

МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра “Теплотехніка та теплові двигуни”

РОБОЧА ПРОГРАМА

*завдання та методичні рекомендації до виконання
контрольних робіт з дисципліни*

***«ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНІ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНІ
ПРОЦЕСИ ТА УСТАНОВКИ»***

Харків 2009

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри „Теплотехніка та теплові двигуни” 4 лютого 2008 р., протокол № 8.

У методичних вказівках наведено загальні положення, робочу програму з питаннями для самоконтролю, задачі з основних розділів курсу та методи їх розв’язання.

Рекомендуються для студентів спеціальності «Теплоенергетика» денної та заочної форм навчання, можуть використовуватися при виконанні дипломного проекту.

Укладачі:

доценти В.М. Лялюк,
С.В. Угольніков,
Т.І. Ярошенко,
асист. О.В. Гришина

Рецензент

доц. І.П. Полтавський

РОБОЧА ПРОГРАМА

*завдання та методичні рекомендації
до виконання контрольних робіт з дисципліни*

*«ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНІ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНІ
ПРОЦЕСИ ТА УСТАНОВКИ»*

Відповідальний за випуск Гришина О.В.

Редактор Ібрагімова Н.В.

Підписано до друку 08.04.08 р.

Формат паперу 60x84 1/16 . Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 2,5. Обл.-вид.арк. 2,75.

Замовлення № Тираж 100. Ціна

Видавництво УкрДАЗТу, свідоцтво ДК № 2874 від. 12.06.2007 р.
Друкарня УкрДАЗТу,
61050, Харків - 50, пл. Фейсрбаха, 7

ЗМІСТ

1	Загальні методичні вказівки	4
2	Робоча програма дисципліни	5
3	Завдання на контрольну роботу 1	7
4	Методичні рекомендації до розв'язання задач контрольної роботи 1	11
5	Завдання на контрольну роботу 2	23
6	Методичні рекомендації до розв'язання задач контрольної роботи 2	27
	Список літератури	36
	Додатки	37

1 ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

Дисципліну „Високотемпературні теплотехнологічні процеси та установки” студенти заочної форми навчання вивчають згідно з наведеною робочою програмою. При вивченні дисципліни слід засвоїти основні поняття предмета, сутність різноманітних високотемпературних процесів, конструктивні особливості і ефективність установок, в яких реалізуються ці процеси; технологічні, енергетичні та екологічні проблеми високотемпературної теплотехнології; усвідомити основи і перспективи розвитку енергозбереження теплотехнології; набути сучасних математичних методів при виконанні теплотехнічних розрахунків високотемпературних установок, а також технічної реалізації нових теплотехнологічних процесів, безвідходних систем та енергетичної модернізації діючих установок.

Основною формою вивчення дисципліни є самостійна робота з підручниками після ознайомлення зі змістом теми робочої програми, яка вивчається.

Кожний студент заочної форми навчання повинен самостійно виконати дві контрольні роботи, які складаються з трьох контрольних запитань і задач.

При виконанні контрольної роботи студент повинен спочатку письмово відповісти на контрольні запитання, а потім розв'язати відповідні задачі. Відповіді на контрольні запитання мають бути стислими, але повністю розкритими. Відповіді необхідно супроводжувати формулами, графіками, схемами й ескізами конструкцій.

При розв'язанні задач необхідно наводити формулу, з якої визначається величина, і одиниці, в яких вона вимірюється, а також зазначити, звідки взяті величини, підставлені у формулу (якщо вони не містяться в умові задачі).

Контрольні запитання студент вибирає із таблиці варіантів до контрольних робіт (таблиці 1.1, 5.1), а числові дані до задач – із відповідних таблиць кожної задачі, які наведені в кінці завдання.

Обчислення необхідно виконувати у розгорнутому вигляді в одиницях системи СІ.

2 РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ

2.1 Вступ до високотемпературної теплотехнології та енергетики теплотехнології

Загальні поняття та визначення. Загальні особливості та область використання високотемпературних теплотехнологічних процесів. Технологічні, енергетичні та екологічні проблеми високотемпературної теплотехнології. Енергетика теплотехнології як науково-практична основа технічної реалізації нових теплотехнологічних процесів та енергетичної модернізації діючих теплотехнологічних установок і систем.

Структурні, теплові, теплотехнічні та конструктивні схеми високотемпературних теплотехнологічних установок. Конструктивні елементи теплотехнологічного реактора. Вогнетривні та теплоізоляційні матеріали. Теплотехнічна класифікація теплотехнологічних процесів та установок. Технологічні основи процесів нагріву та випалу, плавильних процесів, процесів термохімічної переробки палива.

2.2 Матеріальні та теплові баланси. Основи енергозберігаючої теплотехнології

Структура рівнянь і розрахунків матеріальних балансів високотемпературних теплотехнологічних процесів: постановка задач, їх математичне формулювання, методи розв'язання.

Теплові баланси робочого простору, його окремих зон, інших елементів високотемпературної теплотехнологічної установки. Питомі витрати палива та енерговитрати на процес.

Шляхи зниження енерговитрат на високотемпературний теплотехнологічний процес. Зниження енергетичних відходів на базі оптимізації параметрів процесу, теплової ізоляції та герметизації робочого простору. Регенерація теплових горючих відходів: енергетичний ефект регенерації; термодинамічні та енергоекономічні границі її розвитку; теплові схеми; регенеративні пристрої.

Енергетичні відходи високотемпературних теплотехнологічних процесів як вторинні енергоресурси

промисловості. Схеми та установки зовнішнього технологічного та енергетичного використання теплоти відхідних газів; схеми комплексного використання теплоти відхідних газів. Схеми та пристрої використання теплоти технологічних продуктів та відходів, охолоджуючих елементів установок. Коефіцієнти ефективності використання палива та енергії у високотемпературних теплотехнологічних установках.

2.3 Теплотехнічні основи високотемпературної теплотехнології

Схема тепломасообміну у робочому просторі високотемпературної теплотехнологічної установки; зовнішній і внутрішній тепломасообмін. Радіаційний, конвективний та радіаційно-конвективний режими зовнішнього теплообміну, аеродинамічні умови, методи розрахунку, область використання. Методи розрахунку зовнішнього масообміну у робочому просторі.

Тривалість теплової обробки технологічного матеріалу та виробів. Тривалість нагріву та плавлення термічно тонких тіл. Тривалість нагріву термічно масових тіл; аналітичні, чисельні та наближені методи розрахунку. Режими нагріву термічно масивних тіл.

Розміри робочого простору. Шляхи інтенсифікації теплотехнологічного процесу; відбір раціональних теплотехнічних умов у робочому просторі. Основні вимоги, що висуваються до організації процесу генерації теплоти та шляхи їх задоволення; паливоспалювальні пристрої високотемпературних теплотехнологічних установок; техніка генерації теплоти за рахунок електроенергії.

2.4 Математичне моделювання та проектування високотемпературних теплотехнологічних установок

Задачі математичного моделювання. Етапи математичного моделювання роботи високотемпературної теплотехнологічної установки. Приклади математичного моделювання ВТУ. Проектування та оптимізація проектних рішень.

3 ЗАВДАННЯ НА КОНТРОЛЬНУ РОБОТУ 1

Контрольні запитання

- 1 Що являють собою високотемпературні теплотехнологічні системи і їх відмінність від середньо- і низькотемпературних?
- 2 Наведіть визначення понять: теплотехнологія, теплотехнологічний процес, теплотехнологічний реактор, теплотехнологічна установка.
- 3 Що являє собою високотемпературна установка (реактор) (ВТУ) і як вони поділяються за видом використовуваної енергії?
- 4 В основі яких виробництв найбільш поширеними є високотемпературні теплотехнологічні процеси (ВТП)?
- 5 Чому енергозберігаюча політика має особливо важливе значення для галузей промисловості, що засновані на теплотехнології?
- 6 Що собою являє безвідходна теплотехнологія і на яких принципах вона базується?
- 7 Поясніть екологічні проблеми високотемпературної теплотехнології.
- 8 Наведіть структурну схему ВТУ і поясніть призначення її основних елементів.
- 9 Які теплотехнічні принципи покладені в основу класифікації ВТП і установок?
- 10 Які процеси розрізняють серед перетворювань вихідних матеріалів у технологічні продукти?
- 11 Наведіть класифікацію і стислу характеристику реакторів ВТУ.
- 12 Які в загальному випадку можна виділити зони і камери у багатозонному і багатокамерному реакторі?
- 13 Що являє собою теплова схема ВТУ і в чому її відмінність від теплотехнічної схеми?
- 14 Які теплові відходи мають теплотехнологічні установки з елементарною тепловою схемою і як вони можуть бути використані?
- 15 Назвіть основні елементи конструктивної схеми теплотехнологічного реактора і вимоги, що до них висувають.

16 Вогнетривні та ізоляційні матеріали використовують у ВТУ та вимоги, що висувають до них.

17 За якими ознаками класифікують ВТУ?

18 Поясніть фізико-хімічні особливості процесів нагріву виробів.

19 Що являє собою процес випалу і які розрізняють види випалу?

20 Що являють собою плавильні процеси? Наведіть їх класифікацію.

21 В яких випадках складаються матеріальні баланси ВТП? Наведіть рівняння матеріального балансу компонентів у загальному вигляді.

22 Наведіть рівняння матеріальних балансів компонентів топкового і технологічного процесів, а також рівняння матеріальних балансів речовин і хімічних елементів.

23 Яка мета складання теплового балансу ВТУ?

24 Наведіть і поясніть рівняння теплового балансу теплотехнологічного реактора в загальному вигляді.

25 Користуючись даними теплового балансу, як визначити питому витрату палива „в”?

26 Як визначаються сумарні та зведені питомі витрати первинного палива на технологічний процес у ВТУ?

27 Які заходи необхідно застосовувати для зниження питомих витрат палива у ВТУ?

28 Що називається вторинними енергоресурсами і як вони класифікуються?

29 Які напрямки і перспективи використання вторинних енергоресурсів (ВЕР)?

30 Які показники роботи ВТУ характеризують ефективність використання палива і енергії?

