

МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра «Теплотехніка та теплові двигуни»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання курсового проекту з дисципліни
«ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНІ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНІ
ПРОЦЕСИ ТА УСТАНОВКИ»

Харків - 2009

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри «Теплотехніка та теплові двигуни» 9 червня 2009 р., протокол № 11.

У методичних вказівках наведено загальні положення, обсяг, методика та приклади розрахунку високотемпературних установок (ВТУ) при курсовому та дипломному проектуванні.

Призначені для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності «Теплоенергетика».

Укладачі:

доценти В.М.Лялюк,
С.В.Угольніков,
асистенти А.В. Онищенко,
О.В.Гришина

Рецензент

доц. В.В. Савенко

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання курсового проекту з дисципліни

*«ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНІ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ТА
УСТАНОВКИ»*

Відповідальний за випуск Лялюк В.М.

Редактор Губарева К.А..

Підписано до друку 26.06.09 р.
Формат паперу 60x84 1/16 . Папір писальний.
Умовн.-друк.арк. 3,75. Обл.-вид.арк. 4,0.
Замовлення № Тираж 200. Ціна

Видавництво УкрДАЗТу, свідоцтво ДК 2874 від 12.06.2007 р.
Друкарня УкрДАЗТу,
61050, Харків - 50, майд. Фейєрбаха, 7

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Відомості про камерні нагрівальні високотемпературні установки	5
2 Вміст і обсяг розрахунків печей у курсовому проектуванні	7
3 Розрахунок камерної печі з нерухомим подом.....	9
3.1 Розрахунок горіння палива.....	9
3.2 Розміри робочого простору печі	12
3.3 Розрахунок зовнішнього теплообміну у робочому просторі	14
3.4 Розрахунок нагрівання металу.....	17
3.4.1 Перший період нагрівання	19
3.4.2 Другий період нагрівання.....	26
3.4.3 Визначення продуктивності печі.....	30
3.5 Тепловий баланс печі і визначення витрати палива.....	31
3.6 Техніко-економічні показники роботи печі	37
4 Вибір газового пальника	40
4.1 Вибір та розрахунок газового пальника конструкції «Теплопроект».....	41
5 Розрахунок щілинного радіаційного рекуператора з одnobічним обігрівом.....	43
6 Аеродинамічний розрахунок димового тракту.....	48
7 Розрахунок димової труби.....	50
Список літератури.....	51
Додатки.....	52

ВСТУП

Основним напрямком економічного і соціального розвитку України є здобуття раціональної і економічної витрати усіх видів ресурсів, зниження їх витрат, прискорено здійснювати перехід до ресурсозберігаючих і безвідходних технологій, значно покращити використання вторинних енергоресурсів і відходів виробництва.

Проблема економії палива у високотемпературних установках має особливо важливе значення внаслідок великих масштабів його використання.

Курсове проектування з дисципліни «Високотемпературні теплотехнологічні процеси та установки» направлено на краще засвоєння студентами матеріалу навчальної програми; навчити використовувати отримані ними знання для розв'язання інженерно-технічних задач і сприяти наданню навиків самостійної роботи; отримати навички практичного використання довідкового матеріалу: довідників, норм, розрахункових таблиць; ознайомитися з типовими проектами та зразковими проектними матеріалами.

Обсяг і послідовність виконання курсового проекту наведені у завданні до курсового проектування.

Курсовий проект повинен містити завдання, перспективи розвитку високотемпературних тепло технологічних процесів та установок (ВТПУ) відповідно до основних напрямків економічного та соціального розвитку України, викладення усіх розрахунків і рішень, що приймаються, теплової і конструктивної схеми установки. Теплова і конструктивна схеми установки та її елементи виконуються на аркуші формату А1.

Пояснювальна записка повинна бути написана або надрукована на аркушах формату А4 і оформлена відповідно до вимог ГОСТ 2.105-79 обсягом приблизно 25-30 сторінок. У тексті пояснювальної записки не допускаються довільні скорочення слів. Кожну з розрахункових формул потрібно записувати в алгебраїчному виразі і розшифровувати усі позначення та величини із зазначенням розмірності. Потім формулу переписати в чисельних значеннях величин у тому ж порядку і привести

результати розрахунку в Міжнародній системі одиниць вимірювання (СВ).

Пояснювальна записка супроводжується необхідними схемами, ескізами та іншим, завершується стислими висновками. Остання частина записки характеризує ступінь і якість виконання поставленого перед проектантом завдання.

Список використаної літератури приводиться у кінці пояснювальної записки, при тому показуються тільки ті джерела, на які є посилання у тексті.

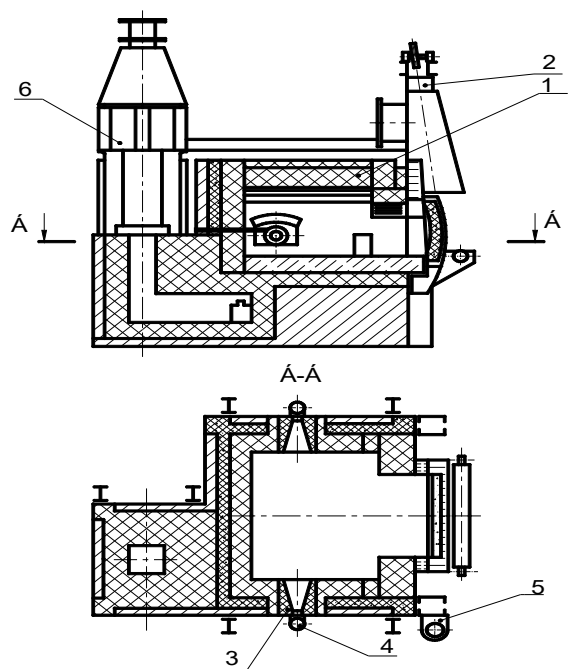
1 Відомості про камерні нагрівальні високотемпературні установки

Високотемпературні теплотехнологічні процеси лежать в основі найважливіших виробництв: металу, деталей машин, будівельних та інших матеріалів. Ці процеси здійснюються у промислових печах, в яких матеріалам або виробам надаються властивості, необхідні для кінцевого продукту або ті, що необхідні для подальшої їх обробки. Так, у нагрівальних печах метал нагрівається перед обробкою його тиском (прокаткою, куванням), а також проходить термообробку (відпалювання, нормалізацію, гартування, випалювання та ін.). При всьому різноманітті обробки тепловий вплив зводиться до призначеної температури нагрівання металу. Так, при нагріванні сталі з метою гомогенізуючого відпалювання температура нагрівання складає 1000-1250⁰С, при нагріванні з метою нормалізації, ізотермічного і повного відпалювання – 800-1100 ⁰С, при відпалюванні для попередження флокеноутворення, рекристалізаційному відпалюванні – 600-700 ⁰С, при нагріванні перед гартуванням 750-950 ⁰С (залежно від мети обробки і марки сталі).

Ці приклади показують, що діапазон температур нагрівання у печах різного технологічного призначення достатньо широкий, і це накладає відбиток на їх конструкцію і роботу.

За принципом роботи печі поділяються на дві групи: камерні печі з періодичним завантаженням і безперервним. У малих і середніх камерних печах температура з неперервним завантаженням протягом часу нагрівання може залишатися

постійною. Потрібний режим нагрівання вибирається залежно від розмірів печі, особливостей металу, що нагрівається, продуктивності та ін. На рисунку 1.1 приведена конструктивна схема камерної нагрівальної печі з нерухомим подом.



1 – кладка; 2 – каркас; 3 – пальник; 4 – газопровід; 5 – підйомник заслінки робочого вікна; 6 – радіаційний щілинний рекуператор

Рисунок 1.1 – Конструктивна схема камерної нагрівальної печі

Піч є футерованою камерою, яка розміщується у жорстко звареному каркасі 2. Футерування 1 печі може бути виконано багатошаровим із шамотної, шамотнолегковагової і теплоізоляційної цегли або одношаровим із шамоту. Каркас печі і робочий фронт виконано із листового і сортового прокату.

Гарнітура робочого вікна і заслінка, що його перекриває, зроблені водоохолоджувачими. Заслінка печі забезпечена пневматичним механізмом підняття – опускання 5. Перед робочим вікном печі, на торцевих стояках каркаса встановлено зонти, який приєднується до цехової вентиляційної системи або індивідуальної труби.

Піч опалюється природним газом або мазутом, які спалюються за допомогою пальників 3. Повітря, що подається на горіння палива, підігрівається за рахунок теплоти димових газів у радіаційному щілинному рекуператорі 6. Повітря до печі подається від дуттьової установки.

Завантаження та вивантаження металу здійснюється вручну або цеховими підйомно-транспортними засобами.

Піч забезпечена системою контролю (температури продуктів згоряння перед рекуператором, температури підігрівання повітря, тиску повітря перед пічкою і пальником), автоматичного регулювання теплового режиму (температури в робочому просторі печі, співвідношення витрат газ-повітря, мазут-повітря), а також сигналізацією і відсічкою газу (мазуту) при відключенні тиску газу (мазуту) або повітря, припиненні подавання води.

2 Вміст і обсяг розрахунків печей у курсовому проектуванні

Повний розрахунок нагрівальної печі охоплює визначення умов, необхідних для забезпечення потрібної продуктивності при заданих технологічних процесам параметрах нагрівання виробів.

Цій меті повинна бути підкорена робота як окремих елементів, так і печі в цілому. Основні розміри робочого простору, умови розташування заготовок, що нагріваються, і омивання їх продуктами горіння повинні забезпечити для заданої

продуктивності достатню інтенсивність підведення теплоти до поверхні металу і розповсюдження його усередину виробів або заготовок. Для підведення необхідної кількості теплоти і організації температурного і теплового режиму роботи печі повинна бути достатньою потужність паливоспалюючих пристроїв. Наведеному повинна бути підпорядкована і механіка руху пічних газів. Схема використання вторинних енергоресурсів печі повинна забезпечувати підвищення економічності паливовикористання при збереженні потрібних параметрів технологічного процесу.

У зв'язку з цим розрахунок пічної установки складається із таких етапів:

- 1 Розрахунок горіння палива.
- 2 Вибір режиму нагрівання виробів.
- 3 Тепловий розрахунок камерної печі і вибір її основних розмірів.
- 4 Тепловий баланс печі і визначення питомої витрати палива.
5. Теплотехнічні характеристики роботи печі і шляхи підвищення її економічності.
- 6 Вибір і розрахунок паливоспалюючого пристрою.
- 7 Вибір і розрахунок рекуператора для підігрівання повітря димовими газами.
- 8 Розрахунок руху димових газів і повітря. Вибір тягодуттьових пристроїв.
- 9 Розрахунок димової труби.

Для проведення розрахунку печі необхідно знати таке: тип і конструкцію печі, рід палива, вид обробки, розміри і форму виробів, марку сталі і її хімічний склад, розташування виробів (заготовок) у печі, продуктивність, ємність печі або розміри поду, основні параметри нагрівання, а також температуру нагрівання повітря у рекуператорі і палива, якщо це передбачено завданням.

При виконанні розрахунків печей у дипломному проектуванні розглядається декілька (2-3) варіантів температурного і теплового режимів. Кінцевий вибір режиму роботи печі проводиться на підставі попередніх техніко-економічних розрахунків. Можна використовувати також теплові

вторинні енергоресурси для підвищення економічності роботи високотемпературних установок.

При виконанні курсового або дипломного проекту можна користуватися наведеними прикладами з методичними рекомендаціями, а також добре розробленими методиками, що викладені у приведеній літературі.

3 Розрахунок камерної печі з нерухомим подом

Камерна термічна піч з нерухомим подом використовується для нагрівання дрібних та середніх заготовок та виробів.

Вихідні дані для розрахунку:

1 Паливо	Природний газ Єлшанського родовища
2 Вид термообробки	Нагрівання під гартування
3 Вироби, що нагріваються	Заготівки квадратного перерізу 80×80 мм ($b = 80$ мм, довжина $l = 420$ мм)
4 Марка сталі	45X
5 Спосіб укладання заготовок	На поді печі із зазорами у два ряди
6 Кількість заготовок у печі	$n = 22$ шт.
7 Початкова температура металу	$t_o = 20$ °C
8 Кінцева температура нагрівання поверхні заготівки	$t_{н.к} = 850$ °C
9 Кінцевий перепад температур за перерізом заготівки	$\Delta t_k = 5$ °C
10 Коефіцієнт витрати повітря	$\alpha = 1,1$

3.1 Розрахунок горіння палива

Склад природного газу Єлшанського родовища [2] наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	N_2	Усього
--------	----------	----------	-------------	-------	--------

93,2	0,7	0,6	0,6	4,9	100%
------	-----	-----	-----	-----	------

Розрахунок горіння палива проведено з $\alpha = 1$ і заданим $\alpha = 1,1$. Результати розрахунку наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунків горіння палива

Паливо			Повітря			Утворені продукти згорання					
складові	вміст, %	кількість, м ³	O ₂	N ₂	усього, м ³	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	усього, м ³	
CH ₄	93,2	93,2	186,4	195,75+ +3,762= =736,41	195,75+ +736,41= =932,16	93,2	186,4	-	736,41+ +4,9		
C ₂ H ₆	0,7	0,7	2,45			1,4	2,1	-			
C ₃ H ₈	0,6	0,6	3,0			1,8	2,4	-			
C ₄ H ₁₀	0,6	0,6	3,9			2,4	3,0	-			
N ₂	4,9	4,9	-	-	-	-	-	-	-	-	
$\alpha = 1$	Σ	100	100	195,75	736,41	932,16	98,8	193,9	-	741,3	1034
	$\Sigma, \%$	-	-	21	79	100	9,6	18,75	-	71,69	100
$\alpha = 1,1$	Σ	-	-	215,33	810,05	1025,38	98,8	193,9	19,57	814,95	1127,2
	$\Sigma, \%$	-	-	21	79	100	8,76	17,2	1,74	72,3	100

Правильність розрахунку перевіряємо за матеріальним балансом:

Надійшло 100 м³ газу,
у тому числі у кілограмах:

$$CH_4 \dots 93,2 \times 16 = 1491,2;$$

$$C_2H_6 \dots 0,7 \times 30 = 21;$$

$$C_3H_8 \dots 0,6 \times 44 = 26,4;$$

$$C_4H_{10} \dots 0,6 \times 58 = 34,8;$$

$$N_2 \dots 4,9 \times 28 = 137,2.$$

Повітря 1025,38 м³,
у тому числі у кілограмах:

$$O_2 \dots 215,33 \times 32 = 6890,56;$$

$$N_2 \dots 810,05 \times 28 = 22681,4.$$

Усього 31282,56 кг.

Одержано 1127,2 м³ продуктів
згорання у тому числі
у кілограмах:

$$CO_2 \dots 98,8 \times 44 = 4347,2;$$

$$O_2 \dots 19,57 \times 32 = 626,24;$$

$$H_2O \dots 193,9 \times 18 = 3490,2;$$

$$N_2 \dots 814,95 \times 28 = 22818,6;$$

Усього 31282,24 кг.

Кількість повітря для спалювання 1 м³ палива

$$V_{нов} = V_{O_2} + V_{N_2} = 2,15 + 8,05 = 10,2 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Об'єм продуктів згоряння при спалюванні 1 м³ газу

$$V_{пр} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{O_2} + V_{N_2} = 0,988 + 1,939 + 0,196 + 8,15 = 11,27 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Склад продуктів згоряння, у відсотках: CO₂ = 8,76; H₂O = 17,2; O₂ = 1,74; N₂ = 72,3.

Питома маса продуктів згоряння

$$\rho = \frac{44 \cdot 8,76 + 18 \cdot 17,2 + 32 \cdot 1,74 + 28 \cdot 72,3}{22,4 \cdot 100} = 1,24 \text{ кг/м}^3.$$

Теплота згоряння природного газу, кДж/м³

$$Q_H^p = 35962,5 \cdot 0,932 + 59088,4 \cdot 0,007 + 91257 \cdot 0,006 + 118694 \cdot 0,006 = 35190$$

Визначаємо ентальпію продуктів згоряння:

$$h_0 = \frac{Q_H^p}{V_{пр}} = \frac{35190}{11,27} = 3122 \text{ кДж/м}^3$$

при t_к = 2000 °С (додаток Б)

$$h_{CO_2} = 0,0876 \cdot 4835,1 = 423,6 ;$$

$$h_{H_2O} = 0,172 \cdot 3889,72 = 669 ;$$

$$h_{O_2} = 0,0174 \cdot 3142,76 = 54,7 ;$$

$$h_{N_2} = 0,723 \cdot 2970,26 = 2147,5 ;$$

$$h_{2000} = 3295,0.$$

при t_к = 1900 °С (додаток Б)

$$h_{CO_2} = 0,0876 \cdot 4360,67 = 382 ;$$

$$h_{H_2O} = 0,172 \cdot 3429,9 = 589,9 ;$$

$$h_{O_2} = 0,0174 \cdot 2971,3 = 51,7 ;$$

$$h_{N_2} = 0,723 \cdot 2646,74 = 1913,6 ;$$

$$h_{1900} = 2937,2.$$

Для визначення теплоємності для повітря і газів можна користуватися додатком А.

Колориметрична температура горіння палива

$$t_k = 1900 + \frac{3122 - 2937,2}{3295 - 2937,2} \cdot 100 = 1952 \text{ °С}.$$

3.2 Розміри робочого простору печі

Розміри робочого простору вибирають із конструктивних міркувань з урахуванням досвіду роботи нагрівальних печей. У даному випадку заготівки розташовують на поді печі у два ряди з зазорами, що дорівнюють половині товщини заготівки. Розташування заготовок на поді печі зображено на рисунку 3.1.

