.30)$$

Задані величини t_{cp1} і t_{cp2} перевіряємо. Далі приведений вивід величин t_{cp1} і t_{cp2} для перевірки.

$$t_1 = t_{кл} - q'_5 \frac{\delta_1}{\lambda_1}, \quad (2.31)$$

де q'_5 – питома густина теплового потоку, Bm/m^2 .

$$q'_5 = \frac{Q'_5}{F_{кл}}, \quad (2.32)$$

До лівої і правої частин рівняння (2.26) додамо $t_{кл}$

$$t_1 + t_{кл} = 2t_{кл} - q'_5 \frac{\delta_1}{\lambda_1}, \quad (2.33)$$

Розділимо ліву і праву частини рівняння (2.31) на 2

$$\frac{t_1 + t_{кл}}{2} = t_{кл} - \frac{q'_5}{2} \cdot \frac{\delta_1}{\lambda_1}, \quad (2.34)$$

Так, як $\frac{t_1 + t_{кл}}{2} = t_{cp1}$ то в результаті одержимо

$$t_{cp1} = t_{кл} - \frac{q'_5}{2} \cdot \frac{\delta_1}{\lambda_1}, \quad (2.35)$$

З рівняння (2.33) визначимо

$$t_1 = 2t_{cp1} - t_{кл}, \quad (2.36)$$

Остаточно одержимо t_{cp1} і t_{cp2} для перевірки

$$t_{cp1} = t_{кл} - \frac{Q'_5 \cdot \delta_1}{2F_{кл} \cdot \lambda_1}, \quad (2.37)$$

$$t_{cp2} = t_1 - \frac{Q'_5 \cdot \delta_2}{2F_{кл} \cdot \lambda_2}, \quad (2.38)$$

Максимальна розбіжність прийнятих температур t_{cp1} і t_{cp2} , не повинна перевищувати 1%. Втрату теплоти через закриту металеву заслінку можна визначити за такою залежністю, $кВт$:

$$(Q'_5)_{зас} = \frac{t_{кл} - t_{нов}}{\delta} F_3 \cdot (1 - \psi) \cdot 10^{-3}, \quad (2.39)$$

$$\lambda + 0,05$$

де ψ – частка часу від однієї години, протягом якого відкрита заслінка.

F_3 – площа поверхні заслінки, $м^2$.

Для методичних печей заслінки яких не охолоджуються можна прийняти, $кВт$:

$$(Q'_5)_{зас} = 4,65 \cdot F_3 \cdot (1 - \psi), \quad (2.40)$$

Загальну втрату теплоти Q'_5 можна визначити по [3, рис. 118].

Q''_5 – втрати теплоти через відкриті вікна, $кВт$:

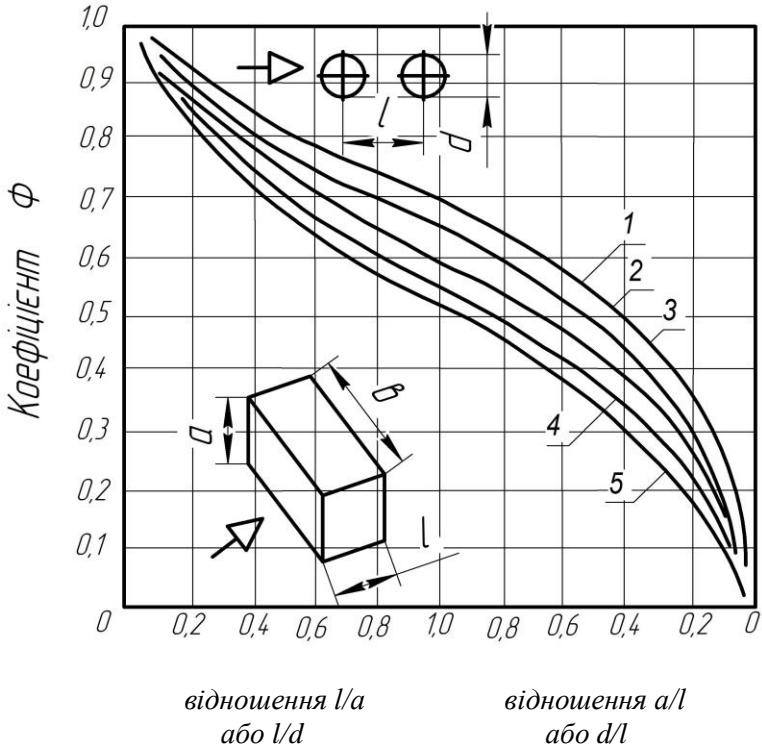
$$Q''_5 = C_0 \cdot F_{відкр} \cdot \psi \cdot \Phi \cdot 10^{-11} \cdot (T_{печі}^4 - T_{нов}^4), \quad (2.41)$$

де C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла,

$$C_0 = 5,67 Вт / (м^2 \cdot K^4).$$

Φ – коефіцієнт діафрагмування (враховує товщину віконного прорізу і розміри вікна), Φ визначається за рис. 2.2.

Для того щоб не зробити помилку при визначенні відношення розмірів вікна, можна окремо зобразити малюнок і проставити на ньому розміри з літерами, як це показано на рис. 2.2.



- 1. вузька щілина $\frac{a}{b} = 0$; 2. прямокутник $\frac{a}{b} = 0,2$;
- 3. прямокутник $\frac{a}{b} = 0,5$; 4. квадрат $\frac{a}{b} = 1$; 5. коло.

Рис. 2.2. До визначення коефіцієнта діафрагмування при випромінюванні через відкритий отвір (вікно)

Коефіцієнт діафрагмування вікна можна визначити за табл.2.1.

