

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**



**Робоча програма,
методичні вказівки та індивідуальні завдання
до вивчення дисципліни «Металургійні печі»
для студентів спеціальності 015 – Професійна освіта
(металургія) (бакалаврський рівень)**

Дніпро НМетАУ 2019

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**

**Робоча програма,
методичні вказівки та індивідуальні завдання
до вивчення дисципліни «Металургійні печі»
для студентів спеціальності 015 – Професійна освіта
(металургія) (бакалаврський рівень)**

УДК 669.041/046

Робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання до вивчення дисципліни «Металургійні печі» для студентів спеціальності 015 – Професійна освіта (металургія) (бакалаврський рівень)/ Укл.: О.В. Гупало, О.О. Єрьомін, Л.О. Воробйова, В.Б. Пульпінський. – Дніпро: НМетАУ, 2019. – 40 с.

Наведені робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання до вивчення дисципліни «Металургійні печі», приклад розрахунку індивідуального завдання, контрольні питання, рекомендована література.

Призначена для студентів спеціальності 015 – Професійна освіта (металургія), які здобувають перший (бакалаврський) рівень вищої освіти.

Друкується за авторською редакцією.

Укладачі: О.О. Єрьомін, д-р техн. наук, проф.
О.В. Гупало, канд. техн. наук, доц.
Л.О. Воробйова, канд. техн. наук, доц.
В.Б. Пульпінський, ст. викл.

Відповідальний за випуск О.О. Єрьомін, д-р техн. наук, проф.

Рецензент М.В. Губинський, д-р техн. наук, проф. (НМетАУ)

Підписано до друку 31.05.2019. Формат 60x84 1/16. Папір друк. Друк плоский. Обл.-вид. арк. 2,35. Умов. друк. арк. 2,32. Тираж 100 прим. Замовлення № 167.

Національна металургійна академія України
49600, Дніпро – 5, пр. Гагаріна, 4

Редакційно-видавничий відділ НМетАУ

ВСТУП

Всі технологічні процеси при виробництві чорних металів, прокатці, куванні, відливці, термічній обробці виробів відбуваються, як правило, при високих температурах. При цьому основним видом устаткування є високотемпературні теплові установки – плавильні, нагрівальні, термічні печі. У сучасному розумінні металургійна піч – це оснащена допоміжним обладнанням високотемпературна теплова установка, в робочому просторі якої відбувається генерація теплоти з того чи іншого виду енергії і передача її матеріалу, який піддається тепловій обробці.

Процеси, що протікають в металургійних печах, розглядаються при вивченні дисципліни «Теплотехніка». У рамках дисципліни «Металургійні печі» вивчаються: конструкції, принцип дії, температурні та теплові режими роботи нагрівальних і термічних печей; матеріали, що застосовуються для будівництва футерівки теплових агрегатів; принципи утилізації теплоти димових газів, що йдуть з робочого простору печі; конструкції, принцип дії та методики розрахунку теплообмінників, призначених для утилізації теплоти відхідних димових газів; теплові баланси металургійних печей безперервної і періодичної дії; техніко-економічні показники теплової роботи печей і фактори, що впливають на них; основні напрями зниження енерговитрат на теплову обробку матеріалів.

Обидві вищезгадані дисципліни тісно пов'язані між собою, оскільки характер та інтенсивність теплових процесів, що протікають у металургійних печах, багато в чому визначають особливості їх конструкцій і техніко-економічні показники роботи, які в свою чергу впливають на енергоємність галузі в цілому.

Без глибокого розуміння фізичної сутності процесів, що протікають в металургійних печах, і без достатньої теоретичної підготовки неможливо вирішувати складні інженерні завдання, пов'язані з їх конструюванням і експлуатацією. У зв'язку з цим вивчення дисципліни «Металургійні печі» має першорядне освітнє значення для студента-металурга.

1 РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ

«МЕТАЛУРГІЙНІ ПЕЧІ»

Розподіл навчальних годин

Усього годин за навчальним планом, у тому числі:	90
аудиторні заняття, з них:	12
лекції	4
лабораторні роботи	4
практичні заняття	4
семінарські заняття	–
Самостійна робота, у тому числі при:	78
вивченні розділів програми, які не викладаються на лекціях	66
виконанні індивідуальних завдань	12
Підсумковий контроль	екзамен

Характеристика дисципліни

Навчальна дисципліна «Металургійні печі» є нормативною і входить до циклу дисциплін фахової підготовки.

Мета вивчення дисципліни – засвоєння знань та придбання навичок, необхідних для уміння використовуючи дані аналізу технологічних етапів металургійного виробництва, обраного основного технологічного обладнання, за допомогою нормативно-технічної документації та стандартних методик, визначити на конкретних ділянках технологічного потоку застосування теплотехнічного та додаткового обладнання, яке б сприяло поліпшенню умов праці, підвищенню економічних та покращенню екологічних показників виробництва чи переробки металу.

У результаті вивчення дисципліни студент повинен знати:

- загальні відомості про властивості, застосування вогнетривкої футерівки та теплової ізоляції в металургійних агрегатах;
- теплотехнічне устаткування печей: рекуператори та регенератори, пальникові пристрої й інше теплотехнічне обладнання;

- основи теплової роботи печей та показники їх роботи;
- основні конструкції та теплові режими роботи нагрівальних та термічних печей металургії.

Наприкінці вивчення дисципліни студент повинен вміти:

- використовуючи відомості щодо вихідної сировини, існуючого металургійного устаткування, призначення та необхідного рівня властивостей кінцевого продукту, за допомогою довідкової літератури та відповідних правил, вибирати металургійне устаткування (піч);
- виходячи з теплового балансу та інших відомостей за допомогою відповідних правил вибирати та розрахувати теплоутилізуючий пристрій для конкретних умов теплового агрегату;
- за допомогою довідкової літератури та відповідних правил вибирати палиниковий пристрій для конкретних умов печі;
- розрахувати тепловий баланс і основні техніко-економічні показники печі.

Контроль поточної роботи студента здійснюється шляхом складання індивідуального завдання викладачу з його обов'язковим захистом.

Критерії успішності – отримання позитивної оцінки при складанні екзамену.

Засоби діагностики успішності навчання – комплект завдань для проведення екзамену в тестовій формі.

Зв'язок з іншими дисциплінами – дисципліні передують вивчення дисциплін «Вища та прикладна математика», «Фізика», «Теплотехніка», «Теорія металургійних процесів», «Металургія чавуну», «Металургія сталі».

Набуті знання і вміння використовувати при вивченні інших дисциплін циклу професійної та практичної підготовки, а також при виконанні випускної роботи бакалавра.

Зміст дисципліни

Основні положення. Вогнетриви та ізоляційні матеріали печей. Теплотехніка печей металургійного виробництва. Класифікація вогнетривів та ізоляційних матеріалів. Теплотехнічні характеристики вогнетривів та ізоляційних матеріалів. Нові матеріали, які застосовуються в металургійних

печах. Кладка печі. Конструкції склепінь, вікон та допоміжних вузлів печі, їх призначення.

Теплотехнічні принципи розрахунків пальникових пристроїв. Принципи спалювання палива. Організація процесів спалювання палива. Факельне спалювання. Довжина факелу. Фактори, які впливають на довжину факелу. Калібр пальника. Вибір пальникових пристроїв для забезпечення теплової роботи металургійної печі.

Пристрої для спалювання газоподібного та рідкого палива. Прилади для спалення палива: пальники; форсунки. Класифікація пальникових пристроїв. Пальники типу «труба в трубі», плоскополуменеві, інжекційні та інші. Вимоги, які пред'являються к пальникам и форсункам. Сучасні пальникові пристрої: регенеративні, рекуперативні, та рекуперативно-пальникові блоки.

Основи теплової роботи печей. Розвиток науки про печі: гідравлічна теорія В.Е. Грум-Гржимайло, енергетична теорія Н.Н. Доброхотова – И.Д. Семикина. Теплотехнічний зміст поняття «промислова піч», процеси які відбуваються в печах. Класифікація печей: за принципом теплогенерації, по технологічному призначенню, по конструктивних ознаках. Поняття про теплову потужність печі, види потужностей: холостого ходу, засвоєна, робоча, загальна. Зв'язок між тепловими потужностями, особливості запису для печей безперервної і періодичної дії. Тепловий дефіцит процесу.

Показники теплової роботи печей. Основні показники роботи печей: продуктивність, витрата теплоти (умовного палива) на одиницю продукції, ККД печі, їх взаємозв'язок.

Теплові баланси печей безперервної та періодичної дії. Приходні та витратні статті теплового балансу, їх розрахунок. Напрями зниження питомої витрати палива в печах. Заміна в печі одного палива іншим.

Утилізація теплоти димових газів, що відходять з печі. Принципи утилізації теплоти димових газів. Теплоутилізаційні пристрої та їх призначення, класифікація, галузь застосування. Регенератори металургійних печей. Конструкції регенераторів. Насадки регенераторів. Схема роботи регенеративної системи опалення печей. Переваги та недоліки регенераторів. Умови експлуатації регенераторів. Рекуператори металургійних печей. Класифікація рекуператорів за переважним принципом тепловіддачі та схемою

руху теплоносіїв. Конструкції трубчатих та блочних керамічних рекуператорів. Конструкції металевих рекуператорів (петльового трубчастого, голчастого, радіаційного, конвективно-радіаційного рекуператорів), їх переваги та недоліки регенераторів.

Конструкції та теплові режими нагрівальних печей періодичної дії. Регенеративні та рекуперативні нагрівальні колодязі: призначення; особливості конструкцій та експлуатації; переваги та недоліки. Режими теплової роботи нагрівальних колодязів. Температурна і теплова діаграми нагрівання злитків холодного та гарячого посаду. Матеріальний і тепловий баланс нагрівального колодязя. Техніко-економічні показники колодязів та заходи щодо зниження витрат палива на нагрівання металу.

