

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ ТА ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ  
З ДИСЦИПЛІНИ  
«ОСНОВИ КОНСТРУЮВАННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ УСТАНОВОК»  
(Для студентів спеціальностей 050401 "Промислова теплотехніка")

Донецьк – 2009

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
**ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**  
**З ДИСЦИПЛІНИ**  
**«ОСНОВИ КОНСТРУЮВАННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ УСТАНОВОК»**

(Для студентів спеціальностей 050401 "Промислова теплотехніка")

Розглянуто на засіданні кафедри "Технічна теплофізика"

протокол № 11 від 24.03.09

Затверджено на засіданні

Навчально – видавничої Ради ДонНТУ,

Протокол № 3 від 24.06.09

Донецьк – 2009

УДК 687.016.3

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт по дисципліні „Основи конструювання теплотехнічних установок” / Гінкул С.І., Касютіна Т.Г. – Донецьк, ДонНТУ, 2009 - 33 с.

Методичні вказівки містять опис лабораторних робіт по дисципліні „Основи конструювання теплотехнічних установок”.

Виконання лабораторних робіт має метою поглиблення знань по окремим розділам дисципліни, а також придбання студентами навиків дослідницького характеру.

Укладачі:

доц., проф. С.І. Гінкул  
ас. Т.Г. Касютіна

Рецензент:

доц. Г.Г. Пятишкін

## ЗМІСТ

<b>1. Лабораторна робота 1</b>	
Метод порозрядного наближення.....	5
<b>2. Лабораторна робота 2</b>	
Метод квадратичної інтерполяції - екстраполяції.....	7
<b>3. Лабораторна робота 3</b>	
Метод ділення інтервалу невизначеності навпіл.....	11
<b>4. Лабораторна робота 4</b>	
Метод золотого перетину.....	15
<b>5. Лабораторна робота 5</b>	
Конструктивний тепловий розрахунок обмурівки.....	18
Перелік посилань.....	27
Додаток 1.....	28
Додаток 2.....	30
Додаток 3.....	32

## **ВСТУП**

У процесі проектування вогнетехнічної установки необхідно оптимізувати конструктивні параметри установки, виконати оптимізацію роботи окремих елементів установки, теплових і технологічних схем. Для цього необхідно володіти методами оптимізації. Метою даних методичних вказівок являється навчити студентів навиків роботи з простими методами оптимізації.

В додатках наведені вихідні дані до лабораторних робіт. Студенту необхідно зі своїми даними отримати результат у кожній роботі.

## 1. Лабораторна робота 1

### МЕТОД ПОРОЗРЯДНОГО НАБЛИЖЕННЯ

Метод порозрядного наближення полягає в пошуку з визначеним кроком по координаті розташування екстремуму функції, а потім його уточнення до одержання заданої погрішності. Якщо потрібно знайти мінімум функції, то потрібно змінити знак функції на зворотній, тобто  $F = -F$ .

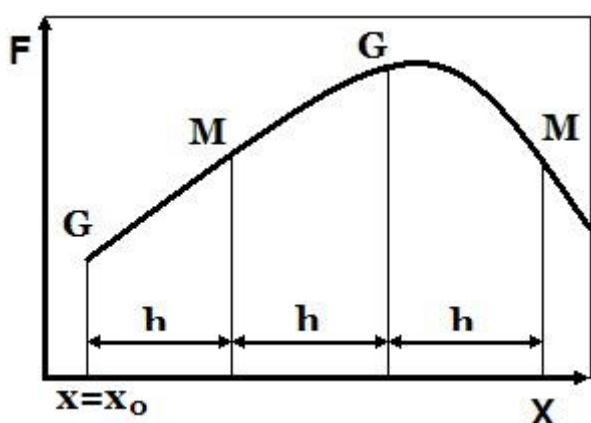


Рисунок 1.1 – Схема пошуку екстремуму функції методом порозрядного наближення

Приблизний алгоритм пошуку максимуму функції  $F(x)$ . Схема пошуку екстремуму показана на рисунку 1.1