Таблиця 2.1

Коефіцієнт діафрагмування

a/L	Прямокутник		Квадрат	Коло
	$a/\epsilon = 0,2$	$a/\epsilon = 0,5$	$a/\epsilon = 1,0$	
1,0	0,645	0,6	0,54	0,505
0,8	0,595	0,54	0,475	0,46
0,6	0,520	0,46	0,41	0,38
0,4	0,430	0,375	0,325	0,315
0,2	0,325	0,26	0,23	0,21

2.3.6 Втрати теплоти на акумуляцію її кладкою (для печей періодичної дії), Q_6 , кВт

$$Q_6 = V_{\text{кл}} \cdot \rho_{\text{кл}} \cdot C_{\text{кл}}^{t_{\text{кл}}} \cdot (t_{\text{кл.сп}}^{\text{к}} - t_{\text{кл.сп}}^{\text{н}}) / \tau, \quad (2.42)$$

де $V_{\text{кл}}$ – об'єм кладки (для кожного шару кладки значення Q_6 рахується окремо), м^3 .

$\rho_{\text{кл}}$ – густина матеріалу кладки при середній температурі, $\text{кг} / \text{м}^3$.

$C_{\text{кл}}^{t_{\text{кл}}}$ – середня масова теплоємність матеріалу кладки в проміжку температур $t_{\text{кл.сп}}^{\text{к}}$ і $t_{\text{кл.сп}}^{\text{н}}$, $\text{кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$.

$t_{\text{кл.сп}}^{\text{к}}$ та $t_{\text{кл.сп}}^{\text{н}}$ – відповідно кінцева і початкова середні температури кладки (шару), $^{\circ}\text{C}$.

$$t_{\text{сп}}^{\text{к}} = \frac{t_{\text{кл.сп}}^{\text{к}} + t_{\text{кл.сп}}^{\text{н}}}{2}, \quad (2.43)$$

τ – час, за який досягається $t_{\text{кл.сп}}^{\text{к}}$, год.

2.3.7 Втрати теплоти на нагрівання тари Q_7 , κBm

$$Q_7 = G_T \cdot C_T \cdot (t_T^k - t_T^n) / \tau, \quad (2.44)$$

де G_T – маса тари, $\kappa\text{г}$.

C_T – середня масова теплоємність тари в інтервалі початкової t_T^n і кінцевої t_T^k температур тари, $\kappa\text{Дж}/(\kappa\text{г} \cdot \text{K})$.

t_T^n та t_T^k – температура тари відповідно при завантаженні і вивантаженні, $^\circ\text{C}$.

τ – час розігріву тари, год.

Під поняттям тари в цій статті витрати слід розуміти не тільки пристосування, у якому транспортується матеріал, але і різні пристрої, призначені для транспортування матеріалу, наприклад, візок для транспортування на ньому матеріалу і т.п.

2.3.8 Втрати теплоти з охолоджуючим теплоносієм, Q_8 , κBm

Як правило в якості охолоджуючого теплоносія використовується вода, втрати теплоти з охолоджуючою водою рівні

$$Q_8 = q_e \cdot F_e, \quad (2.45)$$

де q_e – густина теплового потоку на поверхню деталі яка охолоджується водою, $\kappa Bm / m^2$.

F_e – площа поверхні деталі яка охолоджується водою, m^2 .

Для декількох деталей які охолоджуються водою втрати сумуються. Рекомендовані значення q_e приведені в [4, табл. 31] Для орієнтовних розрахунків можна скористатись формулою

$$Q_8 = 0,1 \sum Q_{\text{прих}}, \quad (2.46)$$

2.3.9 Невраховані втрати теплоти Q_9 , κBm

$$Q_9 = 0,15 \sum Q_{3...8}, \quad (2.47)$$

де $\sum Q_{3...8}$ – кількість теплоти, що витрачається в статтях $Q_3...Q_8$.

2.4 Визначення витрати палива і перевірка правильності складання теплового балансу

Сформулювавши окремо статті приходу і витрати теплоти і порівнявши їх, одержуємо рівняння з одним невідомим. Розв'язок цього рівняння приводить до визначення витрати палива B .

Для перевірки правильності складання теплового балансу доцільно скласти таблицю з двох стовпчиків. У лівому стовпчику перелічити статті приходу і відповідну кількість підведеної теплоти $\sum Q_{\text{прих}}$, а у правій - всі статті витрати теплоти $\sum Q_{\text{випр}}$.

При розбіжності цих величин необхідно визначити максимальну відносну помилку $\Delta Q, \%$

$$\Delta Q = \frac{\sum Q_{\text{max}} - \sum Q_{\text{min}}}{\sum Q_{\text{min}}} \cdot 100\%, \quad (2.48)$$

де $\sum Q_{\text{max}}$ та $\sum Q_{\text{min}}$ - відповідно більше і менше значення величин сумарних значень прихідної $\sum Q_{\text{прих}}$ та витратної $\sum Q_{\text{випр}}$ статті теплового балансу.

Величина ΔQ не повинна перевищувати 0,1%. Розраховану з рівняння теплового балансу витрату палива B доцільно збільшити на 10...15% для деякого форсування роботи установки.

3. МАТЕРІАЛЬНИЙ БАЛАНС ВОГNETЕХНІЧНОЇ УСТАНОВКИ

Матеріальні баланси складаються в тому випадку, коли при термічній обробці матеріалу протікають складні теплотехнічні процеси, пов'язані зі зміною структури матеріалу або свого агрегатного стану. Матеріальний баланс відображає закон збереження маси матеріалів. Рівняння матеріального балансу в загальному вигляді записується в такому вигляді:

$$\sum M_{\text{прих}} = \sum M_{\text{випр}}, \quad (3.1)$$

де $\sum M_{\text{прих}}$ - сума мас матеріалів, внесених у робочий простір установки для термообробки, кг.

