

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

**Робоча програма,  
методичні вказівки та індивідуальні завдання  
до вивчення дисципліни «Високотемпературні установки»  
для студентів, що навчаються за напрямом  
6.050601 – Теплоенергетика**

**Дніпропетровськ НМетАУ 2013**



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

**Робоча програма,  
методичні вказівки та індивідуальні завдання  
до вивчення дисципліни «Високотемпературні установки»  
для студентів, що навчаються за напрямом  
6.050601 – Теплоенергетика**

**Затверджено**  
на засіданні кафедри теплотехніки та  
екології металургійних печей НМетАУ  
Протокол №            від 03.06.13

**Дніпропетровськ НМетАУ 2013**

**УДК 669.04–977(075.8)**

Робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання до вивчення дисципліни «Високотемпературні установки» для студентів, що навчаються за напрямом 6.050601 – Теплоенергетика / Укладач: О.В. Гупало. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2013. – 24 с.

Наведені робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання до вивчення дисципліни «Високотемпературні установки», приклади розрахунку індивідуального завдання, рекомендована література.

Призначено для студентів, що навчаються за напрямом 6.050601 – Теплоенергетика.

Укладач: О.В. Гупало, доц., канд. техн. наук.

Відповідальний за випуск: О.О.Єрсьомін, канд. техн. наук, доц.

Рецензент: В.Я. Перерва, канд. техн. наук, доц. (НМетАУ)

Підписано до друку 03.06.2013. Формат 60x84 1/16. Папір типогр.  
Друк плоский. Умов. друк. арк. 1,4. Тираж 50 прим. Замовлення № .

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

---

Редакційно-видавничій 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 промислових високотемпературних установках, розглядаються при вивченні дисципліни «Високотемпературні процеси». У рамках дисципліни «Високотемпературні установки» вивчаються: конструкції, принцип дії, температурні і теплові режими роботи високотемпературних установок; матеріали, що застосовуються для будівництва футерівки теплових агрегатів; принципи утилізації теплоти димових газів, що йдуть з робочого простору високотемпературних установок; конструкції, принцип дії та методики розрахунку теплообмінників, призначених для утилізації теплоти відхідних димових газів; теплові баланси установок безперервної і періодичної дії; показники енергоефективності роботи теплових агрегатів і фактори, що впливають на енергоефективність; основні напрямки зниження енерговитрат на теплову обробку матеріалів.

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

Без глибокого розуміння фізичної сутності процесів, що протікають в промислових високотемпературних установках, і без достатньої теоретичної підготовки неможливо вирішувати складні інженерні завдання, пов'язані з їх конструюванням і експлуатацією. У зв'язку з цим вивчення дисципліни «Високотемпературні установки» має першорядне освітнє значення для студента-теплоенергетика.

## 1 РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ «ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНІ УСТАНОВКИ»

Напрямок – 6.050601 Теплоенергетика

### Розподіл навчальних годин

Усього годин за навчальним планом, у тому числі:	108
аудиторні заняття, з них:	20
лекції	12
лабораторні роботи	–
практичні заняття	8
семінарські заняття	–
Самостійна робота, у тому числі при:	88
вивченні розділів програми, які не викладаються на лекціях	76
виконанні індивідуальних завдань	12
Підсумковий контроль	екзамен

### Характеристика дисципліни

Навчальна дисципліна «Високотемпературні установки» є вибірковою і входить до циклу дисциплін самостійного вибору вищого навчального закладу.

Мета вивчення дисципліни – засвоєння знань та придбання навичок, необхідних для розрахунку, проектування, експлуатації, ремонту високотемпературних установок.

У результаті вивчення дисципліни студент повинен знати:

- вогнетривкі та ізоляційні матеріали печей;
- вторинні енергоресурси основних металургійних переробок;
- основи теплової роботи та теплові баланси високотемпературних установок;
- конструкції високотемпературних установок та апаратів для утилізації теплоти продуктів згоряння димових газів, що відходять.