1. Задаємося початковим значенням аргументу  $x=x_0$ , кроку  $h$ , погрішності  $\epsilon$  і числа  $n$ , що показує у скільки разів зменшується крок  $h$  при зміні напрямку пошуку.
2. Обчислюємо значення функції  $F(x)$  у точці  $x$ .
3. Покладаємо функцію рівною  $G = F(x)$ .
4. Змінюємо значення аргументу на величину кроку  $h$ , тобто  $x=x+h$ .
5. Обчислюємо значення функції  $F(x)$  при даному значенні аргументу і покладаємо  $M = F(x)$
6. Порівнюємо значення функції  $G$  з аргументом  $x$  і значення функції  $M$  з аргументом  $x+h$ . Якщо  $M > G$ , переходимо на пункт 3 інакше на пункт 7.
7. Зменшуємо величину кроку в  $n$  разів і змінюємо знак на зворотний  $h = -h/n$ .
8. Якщо значення кроку по абсолютній величині перевищує задану похибку  $\epsilon$ , тобто  $|h| \geq \epsilon$ , то переходимо на пункт 3, інакше на пункт 9.
9. Покладаємо  $x_{\text{опт}} = x$ ,  $F_{\text{опт}} = F(x_{\text{опт}})$ .
10. STOP.

Блок-схема програми приведена на рисунку 1.2. Потрібно знайти екстремум функції задану викладачем. Вихідні дані для знаходження екстремума функції приведені у додатку 1, а приклад знаходження екстремума функції у додатку 2.