$\sum M_{\text{випр}}$ - сума мас матеріалів, які отримані в результаті термічної

обробки, кг .

$$\sum M_{\text{прих}} = M_c + M_{\text{вол}} + M_{\text{нал}} + M_{\text{ок}} , \quad (3.2)$$

де M_c – маса сухої технологічної сировини, кг .

$M_{\text{вол}}$ – маса вологи, яка знаходиться в технологічній сировині, кг .

$M_{\text{нал}}$ – маса палива, кг .

$M_{\text{ок}}$ – маса окислювача (повітря, технічний кисень, парове дуття), кг .

$$\sum M_{\text{випр}} = M_{\text{г.п}} + M_2 + M_{\text{ш}} + M_{\text{ум}} , \quad (3.3)$$

$M_{\text{г.п}}$ – маса готового продукту, кг .

M_2 – маса газоподібних продуктів, які утворились в результаті технологічного процесу (включаючи водяну пару, продукти згоряння палива, продукти виділення з матеріалу), кг .

$M_{\text{ш}}$ – маса шлаку (твердих продуктів, які залишаються після термообробки матеріалу), кг .

$M_{\text{ум}}$ – маса матеріалу, винесеного згазами при його тепловій обробці, кг .

Похибку при складанні матеріального балансу визначають аналогічно тепловому балансу і вона не повинна перевищувати 0,5 % .

4. ПРИКЛАДИ СКЛАДАННЯ ТЕПЛОВИХ ТА МАТЕРІАЛЬНИХ БАЛАНСІВ І ЇХ ОКРЕМИХ СТАТЕЙ

Для полегшення студентам складання теплових і матеріальних балансів приведені деякі приклади по визначенню окремих їх статей. Всі кінцеві відповіді повинні виражатись в кіловатах. В усіх випадках рекомендується дотримуватись наведених у методичних вказівках позначень, тому що ці позначення застосовуються і у інших літературних джерелах.

При визначенні тієї або іншої статті теплового (матеріального) балансу доцільно записувати коротко вихідні дані і при необхідності представити розрахункову схему або рисунок.

4.1 Матеріальний баланс оберткової випалювальної печі для випалу цементного клінкера

Рівняння матеріального балансу буде мати такий вигляд:

$$M_c + M_{нал} + M_в = M_{кл} + (M_{вол} + M_{со_2} + M_{вин})_с + M_з + M_{з.п}, \quad (4.1)$$

де $M_c, M_{нал}, M_в, M_{кл}$ – маса відповідно вихідної сировини, внесеного в топку палива, внесеного в топку повітря, готового клінкера, кг .

$M_{вол}, M_{со_2}, M_{вин}$ – маса вологи, двоокису вуглецю, винесеного матеріалу із сировини, кг .

$M_з$ – маса золи, кг .

$M_{з.п}$ – маса продуктів згоряння палива, кг .

В табл. 4.1 приведений матеріальний баланс оборотної печі на 1 кг обпаленого клінкера.

Таблиця 4.1

Матеріальний баланс оборотної випалювальної печі

Прихідна стаття теплового балансу	Маса, $\frac{кг}{кг\text{ клінкера}}$	Витратна стаття теплового балансу	Маса, $\frac{кг}{кг\text{ клінкера}}$
Маса вихідної сировини	2,57	Маса готового продукту	1
Маса внесеного в топку палива	0,22	Маса двоокису вуглецю	0,6
Маса внесеного в топку повітря	2,36	Маса вологи	0,93
		Маса винесеного матеріалу	0,06
		Маса золи	0,0
		Маса продуктів згоряння палива	2,56
Всього	5,15	Всього	5,15

4.2 Приклади складання окремих статей матеріальних балансів

Приклад 1.

Визначити втрати теплоти випромінюванням через вікно посаду і видачі, якщо ширина вікна $b = 1200$ мм, висота $a = 500$ мм, товщина

кладки $l = 350$ мм. Час посадки і видачі по 10 хв. Температуру печі при посаді прийняти 1150 °С, а при видачі - 880 °С, температуру навколишнього середовища - 20 °С.

Розв'язання.

Втрати теплоти випромінюванням через відкрите вікно визначаємо за рівнянням (2.41). Для визначення коефіцієнта діафрагмування Φ обчислюємо l/a і a/b

$$l/a = 0,35/0,5 = 0,61$$

$$a/b = 0,5/1,2 = 0,42$$

Тоді за графіком рис.2.2 $\Phi = 0,7$.

Втрати теплоти при посаді

$$(Q_5'')_{\text{выд}} = 5,67 \cdot 0,5 \cdot 1,2 \cdot 0,12 \cdot 0,7 \cdot 10^{-11} \cdot (1423^4 - 293^4) = 11,696 \text{ кВт.}$$

де $0,12$ – частка години, протягом якої відкрите вікно.

Втрати теплоти при видачі

$$(Q_5'')_{\text{выд}} = 5,67 \cdot 0,5 \cdot 1,2 \cdot 0,12 \cdot 0,7 \cdot 10^{-11} \cdot (1153^4 - 293^4) = 5,029 \text{ кВт.}$$

Приклад 2.

Визначити втрати теплоти через двошарову стінку печі, викладену з магнезитової цегли і шамотної цегли класу А. Магнезитова цегла - перший шар робочого простору печі. Товщина шару магнезитової цегли складає $0,25$ м, а шамотної $0,37$ м. Температуру внутрішньої поверхні кладки прийняти 950 °С, температуру повітря 20 °С. Загальна поверхня, через яку втрачається теплота, складає 154 м².