Конструкції та теплові режими нагрівальних печей безперервної дії. Штовхальні методичні печі прокатного виробництва: призначення; особливості конструкцій та експлуатації; переваги та недоліки. Температурні режими нагрівання заготовок в методичних печах (двохзонний, трьохзонний та багатозонний режими). Теплова і температурна діаграми нагрівання металу. Тепловий баланс методичної печі. Печі зі механізованим переміщенням заготовок: піч з крокуючим подом, піч з крокуючими балками, кільцеві піч. Їх призначення, особливості конструкцій та експлуатації; переваги та недоліки. Техніко-економічні показники нагрівальних печей безперервної дії. Заходи щодо зниження витрат палива на нагрівання металу.

Конструкції та теплові режими термічних печей періодичної дії. Термічні печі. Характерні режими термообробки. Призначення, особливості конструкцій та експлуатації, переваги та недоліки камерної печі з нерухомим подом, камерної печі з вкатним подом і ковпакових печей. Тепловий баланс камерної печі. Техніко-економічні показники термічних печей періодичної дії. Заходи щодо зниження витрат палива на нагрівання металу.

Конструкції та теплові режими термічних печей безперервної дії. Термічні печі прохідного типу – секційна, роликова, конвеєрна та протяжна печі. Їх призначення, особливості конструкцій та експлуатації, переваги та недоліки. Тепловий баланс та техніко-економічні показники термічних печей безперервної дії. Заходи щодо зниження витрат палива на нагрівання металу.

Індивідуальне завдання (12 годин)

Розрахунок теплових втрат теплопровідністю через футерівку печі.

Лабораторні роботи (4 годин)

Тема заняття	Тривалість, годин
1. Конструювання основних вузлів футерівки печі.	4

Практичні заняття(4 годин)

Тема заняття	Тривалість, годин
1. Складання теплового балансу та визначення показників теплової роботи металургійної печі.	4

Рекомендована література

1. Свинолобов Н. П. Печи черной металлургии : Учебное пособие для вузов / Н. П. Свинолобов, В. Л. Бровкин. – Днепропетровск : Пороги, 2002. – 154 с.
2. Губинский В. И. Металлургические печи / В. И. Губинский . – Днепропетровск : НМетАУ, 2006. – 84 с.
3. Кривандин В. А. Металлургическая теплотехника : в 2-х т. / В. А. Кривандин, И. Н. Неведомская, В. В. Кобахидзе и др. – М. : Металлургия, 1986. – Т. 2: Конструкция и работа печей : учебник для вузов. – 1986. – 592 с.
4. Свинолобов Н. П. Теоретические основы металлургической теплотехники : учебное пособие для вузов / Н. П. Свинолобов, В. Л. Бровкин. – Днепропетровск : Пороги, 2002. – 226 с.

2 ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

«Розрахунок теплових втрат теплопровідністю через футерівку 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:

$$q = \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{зов}}}{R_{\text{вн}} + R_{\text{кл}} + R_{\text{зов}}}, \text{ Вт/м}^2, \quad (2.1)$$

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

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

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

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

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

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

S_i – товщина i -ого шару футерівки, м.

Оскільки $\alpha_{\text{вн}}$ і $\alpha_{\text{зов}}$ 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 $\alpha_{\text{вн}}$, $\alpha_{\text{зов}}$ і λ_i не залежали від температури, то для розрахунку q було б достатньо формули (2.1).

2.1 Приклад виконання індивідуального завдання «Розрахунок теплових втрат теплопровідністю через футерівку печі»

2.1.1 Завдання

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. 2.1.

Вихідні дані для виконання розрахунку наведені в таблиці 2.1.

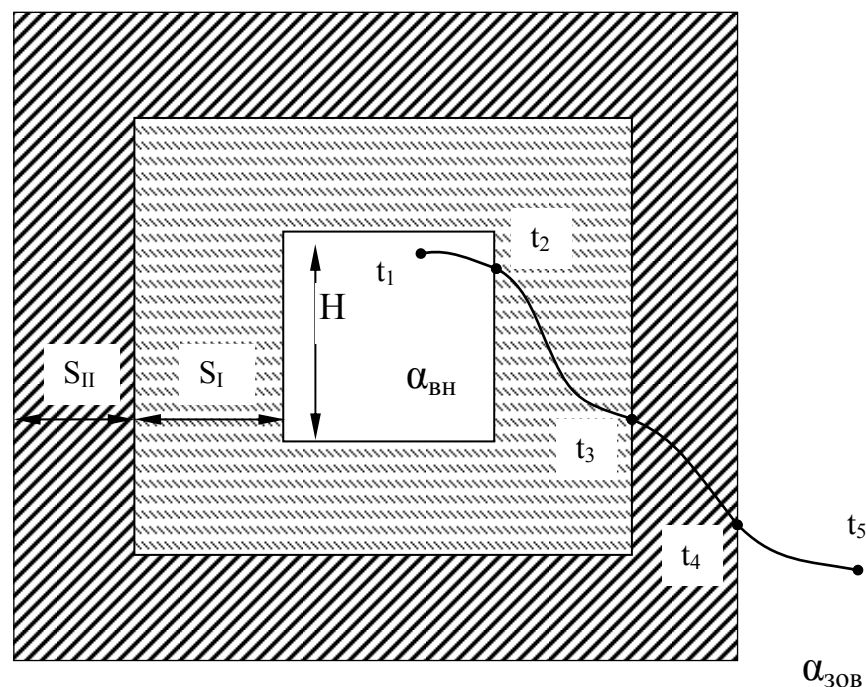


Рисунок 2.1 – Схема двошарової футерівки

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розрахунку

№ вар.	t _l , °C	t ₅ , °C	S _I , м	S _{II} , м	H, м	CO ₂ , %	H ₂ O, %	W _o , 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
21	750	10	0,2	0,07	2,3	20	10	11
22	700	– 5	0,15	0,1	0,7	6	9,4	9
23	725	5	0,25	0,25	2,1	19	8	10
24	625	0	0,3	0,2	0,9	7	22	7
25	825	– 5	0,35	0,17	1,9	18	10	6
26	1160	22	0,15	0,05	1,5	13	16	7
27	1025	20	0,2	0,02	1,2	12	10	5
28	910	18	0,17	0,07	0,5	6	12	3
29	875	15	0,22	0,05	1,0	10	5	4
30	850	10	0,24	0,06	0,7	7	14	2

2.1.2 Вихідні дані:

- 1) температура диму в робочому просторі печі $t_1 = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 2) температура навколишнього середовища $t_5 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 3) внутрішній (робочий) шар футерівки виконаний з вогнетривкої шамотної цегли. Товщина шару $S_I = 0,575\text{ м}$;
- 4) зовнішній (теплоізоляційний) шар футерівки виконаний з високопористого шамоту. Товщина шару $S_{II} = 0,115\text{ м}$;
- 5) висота робочого простору печі $H = 1,5\text{ м}$;
- 6) швидкість димових газів у робочому просторі печі $W_o = 10\text{ м/с}$;
- 7) вміст випромінюючих газів у димі: $\% \text{CO}_2 = 18$; $\% \text{H}_2\text{O} = 10$.
- 8) тиск димових газів у робочому просторі печі $P_k = 100\text{ кН/м}^2$.

2.2 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):

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

Тут $\alpha_{\text{вн}}^*$ і $\alpha_{\text{зов}}^*$ – коефіцієнти тепловіддачі від газів усередині та зовні печі, обчислені в першому наближенні, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$;

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

2.2.1 Орієнтовне значення коефіцієнта тепловіддачі від газів до внутрішньої поверхні футерівки:

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

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

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

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

$$\varepsilon_{\text{гф}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{ф}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{г}}} - 1};$$

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

$\varepsilon_{\text{г}}$ – 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 ($\overline{S_{\text{еф}}}$).

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

Сила поглинання CO_2 і H_2O :

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

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

По рис. 2.2 (а) та 2.2 (б) при $t_1 = 1200^\circ\text{C}$ знаходимо:

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

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

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

$$\text{Тоді } \varepsilon_{\text{г}} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \beta \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}; \quad \varepsilon_{\text{г}} = 0,125 + 1,025 \cdot 0,105 = 0,23;$$

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

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

Визначаємо характер руху димових газів при температурі $t_1 = 1200^\circ\text{C}$. З таблиці 2.2 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 $\text{Pr}_{t_1} = 0,563$.

Гідравлічний діаметр каналу, вздовж якого рухаються димові газы:

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

де Π – периметр робочого простору печі.