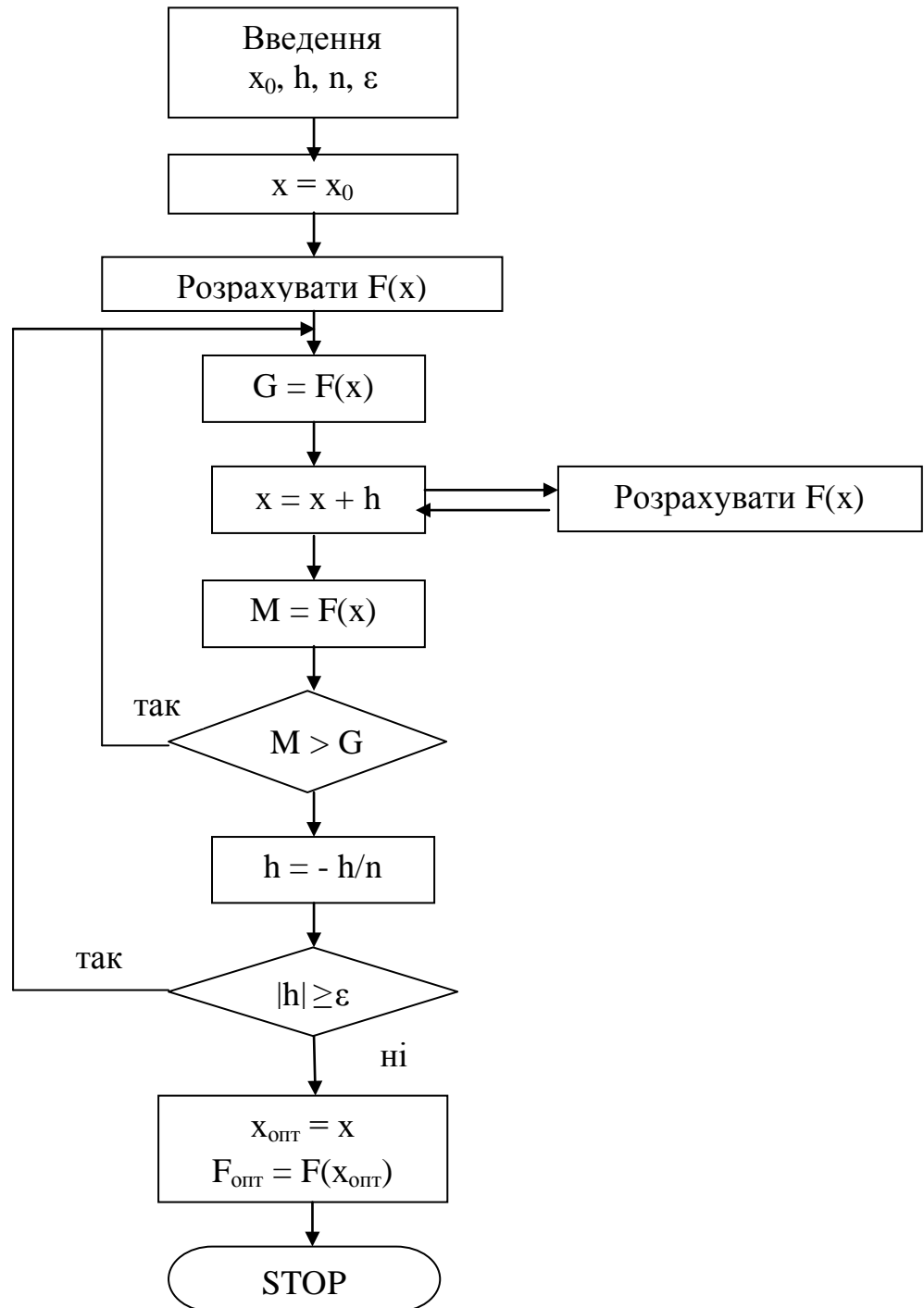


Рисунок 1.2. – Блок-схема методу порозрядного наближення

## 2. Лабораторна робота 2

### МЕТОД КВАДРАТИЧНОЇ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ-ЕКСТРАПОЛЯЦІЇ

Метод квадратичної інтерполяції – екстраполяції використовується в тих випадках, коли значення функції можна обчислити в 3-х точках. Якщо відомі значення функції в трьох різних точках  $F_0 = F(x_0)$ ,  $F_1 = F(x_1)$ ,  $F_2 = F(x_2)$ , (рисунок 2.1.) (значення аргументу  $x$  вибираються в проміжку  $x_1 \pm h$ , де  $x_1$  початкове наближення,  $x_0 = x_1 - h$ ,  $x_1$ ,  $x_1 + h$ ), то функція  $F(x) = ax^2 + bx + c$  може бути апроксимована квадратичною параболою

$$\varphi(x) = ax^2 + bx + c \quad (2.1)$$

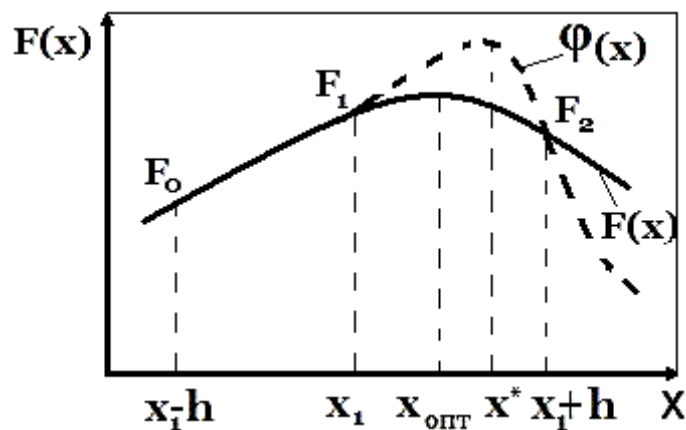


Рисунок 2.1 – Схема метода квадратичної інтерполяції

Рівнянням параболи (2.1) можна користуватися в тому випадку, якщо будуть відомі коефіцієнти  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , які можна визначити із системи рівнянь. При аргументі  $x = x_0$  значення функції  $\varphi(x)$  дорівнює  $F_0$ , при аргументі  $x = x_1$ , значення  $\varphi(x)$  дорівнює  $F_1$  і при  $x = x_2$  значення функції  $\varphi(x)$  дорівнює  $F_2$ . Схема метода квадратичної інтерполяції приведена на рисунку 2.1

Розв'язуючи систему рівнянь