Розв'язання.

Втрати теплоти через двошарову плоску стінку визначаємо за рівнянням (2.26). Позначення відповідають рис.2.1.

Задаємося середньою температурою внутрішніх шарів кладки печі

$$t_{cp1} = \frac{t_{кл}^{вн} + t_{нов}}{2} = \frac{950 + 20}{2} = 485 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$t_{cp2} = \frac{t_{cp1} + t_{нов}}{2} = \frac{485 + 20}{2} = 252,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Формули для визначення λ_1 і λ_2 знаходимо за табл. 5.1

$$\lambda_1 = 6,3 - 27 \cdot 10^{-4} \cdot t = 6,3 - 27 \cdot 10^{-4} \cdot 485 = 4,9905 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

$$\lambda_2 = 0,9 + 2,3 \cdot 10^{-4} \cdot t = 0,9 + 2,3 \cdot 10^{-4} \cdot 252,5 = 0,958 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

$$Q'_5 = \frac{950 - 20}{\frac{0,25}{4,9905} + \frac{0,37}{0,958} + \frac{1}{20}} \cdot 154 \cdot 10^{-3} = 294,5 \text{ кВт}$$

Перевіряємо прийнятті температури

$$t_{cp1} = t_{кл}^{вн} - \frac{Q'_5 \cdot \delta_1}{2F_{кл} \cdot \lambda_1} = 950 - \frac{294,5 \cdot 10^3 \cdot 0,25}{2 \cdot 154 \cdot 4,9905} = 902,1 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$t_{cp2} = 2t_{cp1} - t_{кл}^{вн} - \frac{Q'_5 \cdot \delta_2}{2F_{кл} \cdot \lambda_2} = 2 \cdot 902,1 - 950 - \frac{294,5 \cdot 10^3 \cdot 0,37}{2 \cdot 154 \cdot 0,958} = 484,91 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Отримані значення t_{cp1} і t_{cp2} не збігаються з раніше прийнятими, а тому перезадасмося температурами прийнявши для другого наближення $t_{cp1} = 886 \text{ } ^\circ\text{C}$; $t_{cp2} = 470 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Тоді

$$\lambda_1 = 6,3 - 27 \cdot 10^{-4} \cdot 886 = 3,9078 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

$$\lambda_2 = 0,9 + 2,3 \cdot 10^{-4} \cdot 470 = 1,0081 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

$$Q'_5 = \frac{950 - 20}{\frac{0,25}{3,9078} + \frac{0,37}{1,0081} + \frac{1}{20}} \cdot 154 \cdot 10^{-3} = 297,753 \text{ кВт}$$

Перевіряємо

$$t_{cp1} = 950 - \frac{297,753 \cdot 10^3 \cdot 0,25}{2 \cdot 154 \cdot 3,9078} = 888,15 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$t_{cp2} = 2 \cdot 888,15 - 950 - \frac{297,753 \cdot 10^3 \cdot 0,37}{2 \cdot 154 \cdot 1,0081} = 471,49 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Отримані значення t_{cp1} і t_{cp2} близькі до заданих, а тому остаточно приймаємо $t_{cp1} = 887 \text{ } ^\circ\text{C}$ и $t_{cp2} = 470 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Тоді

$$\lambda_1 = 3,9078 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$$\lambda_2 = 1,0081 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$$Q_5' = 297,753 \text{ кВт}.$$

Приклад 3.

Визначити теплоту екзотермічної реакції від окислення металевих заготовок, якщо їх розміри $70 \times 70 \times 40$ мм. Кількість заготовок 20 шт. Час термообробки 1,4 год. При розрахунку густину матеріалу прийняти рівною $7820 \text{ кг}/\text{м}^3$, величину чаду 1,6 %.

Розв'язання.

Визначаємо об'єм однієї заготовки

$$V_3 = 70 \cdot 70 \cdot 40 = 1960000 \text{ мм}^3 = 0,00196 \text{ м}^3$$

Об'єм всіх заготовок

$$V_{20} = V_3 \cdot n = 0,00196 \cdot 20 = 0,0392 \text{ м}^3.$$

Маса всіх заготовок

$$G = V_{30} \cdot \rho = 0,0392 \cdot 7820 = 306,544 \text{ кг}$$

Витрата матеріалу

$$G_c = G / \tau = 306,544 / 5040 = 0,0608 \text{ кг}/\text{с}$$

де $\tau = 1,4 \text{ год} = 1,4 \cdot 3600 = 5040 \text{ с}$.

Теплоту екзотермічної реакції визначаємо за рівняням (2.7)

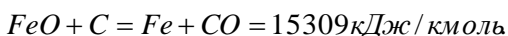
$$Q_{\text{екз}} = 5652 \cdot G_c \cdot a = 5652 \cdot 0,0608 \cdot 0,016 = 5,498 \text{ кВт}.$$

Приклад 4.

Визначити витрати теплоти при виплавці чавуну яка іде на взаємодію Fe_3O_4 з CO і Fe з C . Витрата Fe_3O_4 складає 2400 кг/год, витрата $Fe = 1100$ кг/год.

Розв'язання.

Запишемо реакції взаємодії і їхні ендотермічні ефекти, кДж/кмоль



Витрата Fe_3O_4 :

$$(G_{\mu})_{Fe_3O_4} = \frac{G_{Fe_3O_4}}{\mu_{Fe_3O_4}} = \frac{2400}{3600 \cdot 232} = 0,00287 \text{ кмоль}/\text{с}$$

де Fe_3O_4 – молярна маса Fe_3O_4 , кг/кмоль.