Таблиця 3.1 – Варіанти питань до контрольної роботи 1

Завдання	Остання цифра шифру									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Номери	2	3	4	5	6	7	8	9	14	1
контрольних	12	13	20	15	11	16	18	17	19	10
питань	29	28	27	26	21	22	23	24	25	30

Задача 3.1

Камерна ковальська піч працює на природному газі. Визначити витрату повітря, кількість і склад продуктів згоряння палива при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1$ і при заданому α . Розрахунок перевірити складанням матеріального балансу при заданому α і визначити калориметричну температуру горіння палива при температурах підігріву повітря $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $t_{нов}\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вихідні дані наведені в таблицях 3.2 і 3.3. Родовище природного газу взяти із таблиці 3.2 за списком у групі.

Таблиця 3.2 – Родовища природного газу

Но- мер за спис- ком	Родовище	Склад палива						
		CH_4	C_2H	C_3H	C_4H_1	C_5H_{12}	CO_2	N_2
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Вой-Вожське	88,6	1,0	0,20	0,09	0,06	0,05	10,0
2	Седь- Іольське	87,3	2,3	1,00	0,30	0,05	0,05	9,0
3	Нібельське	87,0	2,3	0,25	0,05	0,03	0,07	10,3
4	Нижньо- Омринське	84,0	4,3	0,80	0,40	0,15	0,15	10,2
5	Східно- Рибушанське	93,3	0,7	0,41	0,25	0,85	0,85	3,64
6	Абрамовське	97,0	0,2	0,06	0,03	0,01	0,1	2,6
7	Генеральське	83,5	4,3	1,9	1,0	0,5	0,2	8,6
8	Степновське	95,5	1,9	0,7	0,4	0,8	0,2	0,5
9	Канівське	88,8	4,8	1,4	0,5	1,8	0,2	2,5
10	Челбасське	89,8	5,1	1,14	0,16	1,3	0,6	1,9
11	Тахта- Кагультинське	98,2	0,3	0,08	0,02	-	0,1	1,3
12	Чуельське	95,5	0,8	0,4	0,08	-	0,22	3,0
13	Тунгорське	86,9	4,4	1,1	1,0	0,6	4,8	1,2
14	Зачепилівське	87,1	5,9	2,1	1,2	3,2	0,1	0,4

Продовження табл. 3.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
15	Більче-Волицьке	98,2	0,22	0,13	0,06	0,09	0,2	1,1
16	Дашавське	98,3	0,3	0,12	0,15	0,03	0,1	1,0
17	Косовське	98,5	0,18	0,1	0,12	-	0,1	1,0
18	Карадагське	97,0	1,3	0,8	0,35	0,15	0,4	-
19	Узенське	94,0	1,5	0,7	0,2	0,5	0,1	3,0
20	Колотовське	88,3	2,6	2,6	1,2	4,7	0,6	-
21	Арчединське	95,3	1,9	0,6	0,3	0,6	0,2	1,1
22	Сабо	89,4	3,2	1,0	2,4	0,3	1,4	2,3
23	Колендо	91,6	1,9	0,9	0,7	0,3	2,8	1,8
24	Північно-Сургутське	87,6	2,8	2,3	1,9	4,8	0,6	-
25	Локосовське	85,5	2,4	4,3	3,2	3,5	1,1	-

Таблиця 3.3

Величини	Передостання цифра шифру									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
α	1,1	1,08	1,07	1,05	1,1	1,06	1,09	1,08	1,07	1,1
$t''_{нов.}$	320	400	380	200	330	250	280	300	350	340

Задача 3.2

Камерна піч призначена для нагріву заготовок під кування, опалюється природним газом. Продуктивність печі $G = 750 \frac{\text{кг}}{\text{год}}$. Розміри робочого простору печі $1,6 \times 1,7 \times 1,1 \text{ м}^3$. Метал нагрівається до кінцевої температури $t_m^k = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$. Скласти тепловий баланс і розрахувати основні теплотехнічні показники роботи печі. Яка буде економія палива, якщо на печі установити рекуператор для підігріву повітря до

? Вихідні дані згоряння палива і температуру повітря

взяти за своїм варіантом із розрахунків задачі 3.1.

4 МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ 1

Матеріальний розрахунок горіння палива

Природний газ є сумішшю горючих і негорючих газів і задається об'ємними частками.

Склад заданого палива занести в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1

CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	CO_2	N_2

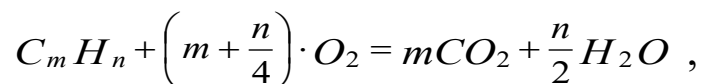
Розрахунок горіння палива є необхідною складовою частиною теплотехнічного розрахунку високотемпературних установок.

Унаслідок розрахунку горіння палива визначають:

- кількість необхідного для горіння повітря звичайного складу або збагаченого киснем;
- кількість і склад продуктів згоряння;
- температуру горіння.

При розрахунку горіння палива витрату повітря, кількість і склад продуктів згоряння визначають на підставі стехіометричних співвідношень горючих компонентів.

У загальному випадку для вуглеводів це співвідношення має вигляд



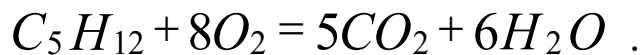
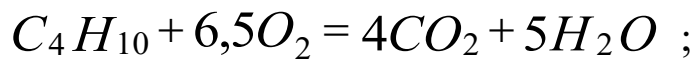
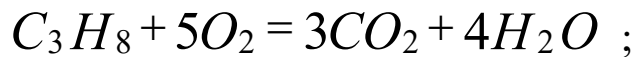
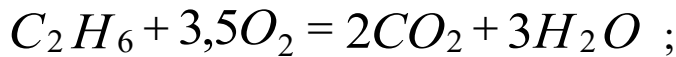
де $\left(m + \frac{n}{4}\right)$ – кількість кисню O_2, M^3 , що потрібне для згоряння

1 M^3 кожного компонента $C_m H_n$;

m – кількість CO_2, M^3 , що утворюється при згорянні 1 M^3 кожного компонента $C_m H_n$;

$\frac{n}{2}$ – кількість водяної пари H_2O , m^3 , що утворюється при згорянні 1 m^3 кожного компонента C_mH_n .

На підставі наведеного



Кількість азоту N_2 , m^3 , у повітрі, що бере участь у згорянні 1 m^3 кожного компонента C_mH_n , при $\alpha = 1$ визначається рівнянням

$$\left(m + \frac{n}{4}\right) \cdot \frac{79}{21}.$$

Кількість кисню O_2 у продуктах згорання при горінні палива з $\alpha = 1$ буде дорівнювати нулю, а при заданому α – добутку $(\alpha - 1)$ на кількість кисню у повітрі при $\alpha = 1$.

Кількість CO_2 , m^3 , у продуктах згорання буде дорівнювати сумі його при згорянні палива і кількості у паливі.

Кількість азоту N_2 , m^3 , у продуктах згорання буде дорівнювати сумі його у повітрі та у паливі.

Розрахунок горіння за наведеною методикою для простоти проводиться на 100 m^3 заданого складу природного газу спочатку з теоретично необхідною кількістю повітря при $\alpha = 1$, а потім з α , що задане (таблиця 4.2).

Оскільки згідно з законом збереження речовин маса тіл, що вступають у реакцію, дорівнює масі тіл, що отримують внаслідок реакції, правильність розрахунку можна перевірити за матеріальним балансом. Баланс завжди складають в одиницях

маси, оскільки об'єми вихідних речовин і продуктів згоряння можуть не дорівнювати одне одному.

Таблиця 4.2 – Результати розрахунків горіння палива

Паливо			Повітря			Утворені продукти згоряння				
складові	вміст, %	кількість, м ³	O ₂	N ₂	разом, м ³	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	разом
CH ₄										
C ₂ H ₆										
C ₃ H ₈										
C ₄ H ₁₀										
C ₅ H ₁₂										
CO ₂										
N ₂										
α = 1	Σ	100	100							
	%	-	-	21	79	100				100
α =	Σ	-	-							
	%	-	-	21	79	100				100

Матеріальний баланс горіння палива

Надійшло 100 м³ газу, Одержано __ м³ продуктів згоряння
у тому числі, кг: у тому числі, кг:

$$CH_4 = \mu_{CH_4} \cdot V_{CH_4} =$$

$$CO_2 = \mu_{CO_2} \cdot V_{CO_2} =$$

$$C_2H_6 =$$

$$O_2 =$$

$$C_3H_8 =$$

$$H_2O =$$

$$C_4H_{10} =$$

$$N_2 =$$

$$C_5H_{12} =$$

Разом _____ кг.

$$CO_2 =$$

$$N_2 =$$

Повітря _____ м³,

у тому числі, кг:

$$O_2 =$$

$$N_2 =$$

Разом _____ кг.

Визначають похибку розрахунку в кілограмах.

Кількість повітря для спалювання 1 м^3 палива при заданому α дорівнює

$$V_{нов} = V_{O_2} + V_{N_2}.$$

Об'єм продуктів згоряння при спалюванні 1 м^3 палива

$$V = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{O_2} + V_{N_2}.$$

Об'ємні частки продуктів згоряння:

$$r_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{ПГ}}; \quad r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{ПГ}};$$

$$r_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_{ПГ}}; \quad r_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_{ПГ}}.$$

$$\sum r_i = r_{CO_2} + r_{H_2O} + r_{O_2} + r_{N_2}.$$

Теплота згоряння палива, $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$,

$$Q_H^p = 126,5 \cdot CO + 107,7 \cdot H_2 + 358,2 \cdot CH_4 + 635 \cdot C_2H_6 + 911 \cdot C_3H_8 + 1186 \cdot C_4H_{10} + 1461 \cdot C_5H_{12} + 234 \cdot H_2S.$$

Визначення калориметричної температури горіння палива

У відповідності з завданням визначають спочатку калориметричну температуру горіння при заданому α і при температурі повітря $t_{нов} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ за формулою

$$t_k = \frac{Q_H^P}{V_{ПГ} \cdot C'_{ПГ}}.$$

У випадку підігріву повітря

$$t_k = \frac{Q_H^P + V_{ПОВ} \cdot C'_{ПОВ} \cdot t_{ПОВ}}{V_{ПГ} \cdot C'_{ПГ}}.$$

Теплоємність продуктів згорання визначається як сума добутоків теплоємностей окремих компонентів на їх об'ємні частки в продуктах згорання, $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \text{К}}$,

$$C'_{ПГ} = C'_{CO_2} \cdot r_{CO_2} + C'_{H_2O} \cdot r_{H_2O} + C'_{O_2} \cdot r_{O_2} + C'_{N_2} \cdot r_{N_2}.$$

Оскільки теплоємність газів є функцією температури, то при визначенні калориметричної температури згорання палива її знаходять користуючись методом послідовного наближення.