Студент повинен вміти:

- розраховувати апарати для утилізації теплоти продуктів згоряння;
- визначати теплові потужності установки, продуктивність, витрати теплоти (умовного палива) на одиницю продукції;
- складати тепловий баланс установки;
- проводити аналіз ефективності роботи установок та розробляти енергозберігаючі заходи.

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 – дисципліна є завершальною при підготовці бакалаврів напряму «Теплоенергетика». Їй передують вивчення дисциплін «Тепломасообмін», «Технічна термодинаміка», «Гідрогазодинаміка», «Теплотехнологічні процеси та установки», «Джерела тепlopостачання промислових підприємств», «Спалювання палива». Набуті знання і вміння використовуються при виконанні випускної роботи бакалавра.

## **Зміст дисципліни**

### **Утилізація теплоти продуктів згоряння.**

Футерівка високотемпературної установки. Вогнетривкі та теплоізоляційні матеріали, що використовуються для футерування робочої камери теплових агрегатів, та їх робочі та теплофізичні характеристики.

Вторинні матеріальні та енергетичні ресурси. Використання фізичної теплоти готових продуктів технологічного процесу та фізичної і хімічної теплоти газів і продуктів згоряння палива.

Рекуперативні теплообмінники. Прямотечійна, протитечійна та перехресна схеми руху теплоносіїв в рекуператорах. Матеріали для виготовлення рекуператорів. Основи розрахунку рекуператорів.

Регенеративні теплообмінники. Види регенеративних насадок. Тепловий і

температурний режим роботи регенеративної насадки в періоди нагріву та охолодження.

### **Основи теплової роботи високотемпературних установок.**

Теплові потужності установки: потужність холостого ходу; засвоєна, робоча і загальна теплові потужності. Види теплових втрат робочою камерою установки. Визначення витрат палива, повітря і виходу диму по відомій тепловій потужності печі.

Продуктивність установки. Питомий тепловий дефіцит технологічного процесу. Розрахунок теплових потужностей установок безперервного та періодичного принципу дії. Фактори, які впливають на теплову потужність.

Питома витрата теплоти та палива. Умовне паливо. Питома витрата умовного палива на теплову обробку матеріалу. Коефіцієнт корисної дії установки. Фактори, які впливають на питому витрату теплоти.

Матеріальний і тепловий баланс установки. Основні прибуткові та витратні статті матеріального і теплового балансів технологічного процесу та установок безперервної та періодичної дії. Визначення теплового дефіциту технологічного процесу.

### **Теплова робота і конструкції високотемпературних установок.**

Рекуперативний і регенеративний нагрівальні колодязі: конструкції і принцип дії. Теплові і температурні режими роботи колодязів. Двостадійний режим роботи колодязя: I період – при  $M_{\text{зар}} = \text{const}$ ; II період – при  $t_{\text{печ}} = \text{const}$ . Особливості розрахунку двостадійного режиму нагрівання матеріалів.

Інші конструкції печей безперервної дії: камерні та ковпакові печі.

Методичні печі: конструкції і принцип дії. Методична, зварювальна і томильна зони методичних печей. Методична піч з похилим монолітним подом, трьохзонні та п'ятизонні методичні печі. Режими роботи печей: 2-х зонний, 3-х зонний та багатозонний режими. Особливості розрахунку теплового і температурного режимів роботи методичних печей.

Інші конструкції печей безперервної дії: печі з крокуючим подом; печі з крокуючими балками; кільцеві, секційні та роликові печі.



### Практичні заняття

Тема заняття	Тривалість, годин
1. Розрахунок рекуператора для підігрівання повітря.	4
2. Розрахунок теплових потужностей, питомої витрати теплоти й палива та ККД високотемпературної установки.	4

### Індивідуальне завдання (12 годин)

Розрахунок теплових втрат теплопровідністю через футерівку високотемпературної установки.