Витрата Fe :

$$(G_{\mu})_{FeO} = \frac{G_{FeO}}{\mu_{FeO}} = \frac{1100}{3600 \cdot 72} = 0,00424 \text{ кмоль/с}$$

Витрати теплоти

$$(Q_1^m)_{Fe_3O_4} = \frac{(Q_{енд})_{Fe_3O_4}}{(G_{\mu})_{Fe_3O_4}} = \frac{22470}{0,00287} = 7829268 \text{ кВт},$$

$$(Q_1^m)_{FeO} = \frac{(Q_{енд})_{FeO}}{(G_{\mu})_{FeO}} = \frac{15309}{0,00424} = 3610613 \text{ кВт}.$$

де $(Q_{енд})_{Fe_3O_4}$ та $(Q_{енд})_{FeO}$ – теплота ендотермічних реакцій відповідно Fe_3O_4 і Fe , кДж/кмоль .

Приклад 5.

Визначити втрати теплоти з відхідними продуктами згоряння, палива, якщо температура відхідного газу, $t_{від} = 900$ °С, а витрата палива $V = 150$ $\text{м}^3/\text{год}$. Паливо і повітря вважати абсолютно сухими. Склад палива по об'єму $CH_4 = 97,0$ %, $N_2 = 3,0$ %. Коефіцієнт надлишку повітря прийняти рівним $\alpha = 1,2$.

Розв'язання.

Втрати теплоти з відхідними газами, Q_2' визначимо за рівнянням (2.14). Виконавши розрахунок горіння палива, визначаємо дійсний об'єм продуктів згоряння $V_{n.з}^{\delta} = 12,08 \frac{M_n^3 \text{ продуктів згоряння}}{M_n^3 \text{ палива}}$, об'ємні долі продуктів згоряння палива $r_{CO_2} = 0,08$; $r_{O_2} = 0,032$; $r_{N_2} = 0,727$; $r_{H_2O} = 0,161$.

Визначаємо теплоємність продуктів згоряння палива

$$C_{n.з} = C_{CO_2} \cdot r_{CO_2} + C_{O_2} \cdot r_{O_2} + C_{N_2} \cdot r_{N_2} + C_{H_2O} \cdot r_{H_2O} = 2,1915 \cdot 0,08 + 1,4668 \cdot 0,032 + 1,3817 \cdot 0,727 + 1,6865 \cdot 0,161 = 1,498 \text{ кДж / (м}_n^3 \cdot K)$$

Втрати теплоти з відхідними димовими газами рівні

$$Q_2' = V \cdot V_{n.з}^{\delta} \cdot C_{n.з} \cdot t_{від} = 150 \cdot 12,08 \cdot 1,498 \cdot 900 / 3600 = 678,6 \text{ кВт}.$$

5. ВЛАСТИВОСТІ ВОГНЕТРИВКИХ ТА ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

У табл. 5.1 представлені значення густини, значення коефіцієнту теплопровідності, теплоємність і гранична температура застосування тільки для деяких, матеріалів які найбільш часто використовуються.

При визначенні значень коефіцієнтів теплопровідності і теплоємності в таблиці представлена функціональна залежність зазначених величин від температури. Значення температури в цих залежностях варто підставляти лише в градусах Цельсія. При виконанні домашніх завдань і контрольних робіт, якщо питання буде пов'язане з вибором теплоізоляційного матеріалу, студентам краще вибирати матеріали, наведені в табл. 5.1.

Якщо матеріал, заданий у задачі за умовою, відсутній у таблиці і не має теплофізичних величин, його можна замінити матеріалом з таблиці (орієнтуючись за значеннями граничних температур використання), якщо заміна ця не спричинить його руйнування внаслідок впливу на нього робочого середовища. Наприклад, при спалюванні мазуту утвориться газ SO_2 , який при наявності вологи може призвести до руйнування матеріалу від впливу на нього слабкої сірчаної кислоти. Тут необхідно застосовувати матеріали стійкі до дії кислот.

Таблиця 5.1

Властивості вогнетривких та теплоізоляційних матеріалів

№ Д/П	Матеріал	Густина, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	Середня масова теплоємність, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	Гранична тем- пература засто- сування, $^{\circ}\text{C}$
1	Дінас звичайний	1900...2000	$0,82+6,8 \cdot 10^{-4}t$	$0,87+1,9 \cdot 10^{-4}t$	1700
2	Дінас щільний	2000...2100	$1,6+3,8 \cdot 10^{-4}t$	$0,87+1,9 \cdot 10^{-4}t$	1700
3	Шамот	1800...2000	$0,7+6,4 \cdot 10^{-4}t$	$0,87+2,1 \cdot 10^{-4}t$	1350
4	Шамот класу А	1800...2000	$0,9+2,3 \cdot 10^{-4}t$	$0,87+2,1 \cdot 10^{-4}t$	1400
5	Багатошамотний	2300...2800	$1,04+1,5 \cdot 10^{-4}t$	$0,87+2,1 \cdot 10^{-4}t$	1350
6	Напівкислий	2300...2500	$0,7+7 \cdot 10^{-4}t$	$0,87+1,9 \cdot 10^{-4}t$	1400
7	Форстеритний	2350...2500	$4,23-16 \cdot 10^{-4}t$	$0,9+2,1 \cdot 10^{-4}t$	1400
8	Магнезит	2600...2800	$6,3-27 \cdot 10^{-4}t$	$1,05+1,5 \cdot 10^{-4}t$	1700
9	Хромомагнезит	2700...2850	$2,8-8,7 \cdot 10^{-4}t$	1,0	1700
10	Магнезитохромит	2600...2800	$6,3-27 \cdot 10^{-4}t$	$1,05+1,5 \cdot 10^{-4}t$	1700
11	Шамот легковаговий	1300	$0,47+3,8 \cdot 10^{-4}t$	$0,87+2,1 \cdot 10^{-4}t$	1300
12	Дінас легковаговий	1000	$0,3+3,7 \cdot 10^{-4}t$	$0,87+1,9 \cdot 10^{-4}t$	1500
13	Азбестовий картон	1000...1250	$0,16+1,4 \cdot 10^{-4}t$	0,85	500
14	Шлакова вата	200	$0,05+1,4 \cdot 10^{-4}t$	1,0	600