При розрахунках калориметричної температури зручно користуватися ентальпією $h_{ПГ} = c \cdot t_k$, кДж/м³, яку визначають як і теплоємність продуктів згорання.

$$h_{ПГ} = h_{CO_2} \cdot r_{CO_2} + h_{H_2O} \cdot r_{H_2O} + h_{O_2} \cdot r_{O_2} + h_{N_2} \cdot r_{N_2}.$$

Ентальпія продуктів згорання при $t_{нов} = 0^{\circ}\text{C}$

$$h_0 = C'_{ПГ} \cdot t_k = \frac{Q_H^P}{V_{ПГ}}.$$

У випадку підігріву повітря

$$h_0 = \frac{Q_H^P + V_{ПОВ} \cdot C'_{ПОВ} \cdot t_{ПОВ}}{V_{ПГ}}.$$

Для знаходження калориметричної температури t_k згоряння палива необхідно задати можливі калориметричні температури у межах $t_{\delta} - t_m = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ і знайти при цих температурах ентальпії продуктів згоряння h_{δ} і h_m . При цьому h_0 повинна бути більше h_m і менше h_{δ} тобто $h_m < h_0 < h_{\delta}$.

За цих умов калориметрична температура визначається рівнянням

$$t_k = t_m + \frac{h_0 - h_m}{h_{\delta} - h_m} \cdot 100 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Значення теплоємностей для повітря і газів наведено у додатку А, а ентальпії – у додатку Б в залежності від температури.

Тепловий баланс робочого простору печі

Прихід теплоти:

1) теплота від згоряння палива, Вт,

$$Q_{\text{ХП}} = V' \cdot Q_H^P;$$

2) фізична теплота повітря і газу у випадку, коли підігрів їх непередбачено дорівнює нулю,

$$Q_{\phi}^{\text{нов}} = Q_{\phi}^n = 0;$$

3) теплота екзотермічних реакцій, приймаючи, що чад металу складає 1 %, Вт,

$$Q_{\text{екз}} = \frac{5650 \cdot G \cdot 0,01 \cdot 10^3}{3600}.$$

Витрата теплоти:

1 Теплота, що витрачається на нагрів металу, Вт,

$$Q_{III} = \frac{G}{3600} \cdot C_M \cdot (t_M^K - t_M^{ноч}),$$

де C_M – середня теплоємність металу, додаток В, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

2 Теплота, що виноситься з димовими газами із робочого простору печі, Вт,

$$Q_{n2} = B \cdot V_{n2} \cdot C_{n2} \cdot t_{n2}.$$

Середню теплоємність газів при t_{n2} можна знайти користуючись додатком А

$$C'_{n2} = r_{CO_2} \cdot CO_2 + r_{H_2O} \cdot H_2O + r_{O_2} \cdot O_2 + r_{N_2} \cdot N_2.$$

3 Оскільки у складі димових газів CO і H_2 відсутні, втрата теплоти від хімічної неповноти згоряння буде дорівнювати нулю $Q_{xH} = 0$.

4 Втрати теплоти теплопровідністю через кладку.

У розглядуваній камерній печі склепіння виконано арочним із шамоту завтовшки $S_{ш} = 0,23 \text{ м}$.

Стіни і під печі мають товщину $S = 0,345 \text{ м}$, із якої шар шамоту складає $S_{ш} = 0,23 \text{ м}$ і теплова ізоляція (діатомітова цегла) $S_{\partial} = 0,115 \text{ м}$. Садочне вікно займає передню стінку і наполовину закрито водоохолоджувальною заслінкою.

Втрати теплоти через склепіння

Для простоти розрахунку прийняти склепіння плоским, а температуру внутрішньої поверхні $t_{кл} = 1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура навколишнього повітря $t_{нов} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$, середня температура вогнетривного матеріалу склепіння дорівнює $650 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Коефіцієнт теплопровідності шамоту при цій температурі, Вт/(м·К),

$$\lambda_{ш} = 0,835 + 0,58 \cdot t \cdot 10^{-3}.$$

Втрати через склепіння печі складуть, Вт,

$$Q_{ск} = \frac{t_{кл} - t_{нов}}{\frac{S_{ш}}{\lambda_{ш}} + \frac{1}{\alpha}} \cdot F_{ск}^{306},$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище,

$$\alpha = 11,63 \frac{Вт}{м^2 \cdot К};$$

$F_{ск}^{306}$ – зовнішня площа склепіння печі,

$$F_{ск}^{306} = B \cdot L,$$

де B – зовнішня ширина печі, м,

$$B = b + 2(S_{ш} + S_{\partial});$$

L – зовнішня довжина печі, м,

$$L = l + 2 \cdot (S_{ш} + S_{\partial}).$$

Втрати теплоти через стіни і під печі

Зовнішня поверхня стін і поду (передня стінка виключається, тому що вона зайнята завантажувальним вікном), $м^2$,

$$F_{306} = 1 \cdot L \cdot B + 2 \cdot L \cdot H + 1 \cdot H \cdot B,$$

де H – висота печі, м,

$$H = h + 2S_{ш} + S_{\partial}.$$

Приймаючи в першому наближенні розподіл температури у двошаровій стіні прямолінійним, знаходять орієнтовну середню температуру шарів:

температура на межі шарів, °С,

$$t' = \frac{t_{кл} + t_{нов}}{2};$$

середня температура шару шамоту, °С,

$$t_{ш} = \frac{t_{кл} + t'}{2};$$

середня температура шару діатоміту, °С

$$t_{д} = \frac{t' + t_{нов}}{2}.$$

Коефіцієнт теплопровідності шамоту і діатоміту знаходимо користуючись залежностями, Вт/(м·К),

$$\lambda_{ш} = 0,835 + 0,58 \cdot t \cdot 10^{-3},$$

$$\lambda_{д} = 0,145 + 0,314 \cdot t \cdot 10^{-3}.$$

Втрати теплоти через стіни і під печі, Вт,

$$Q_{ст} = \frac{t_{кл} - t_{нов}}{\frac{S_{ш}}{\lambda_{ш}} + \frac{S_{д}}{\lambda_{д}} + \frac{1}{\alpha}} \cdot F_{зов}.$$

Правильність прийнятих середніх значень температур шарів кладки перевіряються рівняннями

$$t_{ш} = t_{кл} - \frac{Q_{ст}}{2 \cdot F_{зов}} \cdot \frac{S_{ш}}{\lambda_{ш}};$$

$$t_{\partial} = t_{\text{кл}} - \frac{Q_{\text{ст}}}{2 \cdot F_{\text{зовн}}} \cdot \left(\frac{2 \cdot S_{\text{ш}}}{\lambda_{\text{ш}}} + \frac{S_{\partial}}{\lambda_{\partial}} \right).$$

При цих температурах визначаються $\lambda_{\text{ш}}$, λ_{∂} і втрати теплоти через стіни і під печі, Вт.

Повні втрати теплоти теплопровідністю через кладку складуть, Вт,

$$Q_{\text{кл}} = Q_{\text{скл}} + Q_{\text{ст}}.$$

5 Втрати теплоти випромінюванням через відкрите вікно, Вт,

$$Q_{\text{випр}} = C_0 \cdot \left(\frac{t_{\text{печи}} + 273}{100} \right)^4 \cdot F_{\text{в}} \cdot \Phi \cdot \tau,$$

де C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, $C_0 = 5,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$;

$F_{\text{в}}$ – площа відкритого вікна, м^2 .

Якщо садочне вікно наполовину закрито заслінкою, то площа отвору, через яке проходить випромінювання, буде дорівнювати, м^2 ,

$$F_{\text{в}} = \frac{b \cdot h}{2};$$

$t_{\text{печи}}$ – середня температура печі, $^{\circ}\text{C}$.

τ – доля часу, коли вікно відкрито, вважаючи, що вікно постійно відкрите, будемо мати $\tau = 1$;

Φ – коефіцієнт діафрагмування, який залежить від відносних геометричних розмірів вікна, знаходиться з рисунка 1 додатка Е.

Згідно з рисунком Е.1 при відношенні

$$a : b = \frac{S_{\text{ш}} + S_{\partial}}{b} \quad \text{і} \quad a : l = \frac{S_{\text{ш}} + S_{\partial}}{0,5h}$$

знаходиться коефіцієнт діафрагмування Φ .

6 У печі, що розглядається, транспортуючі прилади відсутні, тому втрати теплоти на їх нагрівання дорівнюють нулю $Q_{тр} = 0$.

7 Тепло, що уноситься водою, що охолоджує заслінку садочного вікна, Вт,

$$Q_{охол} = q_e \cdot F_e,$$

де q_e – густина теплового потоку, яка для заслінки завантажувального вікна без ізоляції дорівнює $q_e = 145 \cdot 10^3$ Вт/м².

Витрату палива B' визначають із рівняння теплового балансу:

$$Q_{xn} + Q_{\phi}^{нов} + Q_{екз} = Q_{тп} + Q_{гг} + Q_{хн} + Q_{кл} + Q_{випр} + Q_{тр} + Q_{охол}.$$

Розрахункові дані зводяться до таблиці теплового балансу (таблиця 4.3).

Таблиця 4.3 – Таблиця теплового балансу

Прибуткові статті	Вт	%	Витратні статті	Вт	%
1 Тепло, що одержана при спалюванні палива			1 Тепло, що витрачена на нагрівання металу		
2 Тепло екзотермічних реакцій			2 Тепло, що відноситься з димовими газами		
Разом			3 Втрати теплоти теплопровідністю через кладку		
			4 Втрати теплоти випромінюванням через відкрите вікно		
			5 Втрати теплоти з охолоджувальною водою		
			Разом		

Теплотехнічні характеристики роботи печі при $t_{нов} = 0$.

Коефіцієнт використання теплоти

$$\eta'_{квт} = \frac{Q_{xn} - Q_{нг}}{Q_{xn}}.$$

Втрати холостого ходу, Вт,

$$Q_{xx} = Q_{кл} + Q_{випр} + Q_{охол}.$$

Кількість теплоти, що витрачається на нагрівання 1 кг металу, Дж/кг,

$$r = \frac{Q_{mn} - Q_{екз}}{G} \cdot \frac{1}{3600}.$$

Питома витрата теплоти, Дж/кг,

$$q' = \frac{Q_{xn}}{G} \cdot \frac{1}{3600}.$$

Коефіцієнт корисної дії печі

$$\eta'_{ккд} = \frac{Q_{mn}}{Q_{xn} + Q_{екз}}.$$

Теплотехнічні характеристики печі у випадку, коли на печі установлений рекуператор для підігріву повітря до температури $t''_{нов}$ за рахунок теплоти димових газів, що відходять із печі.