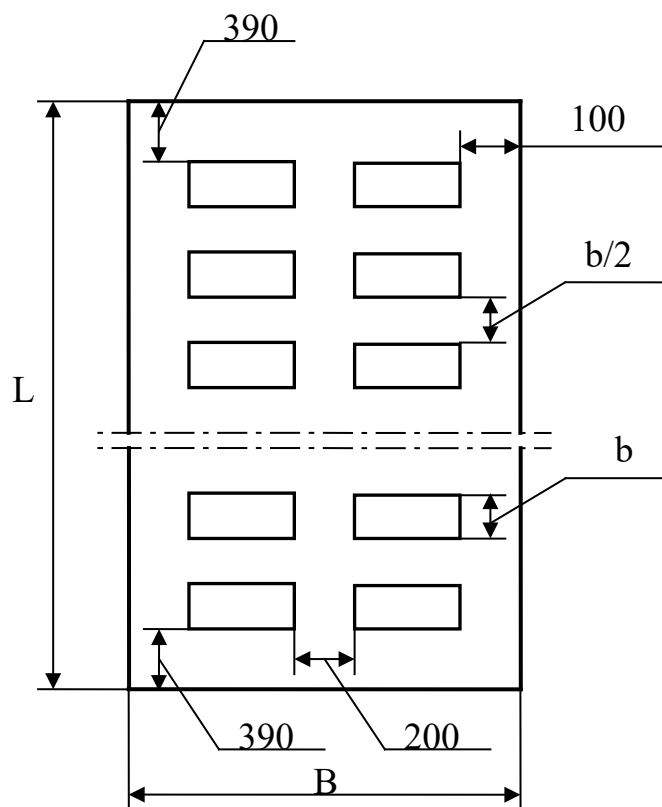


Рисунок 3.1 – Розташування заготовок на поді печі

Довжина робочого простору печі, у метрах,

$$L = \frac{n}{2} \cdot b + \left(\frac{n}{2} - 1\right) \frac{b}{2} + 2 \cdot 0,39,$$

де n – кількість заготовок у печі;

b – ширина заготівки;

0,39 – відстань від заготівки до торцевої стінки, м;

$$L = 11 \cdot 0,08 + \left(\frac{11}{2} - 1\right) \cdot \frac{0,08}{2} + 2 \cdot 0,39 = 2,02.$$

Ширина робочого простору печі, у метрах,

$$B = n_p \cdot l + 0,2 + 2 \cdot 0,1,$$

де n_p – кількість рядів заготовок за шириною поду;
 l – довжина заготівки, м;
0,2 – відстань між рядами заготовок, м;
0,1 – відстань від заготівки до бокової стінки печі, м;

$$B = 2 \times 0,42 + 0,2 + 2 \times 0,1 = 1,24.$$

Висота робочого простору печі у замку склепіння
(приймаємо конструктивно)

$$H = 1,4 \text{ м.}$$

Висота бокової стінки $h = 1,2$ м.

Середня висота печі

$$h_{\text{сер}} = \frac{H + h}{2} = \frac{1,4 + 1,2}{2} = 1,3 \text{ м.}$$

3.3 Розрахунок зовнішнього теплообміну у робочому просторі

Робочій простір печі з точки зору теплообміну є системою, що складається із газів, кладки і виробів, що нагріваються. Основним носієм теплової енергії є газ, від яких теплота передається на кладку і виробам, що нагріваються, випромінюванням і конвекцією.

Визначаємо геометричні параметри випромінюванням.

Поверхня кладки є сумою поверхонь – торцевих, бокових стінок, зведення і поду, у квадратних метрах,

$$F_{\text{кл}} = F_{\text{торц.ст}} + F_{\text{бок.ст}} + F_{\text{зв.}} + F_{\text{под}} = 2 \cdot B \cdot h_{\text{сер}} + 2 \cdot L \cdot h + \frac{\pi \cdot R \cdot \alpha}{180} \cdot L + L \cdot B,$$

де α – центральний кут арочного зведення (приймаємо $\alpha = 60^\circ$);

R – радіус арки зведення, який при $\alpha = 60^\circ$ дорівнює величині прогону зведення, тобто $R = B$ [7].

Тоді

$$F = 2 \cdot 1,24 \cdot 1,3 + 2 \cdot 2,02 \cdot 1,2 + \frac{3,14 \cdot 1,24 \cdot 60}{180} \cdot 2,02 + 2,02 \cdot 1,24 = 13,2 \text{ м}^2.$$

Випромінювальна поверхня металу, у квадратних метрах,

$$F_M = n \cdot (3 \cdot b \cdot l + 2 \cdot b^2),$$

де n – кількість заготовок у печі;

b – товщина металу, що нагрівається, м;

l – довжина металу, що нагрівається, м.

$$F_M = 22 \cdot (3 \cdot 0,08 \cdot 0,42 + 2 \cdot 0,08^2) = 2,48 \text{ м}^2.$$

Об'єм робочого простору печі

$$V_{\text{рп}} = B \cdot L \cdot h_{\text{сер}} = 1,24 \cdot 2,02 \cdot 1,3 = 3,26 \text{ м}^3.$$

Об'єм металу

$$V_M = 22 \cdot b^2 \cdot l = 22 \cdot 0,08^2 \cdot 0,42 = 0,059 \text{ м}^3.$$

Об'єм робочого простору, що заповнений газом

$$V_G = V_{\text{рп}} - V_M = 3,26 - 0,059 = 3,2 \text{ м}^3.$$

Ефективна товщина газового шару

$$S_{\text{еф}} = \frac{3,5 \cdot V_G}{F_{\text{кл}} + F_M} = \frac{3,5 \cdot 3,2}{13,2 + 2,48} = 0,71 \text{ м}.$$

Ступінь чорноти газів залежить від їх складу, умов спалювання палива, запиленості та ін. Відомо, що випромінювальною здатністю володіють триатомні гази. Якщо вважати газову атмосферу в печі вільною від механічних зависань, то ступінь чорноти газів можна визначити як суму

$$\varepsilon_G = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \beta \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}},$$

де $\varepsilon_{\text{CO}_2}$ – ступінь чорноти вуглекислого газу;

β – поправочний коефіцієнт;

ε_{H_2O} – ступінь чорноти водяної пари.

Зазначені величини знаходять з графіків (додаток Е) залежно від температури газів і добутку парціального тиску газів CO_2 , H_2O на довжину випромінювального шару.

Парціальний тиск триатомних газів визначаємо за формулами:

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

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, kH/m^2 ($P_n = 98,1$ кПа).

На підставі наведеного $\varepsilon_r = f(P_{CO_2} \cdot S_{ef}; P_{H_2O} \cdot S_{ef}; t_r)$

$$P_{CO_2} \cdot S_{ef} = 0,0876 \cdot 98,1 \cdot 0,71 = 6,1 \text{ кН/м};$$

$$P_{H_2O} \cdot S_{ef} = 0,172 \cdot 98,1 \cdot 0,71 = 11,98 \text{ кН/м}.$$

Користуючись графіками (додаток Е) знаходимо значення ε_{CO_2} , ε_{H_2O} , β і визначаємо ε_r для різних температур, значення величин зводимо в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Значення ε_r і $C_{г.к.м}$ залежно від температури газу t_r

$t_r, ^\circ C$	ε_{CO_2}	ε_{H_2O}	β	ε_r	$C_{г.к.м}, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$
900	0,088	0,12	1,11	0,22	2,96
1000	0,082	0,105	1,11	0,199	2,82
1100	0,079	0,097	1,11	0,187	2,74
1200	0,071	0,09	1,11	0,17	2,61

Частка випромінювання, що йде від однієї поверхні до другої, називається кутовим коефіцієнтом $\varphi_{1,2}$ або $\varphi_{2,1}$ [5].

Визначаємо кутовий коефіцієнт $\varphi_{к.м}$ за такою формулою, що справедлива на випадок розташування металу на поді печі із зазорами:

$$\varphi_{к.м.} = \frac{F_m}{F_k + F_m} = \frac{2,48}{13,2 + 2,48} = 0,158.$$

Приведений коефіцієнт випромінювання «газ-кладка-метал» визначається з рівняння

$$C_{\text{Г.К.М.}} = \frac{5,77 \cdot \varepsilon_{\text{М}} \cdot \varepsilon_{\text{Г}}}{\varepsilon_{\text{Г}} + \varphi_{\text{К.М}}(1 - \varepsilon_{\text{Г}})} \left[\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}^4 \right]$$

Ступінь чорноти металу приймаємо $\varepsilon_{\text{М}} = 0,8$. Визначаємо приведені коефіцієнти випромінювання $C_{\text{Г.К.М.}} \left[\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}^4 \right]$:

- при $t_{\text{Г}} = 900^{\circ} \text{С}$

$$C_{\text{Г.К.М.}} = \frac{5,77 \cdot 0,8 \cdot 0,22}{0,22 + 0,158(1 - 0,199)} = 2,96 ;$$

- при $t_{\text{Г}} = 1000^{\circ} \text{С}$

$$C_{\text{Г.К.М.}} = \frac{5,77 \cdot 0,8 \cdot 0,199}{0,199 + 0,158(1 - 0,199)} = 2,82 ;$$

- при $t_{\text{Г}} = 1100^{\circ} \text{С}$

$$C_{\text{Г.К.М.}} = \frac{5,77 \cdot 0,8 \cdot 0,187}{0,187 + 0,158(1 - 0,187)} = 2,74 ;$$

- при $t_{\text{Г}} = 1200^{\circ} \text{С}$

$$C_{\text{Г.К.М.}} = \frac{5,77 \cdot 0,8 \cdot 0,17}{0,17 + 0,158 \cdot (1 - 0,17)} = 2,61$$

Розрахункові значення $C_{\text{Г.К.М.}}$ зводимо в таблицю 3.3.

Визначаємо приведені коефіцієнти випромінювання $C_{\text{Піч.М}} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4} \right]$ з рівняння

$$C_{\text{Піч.М}} = \frac{5,77 \cdot \varepsilon_{\text{М}} \cdot \varphi_{\text{М.К}}}{1 - \varphi_{\text{М.М}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{М}})},$$

де кутові коефіцієнти $\varphi_{\text{М.К}}$ і $\varphi_{\text{М.М}}$ визначаємо за формулами:

$$\varphi_{\text{М.К.}} = \frac{F_{\text{К}}}{F_{\text{М}} + F_{\text{К}}} = \frac{13,2}{2,48 + 13,2} = 0,84,$$

$$\varphi_{m.m} = \frac{F_m}{F_m + F_k} = \frac{2,48}{2,48 + 13,2} = 0,158.$$

Тоді

$$C_{nich-m} = \frac{5,77 \cdot 0,8 \cdot 0,84}{1 - 0,158 \cdot (1 - 0,8)} = 4,0.$$

3.4 Розрахунок нагрівання металу

При проведенні розрахунків нагрівання, необхідно знати склад і теплофізичні властивості тіла, що нагрівається: коефіцієнт теплопровідності λ , теплоємність C_p , питому масу ρ , коефіцієнт температуропровідності a , при цьому необхідно враховувати залежності теплофізичних властивостей від температури металу.

Приймаємо склад сталі 45Х: С = 0,45 %; Mn = 0,7 %; Si = 0,3 %; Gr=1,0 %.

Коефіцієнт теплопровідності сталі при $t = 0$ °С визначаємо з рівняння

$$\lambda_0 = 70 - 10 \cdot C - 16 \text{ Mn} - 33,7 \cdot \text{Si};$$

$$\lambda_0 = 70 - 10 \cdot 0,45 - 16 \cdot 0,7 - 33,7 \cdot 0,3 = 44,2 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}.$$

Для інших сталей можна користуватися додатком Г.

При різних температурах значення λ буде дорівнювати [5]:

$$\lambda_{200} = 0,95 \cdot \lambda_0 = 0,95 \cdot 44,2 = 42 \text{ Вт/м}\cdot\text{К};$$

$$\lambda_{400} = 0,85 \cdot \lambda_0 = 0,85 \cdot 44,2 = 37,6 \text{ Вт/м}\cdot\text{К};$$

$$\lambda_{600} = 0,75 \cdot \lambda_0 = 0,75 \cdot 44,2 = 33,1 \text{ Вт/м}\cdot\text{К};$$

$$\lambda_{800} = 0,68 \cdot \lambda_0 = 0,68 \cdot 44,2 = 30,0 \text{ Вт/м}\cdot\text{К};$$

$$\lambda_{1000} = 0,68 \cdot \lambda_0 = 0,68 \cdot 44,2 = 30,0 \text{ Вт/м}\cdot\text{К};$$

$$\lambda_{1200} = 0,73 \cdot \lambda_0 = 0,73 \cdot 44,2 = 32,3 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}.$$

На підставі розрахунку будуємо графік залежності коефіцієнтів теплопровідності від температури (рисунк 3.2).

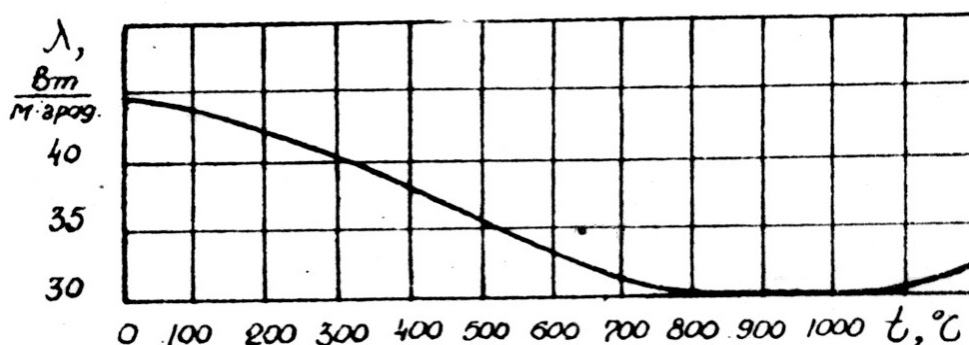


Рисунок 3.2 – Залежність коефіцієнта теплопровідності Ст45Х від температури

Питома маса сталі

$$\rho = 7880 - 40 \cdot C - 16 \cdot Mn - 73 \cdot Si;$$
$$\rho = 7880 - 40 \cdot 0,45 - 16 \cdot 0,7 - 73 \cdot 0,3 = 7820 \text{ кг/м}^3.$$

Ентальпію сталі, що містить вуглецю $C = 0,45 \%$, наведено на рисунку 3.3.

h , кДж/кг

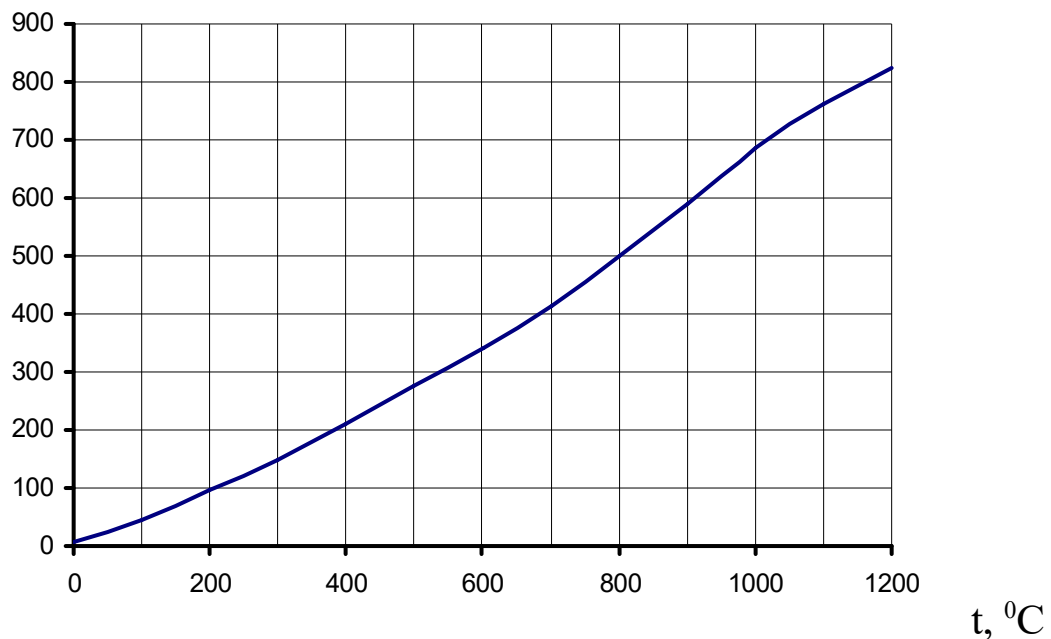


Рисунок 3.3 – Залежність ентальпії сталі 45Х від температури

Для інших сталей можна використовувати додаток Д.

Для розрахунку приймаємо такий режим нагрівання: перший період – нагрівання при постійній температурі печі ($t_{\text{печ}} = \text{const}$); другий період – вирівнювання температур за умови постійної температури поверхні ($t_n = \text{const}$). Нагрівання – однобічне.

3.4.1 Перший період нагрівання

Знаходимо допустиму температуру печі при нагріванні заготовок, яка визначається на підставі теплового опору і допустимої різниці температур металу, що нагрівається.

Допустима різниця температур визначається з рівняння

$$\Delta t_{\text{доп}} = \frac{1,25 \cdot \sigma_{\text{доп}}}{\beta \cdot E},$$

де $\sigma_{\text{доп}}$ – допустима напруга, Н/м²;

E – модуль пружності, Н/м²;

β – лінійний коефіцієнт розширення, °С⁻¹.

Для сталі 45Х [4]:

$$\sigma_{\text{доп}} = 350 \text{ МН/м}^2; E = 21,09 \cdot 10^4 \text{ МН/м}^2; \beta = 13,8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{С}.$$

На підставі того, що температурні напруги повинні враховуватися при нагріванні сталі до 500 °С, коефіцієнт теплопровідності λ буде визначатися з рівняння

$$\lambda = \frac{\lambda_{20} + \lambda_{500}}{2} = \frac{44 + 35}{2} = 39,5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К},$$

де λ_{20} – коефіцієнт теплопровідності при початковій температурі металу, $t = 20$ °С;

λ_{500} – теж саме при $t = 500$ °С (рисунок 3.2).

Тепловий опір металу, що нагрівається,

$$\frac{b}{\lambda} = \frac{0,08}{39,5} = 0,002 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}.$$

Допустима температура печі при $\Delta t_{\text{доп}} = 150$ °С і $\frac{b}{\lambda} = 0,002$ м²·К/Вт буде дорівнювати $t_{\text{печи}}^{\text{доп}} = 1100$ °С (див. додаток К).

Приймаємо температуру печі в першому періоді нагрівання $t_{печ}=1000^{\circ}\text{C}$.

Поділимо перший період за температурою поверхні на два інтервали:

перший інтервал – від $t_{п0} = 20^{\circ}\text{C}$ до $t_{п1} = 700^{\circ}\text{C}$;

другий інтервал – від $t_{п1} = 700^{\circ}\text{C}$ до $t_{п2} = 850^{\circ}\text{C}$.

Перший інтервал. Визначаємо початковий тепловий потік, $\text{Вт}/\text{м}^2$

$$q_0 = 1,1 \cdot C_{нич-м} \left[\left(\frac{T_{нич}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] = 1,1 \cdot 4,0 \cdot \left[\left(\frac{1000+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20+273}{100} \right)^4 \right] = 115224$$

де 1,1 – коефіцієнт, що враховує 10 % на тепловіддачу конвекцією, тому що температура димових газів вище 800°C .

Тепловий потік у кінці першого інтервалу

$$q_1 = 1,1 \cdot 4,0 \cdot \left[\left(\frac{1000+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{700+273}{100} \right)^4 \right] = 76111 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Коефіцієнт тепловіддачі на початку нагрівання

$$\alpha_0 = \frac{q_0}{t_{печ} - t_0} = \frac{115224}{1000 - 20} = 117,6 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі у кінці першого інтервалу

$$\alpha_1 = \frac{q_1}{t_{печ} - t_{п1}} = \frac{76111}{1000 - 700} = 253,7 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}.$$

Середнє значення коефіцієнта тепловіддачі

$$\alpha_{сеп1} = \frac{\alpha_0 + \alpha_1}{2} = \frac{117,6 + 253,7}{2} = 185,7 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}.$$

Середнє значення коефіцієнта теплопровідності

$$\lambda_{сеп} = \frac{\lambda_{20} + \lambda_{700} + \lambda_{1000}}{3} = \frac{44,2 + 44,2 + 32}{3} = 40,1 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}.$$

Критерій Біо

$$Bi_1 = \frac{\alpha \cdot b}{\lambda} = \frac{185,7 \cdot 0,08}{40,1} = 0,37.$$

Температурний критерій поверхні

$$\theta_{n_1} = \frac{t_{nec} - t_{n_1}}{t_{nec} - t_0} = \frac{1000 - 700}{1000 - 20} = 0,31.$$

Користуючись номограмою для розрахунку нагрівання або охолодження поверхні заготовки (рисунок И.1 додатка И), за температурним критерієм θ_{n_1} і критерієм Bi_1 знаходимо значення критерію Фур'є $F_{O1} = 3,2$ (у випадку циліндра див. додаток Ж).