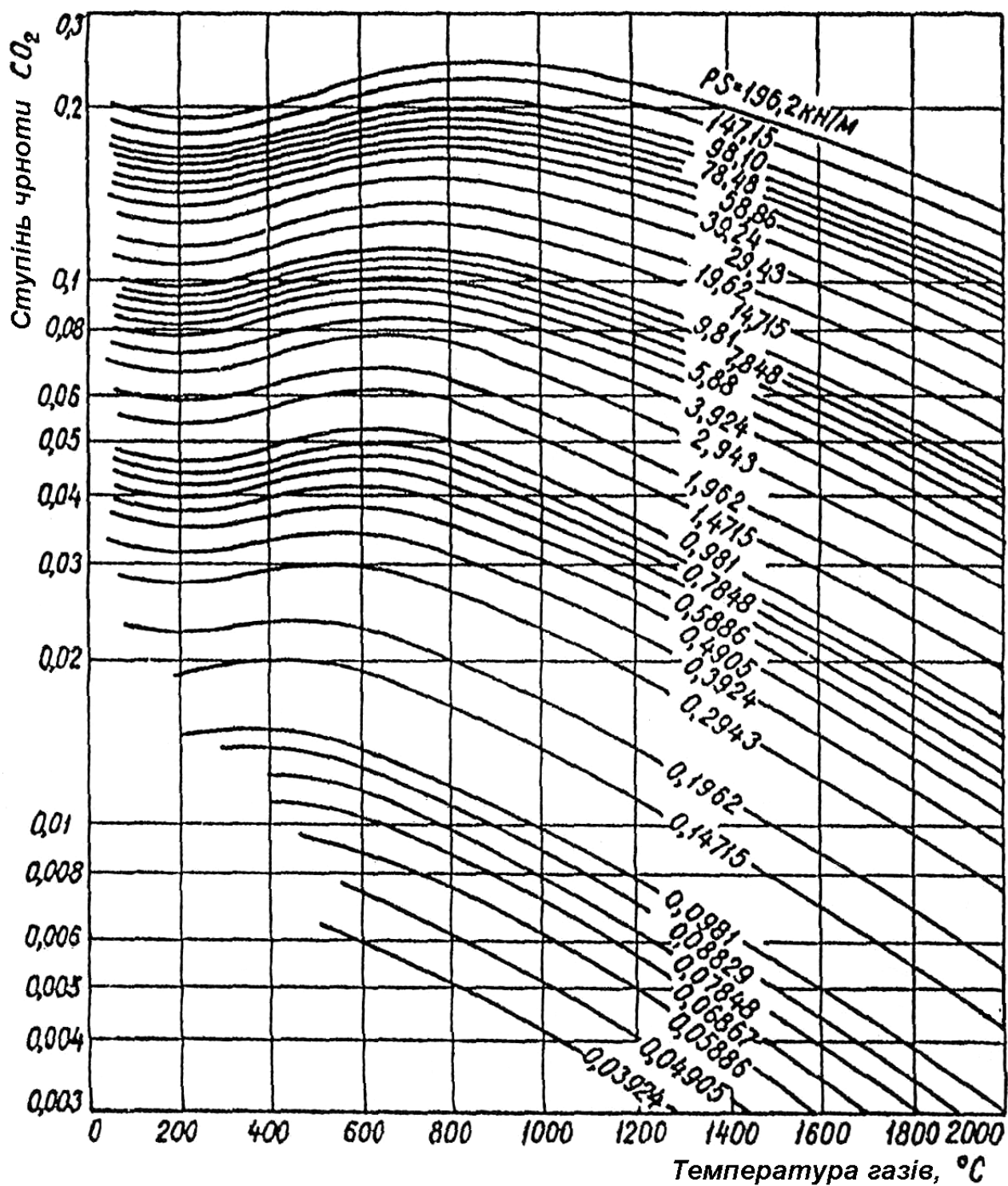


Рисунок 2.2 (а) – Ступінь чорноти при випромінюванні CO_2

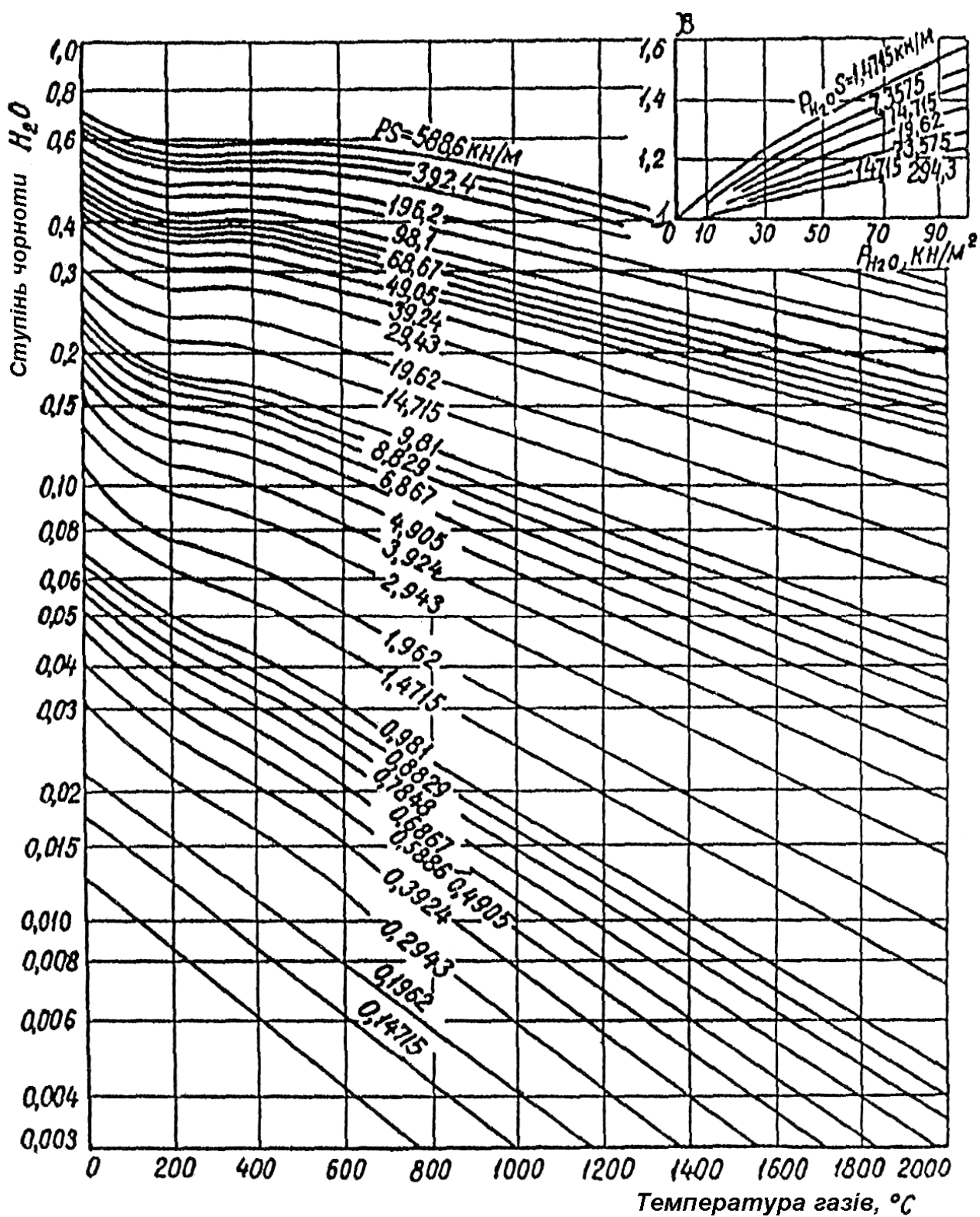


Рисунок 2.2 (б) – Ступінь чорноти при випромінюванні H_2O

Таблиця 2.2 – Фізичні константи повітря і димових газів

№ з/п	Температура, °С	Кінематичний коефіцієнт в'язкості при Р = 760 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:

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

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

димових газів до внутрішньої поверхні футерівки знаходимо за формулою:

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

Загальний коефіцієнт тепловіддачі на димовій стороні:

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

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

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

2.2.2 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:

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

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

Середні значення коефіцієнтів теплопровідності шарів:

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

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

Теплові опори шарів у першому наближенні:

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

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

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

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

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

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

2.2.5 Орієнтовне значення коефіцієнта теплопередачі:

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

2.2.6 Орієнтовне значення питомого теплового потоку:

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

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

$$\begin{aligned} t_2^{**} &= t_1 - q^* \cdot R_1^* = 1200 - 1333 \cdot 0,00495 = 1193 \text{ }^\circ\text{C}; \\ t_3^{**} &= t_2^{**} - q^* \cdot R_2^* = 1193 - 1333 \cdot 0,4517 = 591 \text{ }^\circ\text{C}; \\ t_4^{**} &= t_3^{**} - q^* \cdot R_3^* = 591 - 1333 \cdot 0,377 = 88,5 \text{ }^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

2.4 Визначаємо питомий тепловий потік q^{**} у другому наближенні.

2.4.1 Уточнимо коефіцієнти тепловіддачі в робочому просторі печі:

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

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

$$\alpha_{\text{вн}}^{**} = \alpha_{\text{вн.пром}}^{**} + \alpha_{\text{вн.кон}}^* = 158,34 + 42,51 = 200,74 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Тоді тепловий опір між димовими газами і футерівкою складе:

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

2.4.2 Уточнимо теплові опори футерівки R_2 и R_3 :

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

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \alpha_{30B}^{**} &= \frac{C_0 \cdot \varepsilon_{CT}}{t_4^{**} - t_5} \left[\left(\frac{t_4^{**} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_5 + 273}{100} \right)^4 \right] + 2,55 \cdot \sqrt[4]{t_4^{**} - t_5} = \\ &= \frac{5,67 \cdot 0,85}{88,5 - 20} \left[\left(\frac{88,5 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] + \\ &+ 2,55 \cdot \sqrt[4]{88,5 - 20} = 14,166 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}). \end{aligned}$$

Тепловий опір «футерівка – навколишнє середовище»:

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

2.4.3 Сума теплових опорів:

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

2.4.5 Коефіцієнт теплопередачі у другому наближенні:

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

2.4.6 Питомий тепловий потік у другому наближенні:

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

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

2.5.1 Температура внутрішньої поверхні футерівки:

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

2.5.2 Температура на стику шарів футерівки:

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

2.5.3 Температура зовнішньої поверхні футерівки:

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

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

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

$$q_{30B}^{**} = \alpha_{30B}^{**} (t_4^{**} - t_5) = 14,166 \cdot (88,5 - 20) = 970,5 \text{ Вт} / \text{м}^2.$$

2.6.2 Питомий тепловий потік від футерівки в навколишнє середовище q_{30B}^{***} при $t_4^{***} = 112 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$\begin{aligned} \alpha_{30B}^{***} &= \frac{5,67 \cdot 0,85}{112 - 20} \left[\left(\frac{112 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] + \\ &+ 2,55 \cdot \sqrt[4]{112 - 20} = 15,546 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}); \\ q_{30B}^{***} &= \alpha_{30B}^{***} (t_4^{***} - t_5) = 15,546 \cdot (112 - 20) \approx 1430 \text{ Вт} / \text{м}^2. \end{aligned}$$

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_{30B} 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_{30B}^{**} і q_{30B}^{***} .