$$ax^2 + bx_0 + c = F_0$$

$$ax_1^2 + bx_1 + c = F_1$$



$$ax_2^2 + bx_2 + c = F_2,$$

визначаємо  $a$ ,  $b$ ,  $c$ .

Послідовність знаходження коефіцієнтів  $a$  і  $b$  приведена нижче

$$c = F_0 - ax_0^2 - bx_0;$$

$$a = \frac{F_1 - c - bx_1}{x_1^2}; \quad b = \frac{F_2 - c - bx_2}{x_2}.$$

Остаточно отримаємо

$$a = \frac{(x_2 - x_1)F_0 + (x_0 - x_2)F_1 + (x_1 - x_0)F_2}{\Delta};$$

$$b = \frac{(x_1^2 - x_2^2)F_0 + (x_2^2 - x_0^2)F_1 + (x_0^2 - x_1^2)F_2}{\Delta};$$

де  $\Delta = (x_0 - x_1)(x_1 - x_2)(x_2 - x_0)$ .

Якщо підставити замість  $x_0$  і  $x_2$  їхні значення, тобто  $x_0 = x_1 - h$ ;  $x_2 = x_1 + h$ , то одержимо

$$a = \frac{F_0}{2h^2} - \frac{F_1}{h^2} + \frac{F_2}{2h^2} = \frac{1}{2h^2}(F_0 - 2F_1 + F_2),$$

$$b = \frac{-(2x_1 + h)F_0 + 4x_1F_1 - (2x_1 - h)F_2}{2h^2}. \quad (2.2)$$

Екстремум параболи можна знайти аналітично. Для цього необхідно знайти похідну функції  $\varphi(x)$  і прирівняти її до нуля

$$\frac{\partial \varphi(x)}{\partial x} = 2ax + b = 0,$$

відкіля

$$x^* = -\frac{b}{2a}. \quad (2.3)$$

Підставивши в рівняння (2.3) значення коефіцієнтів з рівняння (2.2), одержимо

$$x^* = \frac{(2x_1 + h)F_0 - 4x_1F_1 + (2x_1 - h)F_2}{2(F_0 - 2F_1 + F_2)}$$

Якщо  $|x_1 - x^*| \geq \varepsilon$ , то полагаємо  $x_1 = x^*$  і розрахунок повторюємо.