Теплота, що вноситься підігрітим повітрям, Вт,

$$Q_{ф}^{нов} = B'' \cdot V_{нов} \cdot C'_{нов} \cdot t''_{нов}.$$

Витрати палива B'' у даному випадку визначаються із теплового балансу печі, до якого входить теплота, що вноситься з підігрітим повітрям у прибуткові статті, останні статті балансу залишаються незмінними.

Відносна економія палива визначається за формулою

$$\frac{B' - B''}{B'} \cdot 100\%.$$

Коефіцієнт використання теплоти

$$\eta''_{\text{квт}} = \frac{Q_{xn} + Q_{\phi}^{\text{нов}} - Q_{нз}}{Q_{xn}}.$$

Питома витрата теплоти, Дж/кг,

$$q'' = \frac{Q_{xn}}{G} = \frac{Q_n^p \cdot B''}{G}.$$

Коефіцієнт корисної дії печі

$$\eta''_{\text{ккд}} = \frac{Q_{mn}}{Q_n^p \cdot B'' + Q_{\phi}^{\text{нов}} + Q_{екз}}.$$

Висновки:

Установлення на печі рекуператора для підігріву повітря за рахунок димових газів, що відходять із печі, є виправданим.

5 ЗАВДАННЯ НА КОНТРОЛЬНУ РОБОТУ 2

Контрольні запитання

1 Відобразіть і охарактеризуйте загальну схему теплообміну в робочому просторі ВТУ.

2 Як умовно розподіляють процес теплообміну в робочому просторі (РП) ВТУ?

3 Назвіть і охарактеризуйте режими теплообміну в РП ВТУ.

4 За якими законами визначається тепловий потік, який сприймається матеріалом, що нагрівається, при променистому і конвективному теплообміні?

5 На які три види розподіляється зовнішній радіаційний теплообмін? Охарактеризуйте їх.

6 Особливості рівномірно розподіленого радіаційного режиму зовнішнього теплообміну.

7 Особливості направленою прямого радіаційного режиму зовнішнього теплообміну.

8 Особливості направленою непрямого радіаційного режиму зовнішнього теплообміну.

9 Область використання конвективного теплообміну в ВТУ. Які факти є визначальними при організації конвективного теплообміну?

10 В яких випадках проводиться рециркуляція димових газів і в чому її сутність? Що таке кратність рециркуляції?

11 Поясніть сутність внутрішньої і зовнішньої рециркуляції димових газів.

12 Як визначається питомий тепловий потік при умовах сумісного променево-конвективного теплообміну?

13 Особливості теплообміну у ВТУ з щільним фільтрованим шаром матеріалу.

14 Особливості теплообміну у ВТУ з киплячим шаром матеріалу.

15 Особливості теплообміну у ВТУ з завислим станом матеріалу.

16 Чому інтенсивність теплообміну у ВТУ з киплячим шаром суттєво вище, ніж у ВТУ з щільним фільтрованим шаром матеріалу?

17 Що таке швидкість початку псевдозрідження і швидкість витання частинок? Як вони визначаються?

18 Як здійснюється розрахунок зовнішнього масообміну у робочому просторі ВТУ? Наведіть приклади.

19 Які тіла, що нагріваються, є термічно тонкими (ТТТ) або термічномасивними (ТМТ)? Як визначається масивність?

20 Як визначається швидкість нагрівання ТТТ?

21 Як виконується розрахунок нагрівання ТМТ у робочому просторі ВТУ з постійною температурою?

22 Як виконується розрахунок нагрівання ТМТ при постійній густині теплового потоку через його поверхню?

23 Як виконується розрахунок нагрівання тіл за методом «тонких» виробів з поправкою на масивність?

24 В яких випадках використовують одно-, дво-, три- та багатоступеневі режими обробки матеріалу?

25 Які шляхи інтенсифікації теплотехнологічного процесу і підвищення економічності ВТУ?

26 Які основні вимоги висуваються до організації процесів генерації теплоти в ВТУ?

27 Які паливоспалювальні пристрої використовуються в ВТУ, що працюють на газі? Основні вимоги до них.

28 Які паливоспалювальні пристрої використовуються в ВТУ, що працюють на рідинному паливі? Основні вимоги до них.

29 Особливості та ефективність використання твердого палива в ВТУ.

30 Яку перевагу мають ВТУ з електричними джерелами генерації теплоти у порівнянні з паливними?

31 Які існують засоби перетворення електричної енергії на теплоту? Область їх використання.

32 Яка сутність фізичного і математичного моделювання? В яких випадках вони використовуються?

Таблиця 5.1 – Таблиця варіантів питань до контрольної роботи 2

Завдання	Остання цифра шифру									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Номери	11	7	2	6	10	4	3	5	9	11
контрольних	22	18	13	17	21	15	14	16	20	19
питань	32	27	21	26	30	24	23	25	29	28

Задача 5.1

У паливній камерній печі продуктивністю G , кг/год, нагріваються металеві заготовки довжиною l , діаметром d або зі стороною квадрата a . Початкова температура їх $t'_m = 20^\circ\text{C}$, кінцева $t''_m = 1100^\circ\text{C}$. Температура газів у печі 1200°C . Заготовки розташовані на поді печі суцільним шаром. Ступінь чорноти їх $\varepsilon_m = 0,8$.

Визначити приведений коефіцієнт випромінювання $C_{гкм}$ і коефіцієнт тепловіддачі α до сталевих заготовок на початку і в кінці нагрівання, а також тепловий потік газів до металу.

Розміри робочого простору печі розрахувати при напруженості активного поду P , кг/(м²·год), і коефіцієнти

завантаженості $m = 0,7$. Вихідні дані вибрати із таблиці 5.2. Склад продуктів згоряння газу прийняти із задачі 3.1 контрольної роботи 1.

Таблиця 5.2

Величина	Остання цифра шифру									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
G , кДж/ год	600	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100
P , кг/ м ² ·год	300	350	400	450	500	550	450	500	550	600
d , мм	-	100	-	120	-	130	-	140	-	150
a , мм	150	-	120	-	130	-	140	-	100	-
l , мм	1050	1000	950	1000	900	1000	1030	1050	980	900

Задача 5.2

Визначити тривалість нагрівання сталевих заготовок (таблиця 5.3) в паливній камерній печі, яка працює з постійною температурою $t_{печ}, ^\circ C$. Температура металу в кінці нагрівання $t''_m, ^\circ C$, початкова $t'_m, ^\circ C$. Розміри і розташування заготовок на поді печі, приведений коефіцієнт випромінювання C_n , температури печі і заготовок прийняти із задачі 5.1.

Нагрівання заготовок несиметричне, коефіцієнт несиметричності для циліндричних заготовок $\mu = 0,8$, для прямокутних $\mu = 1$.

Таблиця 5.3

Величин а	Передостання цифра шифру									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Сталь	08кп	08	20	40	У8	У8'	У12	40	20	У8

6 МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ 2

Для розв'язання задачі 5.1 визначають геометричні характеристики робочого простору та ємність печі.

Основними розмірами робочого простору печі є довжина L , м; ширина B , м, поду печі і висота H , м, робочого простору.

Ці величини знаходять, користуючись залежністю

$$P = \frac{G}{F_n^{акт}},$$

де $F_n^{акт}$ – площа поду, яку займають заготівки, м²;
 G – продуктивність печі, кг/год;
 P – напруженість активного поду, кг/(м²·год).

Звідки

$$F_n^{акт} = \frac{G}{P}.$$

У свою чергу $F_n^{акт} = m \cdot F_n$,

де F_n – загальна площа поду, м²;
 m – коефіцієнт завантаженості поду.

Звідки

$$F_n = \frac{F_n^{акт}}{m}.$$

Ширину поду печі визначають за довжиною l , м, заготівок і числом рядів Z заготівок, що укладені на поді. У даному випадку приймаємо $Z=1$.

$$B = z \cdot l + \Delta(z+1),$$

де Δ – проміжок між торцями заготівок і стінами печі,
 $\Delta = 0,25 \dots 0,3$.

Довжина печі, м,

$$L = \frac{F_n}{B}.$$

Висота склепіння над подом визначається рівнянням, м,

$$H = (A + 0,05) \cdot t_n \cdot 10^{-3},$$

де A – коефіцієнт, який дорівнює $0,5 \div 0,55$ для печі, де температура газів менше 900 °С, і $0,65$, де температура газів більше 1500 °С (проміжні значення визначаються інтерполяцією).

Для визначення маси заготовок, що нагріваються, ϵ (ємність або садка печі), кг, знаходять масу однієї заготовки (у залежності, які заготовки завантажують у піч)

$$g = a \cdot b \cdot l \cdot \rho \quad \text{або} \quad g = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l \cdot \rho,$$

де a, b – висота і ширина заготовки, м;

l – довжина заготовки, м;

ρ – питома маса матеріалу заготовки, кг/м^3 (приймаємо $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$);

d – діаметр заготовки, м.

Кількість заготовок, що завантажені в піч при розташуванні їх суцільним шаром,

$$n = \frac{L}{b(\text{або } d)} \cdot z,$$

де z – кількість рядів ($z=1$).

Ємність печі буде дорівнювати, кг,

$$\epsilon = n \cdot g.$$

Визначаємо геометричні параметри випромінювання.

Випромінююча поверхня обмуровки (кладки) робочого простору печі, м^2 ,

$$F_{\text{кл}} = 2 \cdot B \cdot H + 2 \cdot L \cdot H + B \cdot L.$$

Променевосприймальна поверхня заготовок F_M дорівнює активній площі поду, м^2 ,

$$F_M = F_n^{\text{акт}} = \frac{G}{P}.$$

Кутовий коефіцієнт випромінювання від кладки на заготівки для даної системи

$$\varphi_{км} = \frac{F_M}{F_{кл}}.$$

Об'єм заготовок, що нагріваються, м³,

$$V_M = \frac{G}{\rho}.$$

Об'єм робочого простору печі, м³,

$$V_{pn} = B \cdot L \cdot H.$$

Об'єм робочого простору печі, що заповнений газом, м³,

$$V_z = V_{pn} - V_M.$$

Ефективна товщина випромінювального газового шару, м,

$$S_{ef} = 3,6 \cdot \frac{V_z}{F_{cm} + F_n}.$$

де F_{cm} і F_n – площа поверхонь стін і поду, м².