Дійсну щільність теплового потоку q_d і дійсну температуру зовнішньої поверхні футерівки t_{4d} можна визначити графічним шляхом (див. рис. 2.3). Для цього на одному і тому ж графіку будуються залежності $q_{30B} = f(t_4)$ і $q = f(t_4)$. Точка перетину прямих дає дійсне значення q_d і t_{4d} .

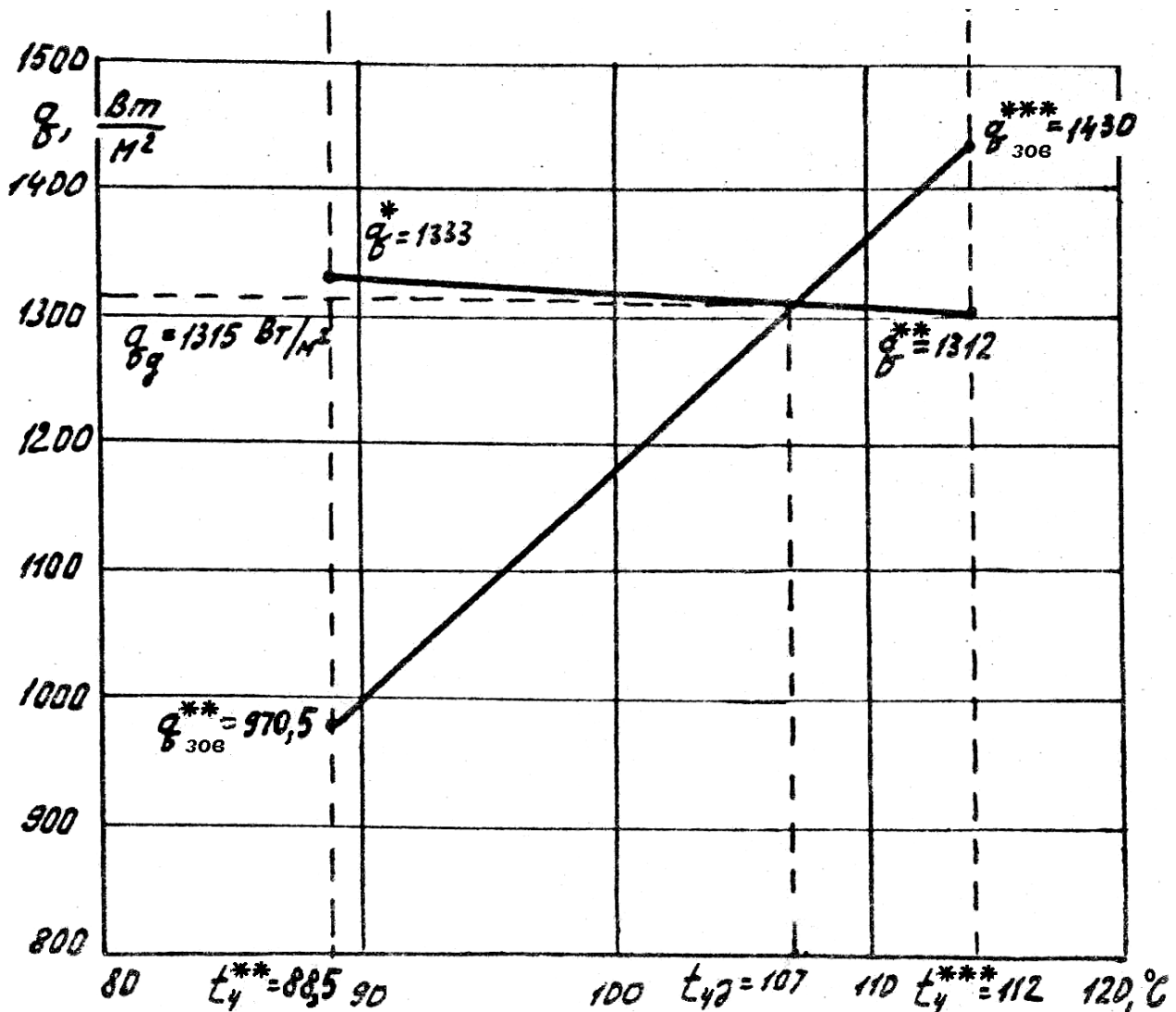


Рисунок 2.3 – Графік для визначення дійсних питомих втрат теплоти через футерівку металургійної печі q_d і дійсної температури зовнішньої поверхні футерівки t_{4d}

Результати розрахунку розподілення температур у двошаровій плоскій футерівці наносимо на температурну діаграму (див. рис. 2.4).

Точка перетину прямих дає дійсне значення питомих втрат теплоти через футерівку печі q_d і температури зовнішньої поверхні футерівки t_{4d} .

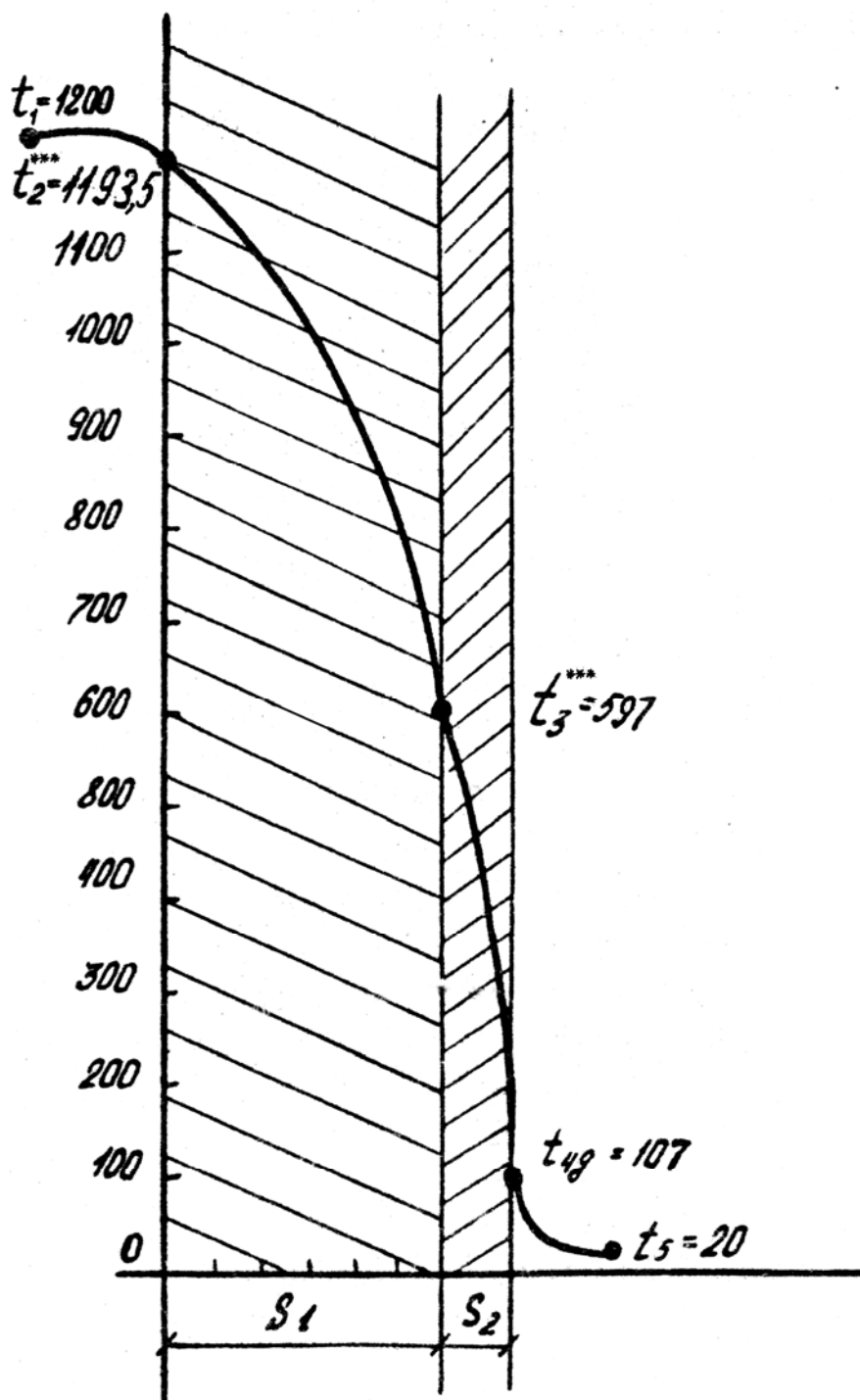


Рисунок 2.4 – Розподіл температур у двошаровій плоскій футерівці в стаціонарному тепловому стані

2.2 Контрольні питання для захисту індивідуального завдання

Дайте визначення поняттям «тепловий потік», «питомий тепловий потік», «коефіцієнт теплопередачі», «тепловий опір футерівки». В яких одиницях виміру розраховуються вищезгадані величини?

Залишить формули для розрахунку теплового потоку з одного газового середовища в інше через двошарову футерівку печі. Як зміниться формула, якщо футерівка печі виконана з трьох, або чотирьох слоїв матеріалів?