Приблизний алгоритм пошуку екстремуму функції методом квадратичної інтерполяції – екстраполяції приведений нижче.

1. Задаємося початковим наближенням  $x_1$ , кроком  $h$ , погрішністю  $\varepsilon$ .
2. Полагаємо аргумент  $x = x_1$ .
3. Обчислюємо значення функції у точці  $x = x_1$ ,  $F_1 = F(x)$ .
4. Приймаємо аргумент рівним  $x = x_1 - h$ .
5. Обчислюємо значення функції у точці  $x = x_1 - h$ ,  $F_0 = F(x)$ .
6. Приймаємо аргумент рівним  $x = x_1 + h$ .
7. Обчислюємо значення функції у точці  $x = x_1 + h$ ,  $F_2 = F(x)$ .
8. Обчислюємо координату вершини параболи

$$x^* = \frac{(2x_1 + h)F_0 - 4x_1F_1 + (2x_1 - h)F_2}{2(F_0 - 2F_1 + F_2)}$$

9. Порівнюємо отримане значення координати вершини параболи  $x^*$  з прийнятим наближенням  $x_1$ . Якщо точність не досягнута  $|x_1 - x^*| \geq \varepsilon$ , то приймаємо  $x_1 = x^*$  і розрахунок повторюємо, тобто переходимо на пункт 2. У тому випадку, коли  $|x_1 - x^*| < \varepsilon$ , переходимо на пункт 10.
10. Полагаємо  $x_{\text{опт}} = x^*$ ,  $F_{\text{опт}} = F_1$ .
11. STOP.

Блок-схема методу квадратичної інтерполяції – екстраполяції приведена на рисунку 2.2

По даному методу можна знаходити, як максимум так і мінімум функції. Якщо екстремум функції  $x^*$  знаходиться усередині розташованого інтервалу  $x_1 \pm h$ , то тоді говорять про інтерполяцію. Якщо екстремум функції знаходиться поза розглянутим інтервалом, то тоді говорять про екстраполяцію.