Приведений коефіцієнт випромінювання системи газ-кладка-метал $C_{ГКМ}$, Вт/(м²·К⁴), знаходиться з рівняння

$$C_{ГКМ} = C_0 \cdot \varepsilon_z \cdot \varepsilon_M \cdot \frac{\varphi_{км} \cdot (1 - \varepsilon_z) + 1}{\varphi_{км} \cdot (1 - \varepsilon_z) \cdot [\varepsilon_M + \varepsilon_z \cdot (1 - \varepsilon_M)] + \varepsilon_z},$$

де C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, який дорівнює 5,7 Вт/(м²·К⁴);

ε_z – ступінь чорноти газів;

ε_M – ступінь чорноти металу, дорівнює – 0,8;

$\varphi_{км}$ – кутовий коефіцієнт випромінювання від кладки на заготівки.

Вважаючи, що газова атмосфера в печі вільна від механічних завесів, ступінь чорноти газів визначається із рівняння

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{CO_2} + \beta \cdot \varepsilon_{H_2O},$$

де ε_{CO_2} – ступінь чорноти вуглекислого газу;

ε_{H_2O} – ступінь чорноти водяної пари;

β – поправковий коефіцієнт.

Ці величини знаходять користуючись номограмами (рисунки 2 – 4 додатка Ж).

Парціальний тиск триатомних газів, кПа,

$$P_{CO_2} = r_{CO_2} \cdot P_n; \quad P_{H_2O} = r_{H_2O} \cdot P_n,$$

де r_{CO_2} і r_{H_2O} – об'ємні частки CO_2 і H_2O у продуктах згоряння;

P_n – тиск у робочому просторі печі, кПа ($P_n = 98,1$ кПа).

Визначають добуток парціального тиску CO_2 і H_2O на ефективну довжину променя, кН·м,

$$P_{CO_2} \cdot S_{ef} \quad \text{і} \quad P_{H_2O} \cdot S_{ef}.$$

Користуючись номограмами (рисунки 2 – 4 додатка Ж), визначаємо при $t_2 = 1200^\circ\text{C}$ ε_{CO_2} , ε_{H_2O} , поправковий коефіцієнт β , а потім ε_2 .

На підставі знайдених величин визначають приведений коефіцієнт випромінювання $C_{ГКМ}$, Вт/(м²·К).

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням α_s , Вт/(м²·К), до сталевих заготовок визначається на початку і в кінці нагрівання рівнянням

$$\alpha = \frac{C_{ГКМ} \cdot \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_M}{100} \right)^4 \right]}{T_2 - T_M}.$$

Тепловий потік від газів до сталевих заготовок визначається також на початку і в кінці нагрівання рівнянням, Вт,

$$Q = C_{ГКМ} \cdot F_M \cdot \left[\left(\frac{T_z}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_M}{100} \right)^4 \right].$$

Методичні вказівки до розв'язання задачі 5.2

При розрахунку тривалості нагрівання заготовок у печах користуються поняттям «термічно тонкі тіла» і «термічно масивні тіла». Область тонких і масивних тіл визначається значеннями критеріїв Біо і Старка.

Тіла належать до термічно тонких при $Bi \leq 0,25$; $Sk < 0,15$, а до термічно масивних – при $Bi \geq 0,5$; $Sk > 0,15$.

Критерій Біо визначається за формулою

$$Bi = \frac{\alpha \cdot S}{\lambda}.$$

Критерій Старка

$$Sk = \frac{C_{np} \cdot S}{100 \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{T_{печ}}{100} \right)^3,$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К);

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м·К);

C_{np} – приведений коефіцієнт випромінювання, Вт/(м²·К⁴);

$T_{печ}$ – температура печі;

S – характерний розмір (розрахункова прогрівана товщина металу, що нагрівається, м).

Для прямокутної заготовки $S = \mu \cdot a$, для циліндричної $S = \mu \cdot d$.

Для розрахунку критерію Біо на початку і в кінці нагрівання визначають коефіцієнти тепловіддачі α_n і α_k , Вт/м²·К,

$$\alpha_n = \frac{C_{ГКМ} \cdot \left[\left(\frac{T_{печ}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T'_M}{100} \right)^4 \right]}{T_{печ} - T'_M};$$

$$\alpha_k = \frac{C_{ГКМ} \cdot \left[\left(\frac{T_{печ}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T''_M}{100} \right)^4 \right]}{T_{печ} - T''_M}.$$

Коефіцієнт теплопровідності для заданої сталі знаходимо з додатка Г.

На підставі розрахунку критерію Bi можна зробити висновок, до яких тіл належать заготовки, що нагріваються.

Розрахунок тривалості нагрівання заготовок розбиваємо на три періоди за температурою їх поверхні:

- 1) $t_{нов} = 20 \dots 800 \text{ } ^\circ\text{C}$;
- 2) $t_{нов} = 800 \dots 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$;
- 3) $t_{нов} = 1000 \dots 1100 \text{ } ^\circ\text{C}$.

У першому періоді нагрівання визначаємо коефіцієнт тепловіддачі α_{n1} на початку і в кінці періоду нагрівання, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$,

$$\alpha = \frac{C_{ГКМ} \cdot \left[\left(\frac{T_{неч}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T'_{м1}}{100} \right)^4 \right]}{T_{неч} - T'_{м1}}$$

Середній коефіцієнт тепловіддачі за 1-й період

$$\alpha_{сеп1} = \frac{\alpha_{n1} + \alpha_{к1}}{2}.$$

Коефіцієнт теплопровідності (середній за перший період), $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$ (додаток Г),

$$\lambda_{сеп1} = \frac{\lambda_{м1}^n + \lambda_{м1}^{yn} + \lambda_{м1}^k}{3}.$$

Критерій Біо

$$Bi_1 = \frac{\alpha_{сеп1} \cdot S}{\lambda_{сеп1}}.$$

Безрозмірна температура поверхні заготовки

$$\theta_{нов1} = \frac{t_{неч} - t''_{м1}}{t_{неч} - t'_{м1}}.$$

Користуючись номограмою для розрахунку нагрівання або охолодження поверхні заготовки рисунки 1 або 3 (непотрібне закреслити) додатка Ж, за безрозмірною температурою поверхні $\theta_{нов1}$ і критерієм Bi_1 знаходимо значення критерія Фур'є Fo_1 .

За критеріями Bi_1 і Fo_1 із номограм (рисунки 2 або 4 (непотрібне закреслити) додатка Ж) знаходимо безрозмірну температуру середини заготовки θ_{y1} .

Температура середини заготовки в кінці першого періоду визначається рівнянням, $^{\circ}\text{C}$,

$$t_{y1}^K = t_{nec} - (t_{nec} - t'_{m1}) \cdot \theta_{y1}.$$

Різниця температур поверхні і центру, $^{\circ}\text{C}$,

$$\Delta t_1 = t''_{m1} - t_{y1}^K.$$

Середня температура заготовки буде дорівнювати, $^{\circ}\text{C}$,

$$t_{cep1} = t_{y1}^K + \frac{1}{2} \cdot \Delta t_1.$$

Середню теплоємність заготовки в першому періоді $C_{t'_{m1}}^{t_{cep1}}$ визначають з рівняння, кДж/кг·К,

$$C_{P_1} = C_{t'_{m1}}^{t_{cep1}} = \frac{h_{t_{cep1}} - h_{t'_{m1}}}{t_{cep1} - t'_{m1}}.$$

Значення ентальпії заготовки при t_{cep1} і t'_{m1} визначаються з таблиці додатка Д.

Коефіцієнт теплопровідності (додаток Г), Вт/м²·К,

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_{m1}^n + \lambda_{m1}^{yn} + \lambda_{m1}^K + \lambda_{m1}^{yK}}{4}.$$

Коефіцієнт температуропровідності заготовки у першому періоді, м²/с,

$$a_1 = \frac{\lambda_1}{C_{p1} \cdot 10^3 \cdot \rho}.$$

Термін нагрівання заготовки у першому періоді, с,

$$\tau_1 = Fo_1 \cdot \frac{S^2}{a_1}.$$

За цією методикою знаходяться також терміни нагрівання заготовок у другому і третьому періодах.

Загальний термін нагрівання заготовок, с,

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3.$$

Розрахункові дані усіх трьох періодів нагрівання заготовок необхідно занести в таблицю 6.1.

Таблиця 6.1 – Розрахункові дані нагрівання заготовок

Величина	Розмірність	20...800	800...1000	1000...1100
		I	II	III
α_n	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$			
α_k	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$			
$\alpha_{сер}$	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$			
$\lambda_{сер}$	$\frac{Вт}{м \cdot К}$			
Bi	-			
$\theta_{нов}$	-			
F_0	-			
θ_u	-			
t_u	$^{\circ}C$			
$t_{сер}$	$^{\circ}C$			
$h_{исер}$	$\frac{кДж}{кг}$			
$h_{t'м1}$	$\frac{кДж}{кг}$			
C_p	$\frac{кДж}{кг \cdot К}$			
λ	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$			
a	$\frac{м^2}{с}$			
τ	$с$			

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: Справочник / Под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1983. – 552 с.

2 Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки: Учеб. для вузов /И.И. Перелетов, Л.А. Бровкин, Ю.И. Розенгарт и др.; Под ред. А.Д. Ключникова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 336 с.

3 Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки: Учеб. пособие /А.П. Несенчук, В.Г. Лисиенко, В.Н. Тимошпольский и др.; Под общ. ред. В.Г. Лисиенко. – Мн.: Выш.шк., 1988. – 320 с.

4 Аверин С.И., Гольдфарб Э.М., Кравцов А.Ф. и др. Расчеты нагревательных печей: Учеб. пособие для металлургических вузов / Под ред. Н.Ю. Тайца. – 2-е изд., доп. – К.: Техника, 1969. – 540 с.

5 Расчет нагревательных и термических печей / Под ред. В.М. Тымчака, В.Л. Гусовского. – М.: Металлургия, 1983. – 541 с.

6 Семенов Н.А. Организация теплоиспользования и энерготехнологического комбинирования в промышленной огнетехнике. – М.: Энергия, 1976. – 280 с.

7 Куперман Л.И., Романовский С.А., Сидельковский Л.Н. Вторичные энергоресурсы и энерготехнологическое комбинирование в промышленности. – К.: Вища школа, 1986. – 304 с.