Які режими руху газів в каналі Ви знаєте. Як визначити режим руху газів.

З якою митою під час розрахунку визначалося число Нуссельта. Сформулюйте його фізичний смисл.

За якими формулами розраховуються коефіцієнт тепловіддачі від димових газів до футерівки печі та коефіцієнт тепловіддачі від футерівки в навколишнє середовище. Які фактори впливають на ці показники?

Який метод Вами застосовано для визначення питомих втрат теплоти через футерівку металургійної печі та дійсної температури зовнішньої поверхні футерівки під час виконання індивідуального завдання.

Запишіть одиниці виміру теплового опору футерівки печі. Які фактори впливають на збільшення теплового опору футерівки?

Які методи визначення ступеня чорноти димових газів Вам відомі? Визначить ступень чорноти димових газів, які перебувають у печі при температурі 1200 °C при нормальному тиску. Склад диму: $\text{CO}_2 = 100\%$. Середня ефективна товщини газового шару у робочому просторі печі 1 м.

Які матеріали використовують для будівництва футерівки металургійних печей? Які матеріали використовують для будівництва внутрішнього та зовнішнього шарів футерівки печі? Чим вони відрізняються один від одного?

Які фактори впливають на теплові втрати через футерівку печі? Яким чином можливо знизити ці теплові втрати?

3 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ ТА ПРАКТИЧНОЇ РОБІТ

3.1 Лабораторна робота № 1 «Конструювання основних вузлів вогнетривкої футерівки печі»

Мета роботи: освоєння правил вогнетривкої кладки основних елементів печей. Розрахунок кількості вогнетривів для споруди окремих елементів печі (стін, арок, зведень та інш.) заданої конструкції та розмірів.

3.1.1 Загальні відомості

Термін служби, газощільність та надійність вогнетривкої кладки печей залежить, в першу чергу, від якості виконання вогнетривких робіт та відповідності матеріалів кладки умовам її роботи. Вимоги до якості кладки відображено у технічних умовах до вогнетривких робіт. Неухильне виконання технічних умов є гарантією тривалого використання кладки печі, її міцності, шлакостійкості та газощільності.

Кладка печі складається з блоків, панелей або окремої цегли, яка укладається певним чином. До теперішнього часу найбільш поширена цегляна кладка. Це пояснюється уніфікацією елементів кладки – цегли, зручністю ремонту окремих ділянок будови печі та великим різноманіттям вузлів, які можуть бути виконано з стандартних елементів.

Нормальна цегла має 6 граней, які утворюють в перетинах 12 кромek. Найбільші грані називаються плашками, довгі бічні – ребрами, а короткі – торцями. Стандартна вогнетривка цегла має розміри 232 x 116 x 65 мм. Спеціальна цегла може мати різну форму та розміри, відмінні від вказаних вище.

Ряд цегли, який укладено довгою гранню уздовж кладки, називають ложковим, а такий спосіб укладання – кладкою ложком. Цегла, яка укладена уподовж кладки короткою гранню (торцем), називають тичковим рядом. Якщо в кладці стін є декілька рядів, то зовнішні ряди називають верстовими, а внутрішні – забутувальними. Сколену на гранях, кутах та кромках цеглу укладають тільки в забутувальні ряди.

При виконанні вогнетривких робіт застосовують наступний інструмент (рис. 3.1) та інвентар:

- кірочка – для обтісування цегли до необхідних розмірів;
- кельма – для нанесення розчину на кладку або цеглину;
- киянка (дерев'яний молоток) – для осідання, підбиття цегли;
- ківш – для розливання розчину по поверхні кладки;
- висок та рівень служать для перевірки вертикальності та горизонтальності рядів кладки;
- щупом перевіряють товщину швів у кладці;
- допоміжні інструменти – рейки, шнурки, кутники і так далі.

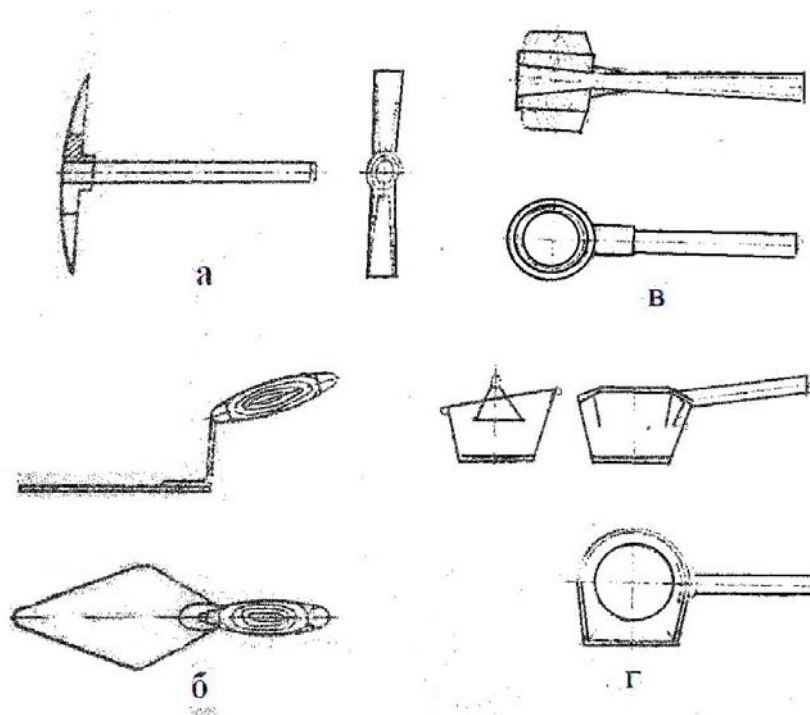


Рис. 3.1 – Інструмент вогнетривника для проведення вогнетривких робіт:

а – кірочка; б – кельма; в – киянка; г – ківш для розчину

Проміжки між цеглою називаються швами (рис. 3.2). В залежності від розташування шви бувають горизонтальні, вертикальні подовжні та вертикальні поперечні. Шви заповнюються розчином або порошком. Порожнечі в швах вогнетривкої кладки не допускаються. Кладка не повинна мати вертикальних швів наскрізь, оскільки в цьому випадку вона буде виглядати окремими стовпчиками цегли, які з часом будуть розшаровуватись.

Перев'язка вертикальних швів досягається зсувом цегли вище розміщеного ряду відносно ряду, який лежить нижче. Горизонтальні шви зазвичай не перев'язуються. В процесі роботи вони самі ущільнюються під вагою цегли. Якщо шари кладки виконуються з різних матеріалів, то вони або не перев'язуються між собою, або перев'язуються через 5 - 8 рядів по висоті кладки. Для запобігання випуклості стін в кладку можуть замурувати металеві анкери, які приварюють до каркасу печі. Умови перев'язки можуть бути змінені в спеціальних випадках, які обмовляються в проекті кладки печі.

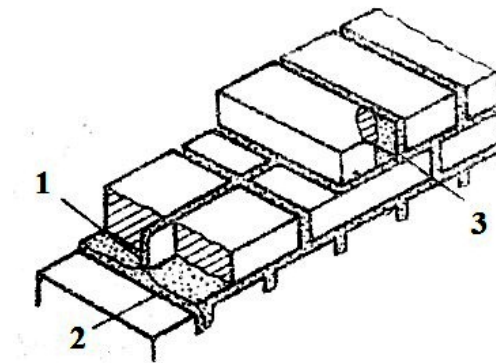


Рис. 3.2 – Шви вогнетривкої кладки:

1 – вертикальний подовжній шов; 2 – вертикальний поперечний шов; 3 – горизонтальний шов

Залежно від товщини швів, які перевіряються щупом, кладку класифікують за наступними категоріями:

- особливо ретельну, з товщиною шва не більше 1 мм;
- ретельну – 2 мм;
- звичайну – 3 мм;
- грубу – більше 3 мм.

Якщо щуп входить в шов без зусилля не більше, ніж на 20 мм, то такий шов вважається придатним. Товщину швів перевіряють в 10 довільних місцях на кожних 5 м².

Для компенсації теплового розширення вогнетривів в кладці передбачають температурні шви. Зазвичай в кресленнях вказується місце розташування цих швів, які можуть бути 2-х типів: розподіленими, завтовшки 5 - 10 мм, які заповнено вигоряючими прокладками (тирса, дошка, толь), та зосередженими,

завтовшки 20 мм і більше, які заповнено матеріалами, що стискаються (глина з азбестом, азбестовий шнур, шамотний порошок). Температурні шви роблять врозбіг, тобто з зсувом, щоб не допустити щілини наскрізь по товщині або висоті кладки. Товщина температурних швів для деяких матеріалів вказана у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Норми товщини температурних швів на 1 погонний метр кладки

Вогнетривкий матеріал	Товщина шва, мм	Вогнетривкий матеріал	Товщина шва, мм
Шамот	5 – 6	Динас	12
Хромомагнезит	10 – 12	Магнезит	12 – 14
Високоглиноземиста цегла	5 – 6	Діатом	5 – 6

3.1.2 Правила кладки прямих стін

Кладка прямих стін та перев'язка прямих кутів кладки наведена на рисунку 3.3.

Стіни завтовшки у півцеглини викладають ложком з перев'язкою вертикальних швів, яку здійснюють зсувом суміжних по висоті рядів на половину довжини цегли (рис. 3.3 а).

Стіни завтовшки в одну цеглину викладаються тичковими рядами так, щоб відстань між поперечними вертикальними швами складала чверть цеглини. Таким чином, парні ряди починають неповномірними цеглинами, які дорівнюють $\frac{3}{4}$ довжини цілої цеглини (рис. 3.3 б).