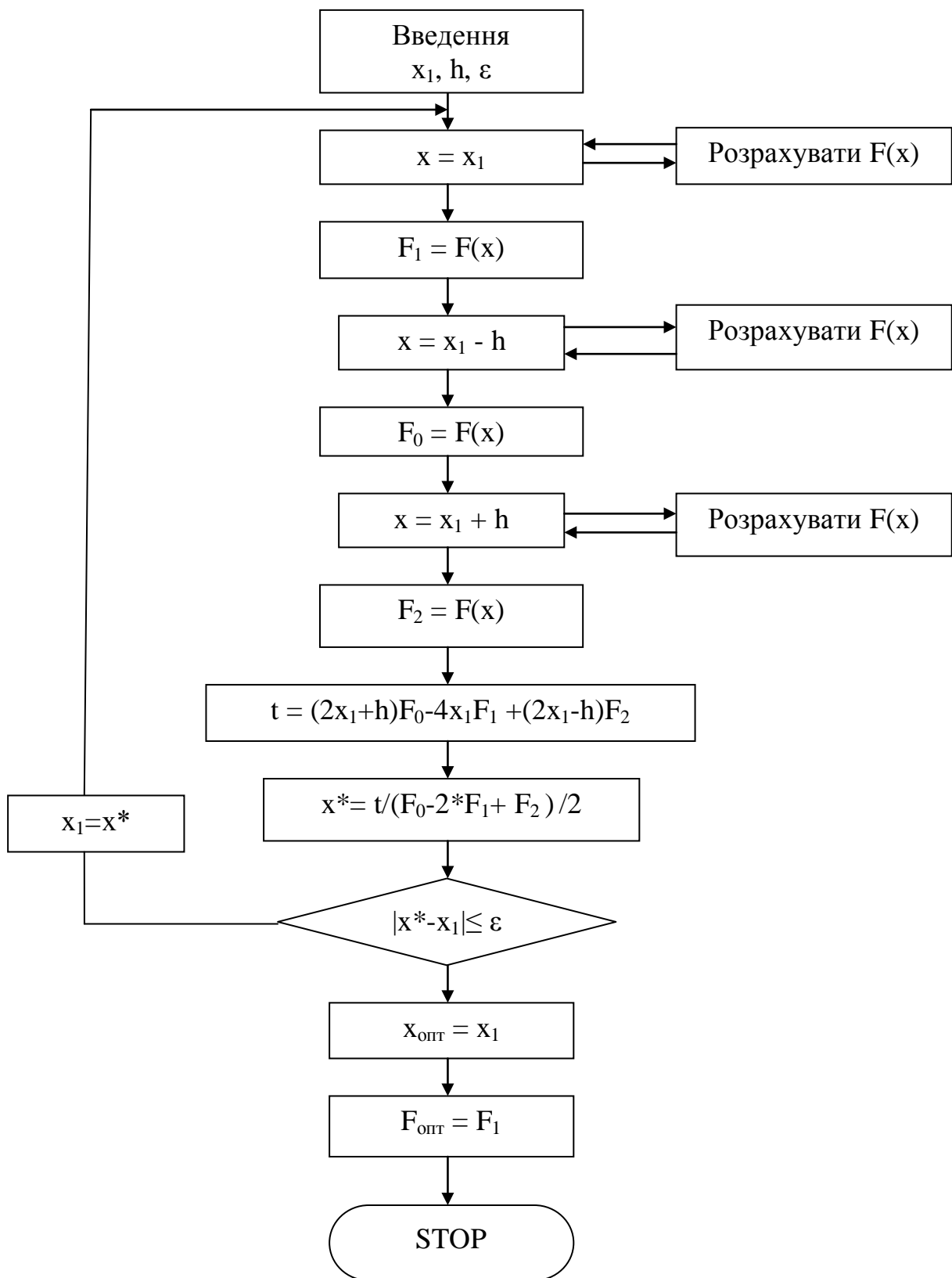


Рисунок 2.2 – Блок-схема методу квадратичної інтерполяції – екстраполяції

### 3. Лабораторна робота 3

#### МЕТОД ДІЛЕННЯ ІНТЕРВАЛУ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ НАВПІЛ

Унімодальною називають функцію, що має один екстремум. Методи оптимізації, засновані на розглянутій властивості унімодальності функції, називаються методами скорочення інтервалу невизначеності. На початку пошуку положення точки оптимального рішення  $x^*$  на інтервалі  $[a, b]$  невідомо.

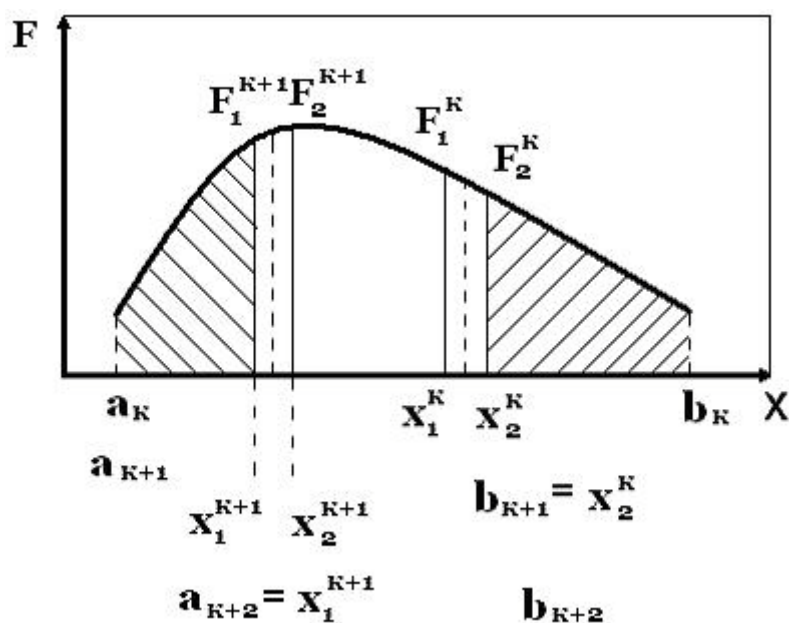


Рисунок 3.1. – Схема пошуку максимуму функції методом дихотомії

Відповідно до цього методу на кожному кроці пошуку проводиться два випробування в точках  $x_1^k$  і  $x_2^k$  які розташовані симетрично, щодо середини інтервалу невизначеності.

$$x_1^k = \frac{(a_k + b_k) - \varepsilon}{2}; \quad x_2^k = \frac{(a_k + b_k) + \varepsilon}{2};$$