8 Металлургическое топливо: Справочник / И.Б. Равич, С.С. Дворин. – М.: Metallurgizdat, 1965. – 471 с.

Додаток А

Середні теплоємності для повітря і газів, кДж/(м³·°С)

Температура , °С	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O	Повітря сухе
0	1,6204	1,3327	1,3076	1,4914	1,3009
100	1,7200	1,3013	1,3193	1,5019	1,3051
200	1,8079	1,3030	1,3369	1,5174	1,3097
300	1,8808	1,3080	1,3583	1,5379	1,3181
400	1,9836	1,3172	1,3796	1,5592	1,3302
500	2,0453	1,3294	1,4005	1,5831	1,3440
600	2,0592	1,3419	1,4152	1,6078	1,3583
700	2,1077	1,3553	1,4370	1,6338	1,3725
800	2,1517	1,3683	1,4529	1,6601	1,3821
900	2,1915	1,3817	1,4663	1,6865	1,3993
1000	2,2266	1,3938	1,4801	1,7133	1,4118
1100	2,2593	1,4056	1,4935	1,7397	1,4236
1200	2,2886	1,4065	1,5065	1,7657	1,4347
1300	2,3158	1,4290	1,5123	1,7908	1,4453
1400	2,3405	1,4374	1,5220	1,8151	1,4550
1500	2,3636	1,4470	1,5312	1,8389	1,4642
1600	2,3849	1,4554	1,5400	1,8619	1,4730
1700	2,4042	1,4625	1,5483	1,8841	1,4809
1800	2,4226	1,4705	1,5559	1,9055	1,4889
1900	2,4393	1,4780	1,5638	1,9252	1,4960
2000	2,4552	1,4851	1,5714	1,9449	1,5031
2100	2,4699	1,4914	1,5743	1,9633	1,5094
2200	2,4837	1,4981	1,5851	1,9813	1,5174
2300	2,4971	1,5031	1,5923	1,9984	1,5220
2400	2,5097	1,5085	1,5990	2,0148	1,5274
2500	2,5214	1,5144	1,6057	2,0307	1,5341

Додаток Б

Ентальпія 1 м³ повітря і газів при різних температурах і постійному тиску 760 мм рт.ст.

Температура	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O	Повітря сухе
°C	кДж/м ³	кДж/м ³	кДж/м ³	кДж/м ³	кДж/м ³
100	172,00	130,13	131,93	150,18	130,51
200	361,67	260,60	267,38	303,47	261,94
300	564,24	392,41	407,48	461,36	395,42
400	777,44	526,89	551,85	623,69	532,08
500	1001,78	664,58	700,17	791,55	672,01
600	1236,76	805,06	851,64	964,68	814,96
700	1475,41	940,36	1005,24	1143,64	960,75
800	1718,95	1094,65	1162,32	1328,11	1109,05
900	1972,43	1243,55	1319,67	1517,87	1259,36
1000	2226,75	1393,86	1480,11	1713,32	1411,86
1100	2485,34	1546,14	1641,02	1913,67	1565,94
1200	2746,44	1699,76	1802,76	2118,78	1721,36
1300	3010,58	1857,74	1966,05	2328,01	1879,27
1400	3276,75	2012,36	2129,93	2540,25	2036,87
1500	3545,34	2170,55	2296,78	2758,39	2196,19
1600	3815,86	2328,65	2463,97	2979,13	2356,68
1700	4087,10	2486,28	2632,09	3203,05	2517,60
1800	4360,67	2646,74	2800,48	3429,90	2680,01
1900	4634,76	2808,22	2971,30	3657,85	2841,43
2000	4910,51	2970,25	3142,76	3889,72	3006,26
2100	5186,81	3131,96	3314,85	4121,79	3169,77
2200	5464,20	3295,84	3487,44	4358,83	3338,21
2300	5746,39	3457,20	3662,33	4485,34	3500,54
2400	6023,25	3620,58	3837,64	4724,37	3665,80
2500	6303,53	3786,09	4014,29	5076,74	3835,29

Додаток В

Середня теплоємність C_{cp} , кДж/(кг·°С), вуглецевих сталей різних марок в інтервалі температур від 50°С до t°С

Температура, °С	Вуглецеві сталі							
	чисте залізо (99,99%)	08кп	08	20	40	У8	У8'	У12
100	0,469	0,486	0,486	0,486	0,486	0,486	0,502	0,486
150	0,477	0,594	0,494	0,494	0,494	0,502	0,511	0,502
200	0,489	0,502	0,502	0,502	0,498	0,515	0,523	0,815
250	0,498	0,511	0,511	0,511	0,507	0,523	0,523	0,523
300	0,511	0,519	0,519	0,519	0,515	0,532	0,519	0,523
350	0,519	0,528	0,528	0,528	0,523	0,540	0,544	0,540
400	0,528	0,536	0,540	0,540	0,532	0,548	0,553	0,544
450	0,536	0,548	0,548	0,548	0,544	0,557	0,565	0,557
500	0,553	0,561	0,561	0,561	0,557	0,589	0,574	0,565
550	0,561	0,574	0,578	0,574	0,569	0,582	0,586	0,578
600	0,578	0,590	0,590	0,590	0,582	0,595	0,503	0,586
650	0,595	0,611	0,607	0,607	0,595	0,603	0,615	0,599
700	0,615	0,628	0,628	0,628	0,607	0,619	0,632	0,615
750	0,641	0,645	0,662	0,669	0,678	0,724	0,745	0,720
800	0,657	0,678	0,682	0,703	0,674	0,716	0,737	0,716
850	0,666	0,682	0,695	0,703	0,662	0,712	0,729	0,712
900	0,666	0,695	0,703	0,703	0,657	0,708	0,724	0,708
950	0,682	0,691	0,609	0,699	0,653	0,703	0,716	0,703
1000	0,678	0,691	0,695	0,695	0,653	0,699	0,712	0,699
1050	0,669	0,691	0,695	0,691	0,653	0,695	0,708	0,695
1100	0,666	0,691	0,695	0,691	0,649	0,695	0,703	0,695
1150	0,666	0,687	0,691	0,691	0,649	0,691	0,707	0,691
1200	0,666	0,687	0,691	0,687	0,649	0,691	0,699	0,691
1250	0,662	0,687	0,691	0,687	0,653	0,691	0,699	0,691
1300	0,662	0,699	0,687	0,687	0,653	0,691	0,699	0,687

Додаток Г

Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·°С), вуглецевих сталей
різноманітних марок у залежності від температури

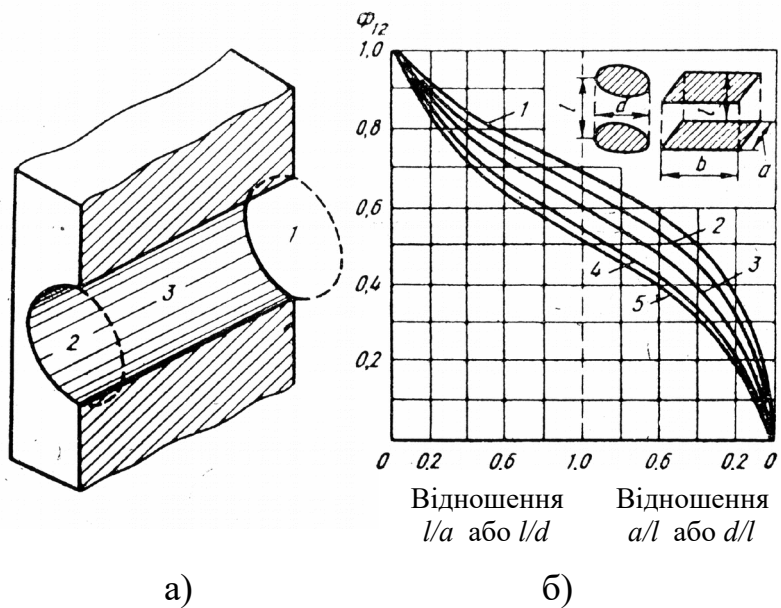
Температура , °С	Марка сталі						
	08кп	08	20	40	У8	У8'	У12
0	65,1	59,5	51,9	51,9	49,8	51,1	45,2
50	62,8	58,6	51,5	51,5	49,4	50,2	45,2
100	60,2	57,7	51,1	50,6	48,1	48,9	44,8
150	57,7	55,2	49,9	49,8	46,9	47,7	42,4
200	55,6	53,5	48,5	48,1	45,1	46,1	42,7
250	53,0	51,5	46,5	46,9	43,0	43,9	41,1
300	50,9	49,4	44,4	45,6	41,4	41,9	40,2
350	48,5	47,7	43,6	44,3	40,2	40,2	38,5
400	46,5	44,8	42,7	41,9	38,1	37,6	37,2
450	43,5	42,3	41,1	40,0	36,4	36,9	36,1
500	41,1	40,2	39,3	38,1	35,2	35,6	34,7
550	39,4	38,1	37,7	36,1	33,9	34,4	33,5
600	37,4	36,1	35,6	33,6	32,7	33,3	31,9
650	36,1	33,9	33,9	31,9	31,4	31,9	30,0
700	33,9	31,9	31,9	30,0	30,1	30,7	28,3
750	31,9	29,8	28,5	26,9	26,9	27,3	26,9
800	30,1	28,5	25,9	24,8	24,3	24,3	23,7
850	27,7	27,2	25,9	24,8	24,3	24,3	23,7
900	27,2	26,7	26,4	25,7	25,7	25,2	24,8
950	27,2	27,2	27,2	26,1	26,5	26,1	25,7
1000	27,7	27,7	27,7	26,9	26,9	26,9	26,1
1050	28,0	28,0	28,0	27,2	27,7	27,7	26,9
1100	28,5	28,5	28,5	28,0	28,6	28,6	27,2
1150	29,3	29,3	29,3	28,7	29,4	28,7	28,0
1200	29,8	29,8	29,8	29,5	30,2	29,5	28,6