6. ОСОБЛИВОСТІ СКЛАДАННЯ ТЕПЛОВИХ БАЛАНСІВ

6.1 Рівняння теплового балансу з використанням коефіцієнта використання палива

Рівняння теплового балансу для всієї установки можна скласти з використанням $\eta_{6,n}$, у даному випадку воно буде мати такий вигляд:

$$B \cdot Q_n^p \cdot \eta_{6,n} + Q_{екз} = Q_1 + Q_5 + Q_6, \quad (6.1)$$

де $Q_{екз}$ – теплота, отримана від екзотермічних реакцій, $кВт$.

Q_1 – теплота, затрачена на нагрівання матеріалу, $кВт$.

Q_5 – втрати теплоти в навколишнє середовище, $кВт$.

Q_6 – теплота, акумульована кладкою, $кВт$.

Коефіцієнт використання палива показує відношення кількості теплоти, яка використана в робочій камері вогнетехнічної установки до нижчої теплоти згоряння палива:

$$\eta_{6,n} = \frac{Q_n^p + \frac{1}{B} \cdot (Q_1 + Q_{нов} - Q_2 - Q_3)}{Q_n^p}, \quad (6.2)$$

де $Q_{нов}$ – теплота, внесена з підігрітим (холодним) повітрям, $кВт$.

Q_2 – втрати теплоти з відхідними газоподібними продуктами, $кВт$.

Q_3 – втрати теплоти від хімічного недопалу і дисоціації газів, $кВт$.

Значення $\eta_{6,n}$ можна виразити через тепловміст

$$\eta_{6,n} = \frac{h_m + h_{нов} + h_{нал} - h_2 - h_3}{h_m}, \quad (6.3)$$

де h_m – тепловміст продуктів згоряння (теплота віднесена до питомого об'єму продуктів згоряння палива за нормальних умов), $кДж / м_n^3$.

$$h_m = \frac{Q_n^p}{V_{n.3}}, \quad (6.4)$$

$h_{нов}$ та $h_{пал}$ – тепловміст повітря і палива, що надходять для горіння, віднесені до питомого об'єму продуктів згоряння, $кДж / м_n^3$.

$$h_{нов} = \frac{Q_{нов}}{B \cdot V_{n.3}} = \frac{C'_{рнов} (T_{нов} - T_o) B \cdot V_{нов}^0}{B \cdot V_{n.3}} = \frac{\alpha \cdot V_{нов}^0}{V_{n.3}} \cdot (T_{нов} - T_o) \cdot C'_{рнов}, \quad (6.5)$$

$$h_m = \frac{Q_{пал}}{B \cdot V_{n.3}} = \frac{C'_{рпал} (T_{пал} - T_o)}{B \cdot V_{n.3}} = \frac{C'_{рпал}}{V_{n.3}} \cdot (T_{пал} - T_o), \quad (6.6)$$

де $C'_{рнов}$ та $C'_{рпал}$ – середні об'ємні теплоємності відповідно повітря і палива при відповідних температурах повітря і палива, $кДж / (м_n^3 \cdot K)$
 $T_{нов}$, $T_{пал}$, T_o – абсолютні температури відповідно повітря, палива та абсолютна температура за нормальних термодинамічних умов, K .

$V_{нов}^0$ – дійсна витрата повітря, що надходить на горіння, при заданому значенні коефіцієнта надлишку повітря α , $\frac{м_n^3 \text{ повітря}}{м_n^3 \text{ продуктів згоряння}}$.

При спалюванні твердого (рідкого) палива в рівняння (6.5) і (6.6) варто підставляти масові теплоємності, $кДж / (кг \cdot K)$.

h_2 – тепловміст відхідних продуктів згоряння, $кДж / м_n^3$.

$$h_2 = \frac{Q_2}{B \cdot V_{n.3}} = \frac{C'_{р.від} (T_{від} - T_o)}{B \cdot V_{n.3}}, \quad (6.7)$$

$C'_{р.від}$ – середня об'ємна теплоємність відхідних продуктів згоряння, $кДж / (м_n^3 \cdot K)$.

$T_{від}$ – абсолютна температура відхідних продуктів згоряння, K .

h_3 – тепловміст продуктів згоряння палива за рахунок хімічного недопалу палива, $кДж / м_n^3$.

$$h_3 = \frac{Q_3}{B \cdot V_{n.3}} = \sum_{i=1}^n Q_{ni}^p \cdot r_i, \quad (6.8)$$

де Q_{ni}^p – теплота згоряння i -го горючого компонента, $кДж / (м_n^3 \cdot K)$.

r_i – об'ємна доля i -го горючого компонента.

Значення r_i рекомендується студентам визначати відразу після проведення розрахунку горіння палива. Як правило значення r_i визначається з якоюсь точністю, а потім виконується перевірка $\sum_{i=1}^n r_i = 1,0$.

Якщо сума r_i компонентів горіння не буде дорівнювати 1,0, то округляється значення r_i компонента, що займає найбільший об'єм у продуктах горіння.