При кладці стін в півтори цеглини в кожному ряду є тичкові та ложкові ряди. Подовжні вертикальні шви перев'язуються чергуванням тичкових та ложкових рядів по висоті кладки (рис. 3.3 в).

При кладці стін в дві цеглини парні ряди набирають з тичкових цеглин, а непарні з ложкових верстових (зовнішніх) і тичкових забутовувальних (внутрішніх) рядів (рис. 3.3 г).

3.1.3 Завдання на виконання кладки прямих стін з перев'язкою кутів

Відповідно до завдання (таблиця 3.2) потрібно викласти 2 ряди кладки необхідної товщини з заданими орієнтовними розмірами сторін стін А і Б.

Виконати перев'язку кута. Залежно від матеріалу та довжини кладки передбачити температурні шви. Кладку виконати з товщиною шва, відповідною заданій категорії.

Провести розрахунок кількості цегли, необхідної для виконання кладки стін печі з заданими розмірами: довжиною – L, шириною – В та висотою – Н. Розрахувати масу цегли для цієї кладки.

Таблиця 3.2 – Вихідні дані до роботи

№	Товщина кладки, цегла, $S_{кл}$	Матеріал кладки	Сто- рона А	Сто- рона Б	Категорія швів	L, м	В, м	Н, м
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,5	Шамот	930	815	особливо ретельна	3	2	1,2
2	1	Хромомагнезит	464	348	звичайна	4	2	2
3	1,5	Шамот-легковіс	464	580	груба	5	3	2
4	2,0	Динас	464	580	груба	4,5	3	2,5
5	0,5	Магнезит	700	580	ретельна	3,5	2	1,5
6	1	Діатоміт	464	464	ретельна	6	4	2,5
7	1,5	Хромомагнезит	580	815	особливо ретельна	5,5	4	2,5
8	2,0	Магнезит	580	464	звичайна	6,5	4	3
9	0,5	Діатоміт	930	580	груба	2,5	2	1,3
10	1	Шамот	348	464	груба	4,5	2	2
11	1,5	Шамот	930	815	особливо ретельна	6	3	2,2
12	2	Хромомагнезит	464	348	звичайна	5	3	2,5
13	0,5	Шамот-легковіс	464	580	груба	6	4	2
14	1,0	Динас	464	580	груба	5	4	2,7

Продовження табл. 3.2.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
15	1,5	Магнезит	700	580	ретельна	3,5	3	2,8
16	2	Діатоміт	464	464	ретельна	4	5	2,5
17	0,5	Хромомагнезит	580	815	особливо ретельна	5,5	5	2,4
18	1,0	Магнезит	580	464	звичайна	6,5	5	2,7
19	1,5	Діатоміт	930	580	груба	2,5	3	2,3
20	2	Шамот	348	464	груба	4,5	3	3

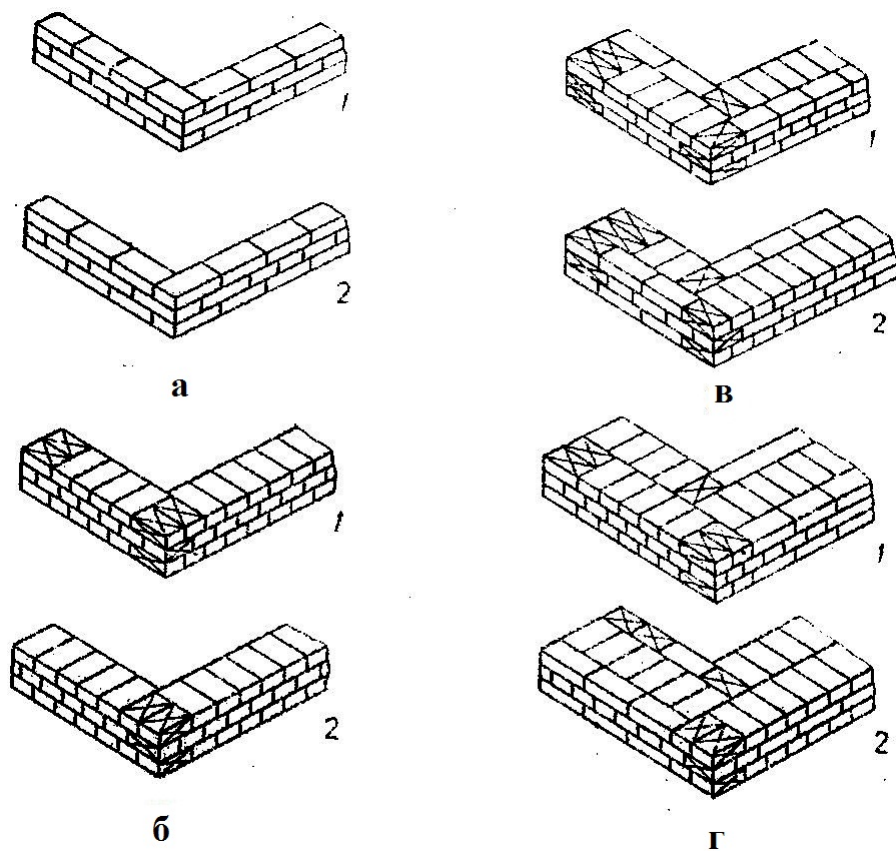


Рис. 3.3 – Кладка стін та перев'язка кутів

3.1.4 Розрахунок кількості та маси цегли для кладки стін печі

Периметр печі з довжиною L та шириною B :

$$P = 2 \cdot (L + B), \text{ м.}$$

Кількість цегли в одному погонному метрі кладки товщиною $S_{\text{кл}}$ (при необхідності округляється до більшого цілого числа):

$$n = \frac{1000}{116} \cdot S_{\text{кл}}, \text{ шт.}$$

Кількість цегли в одному ряду кладки печі (при необхідності округляється до більшого цілого числа):

$$n_1 = P \cdot n, \text{ шт.}$$

Кількість рядів кладки у печі висотою Н (при необхідності округляється до більшого цілого числа):

$$Z = \frac{H}{0,065}, \text{ рядів.}$$

Кількість цегли в z рядах кладки печі:

$$N = n_1 \cdot Z, \text{ шт.}$$

Маса цегли:

$$m = 0,232 \cdot 0,116 \cdot 0,065 \cdot \rho_{\text{ц}}, \text{ кг,}$$

де $\rho_{\text{ц}}$ – густина цегли (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3 – Густина деяких вогнетривких матеріалів

Матеріал	Густина, кг/м ³	Матеріал	Густина, кг/м ³
Шамот	1950	Хромомагнезит	3050
Динас	2100	Діатоміт	700
Магнезит	2950	Шамот-легковіс	1300

Маса цегли, необхідної для кладки печі:

$$M = m \cdot N, \text{ кг, т.}$$

3.1.5 Оформлення звіту

Звіт до лабораторної роботи повинен містити:

- назву та мету роботи;
- короткі теоретичні відомості;
- схему кладки відповідно до свого варіанту;
- результати розрахунку кількості та маси цегли для свого варіанту кладки печі;
- виводи до роботи.

3.1.6 Контрольні питання до лабораторної роботи № 1

З якого матеріалу виконується вогнетривка кладка печі? Яке її призначення?

Як називається ряд цегли, який укладено довгою гранню уздовж кладки?

Як називається ряд цегли, який укладено уздовж кладки короткою гранню?

Які ряди називають верстовими, а які – забутовальними?

Який інструмент та інвентар застосовують при виконанні вогнетривких робіт? Яке призначення цих предметів?

Які Ви знаєте шви вогнетривкої кладки? Як ці шви класифікують по товщині?

Для чого призначені температурні шви кладки? Які типи температурних швів Вам відомо? Чим вони заповнюються?

Опишіть правила кладки прямих стін, які засвоєно у лабораторній роботі.

Як розрахувати кількість та масу цегли для кладки стін печі заданих розмірів?

3.2 Практична робота № 1 «Складання теплового балансу та визначення показників теплової роботи металургійної печі»

Мета роботи: отримати навички складання теплового балансу нагрівальної печі безперервної дії та навчитися визначати показники теплової роботи печі.

3.2.1 Теоретичні відомості

Теплові баланси призначено для визначення основних техніко-економічних показників роботи печей, таких як:

- продуктивність печі P , кг/с, т/год.;
- загальна теплова потужність M_0 , кВт;
- коефіцієнт використання теплоти палива $\eta_{\text{вт}}$, частка;
- коефіцієнт корисної дії печі $\eta_{\text{кд}}$, % або частка;
- питома витрата палива b , м³/т.

Для складання теплового балансу паливної нагрівальної печі необхідно провести теплотехнічні випробування, під час яких визначити: ємкість печі ϵ , кг; тривалість нагріву $\tau_{\text{наг}}$, год.; температуру металу, який нагрівають, при

посаді $t_{\text{поч}}$ та видачі $t_{\text{кінц}}$, °С; витрати палива $V_{\text{г}}$ та повітря $V_{\text{п}}$, м³/год.; температуру підігріву повітря $t_{\text{п}}$, °С; температуру печі $t_{\text{печ}}$, °С і продуктів горіння (димових газів) $t_{\text{д}}$, які відходять, °С; температуру зовнішньої поверхні кладки печі $t_{\text{зовн}}$, °С.