### Рекомендована література

1. Ревун М.П., Потапов Б.Б., Ольшанский В.М., Бородулин А.В. Високотемпературные теплотехнологические процессы и установки в металлургии: Учебное пособие. – Днепропетровск: Из-во ЗГИА. – 443 с.
2. Свинолобов Н.П., Бровкин В.Л. Теоретические основы металлургической теплотехники: Учебное пособие для вузов. – Днепропетровск: Пороги, 2002. – 226 с.
3. Свинолобов Н.П., Бровкин В.Л. Печи черной металлургии: Учебное пособие для вузов. – Днепропетровск: Пороги, 2002. – 154 с.
4. Металлургическая теплотехника. Т. 2. Конструкция и работа печей: Учебник для вузов / Кривандин В.А., Неведомская И.Н., Кобахидзе В.В. и др. – М.: Металлургия, 1986. – 592 с.
5. Губинский В.И. Металлургические печи. – Днепропетровск: НМетАУ, 2006.– 84 с.

## 2 ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

### «Розрахунок теплових втрат теплопровідністю через футерівку високотемпературної установки»

В інженерних розрахунках часто доводиться визначати теплові втрати через кладку (футерівку) теплової установки. Не менший інтерес представляє визначення температури зовнішньої поверхні футерівки і температури на стику її вогнетривких 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 установки,  $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ ;

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

$R_{\text{зов}} = \frac{1}{\alpha_{\text{зов}}}$  – 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 установки 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 багат шарової футерівки;

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

$S_i$  – товщина  $i$ -ого шару футерівки, м.

Оскільки  $\alpha_{\text{вн}}$  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  $\lambda_i$  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 високотемпературної установки»**

### 2.1.1 Завдання

Визначити питомий тепловий потік  $q$ , що проходить через двошарову плоску футерівку високотемпературної установки і розподіл температур по товщині футерівки.

Вихідні дані для виконання розрахунку наведені в таблиці 2.1.

Схема установки та її футерівка показані на рис. 2.1.

### 2.1.2 Вихідні дані:

- 1) температура диму в робочому просторі установки  $t_1 = 1200$  °С;
- 2) температура навколишнього середовища  $t_5 = 20$  °С;
- 3) внутрішній (робочий) шар футерівки виконаний з вогнетривкої шамотної цегли. Товщина шару  $S_I = 0,575$  м;
- 4) зовнішній (теплоізоляційний) шар футерівки виконаний з високопористого шамоту. Товщина шару  $S_{II} = 0,115$  м;
- 5) висота робочого простору установки  $H = 1,5$  м ;
- 6) швидкість димових газів у робочому просторі установки  $W_o = 10$  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 установки  $P_k = 100$  кН/м<sup>2</sup>.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розрахунку

№ вар.	t <sub>1</sub> , °C	t <sub>5</sub> , °C	S <sub>I</sub> , м	S <sub>II</sub> , м	H, м	CO <sub>2</sub> , %	H <sub>2</sub> O, %	W <sub>o</sub> , 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