Аналогічно рівнянню (6.1) можна скласти тепловий баланс для окремої j -ї зони.

$$B_j \cdot Q_n^p \cdot \eta_{n.g.j} + Q_{екзj} = Q_{1j} + Q_{5j} + Q_{6j}, \quad (6.9)$$

6.2 Тепловий баланс, віднесений до одного кілограма матеріалу

Тепловий баланс, віднесений до 1 кг матеріалу, покажемо на прикладі мартенівської плавки сталі.

$$q_m + q_{екз} + q_{o_2} + q_m = q'_m + q_{ш} + q_{від.г} + q_{енд}, \quad (6.10)$$

де q_m – теплота матеріалу при завантаженні його у ванну печі, $кВт / кг$.

$q_{екз}$ – втрати теплоти на екзотермічні реакції, $кВт / кг$.

q_{o_2} – теплота, що надходить з киснем і іншими газами, та сприяє нагріву ванни печі, $кВт / кг$.

q_m – теплота, підведена до ванни від факела і кладки печі, $кВт / кг$.

q'_m – теплота, яка затрачена на нагрівання матеріалу, $кВт / кг$.

$q_{ш}$ – втрати теплоти зі шлаком, $кВт / кг$.

$q_{від.г}$ – втрати теплоти з технологічними газами при їхньому виході з ванни (гази, що утворюються при продувці ванни киснем), $кВт / кг$.

$q_{енд}$ – втрати теплоти на ендотермічні реакції, $кВт / кг$.

6.3 Питомі витрати умовного палива для деяких вогнетехнічних установок

У ряді випадків при складанні теплових розрахунків необхідно знати питомі витрати палива, які затрачаються на обробку матеріалу. Знаючи питомі витрати умовного палива, неважко визначити питому витрату палива яке використовується

$$q_{\text{вик}} = q_{\text{ум}} \cdot \frac{(Q_n^p)_{\text{вик}}}{(Q_n^p)_{\text{ум}}}, \quad (6.11)$$

де $q_{\text{вик}}$ та $q_{\text{ум}}$ – питомі витрати відповідно палива що використовується та умовного палива на обробку одиниці продукції, $\text{кг} / \text{т}$.

$(Q_n^p)_{\text{вик}}$ та $(Q_n^p)_{\text{ум}}$ – теплота згоряння відповідно палива що використовується та умовного палива, $\text{кДж} / \text{кг}$.

У табл. 6.1 представлені орієнтовані питомі витрати умовного палива в деяких вогнетехнічних установках.

7. КОЕФІЦІЄНТИ КОРИСНОЇ ДІЇ ВОГNETEХНІЧНИХ УСТАНОВОК

Для оцінки ефективності роботи вогнетехнічних установок застосовуються різні коефіцієнти корисної дії.

Технологічний ккд $\eta_{\text{техн}}$ показує, яка частка (від одиниці) від усієї підведеної теплоти в робочому просторі печі корисно використовується. У робочому просторі печі корисною теплотою вважається теплота, яка іде на нагрівання матеріалу що оброблюється. Технологічний ккд може бути визначений за такою залежністю:

$$\eta_{\text{техн}} = \frac{Q_1 \cdot P}{Q_n^p \cdot B}, \quad (7.1)$$

де Q_1 – корисно витрачена теплота, кВт .

P – продуктивність вогнетехнічної установки по матеріалу що обробляється, $\text{кг} / \text{с}$.

Q_n^p – нижча теплота згоряння робочої маси палива що використовується, $\text{кДж} / \text{кг}$ ($\text{кДж} / \text{м}_n^3$ для газоподібного палива).

B – витрата палива, $\text{кг} / \text{с}$ ($\text{м}_n^3 / \text{с}$ для газоподібного палива).

Таблиця 6.1

Орієнтовні питомі витрати умовного палива в деяких вогнетехнічних установках

№ П/П	Найменування технологічної операції	Питома витрата умовного палива, кг / т.
1	Нагрівання металу під прокатку в полумєневих печах: нагрівальному колодязі методичній печі	30...50 60...100
2	Нагрівання металу під штампування в полумєневих печах: методичній печі камерні печі	150...200 150...300
3	Термообробка в прохідних полумєневих печах нормалізація загартування низький відпуск	140...250 60...80 30...50
4	Доменна виплавка чавуну	600...800
5	Виплавка чавуну у вагранках	80...120
6	Плавка вугледистої сталі у мартенівській печі холодна завалка шихти гаряча завалка шихти	200...300 150...240
7	Плавка бронзи та латуні в камерній печі	110...130
8	Обпал цементного клінкера в обертовій печі	150...240
9	Обпал шамотних вогнетривких матеріалів в тунельній печі	200...300
10	Обпал червоної цегли	43

$$Q_1 = P \cdot (q_{mk} - q_{mn}), \quad (7.2)$$

де q_{mk} та q_{mn} – кількість теплоти яку сприймає матеріал що нагрівається відповідно в кінці та на початку нагріву, $кВт / кг$.

$$q_{mk} - q_{mn} = C_{pm} (t_{mk} - t_{mn}), \quad (7.3)$$

де C_{pm} – середня масова теплоємність матеріалу що нагрівається в проміжку температур від t_{mn} до t_{mk} , $кДж / (кг \cdot K)$.

t_{mn} та t_{mk} – температура матеріалу відповідно на початку та кінці нагріву, $^{\circ}C$.