За критеріями Bi_1 і F_{O1} із номограми (рисунок И.2 додатка И) знаходимо температурний критерій середини заготовок $\theta_{y_1} = 0,35$ (у випадку циліндра див. додаток Ж).

На підставі того, що в нашому випадку нагрівання однобічне, то під температурою центра мається на увазі температура нижньої поверхні заготовки. Температура центра заготовки в кінці першого інтервалу нагрівання буде дорівнювати

$$t_{y_1} = t_{nec} - \theta_{y_1} \cdot (t_{nec} - t_0) = 1000 - 0,35 \cdot (1000 - 20) = 657 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Уточнюємо значення коефіцієнта теплопровідності за приблизним значенням t_{y_1} , а потім відповідно уточнюємо розраховані вище величини:

$$\lambda_{сер} = \frac{\lambda_{20} + \lambda_{20} + \lambda_{700} + \lambda_{657}}{4} = \frac{44,2 + 44,2 + 32 + 32,12}{4} = 38,13 \text{ Вт/м}\cdot\text{К};$$

$$Bi = \frac{185,7 \cdot 0,08}{38,13} = 0,39; \quad F_0 = 3,05; \quad \theta_{y_1} = 0,36;$$

$$t_{y_1} = 1000 - 0,36 \cdot (1000 - 20) = 647 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Перепад температур по перерізу заготовки в кінці першого інтервалу

$$\Delta t_1 = t_{n_1} - t_{y_1} = 700 - 647 = 53 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Середня температура по перерізу заготовки

$$t_{\text{сер}_1} = t_{n_1} - \frac{2}{3} \Delta t_1 = 700 - \frac{2}{3} \cdot 53 = 665 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Розрахункова теплоємність у першому інтервалі

$$c_{p_1} = \frac{h_{t_{\text{сер}_1}} - h_{t_0}}{t_{\text{сер}_1} - t_0} = \frac{h_{665} - h_{20}}{665 - 20} = \frac{400 - 8,3}{665 - 20} = 0,61 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}.$$

Для інших сталей теплоємність можна визначити з додатка В, а ентальпію – з додатка Д.

Тепловміст сталі 45Х визначаємо з рисунка 3.3

$$h_{665} = 400 \text{ кДж/кг}; \quad h_{20} = 8,3 \text{ кДж/кг}.$$

Середнє значення коефіцієнта температуропровідності в першому інтервалі

$$a_{\text{сер}_1} = \frac{\lambda_{\text{сер}}}{c_{p_1} \cdot \rho} = \frac{38,13}{0,61 \cdot 10^3 \cdot 7820} = 79,9 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Час нагрівання у першому інтервалі

$$\tau_1 = \frac{F_0 \cdot b^2}{a_{\text{сер}_1}} = \frac{3,05 \cdot 0,08^2}{79,9 \cdot 10^{-7}} = 2443 \text{ с} = 0,68 \text{ год}.$$

Температура газу на початку нагрівання, $^\circ\text{C}$

$$t_{20} = 100 \sqrt[4]{\left(\frac{q_0}{C_{2.к.м}}\right) + \left(\frac{T_0}{100}\right)^4} - 273 = 100 \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{115224}{2,61}\right) + \left(\frac{20+273}{100}\right)^4} - 273 = 1177.$$

Температура газу в кінці першого інтервалу

$$t_{e_1} = 100 \sqrt[4]{\left(\frac{76111}{2,74}\right) + \left(\frac{700 + 273}{100}\right)^4} - 273 = 1111 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура кладки на початку нагрівання

$$t_{кл_0} = t_{кл_3} - (100 \div 150) \text{ } ^\circ\text{C},$$

де $t_{кл_3}$ – температура кладки у кінці нагрівання (визначається при розрахунку другого періоду)

$$t_{кл_0} = 860 - 110 = 750 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

На підставі дослідження внутрішня поверхня кладки невеликих камерних печей остигає за період вивантаження і завантаження матеріалу на $100 \div 150 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Другий інтервал. Початковий тепловий потік у другому інтервалі $q_{O_2} = q_1 = 76111 \text{ Вт/м}^2$.

Коефіцієнт тепловіддачі на початку інтервалу $\alpha_{02} = \alpha_1 = 253,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

Тепловий потік у кінці другого інтервалу

$$q_2 = 1,1 \cdot 4 \cdot \left[\left(\frac{1000 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{850 + 273}{100} \right)^4 \right] = 45571 \text{ Вт/м}^2.$$

Коефіцієнт тепловіддачі у кінці другого інтервалу

$$\alpha_2 = \frac{q_2}{t_{неч} - t_{n_2}} = \frac{45571}{1000 - 850} = 303,8 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Середнє значення коефіцієнта тепловіддачі

$$\alpha_{сер_2} = \frac{253,7 + 303,8}{2} = 279 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Середнє значення коефіцієнта теплопровідності

$$\lambda_{\text{сер}_2} = \frac{\lambda_{700} + \lambda_{657} + \lambda_{850}}{3} = \frac{32 + 32,12 + 30}{3} = 31,4 \text{ Вт/м}\cdot\text{К.}$$

Критерій Біо

$$Bi_2 = \frac{\alpha_{\text{сер}_2} \cdot b}{\lambda_{\text{сер}_2}} = \frac{279 \cdot 0,08}{31,4} = 0,71.$$

При розрахунку температурних критеріїв поверхні і центра θ_{n_2} і θ_{u_2} , а також розрахункової теплоємності будемо брати замість $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ середню температуру металу, що дорівнює у кінці першого інтервалу нагрівання $t_{\text{сер}_1} = 665 \text{ }^\circ\text{C}$.

Температурний критерій поверхні

$$\theta_{n_2} = \frac{t_{\text{неч}} - t_{n_2}}{t_{\text{неч}} - t_{\text{сер}_1}} = \frac{1000 - 850}{1000 - 665} = 0,45.$$

Користуючись номограмою (рисунок И.1 додатка И), за температурним критерієм θ_{n_2} і критерієм Bi_2 знаходимо значення критерію Фур'є $F_{O_2} = 1,0$.

За критеріями Bi_2 і F_{O_2} із номограми (рисунок И.2 додатка И) знаходимо температурний критерій середини заготовки у другому інтервалі нагрівання $\theta_{u_2} = 0,6$.

Температура центра заготовки у кінці другого інтервалу нагрівання буде дорівнювати

$$t_{u_2} = t_{\text{неч}} - \theta_{u_2} \cdot (t_{\text{неч}} - t_{\text{сер}_1}) = 1000 - 0,6 \cdot (1000 - 665) = 799 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Уточнюємо значення коефіцієнта теплопровідності за приблизним значенням t_{u_2} , а потім відповідно уточнюємо розраховані вище величини:

$$\lambda_{\text{сер}_2} = \frac{\lambda_{700} + \lambda_{665} + \lambda_{850} + \lambda_{799}}{4} = \frac{32 + 32,12 + 30 + 30}{4} = 31 \text{ Вт/м}\cdot\text{К};$$

$$Bi_2 = \frac{279 \cdot 0,08}{31} = 0,72 ;$$

$$F_{O_2} = 1,0 ; \theta_{u_2} = 0,60 ;$$

$$t_{u_2} = 1000 - 0,60 \cdot (1000 - 665) = 799 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Перепад температур по перерізу заготовки в кінці другого інтервалу

$$\Delta t_2 = t_{n_2} - t_{u_2} = 850 - 799 = 51 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Середня температура по перерізу заготовки

$$t_{\text{сер}2} = t_{n_2} - \frac{2}{3} \cdot \Delta t_2 = 850 - \frac{2}{3} \cdot 51 = 816 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Розрахункова теплоємність у другому інтервалі

$$c_{p_2} = \frac{h_{t_{\text{сер}2}} - h_{t_{\text{сер}1}}}{t_{\text{сер}2} - t_{\text{сер}1}} = \frac{507 - 400}{816 - 665} = 0,71 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}.$$

Ентальпію сталі 45Х визначаємо з рисунка 3.3.

Середнє значення коефіцієнта теплопровідності у другому інтервалі

$$a_{\text{сер}2} = \frac{\lambda_{\text{сер}2}}{c_{p_2} \cdot \rho} = \frac{31}{0,71 \cdot 10^3 \cdot 7820} = 56,3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Час нагрівання у другому інтервалі

$$\tau_2 = \frac{F_{O_2} \cdot b^2}{a_{\text{сер}2}} = \frac{1,0 \cdot 0,08^2}{56,3 \cdot 10^{-7}} = 1137 \text{ с} = 0,316 \text{ год}.$$

Температура газу на початку нагрівання $t_{z_{o_2}} = t_{z_1}$.

Температура газу в кінці другого інтервалу, $^\circ\text{C}$

$$t_{z_2} = 100 \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{q_2}{C_{z.k.m.}}\right) + \left(\frac{T_{n_2}}{100}\right)^4} - 273 = 100 \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{45571}{2,82}\right) + \left(\frac{850+273}{100}\right)^4} - 273 = 1065.$$

Температура кладки в кінці другого інтервалу

$$t_{кл_2} = 2 \cdot t_{печ_2} - t_{z_2} = 2 \cdot 1000 - 1065 = 935.$$

Загальний час нагрівання у першому періоді

$$\tau_I = \tau_1 + \tau_2 = 0,68 + 0,316 = 0,996 \text{ год.}$$

3.4.2 Другий період нагрівання

Ступінь вирівнювання температур

$$\delta = \frac{\Delta t_{\kappa}}{\Delta t_2} = \frac{5}{51} = 0,098.$$

Коефіцієнт вирівнювання температур при $\delta = 0,098$ для пластин $m = 0,99$ (див. додаток Л).

Середнє значення коефіцієнта теплопровідності у другому періоді (рисунок 3.2)

$$\lambda_{серII} = \frac{\lambda_{850} + \lambda_{799} + \lambda_{850} + \lambda_{845}}{4} = \frac{30 + 30,0 + 30 + 30}{4} = 30 \text{ Вт/м}\cdot\text{К.}$$

Середня температура в кінці другого і третього інтервалів:

$$t_{сер_2} = 816 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_{сер_3} = t_{n_3} - \frac{2}{3} \cdot \Delta t_{\kappa} = 850 - \frac{2}{3} \cdot 5 = 847 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

Розрахункова теплоємність у другому періоді

$$c_{pII} = \frac{h_{t_{cep3}} - h_{t_{cep2}}}{t_{cep3} - t_{cep2}} = \frac{h_{847} - h_{816}}{847 - 816} = \frac{530 - 507}{847 - 816} = 0,74 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}.$$

Середнє значення коефіцієнта температуропровідності

$$a_{II} = \frac{\lambda_{II}}{c_{pII} \cdot \rho} = \frac{30}{740 \cdot 7820} = 51,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Тривалість вирівнювання температур

$$\tau_{вир} = \frac{m \cdot b^2}{a} = \frac{0,99 \cdot 0,08^2}{51,8 \cdot 10^{-7}} = 1223 \text{ с} = 0,34 \text{ год}.$$

Тривалість витримки при термообробці для завершення структурних перетворень за літературними даними приймається приблизно подвоєному часу вирівнювання

$$\tau_{II} = 2 \cdot \tau_{вир} = 2 \cdot 1223 = 2446 \text{ с} = 0,68 \text{ год}.$$

Тепловий потік у кінці витримки

$$q_3 = \frac{2 \cdot \lambda_3 \cdot \Delta t_{\kappa}}{b} = \frac{2 \cdot 30 \cdot 5}{0,08} = 3750 \text{ Вт/м}^2.$$

Температура газу в кінці витримки

$$t_{z_3} = 100 \sqrt[4]{\frac{q_3}{c_{ГКМ}} + \left(\frac{T_{II_3}}{100}\right)^4} - 273 = 100 \sqrt[4]{\frac{3750}{2,96} + \left(\frac{850 + 373}{100}\right)^4} - 273 = 872 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Температура печі у кінці витримки

$$t_{печ} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{q_3}{c_{печ.м}} + \left(\frac{T_{II_3}}{100}\right)^4} - 273 = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{3750}{4} + \left(\frac{850 + 273}{100}\right)^4} - 273 = 866 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Температура кладки у кінці витримки

$$t_{кл3} = 2 \cdot t_{печ3} - t_{23} = 2 \cdot 866 - 872 = 860 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Загальний час нагрівання під гартування

$$\tau_{заг} = \tau_I + \tau_{II} = 0,996 + 0,68 = 1,676 \text{ год.}$$

Розрахункові дані зводимо в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 – Розрахункові дані нагрівання

Величини	Розмірність	Перший період		Другий період
		перший інтервал	другий інтервал	витримка
		$t_0 \div t_1$	$t_1 \div t_2$	$t_2 \div t_3$
1	2	3	4	5
t_n	$^\circ\text{C}$	20 ÷ 700	700 ÷ 850	850
$t_{печ}$	$^\circ\text{C}$	1000	1000	1000 ÷ 866
q_0	Вт/м^2	115224 ÷ 76111	76111 ÷ 45571	45571 ÷ 3750
α_o	$\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$	117,6 – 253,7	253,7 - 303,8	-
$\alpha_{сер}$	$\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$	185,7	279	-
$\lambda_{сер}$	$\text{Вт/м} \cdot \text{К}$	38,13	31	30
Bi	-	0,39	0,72	-

Продовження таблиці 3.4

1	2	3	4	5
θ_n	-	0,31	0,42	-
F_o	-	3,05	1,0	-
θ_u	-	0,36	0,6	-
t_u	$^\circ\text{C}$	20 - 647	647 - 799	799 – 845
Δt	$^\circ\text{C}$	53	51	5
$t_{сер}$	$^\circ\text{C}$	665	816	847
h_m	кДж/кг	8,3 ÷ 400	400 ÷ 507	507 ÷ 530

c_p	кДж/кг·К	0,61	0,71	0,74
$a_{сер}$	м ² /с	$79,4 \cdot 10^{-7}$	$56,3 \cdot 10^{-7}$	$51,8 \cdot 10^{-7}$
τ	год	0,68	0,316	0,68
t_2	°С	1177 ÷ 1111	1111 ÷ 1065	1065 ÷ 872
$t_{кл}$	°С	750	935	860

Знаходимо функцію $\theta_{\max} \left(\frac{a \cdot \tau}{b^2}; \frac{\alpha \cdot b}{\lambda} \right)$ з додатка М, яка відповідає максимальній різниці температур при $Bi = 0,39$, $\theta_{\max} = 0,17$.

Критерій F_o при $\theta_{\max} = 0,16$ буде дорівнювати $F_{o_m} = 0,36$.

Максимальна різниця температур між поверхнею і центром

$$\Delta t_{\max} = (t_{печ} - t_0) \cdot \theta_{\max} = (1000 - 20) \cdot 0,17 = 170 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Термін виникнення максимуму

$$\tau_{\max} = \frac{F_{o_m} \cdot b^2}{a_\tau} = \frac{0,36 \cdot 0,08^2}{79,4 \cdot 10^{-7}} = 290 \text{ с} = 0,081 \text{ год.}$$

За даними розрахунку будемо температурну та теплову діаграму нагрівання заготовок під гартування у камерній печі з нерухомим подом, яка приведена на рисунку 3.4.

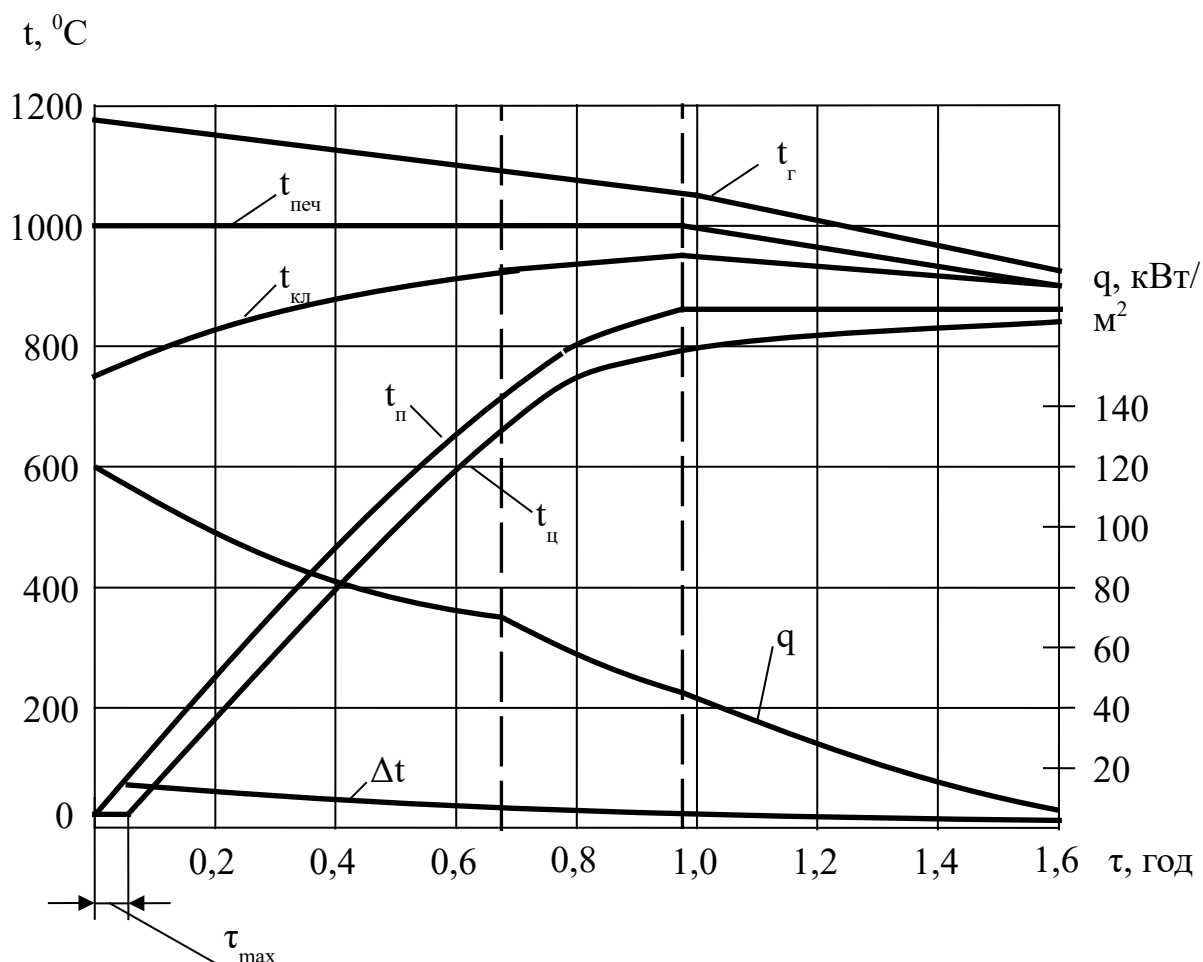


Рисунок 3.4 – Температурна та теплова діаграма нагрівання у камерній печі з нерухомим подом

3.4.3 Визначення продуктивності печі

Ємність печі

$$C = V_m \cdot \rho = 0,059 \cdot 7820 = 461 \text{ кг.}$$

Продуктивність печі

$$G = \frac{C}{\tau_{\text{заг}}} = \frac{461}{1,676} = 275,3 \text{ кг / год} = 0,076 \text{ кг/с.}$$

Напруженість поду печі

$$P = \frac{G}{F_{\text{под}}} = \frac{275,3}{2,02 \cdot 1,24} = 109,9 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{год.}$$

3.5 Тепловий баланс печі і визначення питомої витрати палива

Тепловий баланс печі складаємо на весь період нагрівання та витримки.