Додаток Д

Питома ентальпія вуглецевих сталей h , кДж/кг

Темпера- тура, °C	чисте залізо (99,99 %)	Вуглецеві сталі						
		08кп	08	20	40	У8	У8'	У12
100	46,89	48,57	48,57	48,56	48,57	48,57	50,24	48,57
150	71,59	74,11	74,11	74,11	74,11	75,36	76,62	75,36
200	97,97	100,48	100,48	100,48	99,65	102,99	104,67	102,99
250	124,56	127,69	127,69	127,69	126,65	130,84	130,84	130,84
300	153,24	175,55	155,75	155,75	154,49	159,52	155,75	159,52
350	181,71	184,64	184,64	184,64	183,17	189,03	190,49	189,03
400	211,01	214,36	216,04	216,04	212,69	219,39	221,06	217,72
450	241,16	146,81	246,81	246,81	244,93	250,58	254,35	250,58
500	276,33	280,52	280,52	280,52	278,42	284,70	286,79	282,61
550	308,57	315,48	317,78	315,48	313,17	320,08	322,38	317,78
600	367,67	354,20	354,20	354,20	349,18	356,72	361,74	351,69
650	386,44	397,33	394,61	394,61	386,44	391,88	400,05	389,16
700	430,82	439,61	439,61	439,61	424,96	433,75	442,54	430,82
750	480,44	483,58	496,14	502,42	508,59	543,24	558,94	540,09
800	525,86	542,61	545,96	562,71	539,26	572,75	589,50	572,75
850	565,85	580,08	590,76	597,88	562,29	604,99	619,23	604,99
900	599,13	625,51	633,04	633,04	591,59	636,81	651,88	636,81
950	648,33	656,28	664,24	664,24	620,48	668,28	680,15	668,21
1000	678,6	690,82	729,76	695,00	653,14	699,19	711,76	699,19
1050	703,38	725,36	698,00	725,36	685,70	729,76	742,95	729,76
1100	732,7	709,90	764,51	759,90	713,85	764,51	773,72	764,51
1150	769,74	789,63	794,45	794,45	746,29	794,45	808,89	794,45
1200	798,84	823,96	828,99	823,96	778,74	828,99	839,03	828,99
1250	826,89	858,29	863,53	858,29	816,43	863,63	873,99	863,83
1300	859,97	908,95	892,63	892,63	849,08	898,07	908,95	892,63

Додаток Е



а) схематичне зображення отвору; б) значення коефіцієнта діафрагмування;
 1 – довгі полоси $a/b=0$; 2 – прямокутники $a/b=0,2$; 3 – тяги $a/b=0,5$; 4 – квадрати $a/b=1$;
 5 – коло

Рисунок Е.1 – Випромінювання через отвір у стіні печі

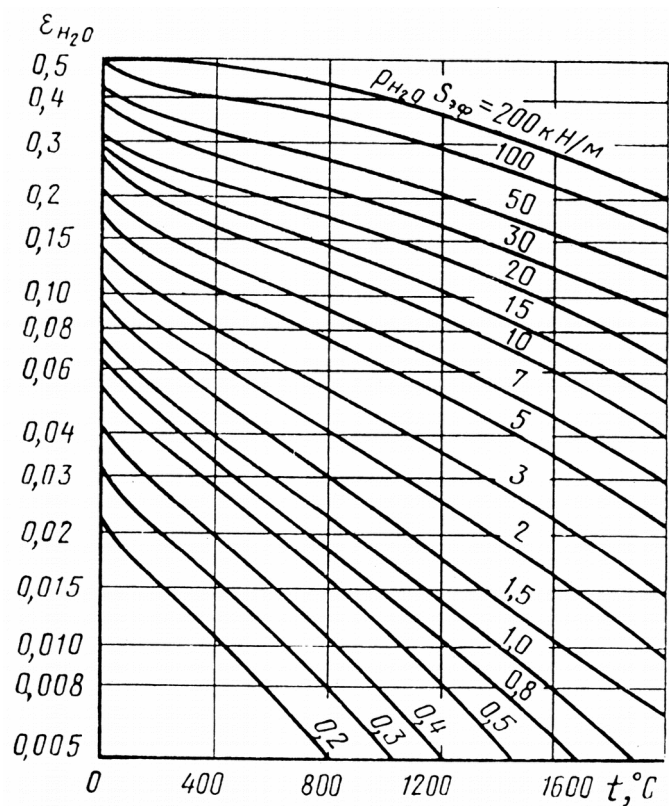


Рисунок Е.2 – Ступінь чорноти водяної пари H_2O

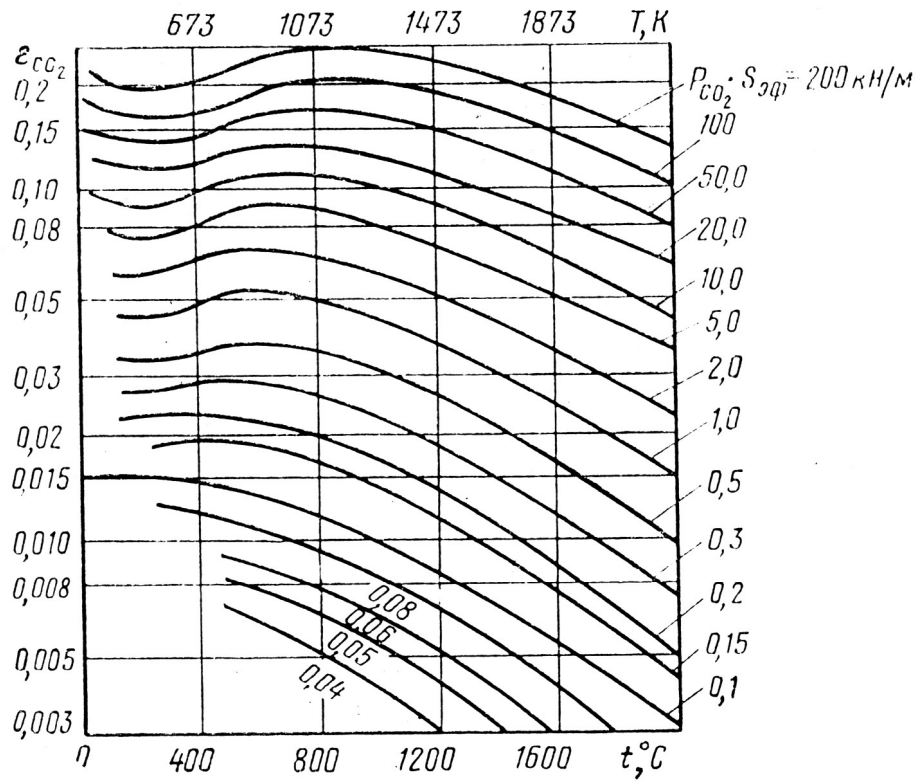


Рисунок Е.3 – Ступінь чорноти вуглекислоти CO_2

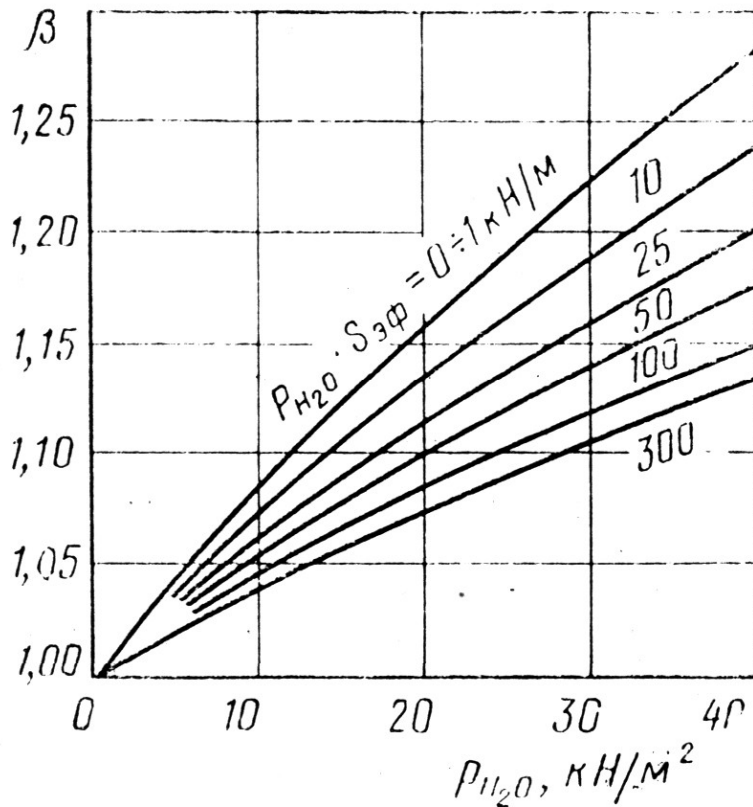


Рисунок Е.4 – Поправковий коефіцієнт β на парціальний тиск для водяної пари

Додаток Ж

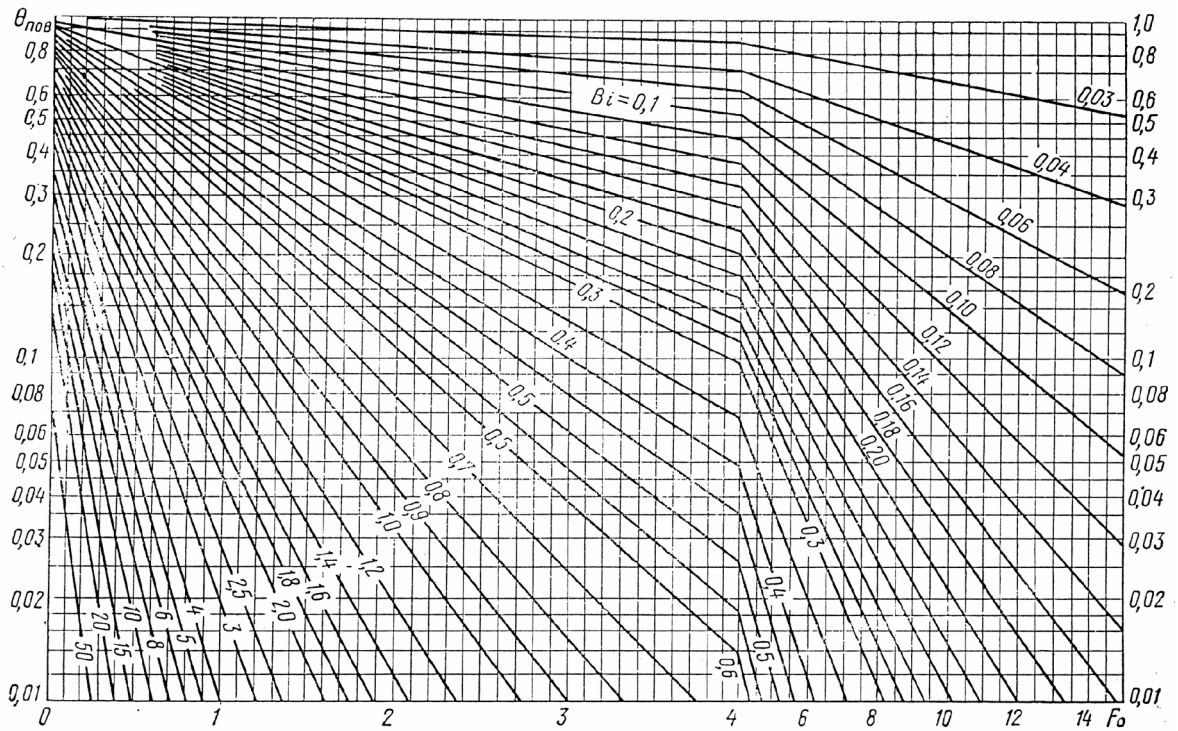


Рисунок Ж.1 – Номограма для розрахунку нагрівання або охолодження поверхні циліндра