3.2.2 Формули, які застосовуються для розрахунку теплового балансу паливної печі безперервної дії

Статті надходження теплоти у тепловому балансі:

– хімічна теплота палива, кВт:

$$Q_{\text{хт}} = V_{\text{г}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}}, \quad (3.1)$$

де $V_{\text{г}}$ – витрата палива, м³/с;

$Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – нижча робоча теплота згоряння палива, кДж/м³;

– теплота, що вноситься з підігрітим повітрям, кВт:

$$Q_{\text{п}}^{\Phi} = V_{\text{п}} \cdot i_{\text{п}}, \quad (3.2)$$

де $V_{\text{п}}$ – дійсна витрата повітря, м³/с;

$i_{\text{п}} = C_{\text{п}} \cdot t_{\text{п}}$ – ентальпія підігрітого повітря, кДж/м³;

$C_{\text{п}}$ – середня теплоємність підігрітого повітря, кДж/(К·м³);

$t_{\text{п}}$ – температура підігрітого повітря, °С;

– теплота, що вноситься з підігрітим паливом, кВт:

$$Q_{\text{пал}}^{\Phi} = V_{\text{г}} \cdot i_{\text{пал}}, \quad (3.3)$$

де $i_{\text{пал}} = C_{\text{пал}} \cdot t_{\text{пал}}$ – ентальпія підігрітого палива, кДж/м³;

$C_{\text{пал}}$ – середня теплоємність підігрітого палива, кДж/(К·м³);

$t_{\text{пал}}$ – температура палива (природного газу), °С.

У сучасних металургійних печах, що працюють на паливі з високою теплою згорання, не здійснюється його підігрів. У зв'язку з цим теплоту, що вноситься з підігрітим паливом, не враховують.

Статті витрат теплоти теплового балансу:

– теплота, засвоєна матеріалом, який нагрівають, кВт:

$$Q_{\text{м}} = P \cdot (i_{\text{м}}^{t_{\text{кінц}}} - i_{\text{м}}^{t_{\text{поч}}}) = P \cdot C_{\text{м}} \cdot (t_{\text{кінц}} - t_{\text{поч}}), \quad (3.4)$$

де $P = \frac{\epsilon}{\tau_{\text{наг}}}$ – продуктивність печі, кг/с;

C_M – середня теплоємність металу під час нагріву від $t_{\text{поч}}$ до $t_{\text{кінц}}$;

$i_M^{t_{\text{кінц}}} = C_M \cdot t_{\text{кінц}}$ – ентальпія (тепловміст) матеріалу у кінці нагріву, кДж/кг;

$i_M^{t_{\text{поч}}} = C_M \cdot t_{\text{поч}}$ – ентальпія матеріалу на початку нагріву, кДж/кг;

$\epsilon = M \cdot N$ – ємність печі, кг;

M, N – маса садки металу, кг та кількість заготовок, шт;

$\tau_{\text{наг}}$ – тривалість нагрівання, с;

– втрати теплоти з продуктами горіння, які відходять, кВт:

$$Q_d = V_d \cdot i_d, \quad (3.5)$$

де $V_d = B_g \cdot \nu_d$ – дійсна витрата димових газів, м³/с;

ν_d – питомий вихід продуктів згоряння (з розрахунку горіння палива), м³/м³;

$i_d = C_d \cdot t_d$ – ентальпія продуктів згоряння, які відходять з печі, що визначається по складу димових газів та їх температурі, кДж/м³;

– втрати теплоти з водою, яка охолоджується, кВт:

$$Q_{\text{охол}} = G_v \cdot C_v \cdot (t_{\text{вих}} - t_{\text{вх}}), \quad (3.6)$$

де G_v – витрата води на охолодження елементів печі, кг/с;

$C_v = 4,187$ кДж/(кг·К) – теплоємність води;

$t_{\text{вх}}$ і $t_{\text{вих}}$ – температури води, яка входить та виходить з системи охолодження елементів печі, °С;

– втрати теплоти теплопровідністю через кладку печі, кВт:

$$Q_{\text{кл}} = 1,163 \cdot (8 + 0,05 \cdot t_{\text{зовн}}) \cdot (t_{\text{зовн}} - t_{\text{навк}}) \cdot F_{\text{кл}}^{\text{зовн}}, \quad (3.7)$$

де $F_{\text{кл}}^{\text{зовн}}$ – площа зовнішньої поверхні печі, м²;

$t_{\text{зовн}}, t_{\text{навк}}$ – температура зовнішньої поверхні кладки печі та навколишнього повітря, °С;

– втрати теплоти випромінюванням через відкриті отвори та вікна печі, кВт:

$$Q_{\text{випр}} = C_{\text{піч}} \cdot \left[\left(\frac{t_{\text{піч}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{навк}} + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot F_{\text{вікн}}, \quad (3.8)$$

де $F_{\text{вікн}}$ – площа відкритих отворів та вікон печі, м²;

$t_{\text{піч}}$ – температура печі, °С;

$C_{\text{печ}} = 3,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – приведений коефіцієнт випромінювання, віднесений до температури печі (у розрахунку можна прийняти приблизно).

3.2.3 Завдання на складання теплового балансу нагрівальної печі безперервної дії

За результатами теплотехнічних випробувань, наведених в таблиці 3.4, скласти тепловий баланс печі. Під час розрахунків прийняти теплоємність матеріалу, що нагрівається, $C_{\text{м}} = 0,7 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Таблиця 3.4 – Вихідні дані балансових випробувань паливної печі

№ вар-та	М, кг	N, шт	$\tau_{\text{наг}}$, год.	Температура металу, °С		$B_{\text{Г}}$, м ³ /год.	$V_{\text{п}}$, м ³ /год.	$t_{\text{п}}$, °С	$t_{\text{печ}}$, °С	$t_{\text{д}}$, °С	$t_{\text{зовн}}$, °С
				$t_{\text{поч}}$	$t_{\text{кінц}}$						
1	550	180	1,44	20	1220	2700	29000	350	1230	850	154
2	450	175	1,3	20	1220	2300	25000	340	1230	770	154
3	450	145	1,3	20	1240	1950	21000	480	1250	780	160
4	1500	80	2,38	20	1250	1980	21000	460	1260	800	160
5	1200	100	2,13	20	1200	2100	22700	420	1210	800	150
6	200	180	0,9	20	1200	1500	16200	470	1210	750	150
7	200	310	0,9	20	1230	2700	29000	410	1240	820	155
8	2000	110	3,1	20	1280	2850	31000	360	1290	800	160
9	2000	130	2,8	20	1220	3500	38000	310	1230	810	155
10	2000	70	2,75	20	1240	2000	21500	410	1250	790	155
11	1800	140	3	20	1240	2950	31000	400	1250	700	170
12	1550	120	2,9	20	1210	2600	27000	530	1220	820	160
13	1750	134	3,2	20	1230	2800	28000	440	1240	790	150
14	600	200	1,5	20	1230	3000	31000	360	1240	830	145
15	680	215	1,8	20	1205	3000	31000	420	1215	860	165
16	750	205	2	20	1200	2800	29000	380	1210	790	165
17	850	190	2	20	1200	2900	30000	320	1210	780	155
18	950	182	2,5	20	1200	2700	28000	650	1210	760	155
19	1050	170	2,3	20	1240	3000	31000	520	1250	755	145
20	1150	164	2,5	20	1240	2950	31000	635	1250	785	145

3.2.4 Приклад складання теплового балансу (розрахункова частина)

У нагрівальну піч методичного типу (кільцева піч) здійснюють посад металу масою 2000 кг з початковою температурою, яка дорівнює температурі навколишнього повітря $t_{\text{поч}} = t_{\text{навк}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура металу при видачі складає $t_{\text{кінц}} = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тривалість нагріву $\tau_{\text{наг}} = 6$ год. Кількість заготовок одночасно, що знаходяться в печі, складає $N = 144$ шт. Витрата палива (природного газу) і повітря на піч відповідно дорівнюють $B_r = 2000\text{ м}^3/\text{год.}$ і $V_{\text{п}} = 21000\text{ м}^3/\text{год.}$ Температура продуктів горіння, що відходять, складає $t_d = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура підігріву повітря $t_{\text{п}} = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура печі в опалювальних зонах складає $t_{\text{пч}} = 1270\text{ }^{\circ}\text{C}$. Загальна площа зовнішньої поверхні кладки та її температура відповідно дорівнюють $F_{\text{кл}}^{\text{зовн}} = 1000\text{ м}^2$ і $t_{\text{зовн}} = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.2.4.1 Розрахунок згоряння палива

У розрахунку згоряння палива по відомому його складу необхідно визначити: питому теоретичну витрату повітря; коефіцієнт витрати повітря і питому дійсну витрату повітря; теплоту згорання палива; питомий вихід продуктів згорання та їх склад, а також витрату димових газів. Склад природного газу наведено у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Склад палива, об'ємні відсотки

CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	CO ₂	N ₂	O ₂	Σ
89,9	3,1	0,9	0,4	0,3	5,2	0,2	100

Питома теоретична витрата повітря:

$$L_o = \frac{0,01}{0,21} \cdot (2 \cdot \text{CH}_4 + 3,5 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 5 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 6,5 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} - \text{O}_2) = \\ = \frac{(2 \cdot 89,9 + 3,5 \cdot 3,1 + 5 \cdot 0,9 + 6,5 \cdot 0,4 - 0,2)}{21} = 9,407\text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Питома дійсна витрата повітря:

$$L_n = n \cdot L_o = \frac{V_{\text{п}}}{B_r} = \frac{21000}{2000} = 10,5\text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Коефіцієнт витрати повітря:

$$n = \frac{L_n}{L_0} = \frac{10,5}{9,407} = 1,116.$$

Теплота згоряння палива:

$$Q_H^p = 357 \cdot CH_4 + 635 \cdot C_2H_6 + 911 \cdot C_3H_8 + 1186 \cdot C_4H_{10} = \\ = 357 \cdot 89,9 + 635 \cdot 3,1 + 911 \cdot 0,9 + 1186 \cdot 0,4 = 35357,1 \text{ кДж/м}^3.$$