Прихідні статті теплового балансу

1 Хімічна теплота палива

$$Q_{\text{хп}} = Q_{\text{н}}^p \cdot B \cdot \tau_{\text{заг}} = 35190 \cdot B \cdot 6034 = 212336 \cdot 10^3 \cdot B \text{ кДж.}$$

2 Фізична теплота повітря при $t_{\text{нов}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_{\text{ф}}^{\text{нов}} = V_{\text{нов}} \cdot C'_{\text{нов}} \cdot t_{\text{нов}} \cdot B \cdot \tau_{\text{заг}} = 10,2 \cdot 1,3 \cdot 20 \cdot B \cdot 6034 = 1600 \cdot 10^3 \cdot B \text{ кДж.}$$

Витратні статті теплового балансу

1 Теплота, що витрачається на нагрів металу

$$Q_{\text{ТП}} = \epsilon \cdot (h_{t_{\text{сер.з}}} - h_{t_0}) = 461 \cdot (530 - 8,3) = 240503,7 \text{ кДж.}$$

2 Втрати теплоти, що відходять з димовими газами

$$Q_{\text{дг}} = V_{\text{нг}} \cdot h_{\text{дг}} \cdot B \cdot \tau_{\text{заг}}, \text{ кДж,}$$

де $h_{\text{дг}}$ – ентальпія димових газів при середній температурі $t_{\text{сер.дг}}$ диму за період нагрівання.

Середня температура димових газів, що відходять

$$t_{сер.дг} = \frac{t_{20} + t_{21} + t_{22} + t_{23}}{4} = \frac{1177 + 1111 + 1065 + 872}{4} = 1056^{\circ}\text{C}.$$

Надлишок повітря у продуктах горіння

$$v = \frac{(\alpha - 1) \cdot V_0}{V_{нг}} \cdot 100 = \frac{(1,1 - 1) \cdot 9,32}{11,27} \cdot 100 = 8,3 \%$$

Ентальпія димових газів при $t_{сер.дг}$ і $v = 8,3 \%$ згідно з додатком Н буде дорівнювати

$$h_{1056} = 1650 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}.$$

Для доменного газу при $Q_H^p = 8 \dots 12$ МДж/м³ використовується додаток П, а для $Q_H^p < 8$ МДж/м³ – додаток Р.

Теплота з димовими газами, що відходять, буде дорівнювати

$$Q_{дг} = 11,27 \cdot 1650 \cdot B \cdot 6034 = 112205 \cdot 10^3 \cdot B, \text{ кДж},$$

де 6034 – загальний час нагрівання заготовок.

3 Втрати теплоти теплопровідністю через стіни і зведення печі

Через стіни:

а) у першому періоді

$$Q_{ст}^I = \frac{1}{\left(\frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_1}\right)} \cdot (t'_{кл} - t_{нов}) \cdot F_{ст} \cdot \tau_I;$$

де $t'_{кл}$ – середня температура внутрішньої поверхні кладки за перший період;

$$t'_{кл} = \frac{t_{кл0} + t_{кл2}}{2} = \frac{750 + 935}{2} = 843^{\circ}\text{C},$$

де $t_{нов}$ – температура повітря, 20 °С;

S_1 – товщина стін, $S_1 = 350$ мм (шамот);

$F_{ст}$ – площа поверхні стін, $F_{ст} = 8,07$ м²;

τ_1 – час нагрівання заготовок у першому періоді, $\tau_1 = 0,996$ год;

α_1 – коефіцієнт тепловіддачі, приймаємо $\alpha_1 = 16 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$;

λ_1 – коефіцієнт теплопровідності шамоту;

$$\lambda_1^I = 0,7 + 0,00064 \cdot t_{кл.сер} = 0,7 + 0,00064 \cdot 432 = 0,98 \frac{Вт}{м \cdot К} ;$$

$$t_{кл.сер} = \frac{t'_{кл} + t_0}{2} = \frac{843 + 20}{2} = 432^\circ C ;$$

$$Q_{ст}^I = \frac{1}{\left(\frac{0,35}{0,98} + \frac{1}{16}\right)} \cdot 8,07 \cdot (843 - 20) \cdot 3586 = 56848 \text{ кДж} ;$$

б) у другому періоді

$$Q_{ст}^{II} = \frac{1}{\left(\frac{0,35}{0,994} + \frac{1}{16}\right)} \cdot (898 - 20) \cdot 8,07 \cdot 2446 = 41853 \text{ кДж} ;$$

$$t_{кл}^{II} = \frac{935 + 860}{2} = 898^\circ C$$

$$t_{кл.сер} = \frac{898 + 20}{2} = 459^\circ C$$

$$\lambda^{II} = 0,7 + 0,00064 \cdot 459 = 0,994 \frac{Вт}{м \cdot К} ;$$

Через зведення:

а) у першому періоді

$$Q_{зв}^I = \frac{1}{\left(\frac{0,23}{0,98} + \frac{1}{16}\right)} \cdot (843 - 20) \cdot 2,62 \cdot 3586 = 25947 \text{ кДж} ,$$

де $S_2 = 0,23$ – товщина зведення (шамот);

$F_{зв}$ – площа поверхні зведення, $F_{зв} = 2,62$ м²;

б) у другому періоді

$$Q_{зв}^{II} = \frac{1}{\left(\frac{0,23}{0,994} + \frac{1}{16}\right)} \cdot (898 - 20) \cdot 2,62 \cdot 2446 = 19138 \text{ кДж}$$

Сумарні втрати теплоти теплопровідністю

$$Q_{менл} = 56848 + 41853 + 25947 + 19138 = 143786 \text{ кДж.}$$

4 Втрати теплоти випромінюванням при посаді і видачі заготовок із печі

Втрати теплоти випромінюванням залежать від температури печі, площі отвору та товщини стінки, в якій є відкритий отвір, і визначаються формулою

$$Q_{ен} = 5,7 \cdot \Phi \cdot \Psi \cdot \left[\left(\frac{t_{зо} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{нов} + 273}{100} \right)^4 \cdot F_{отв} \right], \text{ кДж,}$$

де $F_{отв}$ – площа отвору (вікна).

Розміри вікна такі: ширина $v=1240$ мм, висота $a=500$ мм, товщина кладки $l=350$ мм.

$$F_{отв} = v \cdot a = 1,24 \cdot 0,5 = 0,62 \text{ м}^2;$$

Φ – коефіцієнт діафрагмування, визначаємо з рисунка Е.1 (додаток Е).

$$\frac{l}{a} = \frac{0,35}{0,5} = 0,7; \quad \frac{a}{v} = \frac{0,5}{1,24} = 0,4; \quad \Phi = 0,61;$$

Ψ – частка часу, коли вікно відкрите.

Тривалість посаду і видачі τ приймаємо по 8 хвилин ($\Psi = 480$ с).

Втрати теплоти випромінюванням при посаді

$$Q_{ен}^{noc} = 5,7 \cdot 0,61 \cdot 480 \cdot \left[\left(\frac{1177 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \cdot 0,62 \right] = 45664 \text{ кДж.}$$

Втрати теплоти випромінюванням при видачі

$$Q_{\text{вп}}^{\text{вид}} = 5,7 \cdot 0,61 \cdot 480 \cdot \left[\left(\frac{872 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \cdot 0,62 \right] = 17709 \text{ кДж.}$$

5 Тепло, акумульоване кладкою печі

Футерівка печі складається з шамоту, причому товщина стін $S = 350$ мм, зведення $S = 230$ мм.

Тепло, що акумулюється кладкою, визначається за формулою

$$Q_{\text{ак}} = q_{\text{ак}} \cdot F_{\text{кл}} = 0,75 \cdot (t_{\text{кл}2} - t_{\text{кл}0}) \cdot \sqrt{\lambda \cdot C_p \cdot \rho \cdot \tau_I} \cdot F_{\text{кл}},$$

де $F_{\text{ст}}$ – площа поверхні кладки, м^2 ;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, з якого зроблено кладку, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$;

C_p – теплоємність матеріалу кладки, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;

ρ – питома маса матеріалу кладки, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

$t_{\text{кл}2}$ – температура кладки в кінці першого періоду нагрівання, К;

$t_{\text{кл}0}$ – температура кладки на початку нагрівання, К;

τ_I – загальний час нагрівання заготовок у першому періоді.

Середня температура внутрішньої поверхні кладки за перший період

$$t'_{\text{кл}} = \frac{t_{\text{кл}0} + t_{\text{кл}2}}{2} = \frac{750 + 935}{2} = 843 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

Середня температура по перерізу кладки

$$t_{\text{кл.сер}} = \frac{t'_{\text{кл}} + t_0}{2} = \frac{843 + 20}{2} = 432 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

Коефіцієнт теплопровідності шамоту (додаток С)

$$\lambda = 0,7 + 0,64 \cdot 10^{-3} \cdot t_{\text{кл.сер}} = 0,7 + 0,00064 \cdot 432 = 0,98 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Теплоємність шамоту (додаток С)

$$C_p = 0,8 + 0,315 \cdot 10^{-3} \cdot t_{\text{кл.сер}} = 0,8 + 0,000315 \cdot 432 = 0,936 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = 936 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Питома маса шамоту $\rho = 1860 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Тепло, що акумулюється кладкою, буде дорівнювати

$$Q_{\text{ак}} = 0,75 \cdot (935 - 750) \cdot \sqrt{0,98 \cdot 936 \cdot 1860 \cdot 3586} \cdot 13,2 \cdot 10^{-3} = 143258 \text{ кДж}.$$

Загальні втрати теплоти і витрати теплоти на акумуляцію

$$\sum Q_{\text{втр}} = 143258 + 63373 + 143786 + 112205 \cdot 10^3 \cdot B = 350417 + 112205 \cdot 10^3 \cdot B, \text{ кДж},$$

де B – витрата палива, $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$.

Прирівнюємо приходні і витратні статті теплового балансу та визначаємо середньогодинну витрату палива:

$$212336 \cdot 10^3 \cdot B + 1600 \cdot 10^3 \cdot B = 240503,7 + 350417 + 112205 \cdot 10^3 \cdot B;$$

$$101731 \cdot 10^3 \cdot B = 590920,7;$$

$$B = 0,0058 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 20,9 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}.$$

Тепловий баланс печі зведено в таблицю 3.5.

Відхил балансу

$$\frac{1241,5 - 1241}{1241} \cdot 100 = 0,024 \%.$$

Таблиця 3.5 – Тепловий баланс камерної печі

Стаття	Прихід теплоти		Стаття	Витрати теплоти	
	МДж, за період	%		МДж, за період	%
1 Теплота від згоряння палива ($212336 \cdot 0,0058 \cdot 10^3$)	1232	99,27	1 Теплота, що засвоєна металом	240	19,3
2 Фізична теплота повітря ($1600 \cdot 0,0058 \cdot 10$)	9,28	0,73	2 Втрати теплоти, що відходить з димовими газами ($112205 \cdot 0,0058 \cdot 10$)	651	52,5
			3 Втрати теплоти теплопровідністю	144	11,6
			4 Втрати теплоти випромінюванням	63	5,1
			5 Теплота, акумульована кладкою	143	11,5
Разом	1241,3	100	Разом	1241	100

3.6 Техніко-економічні показники роботи печі

Коефіцієнт використання палива при $t_{\text{дг.сер}} = 1056^\circ\text{C}$

$$\eta_{\text{квп}} = \frac{Q_H^p + Q_{\text{ф.нов}} - Q_{\text{дг}}}{Q_H^p},$$

де $Q_H^p = 35190 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3};$

$$Q_{\text{ф.нов}} = V_{\text{нов}} \cdot C_p^{\text{нов}} \cdot t_{\text{нов}}^{20} = 10,2 \cdot 1,3 \cdot 20 = 265,2 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3};$$

$$Q_{\text{дг}} = V_{\text{дг}} \cdot h_{\text{дг}}^{1056} = 11,27 \cdot 1650 = 18596 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3};$$

$$\eta_{\text{квп}} = \frac{35190 + 265 - 18596}{35190} = 0,479.$$

Засвоєна теплова потужність

$$M_{засв} = \frac{Q_{мп}}{\tau_{заг}} = \frac{240503}{6034} = 39,86 \text{ кВт}.$$

Корисна теплова потужність (середня)

$$M_{кор.сер} = \frac{M_{засв}}{\eta_{квп}} = \frac{39,86}{0,479} = 83,2 \text{ кВт}.$$

Потужність холостого ходу (середня)

$$M_{хх.сер} = \frac{Q_{втр}}{\tau_{заг} \cdot \eta_{квп}} = \frac{350417}{6034 \cdot 0,479} = 121,2 \text{ кВт}.$$

Загальна теплова потужність

$$M_{заг.сер} = M_{кор.сер} + M_{хх.сер} = 83,2 + 121,2 = 204,4 \text{ кВт}.$$

Середньогодинна витрата палива

$$V_{сер} = \frac{M_{заг.сер}}{Q_n^p} = \frac{204,4}{35190} = 0,0058 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 20,9 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}.$$

Витрата теплоти на 1т металу (середня)

$$q = \frac{M_{заг.сер}}{G} = \frac{204400}{0,076} = 2689 \frac{\text{МДж}}{\text{т}}.$$

Витрата умовного палива 1т металу

$$V_{умп} = \frac{q}{7000} = \frac{2689}{29,3} = 91,8 \frac{\text{кг}}{\text{т}},$$

де $29,3 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$ - теплота згоряння умовного палива.

Коефіцієнт корисної дії печі

$$\eta_{\text{ккд}} = \frac{M_{\text{засв}}}{M_{\text{заг.сер}}} = \frac{39,86}{204,4} \cdot 100 = 19,5 \%$$

На підставі аналізу теплового балансу слід відмітити, що при роботі печі значна кількість теплоти втрачається з димовими газами, що покидають робочий простір. Для використання теплоти димових газів слід установити рекуператор для підігрівання повітря.

Визначаємо ефективність встановлення на печі металевого рекуператора. Приймаємо температуру підігрівання повітря у рекуператорі $t_{\text{нов}} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$.

Теплота, що вноситься підігрітим повітрям,

$$Q_{\text{ф.нов}} = V_{\text{нов}} \cdot C_{\text{нов}} \cdot t_{\text{нов}} = 10,2 \cdot 1,318 \cdot 300 = 4033 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$$

Коефіцієнт використання палива (середній)

$$\eta_{\text{квп}} = \frac{35190 + 4033 - 18596}{35190} = 0,586$$

Теплова потужність печі (середня)

$$M_{\text{заг.сер}} = \frac{39,86}{0,586} + \frac{350417}{6034 \cdot 0,586} = 68,02 + 99,1 = 167,12 \text{ кВт}$$

Втрата теплоти на 1 т металу

$$q = \frac{M_{\text{заг.сер}}}{G} = \frac{167,12}{0,076} = 2199 \frac{\text{МДж}}{\text{т}}$$

Витрата умовного палива

$$B_{\text{умн}} = \frac{2199}{29,3} = 75 \frac{\text{кг}}{\text{т}}$$

Коефіцієнт корисної дії печі

$$\eta_{\text{ккд}} = \frac{M_{\text{засв}}}{M_{\text{заг.сер}}} \cdot 100 = \frac{39,86}{167,12} \cdot 100 = 23,85 \%$$

Таким чином, при використанні теплоти димових газів для підігрівання у рекуператорі повітря до 300 °С, що йде на згоряння палива, збільшуються коефіцієнт використання палива (к.в.п) і коефіцієнт корисної дії (к.к.д) печі, а витрата теплоти на 1 т металу, що нагрівається, відповідно зменшується у 1,22 разу.

Для підігрівання повітря до 300°С пропонується установити щілинний радіаційний рекуператор з однобічним обігрівом.

4 Вибір газового пальника

На практиці спалювання газу здійснюється у топочних пристроях, що складаються з газових пальників і камери згоряння. Призначення газового пальника – це підготовка суміші газу і повітря; подання газоповітряної суміші у робочий простір у заданому напрямку; забезпечення займання газоповітряної суміші при всіх навантаженнях; створення факела необхідної довжини і випромінювальної здатності; створення необхідної інтенсивності горіння; забезпечення повного згоряння газу. Виконання перерахованих функцій можливе тільки при правильному сполученні пальників з камерами згоряння. У ВТУ з невеликими робочими камерами широко використовуються нормалізовані багатоструминні пальники типу ГНП (пальник низького тиску для природного газу) конструкції проектного інституту “Теплопроект”. Інститутом розроблено 9 типорозмірів пальників ГНП з діаметром носика 25 ÷ 145 мм, пропускною здатністю по газу 0,0025 ÷ 0,1 м³/с для спалювання газу з теплою згоряння 30000 ÷ 45000 кДж/м³. Надлишковий тиск газу перед пальником складає 0,1 ÷ 8 кПа. Температура підігрівання повітря до 500 °С.

4.1 Вибір та розрахунок газового пальника конструкції “Теплопроект”

Вихідні дані:

- витрата газу пальниками $V_{o.2} = 0,0058 \frac{m^3}{c}$;
- кількість пальників у робочому просторі $n = 2 шт$;
- теоретично необхідна кількість повітря

для спалювання 1 м³ газу $V_{нов}^0 = 9,32 \frac{m^3}{m^3}$;

- коефіцієнт надлишку повітря..... $\alpha = 1,1$;
- температура повітря $t_{нов} = 300^\circ C$;
- температура газу $t_2 = 20^\circ C$;
- надлишковий тиск газу $P_{2.н} = 300 Па$;
- склад природного газу (об’ємна частка у відсотках):

$CH_4 = 93,2$, $C_2H_6 = 0,7$, $C_3H_8 = 0,6$, $C_4H_{10} = 0,6$, $N_2 = 4,9$.