де  $2\varepsilon > 0$  максимально допустиме розходження між точками випробувань  $x_1^k$  та  $x_2^k$ . За значеннями функції  $F(x)$ , отриманими у цих точках, одна половина досліджуваного інтервалу в силу унімодальності функції виключається з подальшого розгляду. Так на рисунку 3.1. функція в

точці  $x_1^k$   $F(x_1^k) = F_1$  більша чим функція в точці  $x_2^k$   $F(x_2^k) = F_2$ , тобто  $F_1 > F_2$ . У зв'язку з цим з дальшого розгляду виключається інтервал  $[x_2^k, b_k]$  і кінець інтервалу переноситься в точку  $x_2^k$ , а точка  $a_k$  залишається на місці. В цьому випадку  $a_{k+1} = a_k$  і  $b_{k+1} = x_2^k$ . Якщо погрішність не досягнута тобто  $|b_{k+1} - a_{k+1}| \geq 2\varepsilon$ , то розрахунок продовжуємо. В інтервалі невизначеності  $[a_{k+1}, b_{k+1}]$  виконуємо два випробування в точках

$$x_1^{k+1} = \frac{(a_{k+1} + b_{k+1}) - \varepsilon}{2}; \quad x_2^{k+1} = \frac{(a_{k+1} + b_{k+1}) + \varepsilon}{2}.$$

Розраховуємо функції в цих двох точках  $F_1^{k+1} = F(x_1^{k+1})$  і  $F_2^{k+1} = F(x_2^{k+1})$  (рисунок 3.1). Так як  $F_1^{k+1} < F_2^{k+1}$ , то з дальшого розгляду виключається інтервал  $[a_{k+1}; x_1^{k+1}]$  і початок інтервалу переноситься в точку  $x_1^{k+1}$ , точка  $b_{k+1}$  залишається на місці, тоді  $a_{k+2} = x_1^{k+1}$  і  $b_{k+2} = b_{k+1}$  і так далі до досягнення заданої точності. При знаходженні мінімуму функції розраховується функція у двох точках (рисунок 3.2). Якщо функція продовжує зменшуватися від точки  $x_2^k$  до  $x_1^k$  тобто  $F(x_1^k) < F(x_2^k)$ , то з розгляду виключається інтервал  $[x_2^k, b_k]$ , кінець інтервалу переноситься в точку  $x_2^k$ , тобто  $b_{k+1} = x_2^k$ . Начало інтервалу знаходиться в тім же місці  $[a_{k+1}, b_{k+1}]$ , в середині цього інтервалу знаходимо точки  $x_1^{k+1}$  та  $x_2^{k+1}$ . Розрахувавши значення функції  $F_1^{k+1}$  та  $F_2^{k+1}$ , видно, що функція зменшується від точки  $x_1^{k+1}$  до точки  $x_2^{k+1}$  тобто функція  $F_1^{k+1} > F_2^{k+1}$ . В цьому разі виключається інтервал  $[a_{k+1}; x_1^{k+1}]$ . Тоді точка  $a_{k+2}$  переходить в точку  $x_1^{k+1}$  і  $a_{k+2} = x_1^{k+1}$ , а точка  $b_{k+2} = b_{k+1}$ . В подальшому розглядаємо інтервал  $[a_{k+2}; b_{k+2}]$  і т.д.

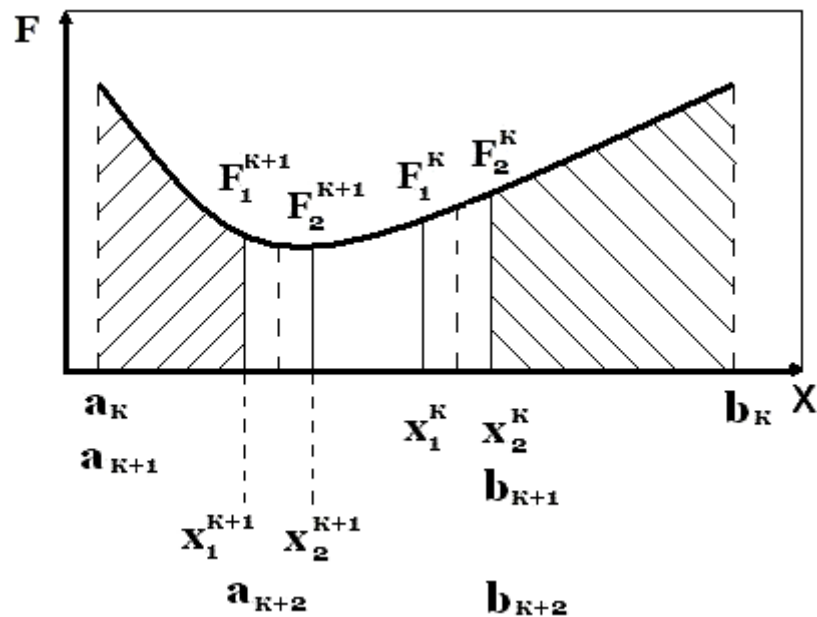


Рисунок 3.2. – Схема пошуку мінімуму функції методом дихотомії

Алгоритм пошуку екстремуму (мінімуму) функції методом дихотомії приведений нижче.