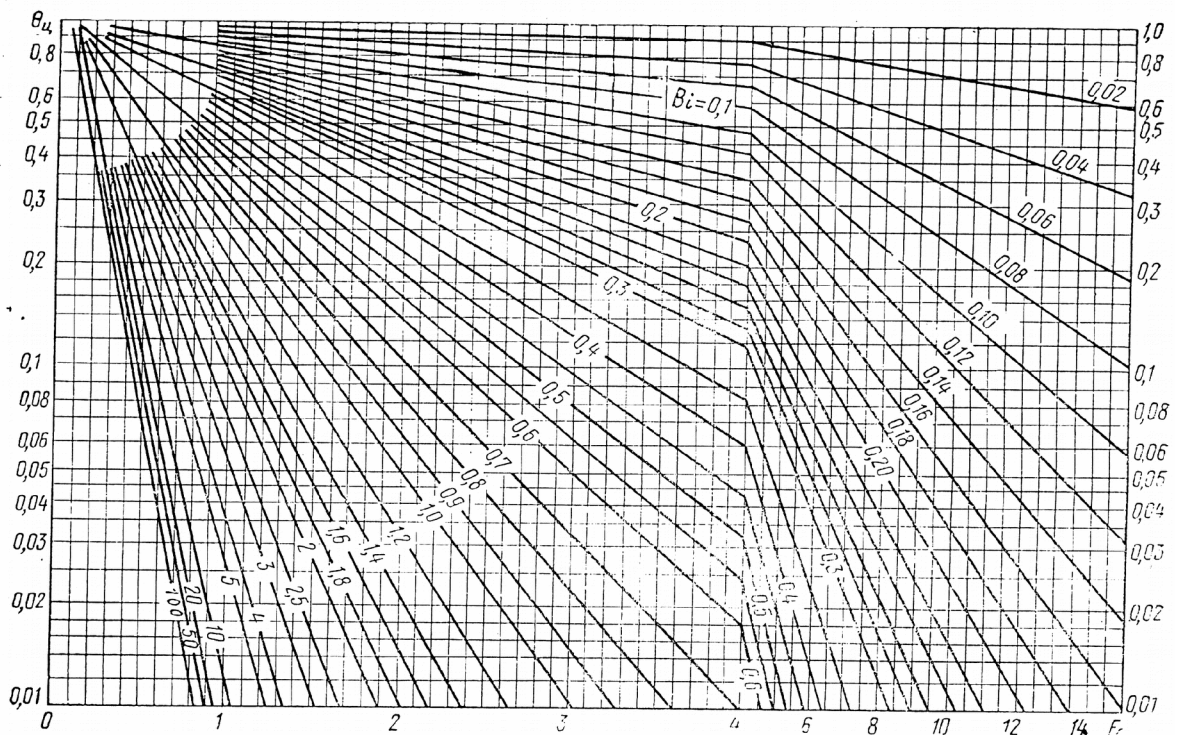


Рисунок Ж.2 – Номограма для розрахунку нагрівання або охолодження осі циліндра

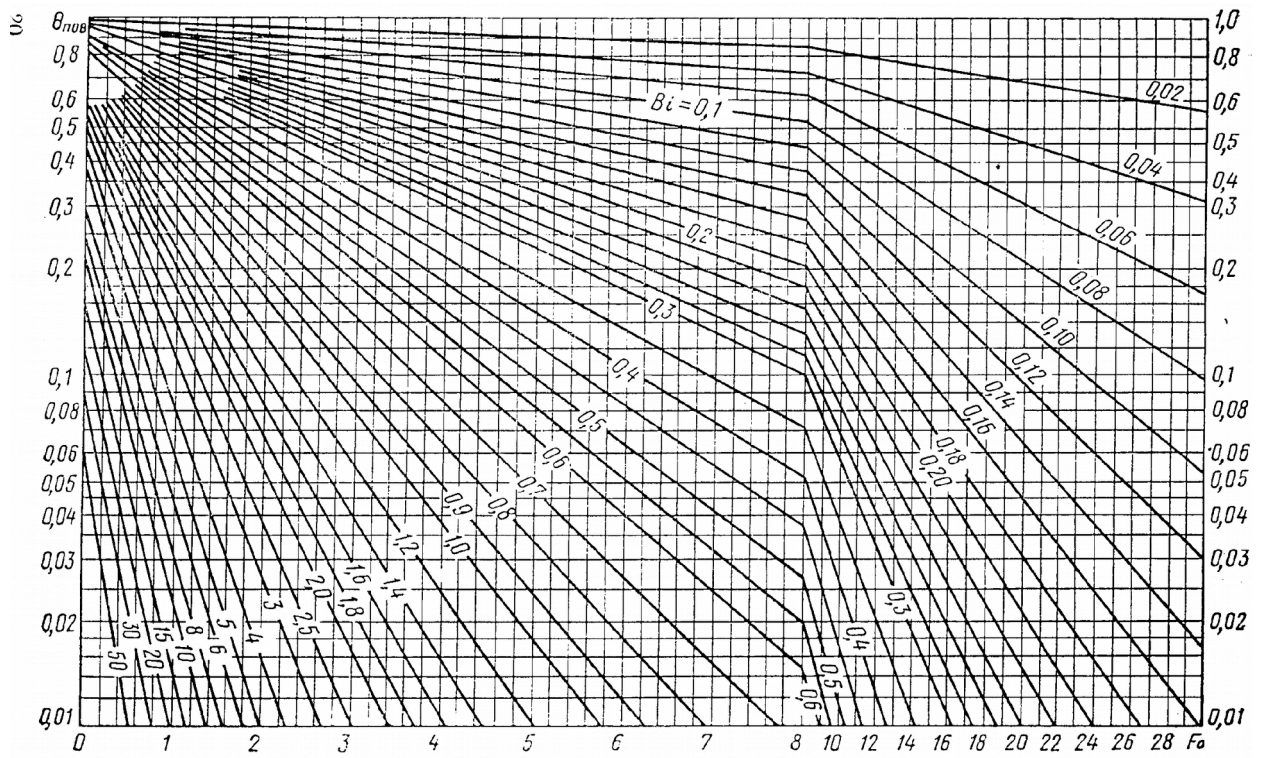


Рисунок Ж.3 – Номограма для розрахунку нагрівання або охолодження поверхні пластини

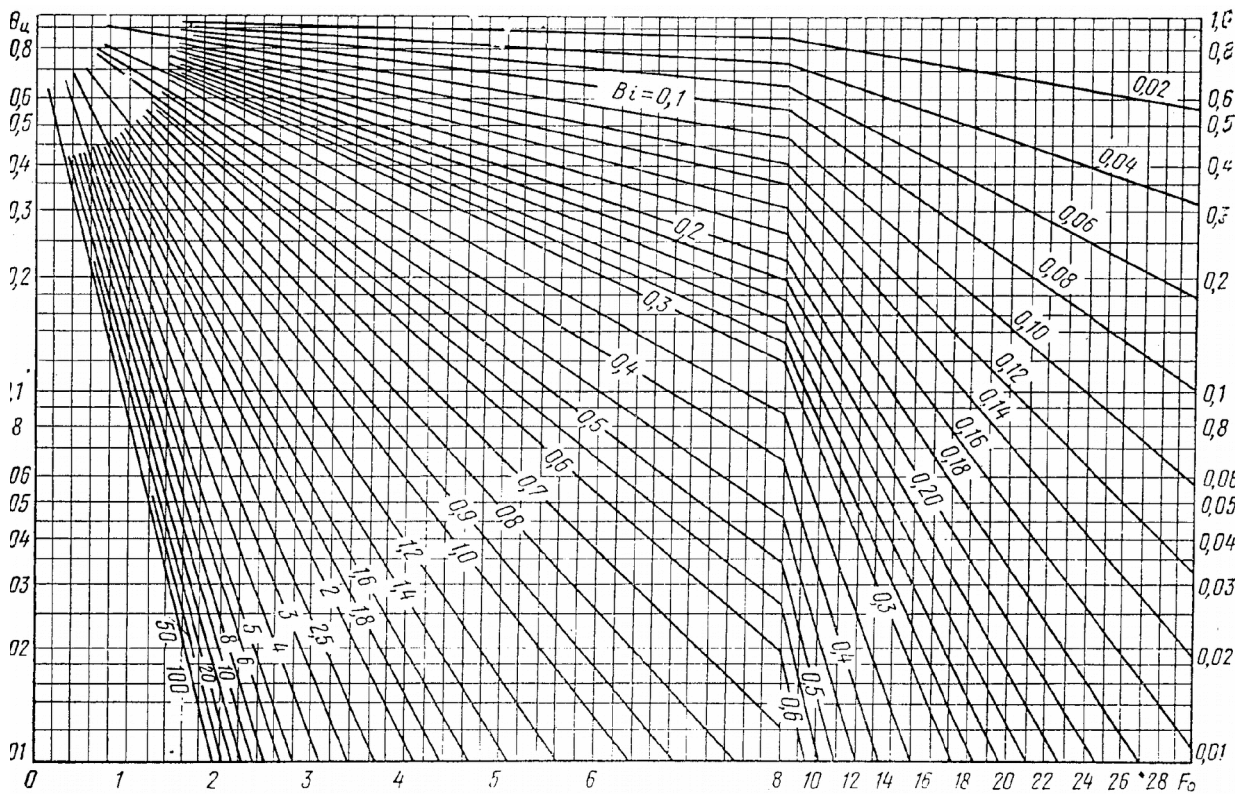


Рисунок Ж.4 – Номограма для розрахунку нагрівання або охолодження середини пластини