1 Продуктивна здатність одного пальника

$$V_{o.2} = \frac{B_2}{n} = \frac{0,0058}{2} = 0,0029 \frac{m^3}{c}.$$

2 Витрата повітря на пальник за нормальними умовами

$$V_{o.нов} = \alpha \cdot V_{нов}^0 \cdot V_{o.2} = 1,1 \cdot 9,32 \cdot 0,0029 = 0,0297 \frac{m^3}{c}.$$

3 Розрахункова витрата повітря

$$V_{нов}^{розр} = V_{o.нов} \cdot \sqrt{\frac{T_{нов}}{293}} = 0,0297 \cdot \sqrt{\frac{300 + 273}{293}} = 0,0415 \frac{m^3}{c}.$$

4 Розрахункова витрата газу

$$V_2^{розр} = V_{o.2} \cdot \sqrt{\frac{T_2 \cdot \rho_{o.2}}{293 \cdot \rho_{o.2p}}} = 0,0029 \cdot \sqrt{\frac{(20 + 273) \cdot 0,764}{293 \cdot 0,73}} = 0,00297 \frac{m^3}{c},$$

де $\rho_{o.зр}$ – питома маса газу, для якого побудовано графік (рисунок Т.2 додатка Т), $\rho_{o.зр} = 0,73 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

$$\rho_{o.з} = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i \cdot r_i}{22,4} = \frac{1}{22,4} \cdot (16 \cdot 0,932 + 30 \cdot 0,007 + 44 \cdot 0,006 + 58 \cdot 0,006 + 28 \cdot 0,049) = 0,764 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

5 Згідно з графіком а (додаток Т) за розрахунковою витратою газу $V_2^{розр} = 0,00297 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ і надлишковим тиском газу $P_{2.н} = 300 \text{ Па}$ вибираємо пальник ГНП – 4.

6 З графіка б (додаток Т) визначаємо необхідний тиск повітря $P_{нов.н} = 200 \text{ Па}$.

7 З таблиці Т.1 (додаток Т) визначаємо розміри газового пальника ГНП – 4, у міліметрах,

$$d_{нз} = 55, \quad d_2 = 25,4, \quad d_{нов} = 80, \\ L_1 = 175, \quad L_2 = 250, \quad L_3 = 380, \quad L_4 = 240.$$

8 Швидкість газу при робочих умовах у вхідному перерізі пальника

$$W_2^{вх} = \frac{V_2^{вх}}{F_2^{вх}} = \frac{4 \cdot V_{o.з}^{вх} \cdot T_2}{\pi \cdot d_2^2 \cdot T_0} = \frac{4 \cdot 0,0029 \cdot 293}{3,14 \cdot 0,0254^2 \cdot 273} = 6,15 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

9 Швидкість повітря у вхідному перерізі пальника

$$W_{o.нов}^{вх} = \frac{V_{o.нов}^{вх} \cdot 4}{\pi \cdot d_{нов}^2} = \frac{0,0297 \cdot 4}{3,14 \cdot 0,08^2} = 5,94 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

При робочих умовах швидкість повітря буде дорівнювати

$$W_{нов}^{вх} = W_{o.нов}^{вх} \cdot \frac{T_{нов}}{T_0} = 5,94 \cdot \frac{300 + 273}{273} = 12,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Рекомендована швидкість повітря у вхідному перерізі складає

$$W_{нов}^{вх} = 10 \div 15 \frac{м}{с}.$$

10 Швидкість суміші у вихідному перерізі

$$W_{сум} = \frac{V_{нов} + V_2}{F_{н2}} = \frac{4 \cdot (V_{о.нов} \cdot T_{нов} + V_{о.2} \cdot T_2)}{\pi \cdot d_{н2}^2 \cdot 273} = \frac{4 \cdot (0,0297 \cdot 573 + 0,0029 \cdot 293)}{3,14 \cdot 0,055^2 \cdot 273} = 27,5 \frac{м}{с}$$

Рекомендована швидкість суміші у вихідному перерізі складає

$$W_{сум} = 20 \div 40 \frac{м}{с}.$$

Усі швидкості лежать у межах рекомендованих значень [7].

5 Розрахунок щілинного радіаційного рекуператора з однобічним обігрівом

Вихідні дані:

- витрата повітря..... $V_{нов} = 0,059 \frac{м^3}{с}$;
- витрата димових газів..... $V_{д2} = 0,065 \frac{м^3}{с}$;
- температура повітря початкова..... $t'_{нов} = 20^\circ C$;
- температура повітря кінцева..... $t''_{нов} = 300^\circ C$;
- температура димових газів на вході у рекуператор..... $t'_{д2} = 1056^\circ C$;
- склад димових газів:.....

$$CO_2 = 8,76\% \quad H_2O = 17,2\% \quad O_2 = 1,74\% \quad N_2 = 72,3\%.$$

Розрахунок рекуператора

1 Приймаємо внутрішній діаметр рекуператора $D = 0,45$ м.

2 Визначаємо температуру димових газів за рекуператором.

На виході з рекуператора тепловміст димових газів визначається з рівняння теплового балансу [5, 10]

$$h''_{\partial z} = h'_{\partial z} - \frac{V_{\text{пов}} \cdot (h''_{\text{пов}} - h'_{\text{пов}})}{\xi \cdot V_{\partial z}};$$

де $h'_{\partial z}$ – тепловміст димових газів на вході в рекуператор при $t'_{\partial z} = 1056^{\circ}\text{C}$;

$$h'_{\partial z} = r_{\text{CO}_2} \cdot h_{\text{CO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}} \cdot h_{\text{H}_2\text{O}} + r_{\text{O}_2} \cdot h_{\text{O}_2} + r_{\text{N}_2} \cdot h_{\text{N}_2} = 0,0876 \cdot 2346 + 0,172 \cdot 1839 + \\ + 0,0174 \cdot 1568,5 + 0,723 \cdot 1475,5 = 205,5 + 316,3 + 27,3 + 1066,86 = 1616 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} ;$$

$h'_{\text{пов}} = 26 \text{ кДж/м}^3$ – тепловміст повітря при $t'_{\text{пов}} = 20^{\circ}\text{C}$;

$h''_{\text{пов}} = 394,4 \text{ кДж/м}^3$ – тепловміст повітря при $t''_{\text{пов}} = 300^{\circ}\text{C}$;

ζ – коефіцієнт, що враховує втрати теплоти через кладку рекуператора, у даному випадку $\zeta = 1$.

$$h''_{\partial z} = 1616 - \frac{0,059 \cdot (394,4 - 26)}{0,065 \cdot 1} = 1281,6 \text{ кДж/м}^3.$$

Цьому тепловмісту відповідає температура димових газів $t''_{\text{др}} = 840^{\circ}\text{C}$.

Середня температура димових газів у рекуператорі

$$t_{\partial z} = \frac{t'_{\partial z} + t''_{\partial z}}{2} = \frac{1056 + 840}{2} = 948^{\circ}\text{C}.$$

Для визначення коефіцієнта випромінювання на внутрішню трубу рекуператора знаходимо ефективну товщину газового шару

$$\bar{S} = 0,9 \cdot D = 0,9 \cdot 0,45 = 0,405 \text{ м}.$$

За знайденим значенням \bar{S} і парціальними тисками P_{CO_2} , P_{H_2O} знаходимо силу поглинання

$$P_{CO_2} \cdot \bar{S} = 0,0876 \cdot 98,1 \cdot 0,405 = 3,48 \text{ кН/м};$$

$$P_{H_2O} \cdot \bar{S} = 0,172 \cdot 98,1 \cdot 0,405 = 6,83 \text{ кН/м}.$$

Користуючись графіками (додаток Е) знаходимо ступінь чорноти ε_{CO_2} , ε_{H_2O} , β і визначаємо ε_2 за рівнянням

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{CO_2} + \beta \cdot \varepsilon_{H_2O} = 0,072 + 1,18 \cdot 0,08 = 0,166.$$

Ступінь чорноти стінки рекуператора приймаємо $\varepsilon_{cm} = 0,8$. Зведений коефіцієнт випромінювання визначаємо за формулою

$$C_{зв} = \frac{5,75}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1}{\varepsilon_{cm}} - 1} = \frac{5,75}{\frac{1}{0,166} + \frac{1}{0,8} - 1} = 0,92 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4.$$

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією на повітряному боці рекуператора знаходимо за формулою

$$\alpha = (3,57 + 0,00174 \cdot t_{нов}) \frac{W_{нов}^{0,8}}{d_{екв}^{0,2}} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К};$$

де $t_{нов}$ – середня температура повітря

$$t_{нов} = \frac{t'_{нов} + t''_{нов}}{2} = \frac{20 + 300}{2} = 160 \text{ }^\circ\text{C},$$

$W_{нов}$ – швидкість повітря (приймаємо $W_{нов} = 12 \text{ м/с}$).
Ширина кільцевої щілини для проходження повітря

$$\delta = \frac{V_{нов}}{\pi \cdot D \cdot W_{нов}} = \frac{0,059}{3,14 \cdot 0,45 \cdot 12} = 0,0035 \text{ м}.$$

Еквівалентний діаметр визначаємо за формулою

$$d_{екв} = \frac{4 \cdot f}{\Pi},$$

де f – площа поперечного перерізу щілини

$$f = \pi \cdot D \cdot \delta;$$

Π – периметр, що обтікає потоком.

При однобічному обігріві

$$\Pi = \pi \cdot D,$$

тоді

$$d_{екв} \frac{4 \cdot \pi \cdot D \cdot \delta}{\pi \cdot D} = 4\delta = 4 \cdot 0,0035 = 0,014 \text{ м};$$

$$\alpha_{нов} = (3,57 + 0,00174 \cdot 160) \cdot \frac{12^{0.8}}{0,014^{0.2}} = 65,95 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Середня температура внутрішньої стінки рекуператора $T_{ст1}$ (без урахування випромінювання між трубами) визначається за формулою

$$\bar{T}_{ст} = T_0 \cdot f(a);$$
$$T_0 = \frac{C_{зв}}{\alpha_{нов}} \cdot \left(\frac{\bar{T}_{\partial 2}}{100} \right) + \bar{T}_{нов} = \frac{0,92}{65,95} \cdot \left(\frac{948 + 273}{100} \right)^4 + (160 + 273) = 743 \text{ К},$$

де $f(a)$ – визначається за величиною a

$$a = \frac{C_{зв}}{100 \cdot T_0} \cdot \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 = \frac{0,92}{100 \cdot 743} \cdot \left(\frac{743}{100} \right)^4 = 0,038.$$

При $a = 0,038$ $f(a) = 0,967$ (таблиця У.1 додатка У).

Тоді $T_{cm1} = 743 \cdot 0,967 = 718K = 445 \text{ }^\circ\text{C}$.

Температуру стінки зовнішньої труби t_{ct2} приймаємо, що вона дорівнює температурі повітря $t_{ct2} = t_{нов} = 160 \text{ }^\circ\text{C}$.

Визначаємо коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням від димових газів до стінки $\alpha_{\partial z}$ і між стінками α_{cm} за такими формулами, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$:

$$\alpha_{\partial z} = \frac{C_{зв} \left[\left(\frac{\bar{T}_{\partial z}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\bar{T}_{cm1}}{100} \right)^4 \right]}{\bar{T}_{\partial z} - \bar{T}_{cm1}} = \frac{0,92 \cdot \left[\left(\frac{948 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{445 + 273}{100} \right)^4 \right]}{1221 - 718} = 35,8 \text{ ;}$$

$$\alpha_{cm} = \frac{4 \cdot \left[\left(\frac{\bar{T}_{cm1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\bar{T}_{cm2}}{100} \right)^4 \right]}{\bar{T}_{cm1} - \bar{T}_{cm2}} = \frac{4 \cdot \left[\left(\frac{445 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{160 + 273}{100} \right)^4 \right]}{718 - 433} = 32,4 \text{ .}$$

Уточнюємо значення середньої температури внутрішньої труби з урахуванням випромінювання між стінками за формулою, $^\circ\text{C}$:

$$t_{cm1} = \frac{(\alpha_{\partial z} \cdot \bar{t}_{\partial z} + \alpha_{нов} \cdot \bar{t}_{нов}) \cdot (\alpha_{нов} + \alpha_{cm}) + \alpha_{cm} \cdot \alpha_{нов} \cdot \bar{t}_{нов}}{(\alpha_{нов} + \alpha_{cm}) \cdot (\alpha_{нов} + \alpha_{\partial z} + \alpha_{cm}) - \alpha_{cm}^2} =$$

$$= \frac{(35,8 \cdot 948 + 65,95 \cdot 160) \cdot (65,95 + 32,4) + 32,4 \cdot 65,95 \cdot 160}{(65,95 + 32,4) \cdot (65,95 + 35,8 + 32,4) - 32,4^2} = 641 \text{ .}$$

Визначаємо питомий тепловий потік $q_{сер}$, $\text{Вт}/\text{м}^2$, на внутрішню трубу за формулою

$$q_{сер} = C_{зв} \cdot \left[\left(\frac{T_{\partial z}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{cm}}{100} \right)^4 \right] = 0,92 \cdot \left[\left(\frac{948 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{641 + 273}{100} \right)^4 \right] = 14027 \text{ .}$$

Кількість теплоти, що передана повітрю

$$Q_{нов} = V_{нов} \cdot (h''_{нов} - h'_{нов}) \cdot 10^3 = 0,059 \cdot (394,4 - 26) \cdot 10^3 = 21736 \text{ Вт.}$$

Визначаємо поверхню нагрівання рекуператора за формулою

$$F = \frac{Q_{нов}}{q_{сер}} = \frac{21736}{14027} = 1,55 \text{ м}^2.$$

Маючи поверхню нагрівання рекуператора і внутрішній діаметр, визначаємо його висоту з рівняння

$$H = \frac{F}{\pi \cdot D} = \frac{1,55}{3,14 \cdot 0,45} = 1,1 \text{ м.}$$

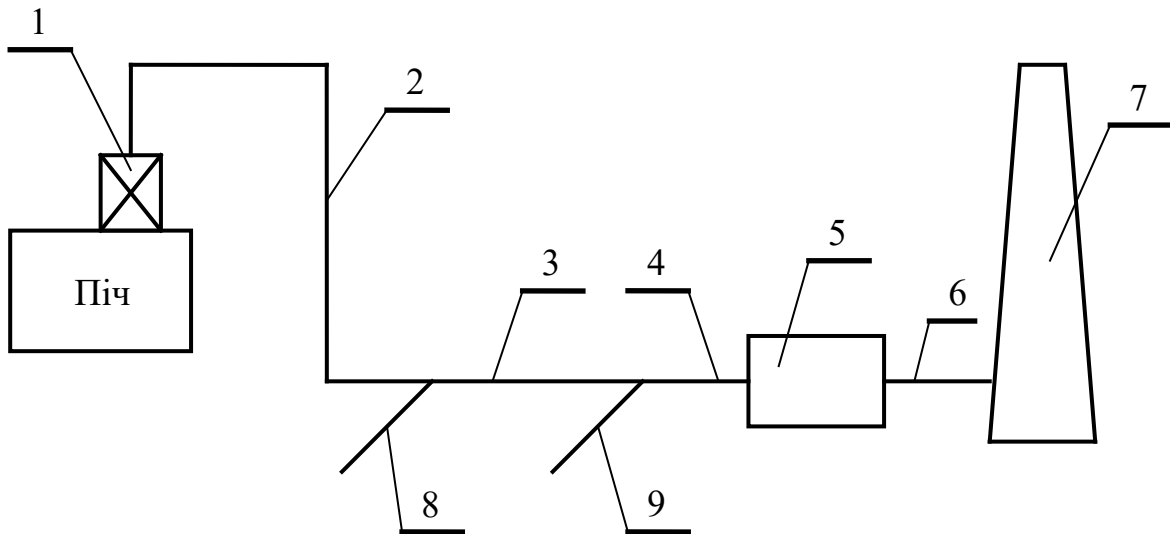
6 Аеродинамічний розрахунок димового тракту

Аеродинамічний розрахунок газового тракту виконується для визначення розмірів каналів і параметрів тягодуттьових пристроїв (висоти димової труби, тиску або розрідження, що утворюється насосом, вентилятором, димососом та ін.), при яких через трасу можна пропускати необхідну кількість середовища, або для визначення пропускної здатності траси при визначених розмірах каналів і заданих параметрах тягодуттьових пристроїв.

При розрахунку пічна установка поділяється на дві частини: перша, в якій димові гази рухаються під тиском (топка і робочий простір печі), і друга, в якій гази рухаються за рахунок розрідження, що утворюється тяговою установкою (димоходи і лежаки після пічної камери).

На практиці рідко проводиться розрахунок першої частини газового тракту на підставі того, що опори при русі газів у робочому просторі бувають малими і їх можна подолати діями дуттьових засобів. Тому частіше всього обмежуються розрахунком димоходів і лежаків, де гази рухаються за рахунок розрідження.

Для визначення опору газового тракту печі спочатку потрібно накреслити його схему (рисунок 6.1) і розбити на розрахункові ділянки. Розрахункова ділянка – ділянка тракту з однаковим швидкісним напором, тобто ділянка, на якій прохідний переріз, витрата і температура середовища, що протікає, постійні.



1 – рекуператор; 2 – вертикальний димохід; 3 – горизонтальний лежак; 4 – горизонтальний лежак перед утилізатором вторинних ресурсів (ВЕР) (димових газів); 5 – утилізатор ВЕР; 6 – димохід за утилізатором; 7 – димова труба; 8, 9 – вхід димових газів від інших печей

Рисунок 6.1 – Схема димового тракту

На схемі проставити номери ділянок, витрати і температури середовища в них. Визначити на кожній ділянці втрати напору (тиску) на тертя, місцеві опори, а у вертикальних каналах і на подолання геометричного напору.

При визначенні температури середовища слід враховувати падіння температури у разі втрати теплоти назовні. Величину цих втрат на 1 м довжини ділянки приймають для лежаків – 2°C , димових труб – 3°C , футерованих або ізольованих трубопроводів – $1-2^{\circ}\text{C}$.

Швидкість димових газів у лежаках і трубах звичайно приймають біля $3-4\text{ м/с}$, а газу і повітря у трубопроводах не вище 10 м/с .

Кінцевою метою розрахунку є визначення сумарної втрати напору від печі до основи димової труби.

Методика і приклади розрахунку димового тракту наведено в [5] або [6] і [8].

7 Розрахунок димової труби

Димова труба призначена для вилучення продуктів згоряння із робочого простору печі і з'єднана з нею системою лежаків.

Геометричний напір $h_{геом.}$ (розрідження) стовпа гарячого газу всередині труби, яка розташована в атмосфері, більше холодного повітря, повинен покрити витрати напору при проходженні димових газів по системі лежаків $\Sigma h_{втр.}$, втрати на тертя у самій трубі $h_{тр.}$ і втрати на вихлоп у гирлі $h_{вих.}$.