З врахуванням теплоти екзотермічних реакцій

$$\eta_{техн} = \frac{Q_1}{B \cdot Q_n^p + Q_{екз}}, \quad (7.4)$$

Для оцінки ефективності роботи вогнетехнічної установки з врахуванням зовнішньої теплоізоляції застосовується енергетичний ккд

$$\eta_{ен} = \frac{Q_1 + Q_{доод}}{B \cdot Q_n^p + Q_{екз}}, \quad (7.5)$$

де $Q_{доод}$ – теплота, яка додатково використовується (наприклад, у рекуператорах, регенераторах, котлах-утилізаторах).

З врахуванням теплоти ендотермічних реакцій отримаємо

$$\eta_{ен} = \frac{P \cdot (q_{mk} - q_{mn}) + Q_{енд} + Q_{доод}}{B \cdot Q_n^p + Q_{екз}}, \quad (7.5)$$

Енергетичний ккд завжди вище технологічного

$$\eta_{ен} = \eta_{техн} + \frac{Q_{доод}}{B \cdot Q_n^p + Q_{екз}}, \quad (7.6)$$

Значення технологічного ККД для деяких печей представлені в табл. 7.1.

Таблиця 7.1

Технологічний коефіцієнт корисної дії для деяких печей

Вид термообробки	Тип печі	$\eta_{техн}$ печі
Відпал сталевого лиття	камерна	0,10...0,12
	шахтна	0,10...0,12
	з висувним подом	0,11...0,13
	безперервної дії	0,08...0,12
	штовхальна	0,12...0,15
Відпал ковкого чавуну	камерна	0,06...0,1
	безперервної дії	0,18...0,25
	штовхальна	0,18...0,25

ЛІТЕРАТУРА

1. Мастрюков Б. С. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей., Ч. 2. М. : Металлургия, 1978. 272 с.
2. Бельский В. И., Сергеев Б. В. Промышленные печи и трубы. М. : Стройиздат, 1974. 304 с.
3. Василькова С. В., Генкина М. М., Гусовский В. Л. Расчет нагревательных и термических печей. М. : Металлургия, 1983. 482 с.
4. Топливоогнеупоры и металлургические печи / Вагин А. А. Кривандин В. А., Прибытков И. А., Перлов Н. И. М.: Металлургия, 1978. 432 с.
5. Глинков М. А., Глинков Г. М. Общая теория печей. М. : Металлургия, 1978. 264 с.
6. Расчет нагревательных и термических печей : справочник / Под общ. ред. В. М. Тымчака и В. Л. Гусовского. М. : Металлургия, 1983. 480 с.
7. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / Розенгарт Ю. И., Потапов Б. Б., Ольшанский В. М., Бородулин А. В. Киев; Донецк : Вища школа. Головное издательство, 1986. 296 с.
8. Ткаченко О. О. Високотемпературні процеси та установки. Київ : А.С.К. 2005. 480 с.
9. Филимонов Ю. П., Старк С. Б., Морозов В. А. Металлургическая теплотехника. Том 2. М. : Металлургия, 1974. 519 с.
10. Филипьев С. В. Промышленные печи и газовое хозяйство заводов. Киев : Вища школа, 1976. 240 с.
11. Щукин А. А. Промышленные печи и газовое хозяйство заводов. М. : Энергия, 1973. 224 с.

Фізичні параметри димових газів при атмосферному тиску
(0,101 МПа), Склад газів: CO₂=13%; H₂O=11%; N₂=76%

Температура		Густина ρ , кг/м ³	Теплоємність C_p , кДж/(м ³ ·К)	Теплопровідність $\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	Температуропровідність $a \cdot 10^6$, м ² /с	Коефіцієнт кінематичної в'язкості $\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Число Прандтля Pr
К	t°С						
273	0	1,295	1,3562	2,280	16,9	12,20	0,72
373	100	0,950	1,3712	3,129	30,6	21,54	0,69
473	200	0,748	1,3875	4,012	48,9	32,80	0,67
573	300	0,617	1,4057	4,838	69,9	45,81	0,65
673	400	0,525	1,4234	5,699	94,3	60,38	0,64
773	500	0,457	1,4424	6,559	121,1	76,30	0,63
873	600	0,405	1,4315	7,420	150,9	93,61	0,62
973	700	0,363	1,4807	8,268	183,8	112,10	0,61
1073	800	0,330	1,4994	9,153	219,7	131,80	0,60
1173	900	0,301	1,5170	10,013	258,0	152,50	0,59
1273	1000	0,275	1,5337	10,897	303,4	174,30	0,58
1373	1100	0,257	1,5496	11,746	345,5	197,10	0,57
1473	1200	0,240	1,5646	12,319	392,4	221,00	0,56

Нижча теплота згоряння газів

Найменування газу	Позначення	Густина ρ , кг/м ³	Q_n^p , ккал/м ³	Q_n^p , кДж/м ³
Водень	H ₂	0,09	2579	10797
Азот елементарний	N ₂	1,251	-	-
Кисень	O ₂	1,428	-	-
Оксид вуглецю	CO	1,25	3018	12635
Вуглекислий	CO ₂	1,964	-	-
Сірчистий	SO ₂	2,858	-	-
Сірководень	H ₂ S	1,52	5585	23383
Метан	CH ₄	0,716	8555	35818
Етан	C ₂ H ₆	1,342	15226	63748
Пропан	C ₃ H ₈	1,967	21795	91251
Бутан	C ₄ H ₁₀	2,593	28338	118645
Пентан	C ₅ H ₁₂	3,218	34890	140077
Етилен	C ₂ H ₄	1,251	14107	59063
Пропілен	C ₃ H ₆	1,877	20541	86001
Бутилен	C ₄ H ₈	2,503	27111	113508
Бензол	C ₆ H ₆	3,485	38528	140375