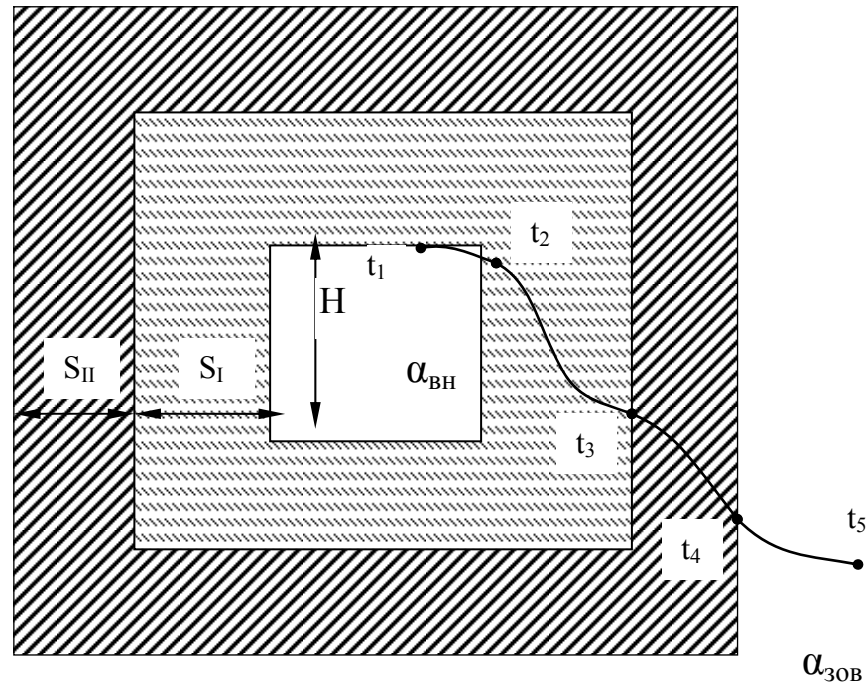


Рис. 2.1 – Схема двох шарів стінки

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):

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

Тут  $\alpha_{ВН}^*$  і  $\alpha_{ЗОВ}^*$  – коефіцієнти тепловіддачі від газів усередині та зовні установки, обчислені в першому наближенні,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

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

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

$$\alpha_{ВН}^* = \alpha_{ВН.ПРОМ}^* + \alpha_{ВН.КОН}^*,$$

$$\text{де } \alpha_{ВН.ПРОМ}^* = \frac{C_0 \cdot \varepsilon_{ГФ}}{25} \left( \frac{t_1 + 273}{100} \right)^3, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$C_0 = 5,67$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ;

$\varepsilon_{\text{ГФ}}$  – 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  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$ , яка залежить від парціальних тисків  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  і середньої ефективної товщини газового шару у робочому просторі футерівки ( $\overline{S_{\text{еф}}}$ ).

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

Сила поглинання  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$ :

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

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

По рис. 2.4 а і 2.4 б при  $t_1 = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$  знаходимо:

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

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

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

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

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

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

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

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

де  $\Pi$  – периметр робочого простору установки.

Число Рейнольдса:

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

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 по формулі:

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

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 по формулі:

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

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.

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:

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

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

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 високотемпературної установки:

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

2.2.5 Орієнтовне значення коефіцієнту теплопередачі:

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

2.2.6 Орієнтовне значення питомого теплового потоку:

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

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



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

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

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

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

2.4.1 Уточнимо коефіцієнти тепловіддачі в робочому просторі:

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

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

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

Тоді тепловий опір між димовими газами і футерівкою складе:

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

2.4.2 Уточнимо теплові опори футерівки  $R_2$  и  $R_3$ :

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

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

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

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

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

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

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

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

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 установки)  $q_d$  і температури зовнішньої поверхні футерівки  $t_{4д}$ .

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

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

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

$$\alpha_{\text{зов}}^{***} = \frac{5,67 \cdot 0,85}{112 - 20} \left[ \left( \frac{112 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] + 2,55 \cdot \sqrt[4]{112 - 20} = 15,546 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

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

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

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

Дійсну щільність теплового потоку  $q_d$  і дійсну температуру зовнішньої поверхні футерівки  $t_{4d}$  можна визначити графічним шляхом (див. рис. 2.2). Для цього на одному і тому ж графіку будуються залежності  $q_{\text{зов}} = f(t_4)$  і  $q = f(t_4)$ . Точка перетину прямих дає дійсне значення  $q_d$  і  $t_{4d}$ .

Результати розрахунку розподілення температур у двошаровій плоскій футерівці наносимо на температурну діаграму (див. рис. 2.3).