Втрати тиску $\Sigma h_{втр.}$ у процесі роботи печі можуть збільшуватися внаслідок збільшення підсмоктування повітря через нещільність або наступного форсування її роботи. Тому величину втрат напору при розрахунку необхідно приймати з деяким запасом (більше на 30-50 %).

Для зменшення концентрації шкідливих речовин у повітряній атмосфері рекомендується приймати коефіцієнт запасу $K_з = 3$. Окрім того, для кожного типу промислових установок залежно від кількості шкідливих домішок у продуктах згоряння встановлені розміри мінімальної висоти димової труби за санітарними умовами. Якщо будинки навколо труби знаходяться на відстані менше 100 м, то висота труби повинна бути на 5 м вище гребеня покрівлі будинку, але не менше 16 м. Якщо продукти згоряння містять у збільшених кількостях шкідливі гази (N_2O_5 , SO_2 та інші), то висота труби повинна перевищувати 100 м.

При великих опорах системи лежаків для вилучення продуктів згоряння із печей використовуються вентилятори-димососи. Методика та розрахунок димової труби приведено в [5] або [7] і [8].

Список літератури

1 Вторичные энергоресурсы и энерготехнологическое комбинирование в промышленности / Н.А. Семенов, Л.И. Куперман, С.А. Романовский и др. – К.: Вища школа, 1979. – 296 с.

2 Metallургическое топливо: Справочник / М.Б. Равич, С.С. Дворин. – М.: Metallургиздат, 1965. – 471.

3 Робоча програма, завдання та методичні рекомендації до виконання контрольних робіт з дисципліни «Високотемпературні теплотехнологічні процеси та установки». – Харків, УкрДАЗТ, 2009. – 46 с.

4 Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; Под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.

5 Расчеты нагревательных печей/ Под ред. Н.Ю. Тайца. – К.: Техніка, 1969. – 540 с.

6 Расчет нагревательных и термических печей / Под ред. В.М. Тымчака и В.Л. Гусовского. – М.: Metallургия, 1983. – 480 с.

7 Справочник конструктора печей прокатного производства / Под ред. В.М. Тымчака. – М.: Metallургия, 1969. – Т.1. – 576 с.

8 Теплотехнические расчеты промышленных предприятий / Б.С. Матрюков. – М.: Metallургия, 1972. – 368 с.

9 Теплоиспользующие установки промышленных предприятий / Под ред. О.Г. Ильченко. – Харьков: Вища школа, 1985.

10 Тебеньков Б.П. Рекуператоры для промышленных печей. – М.: Metallургиздат, 1967.

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця А.1 – Середні теплоємності для повітря і газів,
кДж/(м³·°С)

Температура , °С	СО ₂	Ν ₂	О ₂	Н ₂ О	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

Таблиця Б.1 – 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 су- хе
°С	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

Таблиця В.1 – Середня теплоємність C_{cp} вуглецевих сталей різних марок в інтервалі температур від 50°C до $t^{\circ}\text{C}$, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$

Температура, $^{\circ}\text{C}$	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

Таблиця Г.1 – Коефіцієнт теплопровідності λ вуглецевих сталей різноманітних марок залежно від температури, ВТ/(м·°С)

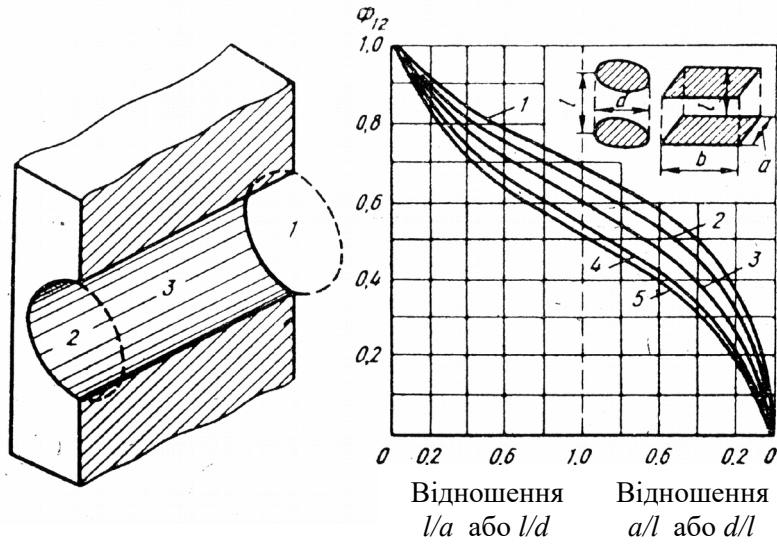
Температура, °С	Марка сталі						
	08кп	08	20	40	У8	У8'	У12
0	65,1	59,5	51,9	51,9	49,8	51,1	45,2
50	62,8	58,6	51,5	51,5	49,4	50,2	45,2
100	60,2	57,7	51,1	50,6	48,1	48,9	44,8
150	57,7	55,2	49,9	49,8	46,9	47,7	42,4
200	55,6	53,5	48,5	48,1	45,1	46,1	42,7
250	53,0	51,5	46,5	46,9	43,0	43,9	41,1
300	50,9	49,4	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

Таблиця Д.1 – Питома ентальпія вуглецевих сталей h , кДж/кг

Температура, °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	246,81	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	698,00	695,00	653,14	699,19	711,76	699,19
1050	703,38	709,90	729,76	725,36	685,70	729,76	742,95	729,76
1100	732,7	725,36	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)

б)

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

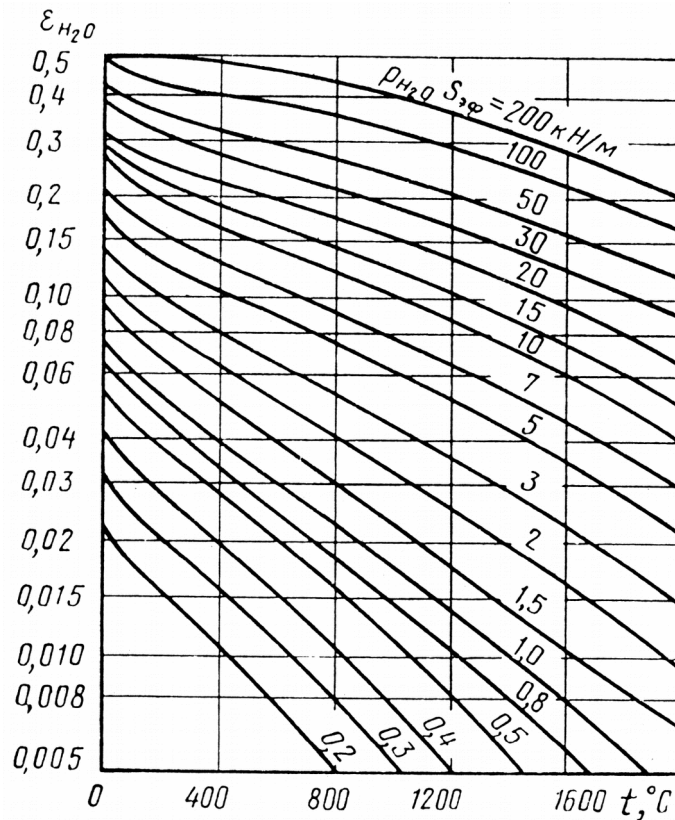


Рисунок Е.2 – Ступінь чорноти водяної пари H_2O

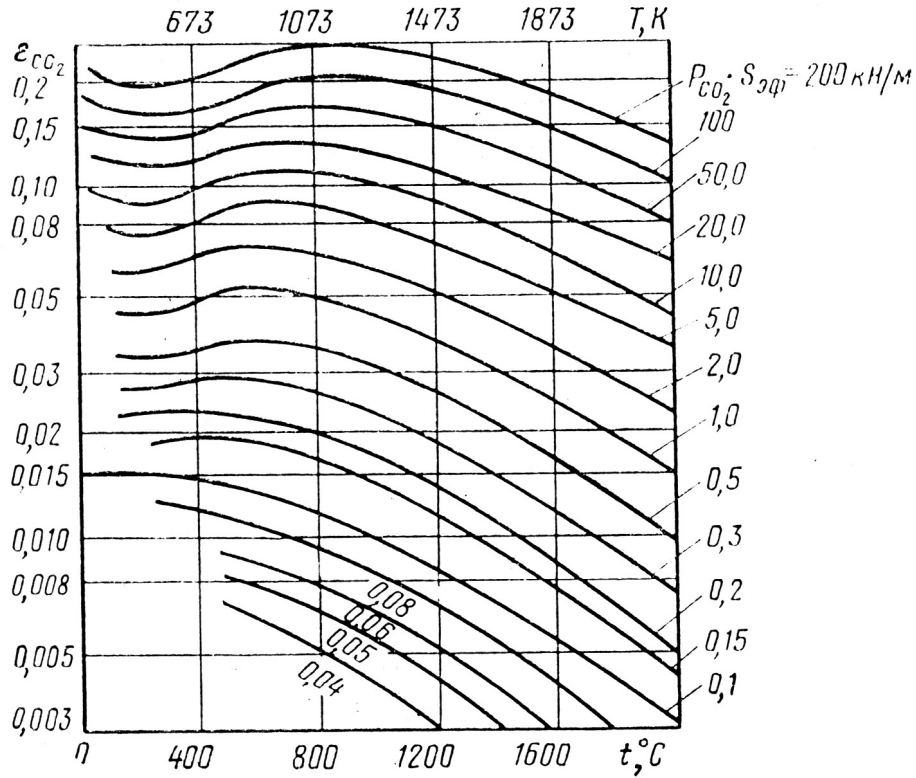


Рисунок Е.3 – Ступінь чорноти вуглекислоти CO_2

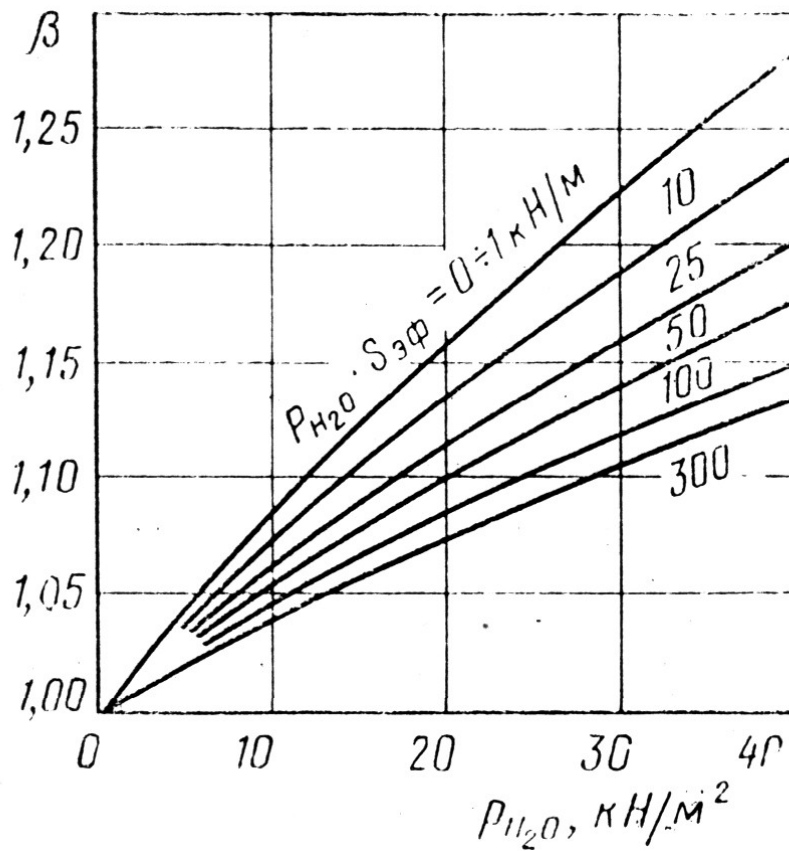


Рисунок Е.4 – Поправочний коефіцієнт β на парціальний тиск

для водяної пари
Додаток Ж

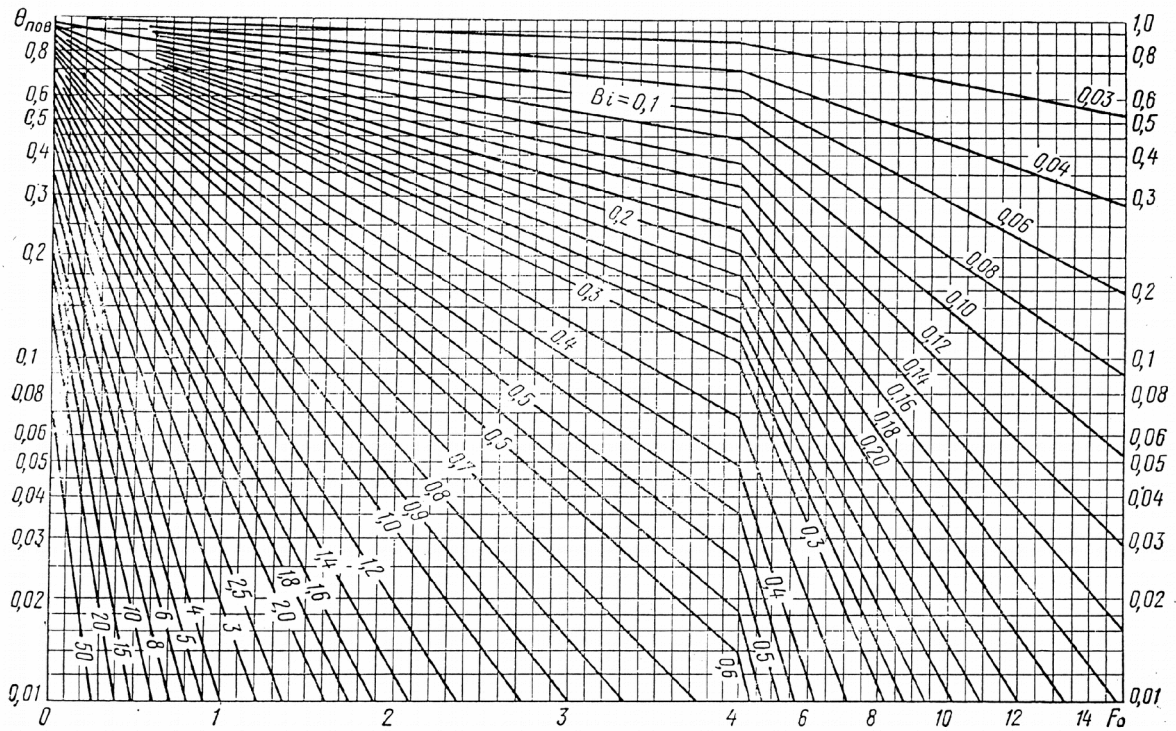


Рисунок Ж.1 – Номограма для розрахунку нагрівання або охолодження поверхні циліндра

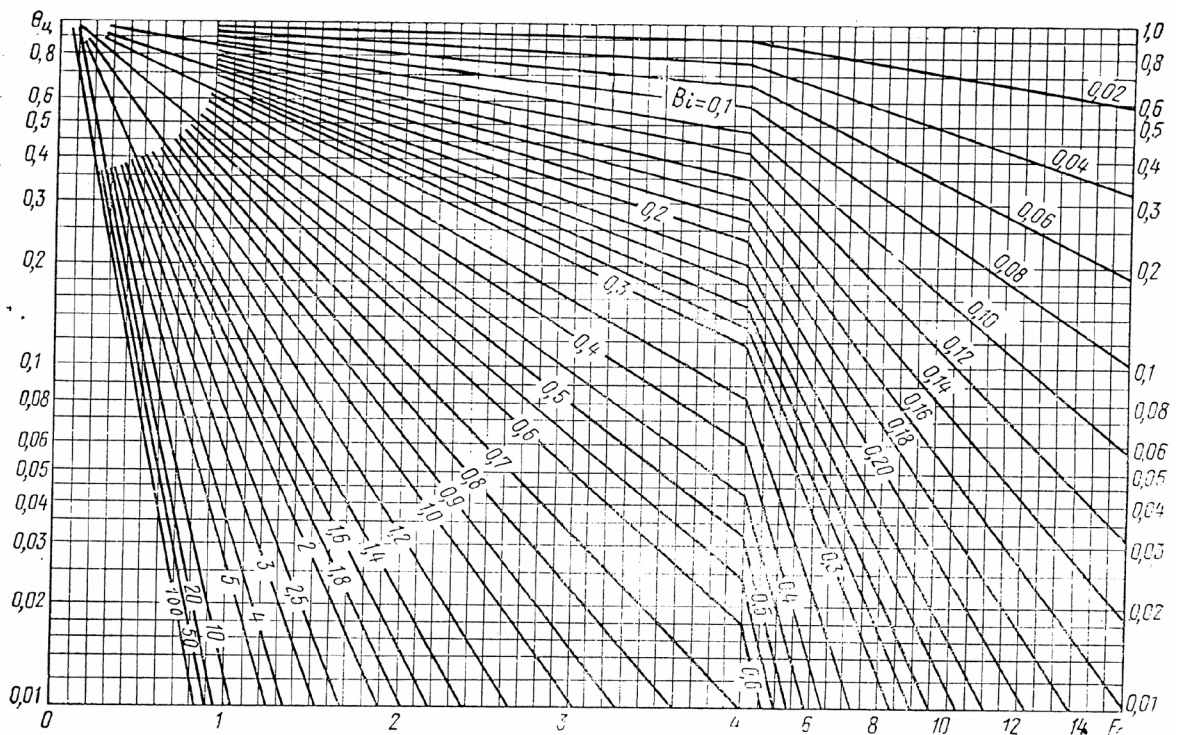


Рисунок Ж.2 – Номограма для розрахунку нагрівання або охолодження осі циліндра
Додаток И