Питомий вихід продуктів згорання:

$$V_{CO_2} = 0,01 \cdot (CO_2 + CH_4 + 2 \cdot C_2H_6 + 3 \cdot C_3H_8 + 4 \cdot C_4H_{10}) = \\ = 0,01 \cdot (0,3 + 89,9 + 2 \cdot 3,1 + 3 \cdot 0,9 + 4 \cdot 0,4) = 1,007 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{H_2O} = 0,01 \cdot (2 \cdot CH_4 + 3 \cdot C_2H_6 + 4 \cdot C_3H_8 + 5 \cdot C_4H_{10}) = \\ = 0,01 \cdot (2 \cdot 89,9 + 3 \cdot 3,1 + 4 \cdot 0,9 + 5 \cdot 0,4) = 1,947 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{N_2} = 0,01 \cdot (N_2 + 79 \cdot L_n) = 0,01 \cdot (5,2 + 79 \cdot 10,5) = 8,347 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (n - 1) \cdot L_0 = 0,21 \cdot (1,116 - 1) \cdot 9,407 = 0,229 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$v_{\partial} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2} = 1,007 + 1,947 + 8,347 + 0,229 = 11,53 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Склад продуктів згоряння (димових газів):

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{v_{\partial}} \cdot 100 = \frac{1,007}{11,53} \cdot 100 = 8,734\%;$$

$$H_2O = \frac{V_{H_2O}}{v_{\partial}} \cdot 100 = \frac{1,947}{11,53} \cdot 100 = 16,886\%;$$

$$N_2 = \frac{V_{N_2}}{v_{\partial}} \cdot 100 = \frac{8,347}{11,53} \cdot 100 = 72,394\%;$$

$$O_2 = \frac{V_{O_2}}{v_{\partial}} \cdot 100 = \frac{0,229}{11,53} \cdot 100 = 1,986\%.$$

Склад димових газів у відсотках за об'ємом наведено у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Склад димових газів, об'ємні відсотки

CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	Σ
8,734	16,886	72,394	1,986	100

Витрата димових газів:

$$V_d = B_r \cdot v_{\partial} = 2000 \cdot 11,53 = 23060 \text{ м}^3/\text{год.}$$

3.2.4.2 Статті надходження теплоти у тепловому балансі

Хімічна теплота палива (за формулою 3.1):

$$Q_{\text{х.пал}} = \frac{2000}{3600} \cdot 35357,1 = 19643 \text{ кВт.}$$

Теплота, яка вноситься з підігрітим повітрям (за формулою 3.2):

$$Q_{\text{п}}^{\Phi} = \frac{21000}{3600} \cdot 1,32 \cdot 300 = 2310 \text{ кВт,}$$

де $C_{\text{п}} = 1,32 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}$ – теплоємність повітря, підігрітого при $t_{\text{п}} = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (див. табл. 3.7).

Таблиця 3.7 – Середня теплоємність газів C_0^t від 0 до $t \text{ }^{\circ}\text{C}$

Температура $t, \text{ }^{\circ}\text{C}$	CO_2	H_2O	Повітря	N_2	O_2
100	1,73	1,49	1,295	1,295	1,31
200	1,8	1,51	1,31	1,3	1,33
300	1,87	1,54	1,32	1,31	1,35
400	1,94	1,56	1,33	1,32	1,37
500	2	1,58	1,34	1,33	1,39
600	2,05	1,61	1,35	1,34	1,41
700	2,1	1,63	1,36	1,35	1,42
800	2,14	1,66	1,38	1,36	1,43
900	2,18	1,68	1,4	1,38	1,44
1000	2,21	1,71	1,41	1,39	1,45
1100	2,24	1,74	1,42	1,4	1,46
1200	2,27	1,76	1,43	1,41	1,47
1300	2,3	1,78	1,44	1,42	1,475

3.2.4.3 Витратні статті теплового балансу

Теплота, засвоєна матеріалом, який нагрівають (за формулою 3.4):

$$Q_{\text{м}} = \frac{2000 \cdot 144}{6 \cdot 3600} \cdot 0,7 \cdot (1250 - 20) = 11480 \text{ кВт.}$$

Втрати теплоти з продуктами горіння, які відходять (за формулою 3.5):

$$Q_d = \frac{23060}{3600} \cdot 1,48 \cdot 800 = 7584 \text{ кВт},$$

де $C_d = 1,48 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ – теплоємність димових газів при $t_d = 800^\circ \text{C}$, розрахована за даними таблиць 3.6 та 3.7:

$$C_d = 0,01 \cdot (2,14 \cdot 8,734 + 1,66 \cdot 16,886 + 1,36 \cdot 72,394 + 1,43 \cdot 1,986) = 1,48 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

Втрати теплоти теплопровідністю через кладку печі (за формулою 3.6):

$$Q_{\text{кл}} = 1,163 \cdot (8 + 0,05 \cdot 120) \cdot (120 - 20) \cdot 1000 = 1628200 \text{ Вт} \approx 1628 \text{ кВт}.$$

Основними втратами теплоти випромінюванням через відкриті отвори та вікна печі є втрати через вікна посаду і видачі. Робочі вікна посаду і видачі заготовок мають площу $F_{\text{вікн}}^{\text{пос}} = F_{\text{вікн}}^{\text{вид}}$ (можна прийняти $F_{\text{вікн}}^{\text{пос}} = F_{\text{вікн}}^{\text{вид}} = 2 \text{ м}^2$) і періодично закриваються. Для обліку втрат теплоти випромінюванням через всі щілини та отвори печі приймаємо, що робочі вікна постійно відкриті. При визначенні втрат теплоти випромінюванням через вікно посаду приймаємо температуру печі, на початку нагріву, яка дорівнює температурі продуктів горіння.

Втрати теплоти випромінюванням через вікно посаду (за формулою 3.7):

$$Q_{\text{випр}_1} = \frac{3,5}{1000} \cdot \left[\left(\frac{800 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot 2 = 92,27 \text{ кВт}.$$

Втрати теплоти випромінюванням через вікно видачі (за формулою 3.8):

$$Q_{\text{випр}_2} = \frac{3,5}{1000} \cdot \left[\left(\frac{1270 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot 2 = 396,28 \text{ кВт}.$$

Втрати теплоти випромінюванням через відкриті вікна печі:

$$Q_{\text{випр}} = Q_{\text{випр}_1} + Q_{\text{випр}_2} = 92,27 + 396,28 \approx 489 \text{ кВт}.$$

Інші втрати теплоти обчислюються, як різниця між надходженням та витратою теплоти.

Результати розрахунку теплового балансу заносимо у таблицю 3.8.

3.2.4.4 Техніко-економічні показники роботи печі

Продуктивність печі:

$$P = \frac{G}{\tau_{\text{наг}}} = \frac{144 \cdot 2000}{6 \cdot 1000} = 48 \text{ т/год}.$$

Загальна теплова потужність:

$$M_o = B \cdot Q_H^p = \frac{Q_m + Q_{кл} + Q_{випр} + Q_{пр}}{\eta_{вп}} = Q_{хт} = 19643 \text{ кВт.}$$

Таблиця 3.8 – Тепловий баланс прохідної нагрівальної печі методичного типу

Надходження теплоти			Витрата теплоти		
Стаття	кВт	%	Стаття	кВт	%
Хімічна теплота палива	19643	89,48	Теплота, яка засвоєна металом	11480	52,29
Фізична теплота повітря	2310	10,52	Втрати теплоти з димом, який відходить	7584	34,54
			Втрати теплоти через кладку	1628	7,42
			Втрати теплоти випромінюванням	489	2,23
			Інші втрати	772	3,52
РАЗОМ	21953	100	РАЗОМ	21953	100

Коефіцієнт використання теплоти палива:

$$\eta_{вп} = \frac{Q_m + Q_{кл} + Q_{випр} + Q_{пр}}{Q_{хт}} = \frac{11480 + 1628 + 489 + 772}{19643} = 0,7315.$$

Коефіцієнт корисної дії печі:

$$\eta_{кд} = \frac{Q_m}{Q_{хт}} = \frac{11480}{19643} = 0,5844 \text{ або } 58,44 \%.$$

Питома витрата природного газу:

$$b = \frac{B_r}{P} = \frac{2000}{48} = 41,67 \text{ м}^3/\text{т.}$$

3.2.5 Контрольні питання до практичної роботи № 1

Які параметри необхідно визначити при теплотехнічних балансових випробуваннях паливної печі?

Які основні статті надходження теплоти у тепловому балансі?

Які основні витратні статті у тепловому балансі?

Які втрати теплоти можуть бути віднесено до інших?

Які параметри визначаються у розрахунку згоряння палива і для чого?

Запишіть формули для робочої потужності та потужності холостого ходу.

Сформулюйте визначення коефіцієнту корисної дії печі та коефіцієнту використання теплоти палива. Запишіть формули для їх розрахунку.

За якими формулами визначають питома витрата теплоти та питома витрата палива при тепловій обробці матеріалу? Які одиниці виміру мають згадані показники?

Що таке «умовне паливо»? За якою формулою визначається питома витрата умовного палива на теплову обробку матеріалу?

ЗМІСТ

	стор
ВСТУП.....	3
1 РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ «МЕТАЛУРГІЙНІ ПЕЧІ».	4
2 ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ «РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВИХ ВТРАТ ТЕПЛОПРОВІДНІСТЮ ЧЕРЕЗ ФУТЕРІВКУ ПЕЧІ».....	9
2.1 Приклад виконання індивідуального завдання «Розрахунок теплових втрат теплопровідністю через футерівку печі».....	10
3 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ.....	24
3.1 Лабораторна робота № 1. «Конструювання основних вузлів вогнетривкої футерівки печі».....	24
3.2 Практична робота № 1. «Складання теплового балансу та визначення показників теплової роботи металургійної печі».....	31