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

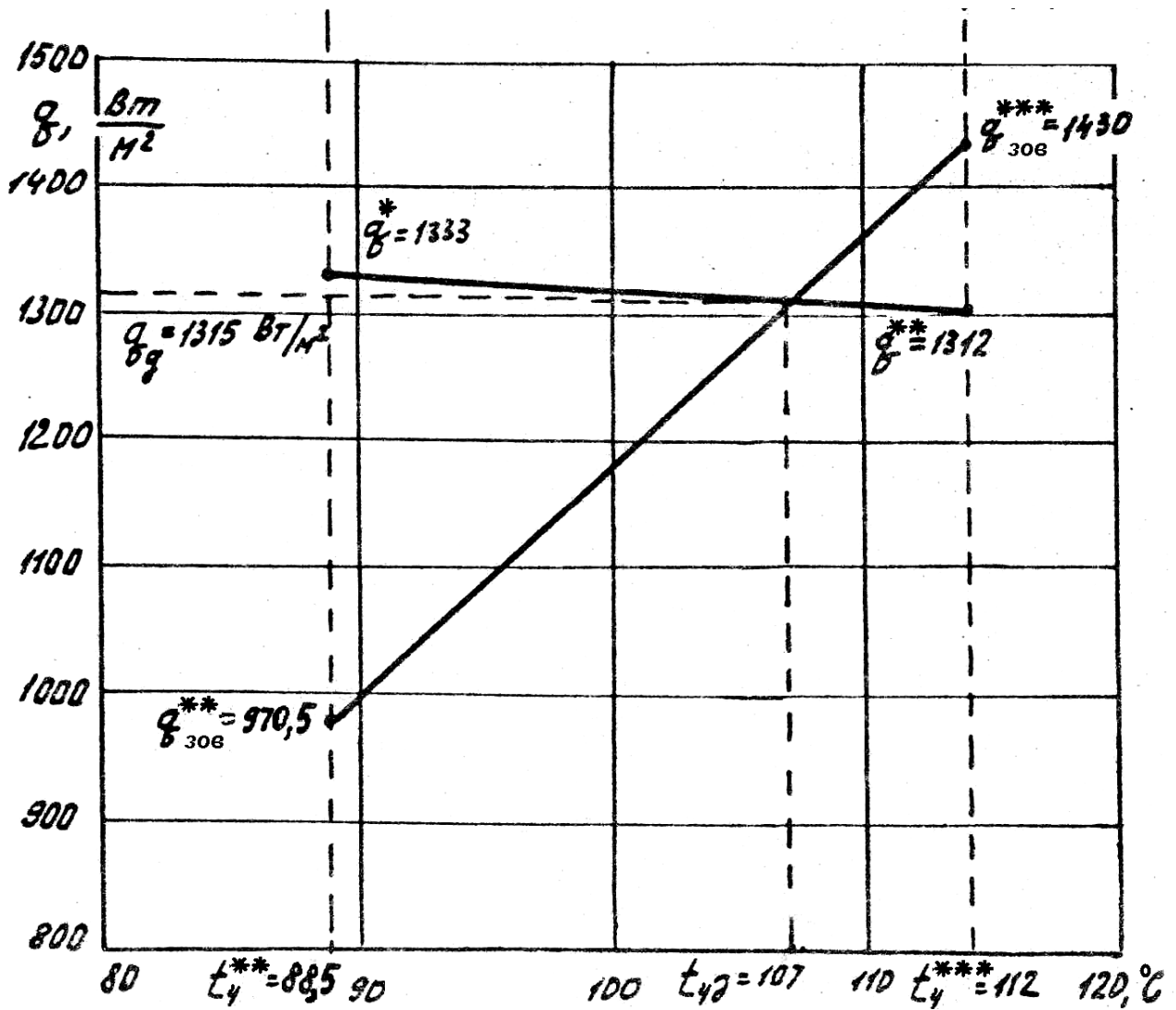


Рисунок 2.2 – Графік для визначення дійсних питомих втрат теплоти через футерівку високотемпературної установки  $q_d$  і дійсної температури зовнішньої поверхні футерівки  $t_{4d}$