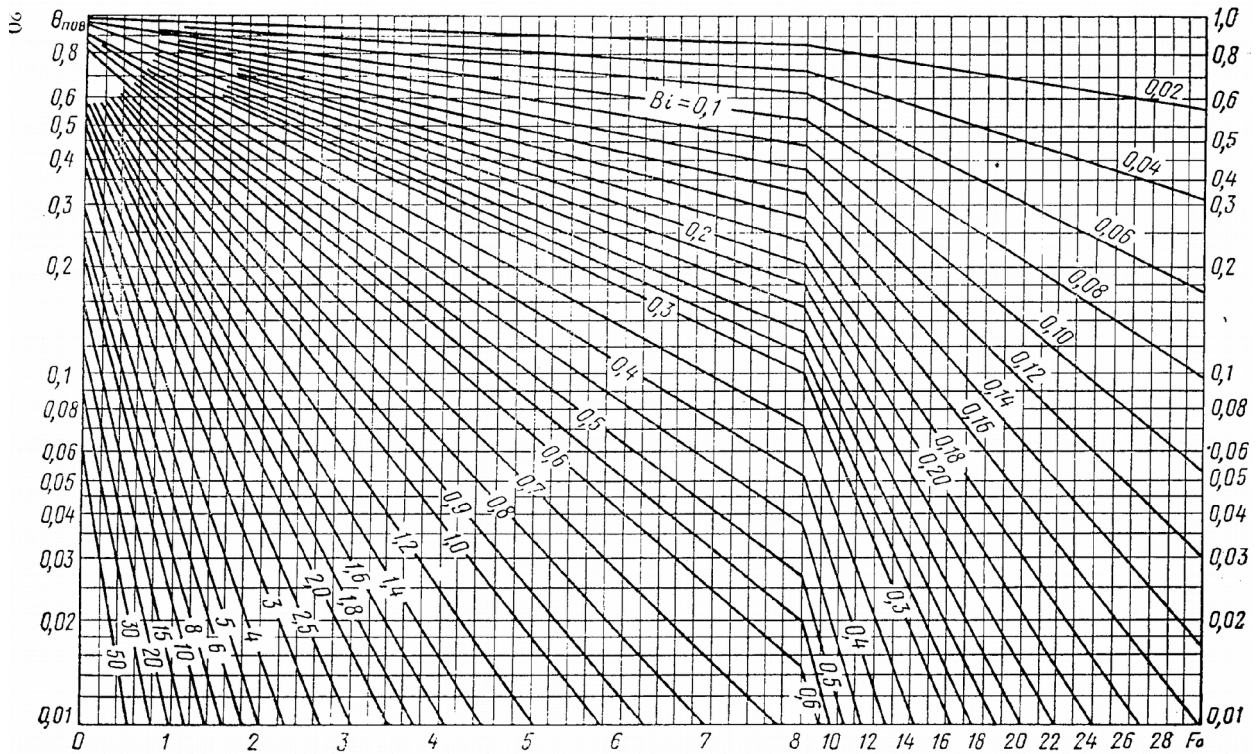


Рисунок И.1 – Номограма для розрахунку нагрівання або охолодження поверхні пластини

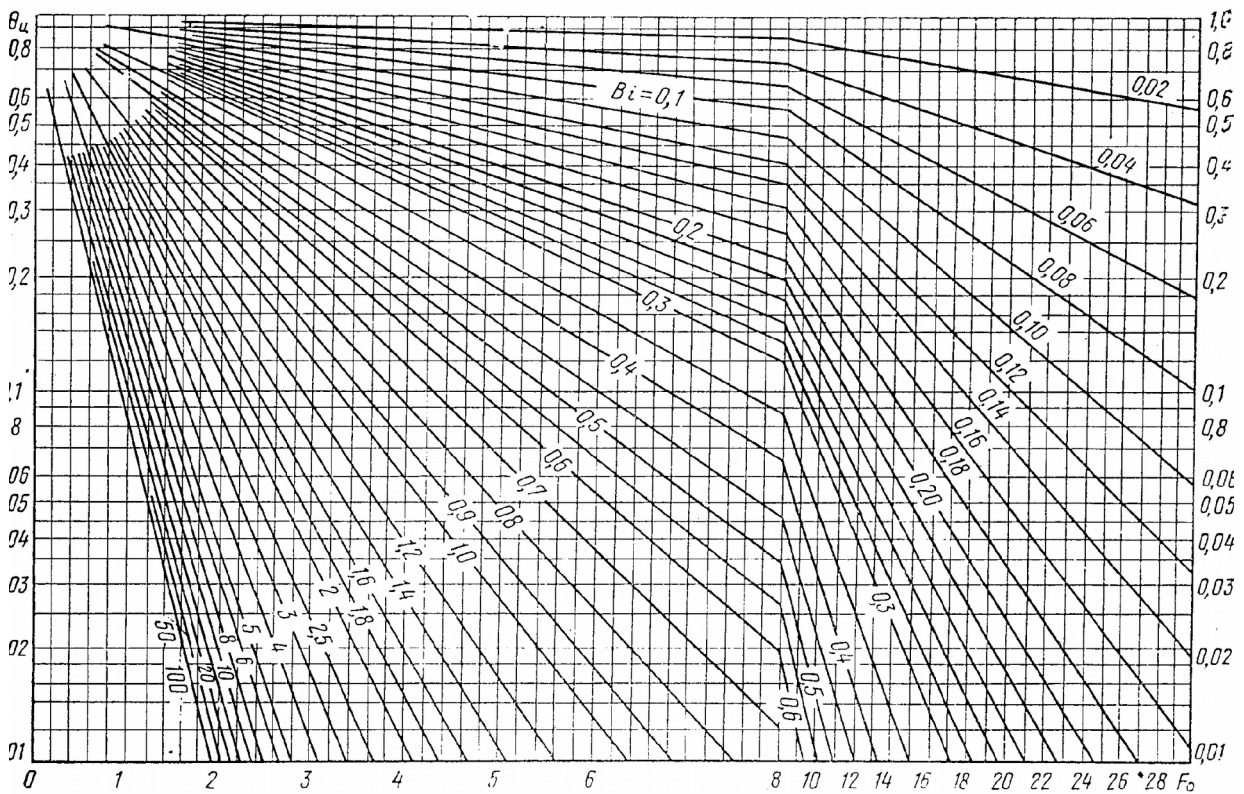


Рисунок И.2 – Номограма для розрахунку нагрівання або охолодження середини пластини
Додаток К

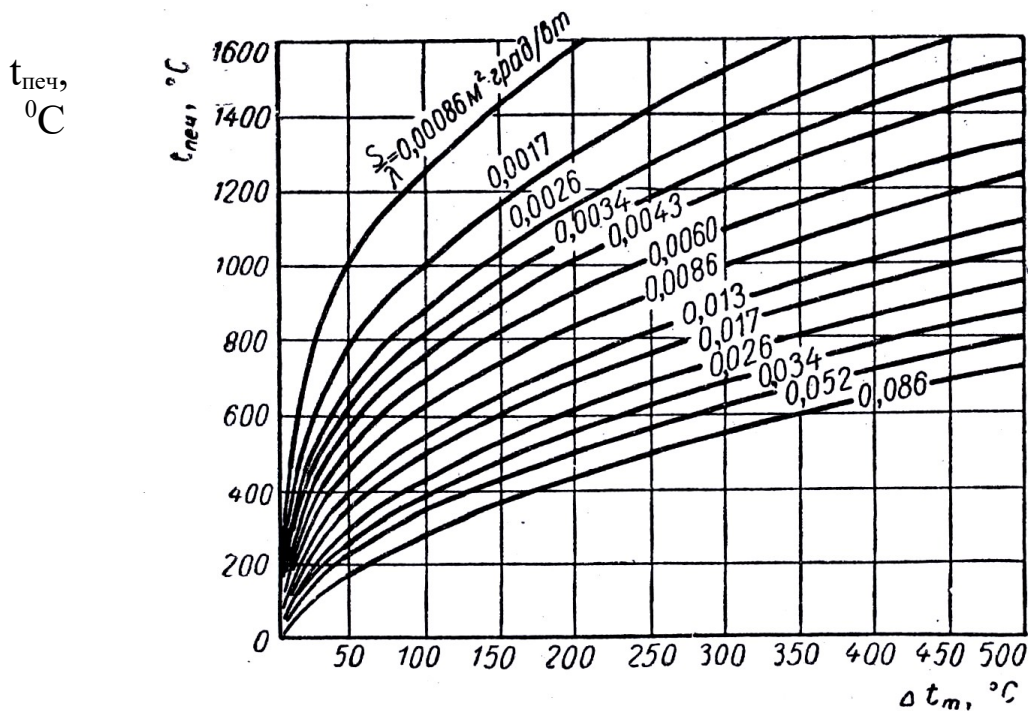


Рисунок К.1 – Допустима температура печі $t_{\text{печ}}$ для пластини залежно від максимально допустимої різниці температур металу

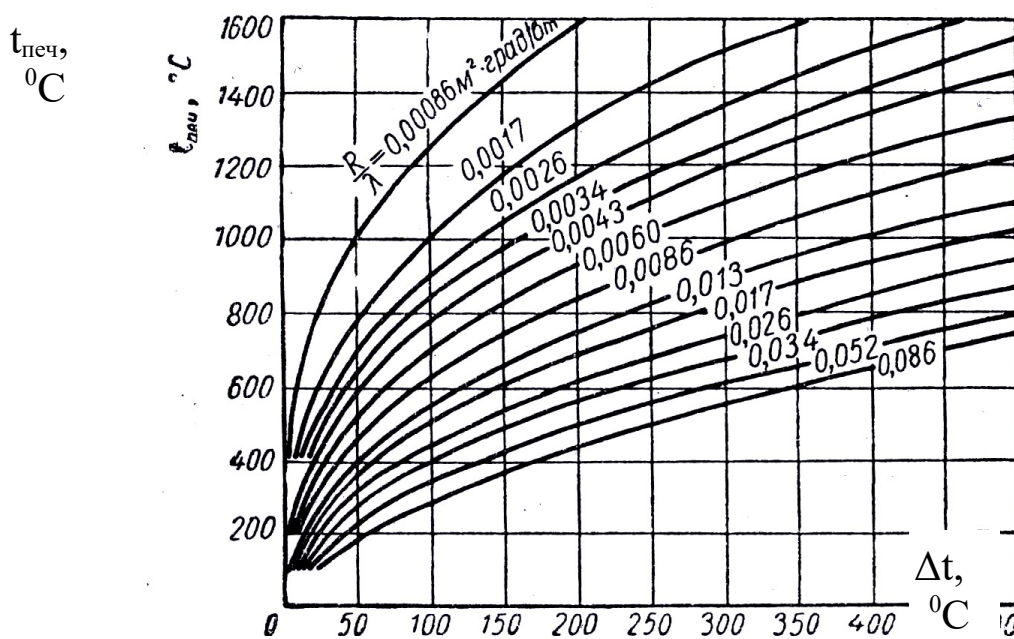


Рисунок К.2 - Допустима температура печі $t_{\text{печ}}$ для циліндра залежно від максимально допустимої різниці температур металу

Додаток Л

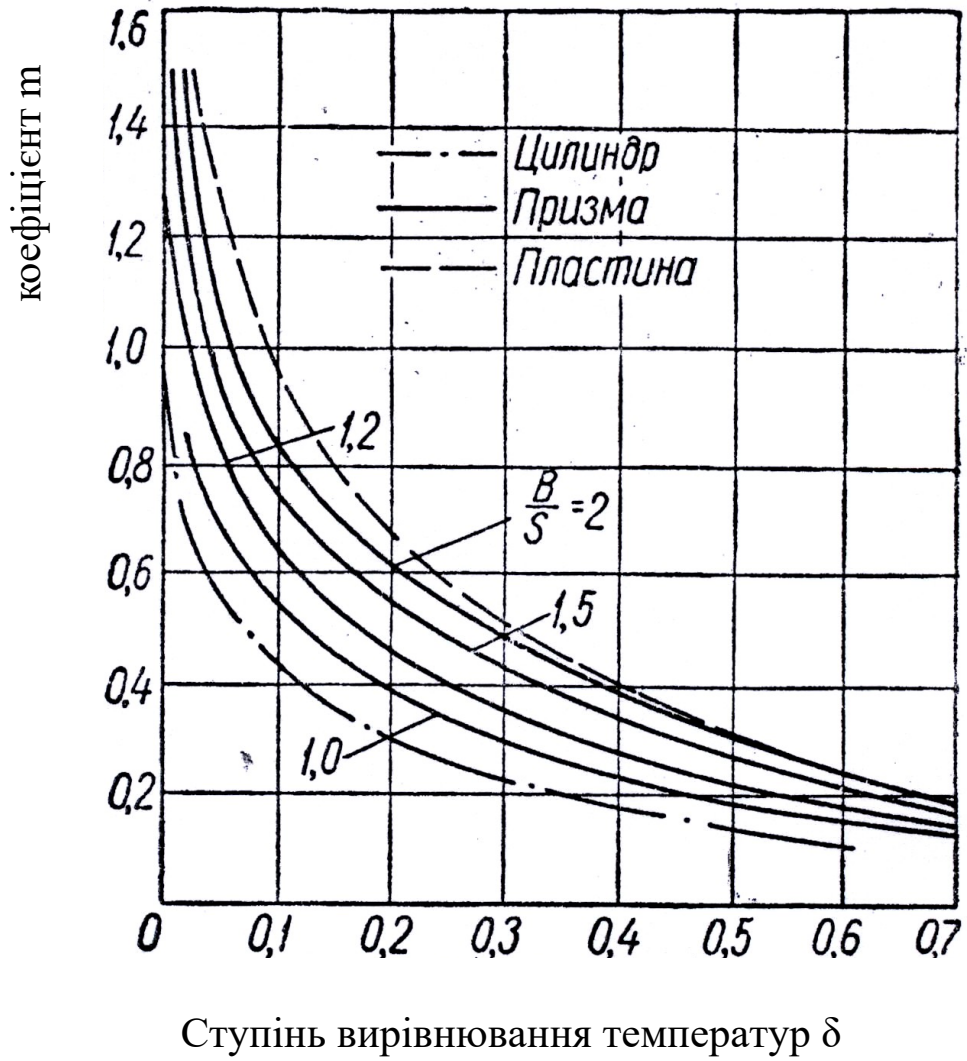


Рисунок Л.1 – Графік для визначення тривалості витримки

Додаток М

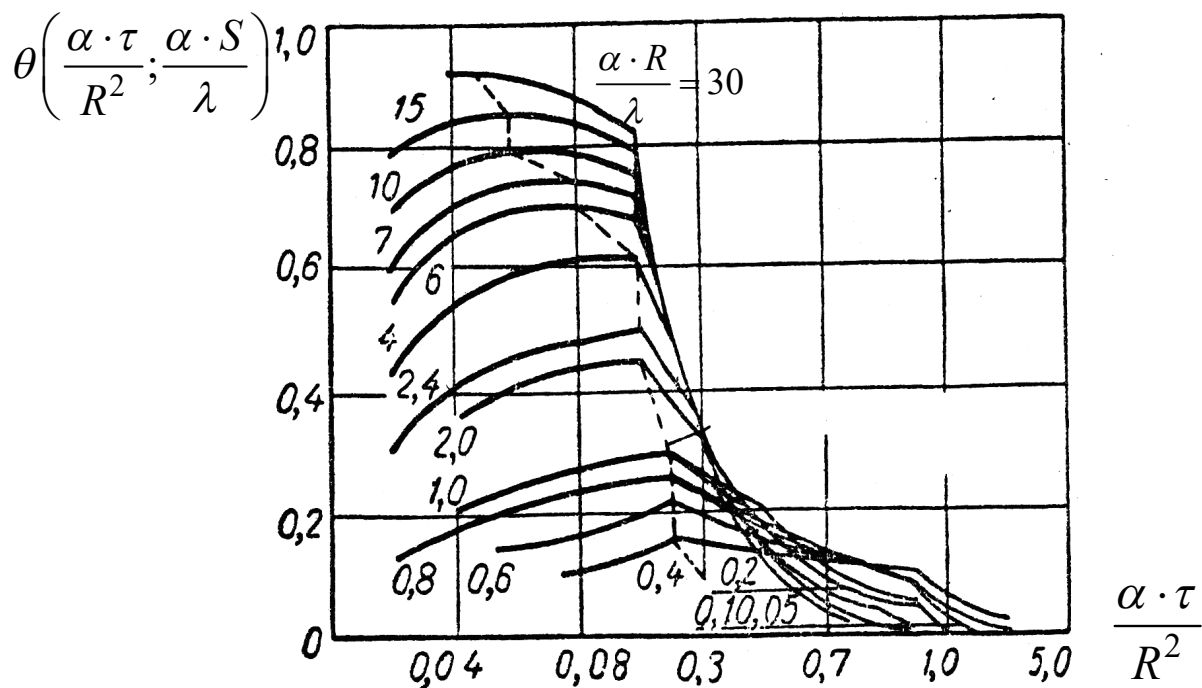


Рисунок М.1 – Функція $\theta\left(\frac{\alpha \cdot \tau}{R^2}; \frac{\alpha \cdot S}{\lambda}\right)$ для різниці температур у
циліндрі

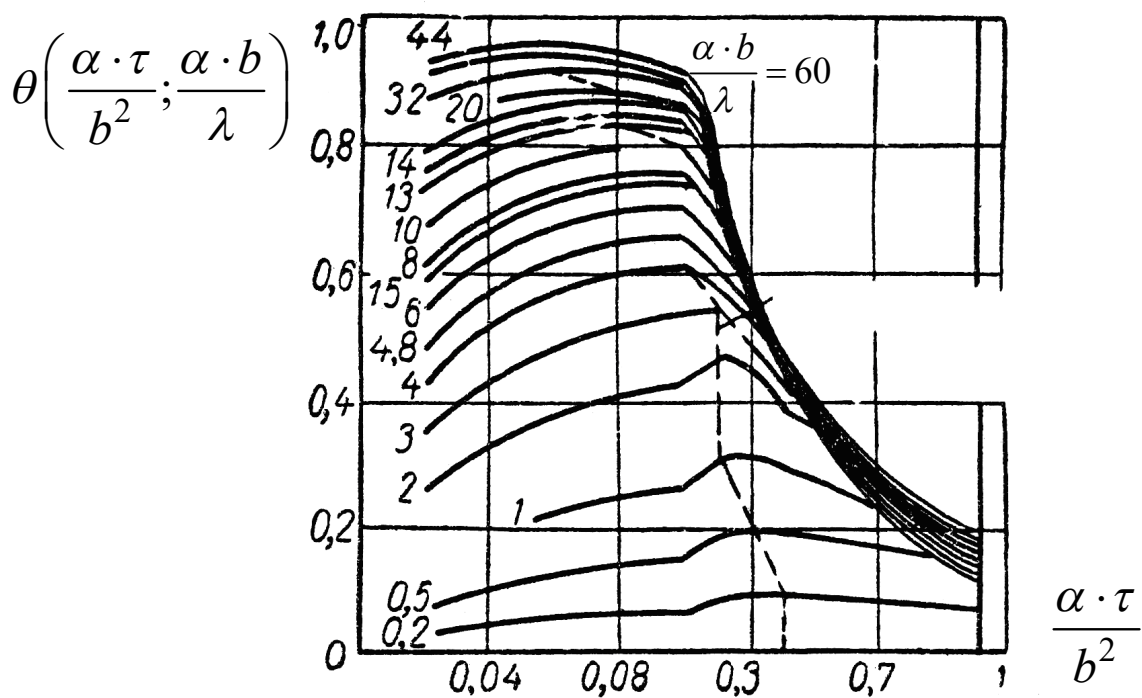
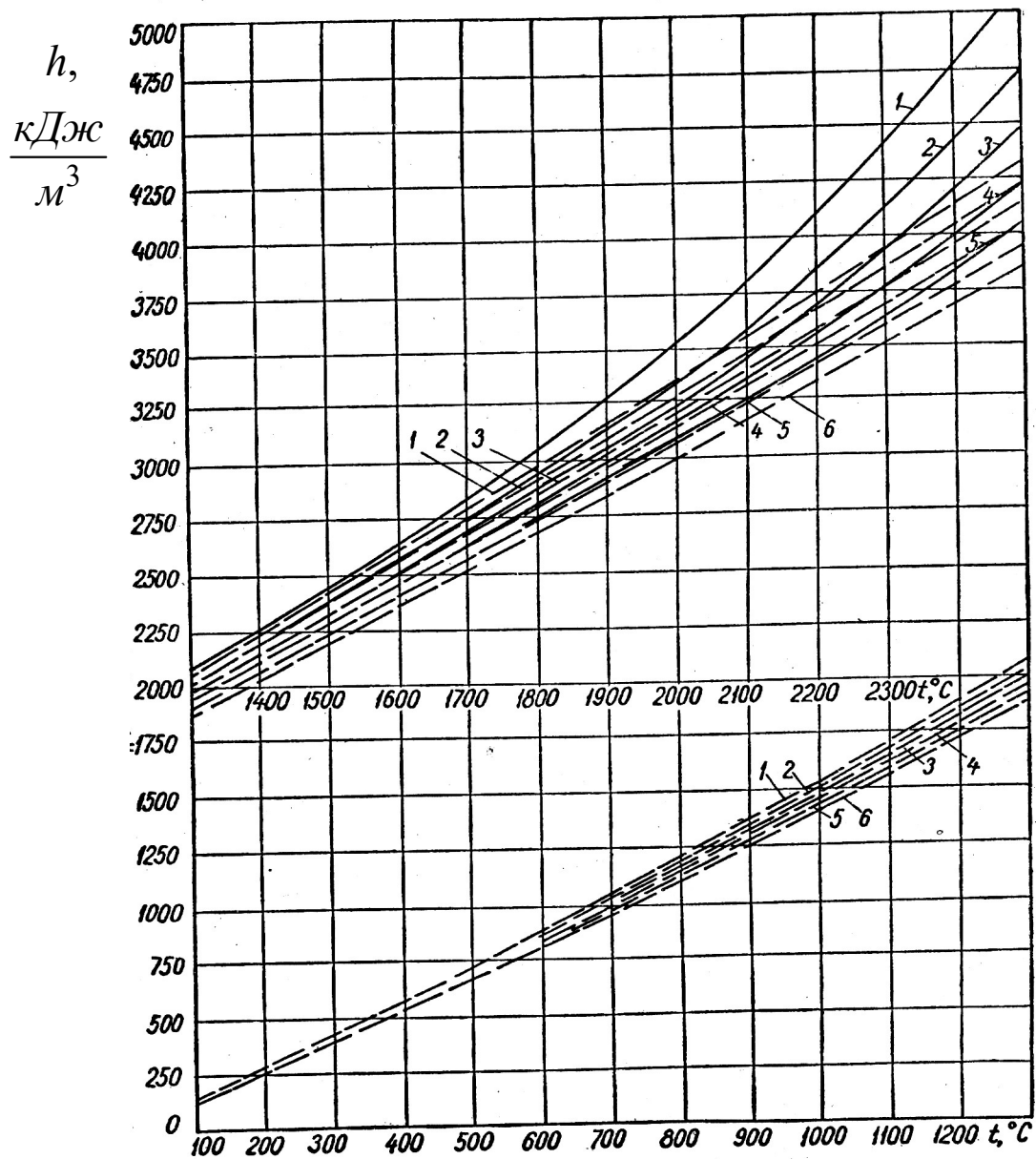


Рисунок М.2 – Функція $\theta\left(\frac{\alpha \cdot \tau}{b^2}; \frac{\alpha \cdot b}{\lambda}\right)$ для різниці температур у пластині
Додаток Н



1 – $\nu = 0\%$ (продукти горіння без повітря);

2 – $\nu = 20\%$;

3 – $\nu = 40\%$;

4 – $\nu = 60\%$;

5 – $\nu = 80\%$;

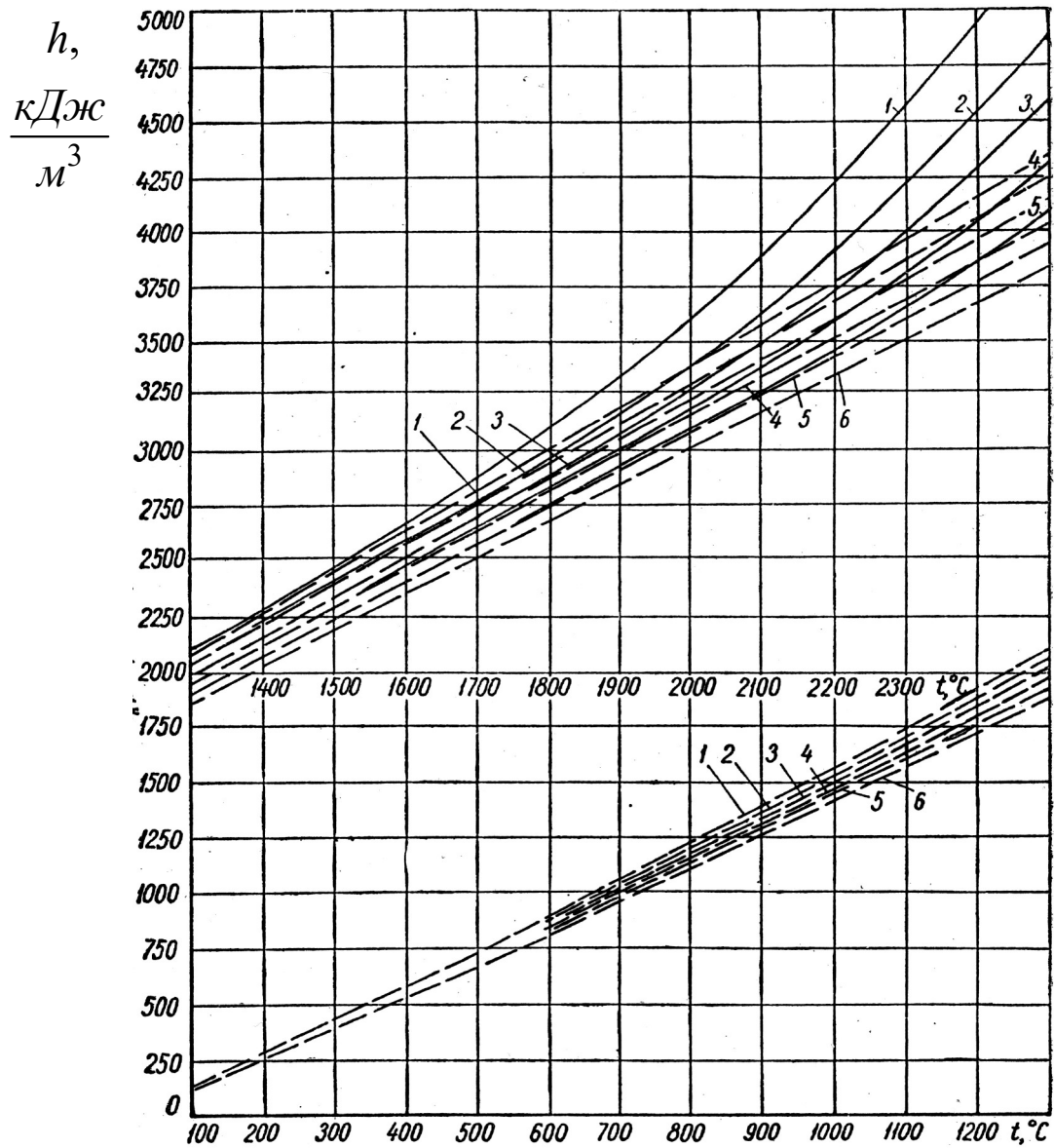
6 – чисте повітря;

————— – теоретична температура;

- - - - - – калориметрична температура

Рисунок Н.1 – h-t-діаграма для природного, коксового газів та суміші коксового і доменного при $Q_n^p > 12$ МДж/м³

Додаток П



1 – $v = 0\%$ (продукти горіння без повітря);

2 – $v = 20\%$;

3 – $v = 40\%$;

4 – $v = 60\%$;

5 – $v = 80\%$;

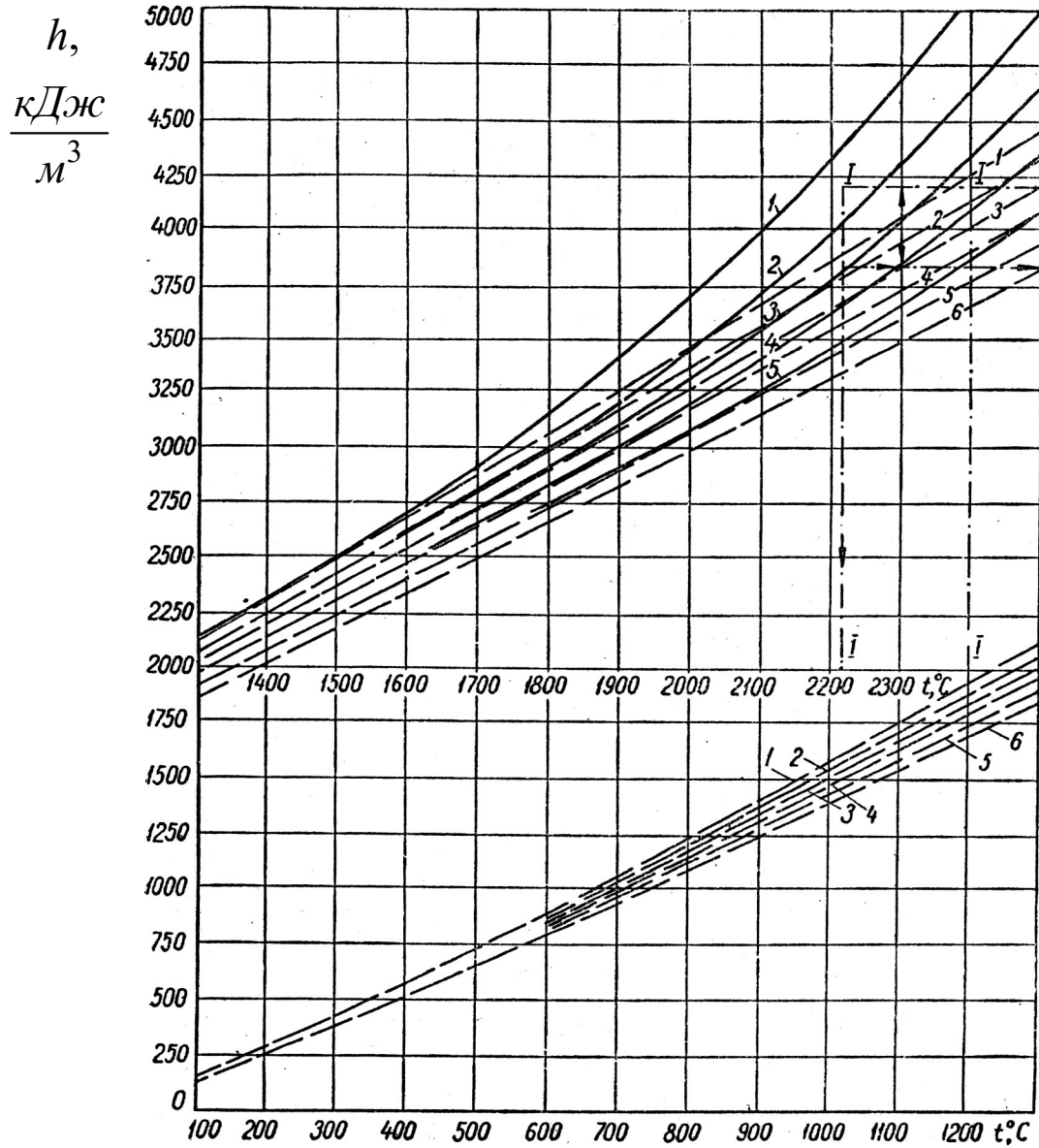
6 – чисте повітря;

————— – теоретична температура;

- - - - - – калориметрична температура

Рисунок П.1 – h - t -діаграма для пароповітряного, генераторного газів, суміші доменного і коксового при $Q_H^p = 8...12$ МДж/м³, мазута, кам'яного вугілля, антрациту і коксу

Додаток Р



1 – $v = 0\%$ (продукти горіння без повітря);

2 – $v = 20\%$;

3 – $v = 40\%$;

4 – $v = 60\%$;

5 – $v = 80\%$;

6 – чисте повітря;

————— – теоретична температура;

- - - - - – калориметрична температура.

Рисунок Р.1 – h-t-діаграма для водяного, генераторного газів, суміші доменного і коксового при $Q_n^p < 8$ МДж/м³, бурих вуглів, гарячих сланців, торфу і дров

Додаток С

Таблиця С.1 – Теплофізичні властивості типових і будівельних матеріалів для печей

Матеріал	Об'ємна маса, кг/м ³	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К)	Середня теплоємність c_0 , кДж/(кг·К)
Динас	1980	$1,046 + 0,93 \cdot \frac{t}{1000}$	$0,699 + 0,837 \cdot \frac{t}{1000} - 0,54 \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^2 + 0,1181 \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^3$
Шамот	1860	$0,7 + 0,64 \cdot \frac{t}{1000}$	$0,808 + 0,314 \cdot \frac{t}{1000}$
Магнезит	2700	$4,31 - 0,512 \cdot \frac{t}{1000}$	$t = 0 \dots 260^0$ $0,869 + 0,452 \cdot \frac{t}{1000}$
			$t > 260^0$ $\frac{19,26}{t} + 1,006 + 0,167 \cdot \frac{t}{1000}$
Хромо-магнезит	2870	1,98	$0,712 + 0,389 \cdot \frac{t}{1000}$
Високоглиноземисті вогнетриви	-	-	$t > 500^0$ $\frac{7,12}{t} + 0,964 + 0,1947 \cdot \frac{t}{1000}$
Червона цегла	1600	$0,466 + 0,512 \cdot \frac{t}{1000}$	За формулою для шамоту
Шамотний легковий	1250	$0,312 + 0,477 \cdot \frac{t}{1000}$	Те ж
Піношамотна	800	$0,312 + 0,195 \cdot \frac{t}{1000}$	Те ж

Додаток Т

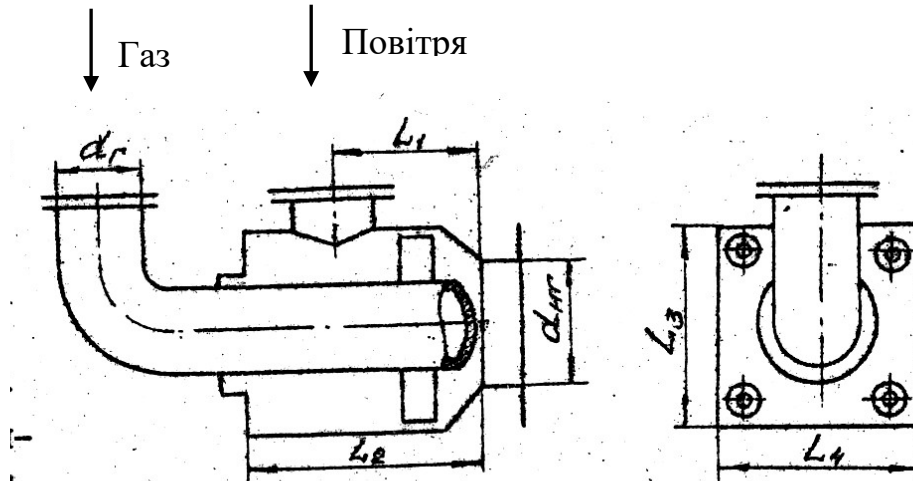
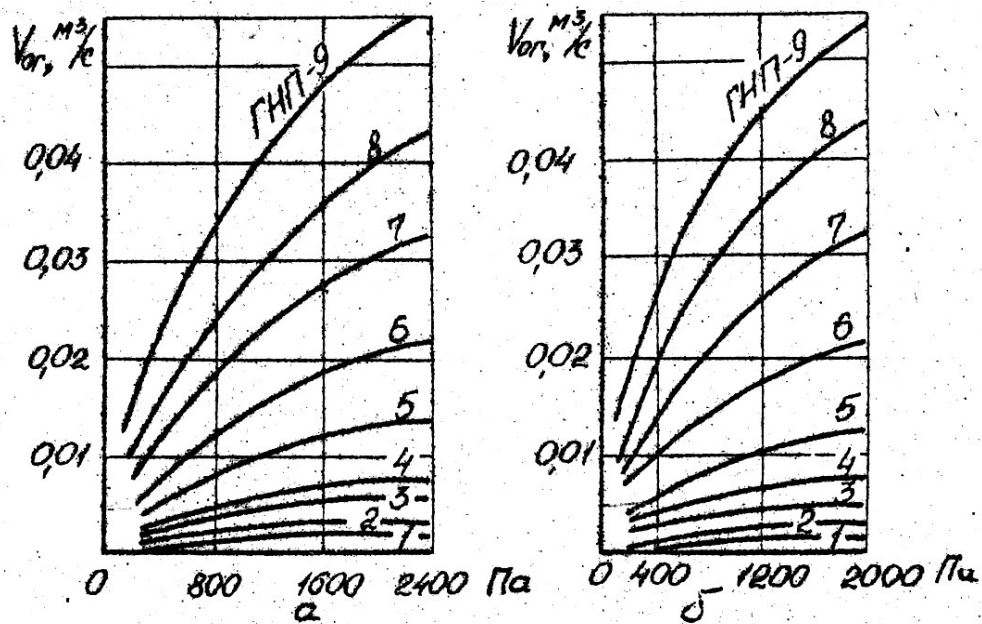


Рисунок Т.1 – Схема багатоструминного пальника конструкції «Теплопроекта»



а) залежність пропускної здатності по газу від його тиску перед пальником; б) залежність тиску повітря від пропускної здатності по газу

Рисунок Т.2 – Характеристика пальників ГНП низького тиску для природного газу

Таблиця Т.1 – Розміри багатоструминних пальників конструкції «Теплопроект»

Розмір, мм	ГНП-1	ГНП-2	ГНП-3	ГНП-4	ГНП-5	ГНП-6	ГНП-7	ГНП-8	ГНП-9
$d_{нr}$	25	32	46	55	74	92	112	130	145
d_r	19,05	19,05	25,4	25,4	31,75	38,1	50,8	63,5	63,5
$D_{нов}$	36	40	70	80	100	125	150	175	175
L_1	120	130	165	175	195	215	240	270	300
L_2	165	180	220	250	285	320	360	405	445
L_3	240	310	310	380	400	500	600	600	600
L_4	130	240	240	240	360	380	500	500	500

Додаток У

Таблиця У.1 – Залежність між $f(a)$ і a

$f(a)$	A	$f(a)$	a
0,50	8,02	0,76	0,71
0,52	6,54	0,78	0,60
0,54	5,42	0,80	0,49
0,56	4,62	0,82	0,40
0,58	3,72	0,84	0,32
0,60	3,1	0,86	0,26
0,62	2,57	0,88	0,20
0,64	2,24	0,90	0,15
0,66	1,79	0,92	0,11
0,68	1,51	0,94	0,076
0,70	1,25	0,96	0,047
0,72	1,04	0,98	0,021
0,74	0,88	1,00	0,00