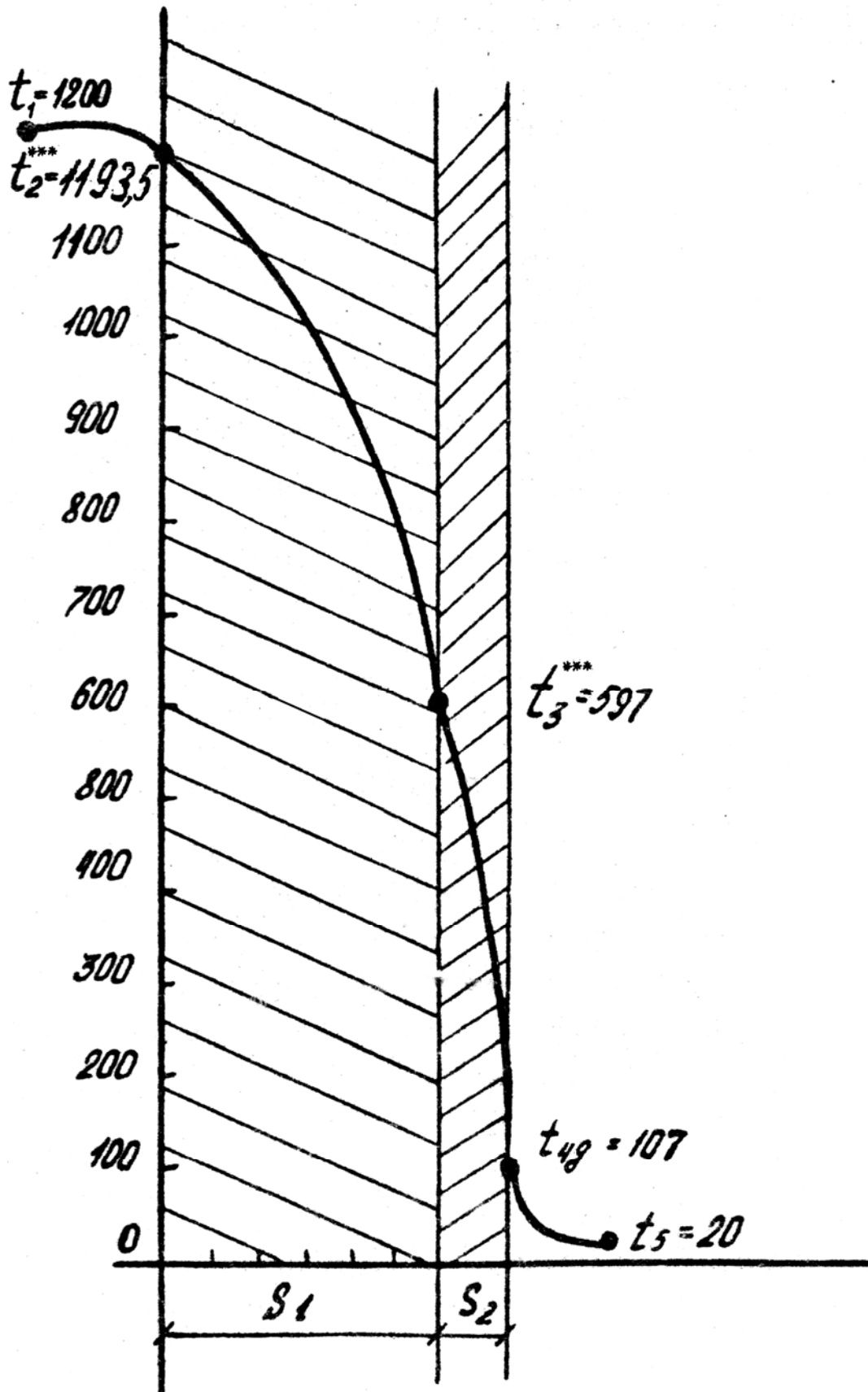


Рисунок 2.3 – Розподіл температур у двошаровій плоскій футерівці в стаціонарному тепловому стані

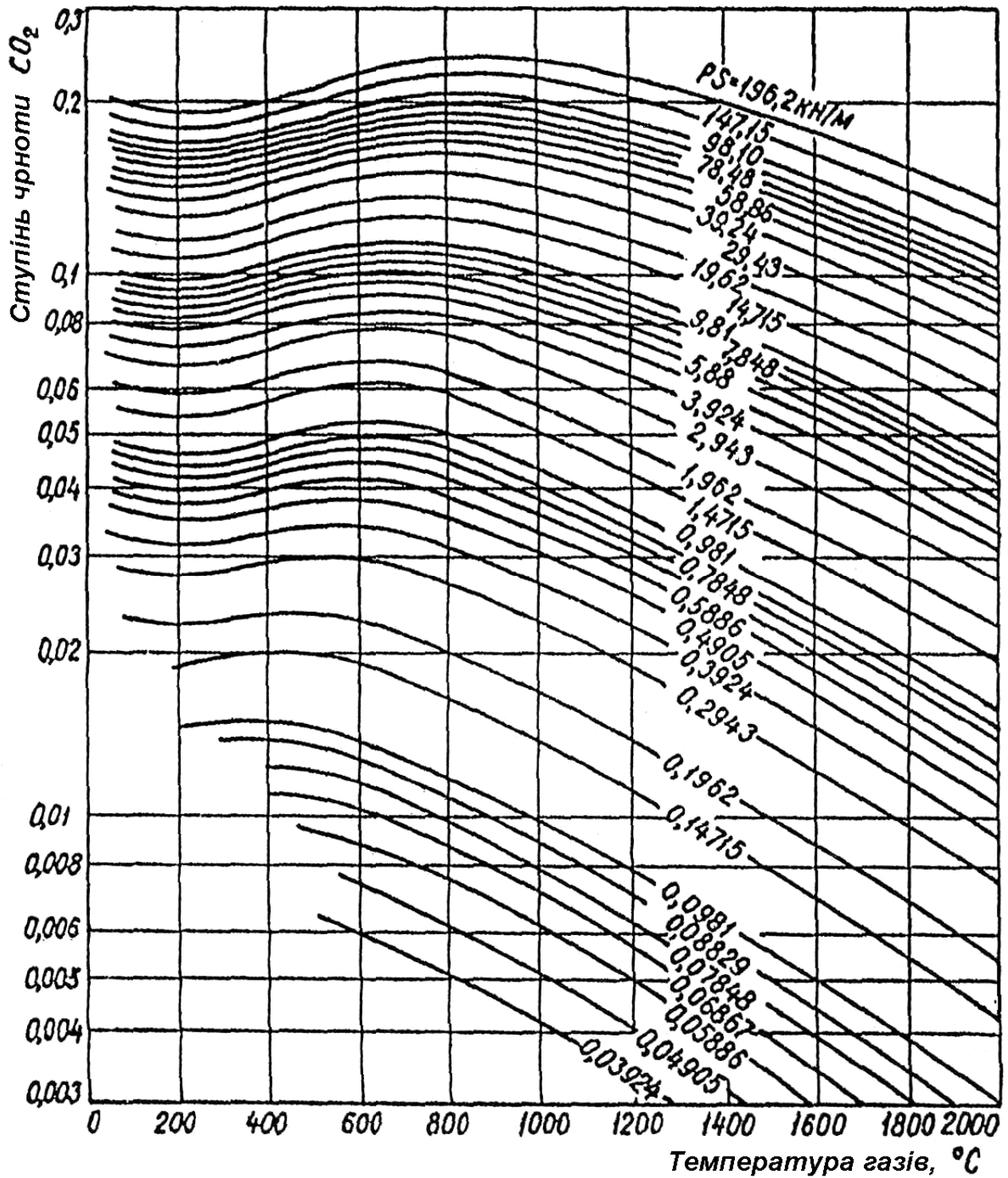


Рисунок 2.4 а – Ступінь чорноти при випромінюванні  $CO_2$



Таблиця 2.2 – Фізичні константи повітря і димових газів

№ п/п	Тем- пера- тура °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



## ЗМІСТ

	стор
ВСТУП. ....	3
1 РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ «ВИСОКОТЕМПЕРАТУР- РНІ УСТАНОВКИ. ....	4
2 ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ «РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВИХ ВТРАТ ТЕПЛОПРОВІДНІСТЮ ЧЕРЕЗ ФУТЕРІВКУ ВИСОКОТЕ- МПЕРАТУРНОЇ УСТАНОВКИ». ....	8
2.1 Приклад виконання індивідуального завдання «Розрахунок теплових втрат теплопровідністю через футерівку високотемперату- рної установки». ....	10