1. Задається початок інтервалу  $\mathbf{a}$ , кінець інтервалу  $\mathbf{b}$ , погрішність  $\varepsilon$
2. Перевіряємо умову  $|b - a| < 2\varepsilon$ . Якщо умова виконується, то йдемо на пункт 7, інакше на пункт 3.
3. Знаходимо значення точок випробувань

$$x_1 = \frac{a + b - \varepsilon}{2}; \quad x_2 = \frac{a + b + \varepsilon}{2};$$

4. Обчислюємо значення функції  $F_1 = F(x_1)$  и  $F_2 = F(x_2)$ .
5. Перевіряємо умову  $F_2 > F_1$ . Якщо вона виконується, то покладаємо  $\mathbf{b}=x_2$  і йдемо на пункт 2. Якщо умова не виконується, переходимо на пункт 6.
6. Покладаємо  $\mathbf{a}=x_1$  і переходимо на пункт 2.
7. Обчислюємо

$$x_{\text{опт}} = \frac{x_1 + x_2}{2}; \quad F_{\text{опт}} = F(x_{\text{опт}})$$

Блок – схема метода дихотомії приведена на рисунку 3.3.

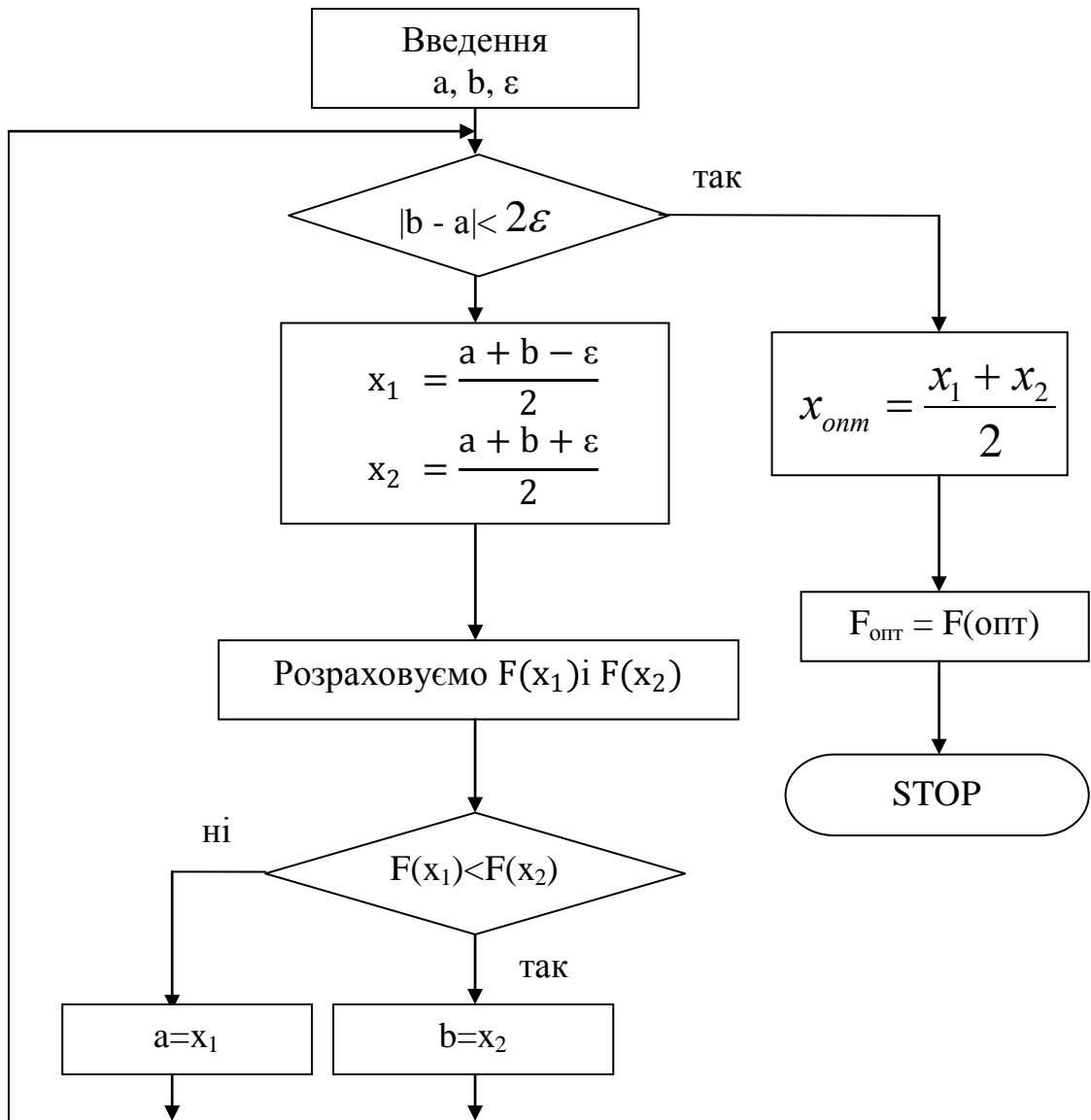


Рисунок 3.3. Блок – схема пошуку мінімуму функції методом дихотомії

#### 4. Лабораторна робота 4

### МЕТОД „ЗОЛОТОГО” ПЕРЕТИНУ

Метод „золотого” перетину настільки ж ефективний, як і метод Фібоначі, однак при цьому не потрібно знати кількість обчислень функції  $N$ .

Розглянемо екстремальну задачу:

при виконанні умов  $I_m = \min \max [b_k - a_k]$

$$0 \leq t_k \leq \frac{1}{2} \quad (4.1)$$

$$t_{k+1} = \frac{1 - 2t_k}{1 - t_k}$$

$k = 0, 1; \dots; n-1$

Введемо додаткову вимогу, щоб на кожному кроці випробувань коефіцієнти  $t_k$  зберігали постійне значення.

Перетворимо обмеження (4.1) до виду

$$t_{k+1} = \frac{1 - 2t_k}{1 - t_k} \rightarrow \bar{t} = \frac{1 - 2\bar{t}}{1 - \bar{t}}$$

Одержали квадратне рівняння, рішення якого має вид  $\bar{t}^2 - 3\bar{t} + \bar{t} = 0$ .

У силу обмеження (4.1) оптимальним рішенням є параметр

$$t_3^* = \frac{3 - \sqrt{5}}{2} = 0,381966.$$

Приблизний алгоритм методу „золотого перетину” наступний.

Задано: границі невизначеності  $a, b$  і погрішність розрахунку  $\varepsilon$ . (рисунок 4.1)

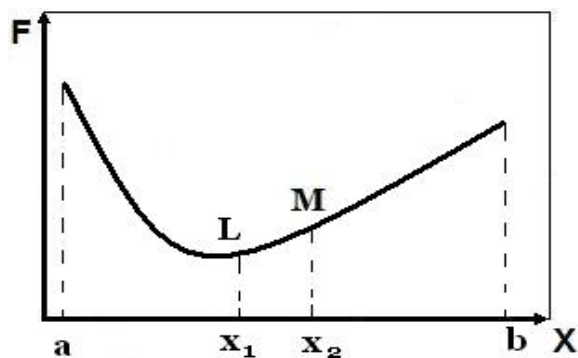


Рисунок 4.1 – Схема пошуку мінімуму функції методом „золотого” перетину



1. Обчислюємо коефіцієнт пропорційності  $k = (3 - \sqrt{5})/2$ .
2. Обчислюємо точки випробувань:  $x_1 = a + k(b-a)$ ;  $x_2 = a + (1-k)(b-a)$ .
3. Обчислюємо функцію  $L = F(x_1)$ .
4. Обчислюємо функцію  $M = F(x_2)$ .
5. Якщо  $|x_2 - x_1| < \varepsilon$ , то йдемо на пункт 9.
6. Якщо  $L > M$ , то йдемо на пункт 7, інакше на пункт 8.
7. Вважаємо  $a = x_1$ ;  $x_1 = x_2$ ;  $L = M$ ;  
 $x_2 = a + (1 - k)(b - a)$ ;  $M = F(x_2)$  і йдемо на пункт 5.
8. Вважаємо  $b = x_2$ ;  $x_2 = x_1$ ;  $M = L$ ;  
 $x_1 = a + k(b - a)$ ,  $L = F(x_1)$  і йдемо на пункт 5.
9. Полагаємо  $x_{\text{опт}} = \frac{x_1 + x_2}{2}$  обчислюємо значення функції  $F_{\text{опт}} = F(x_{\text{опт}})$
10. STOP.

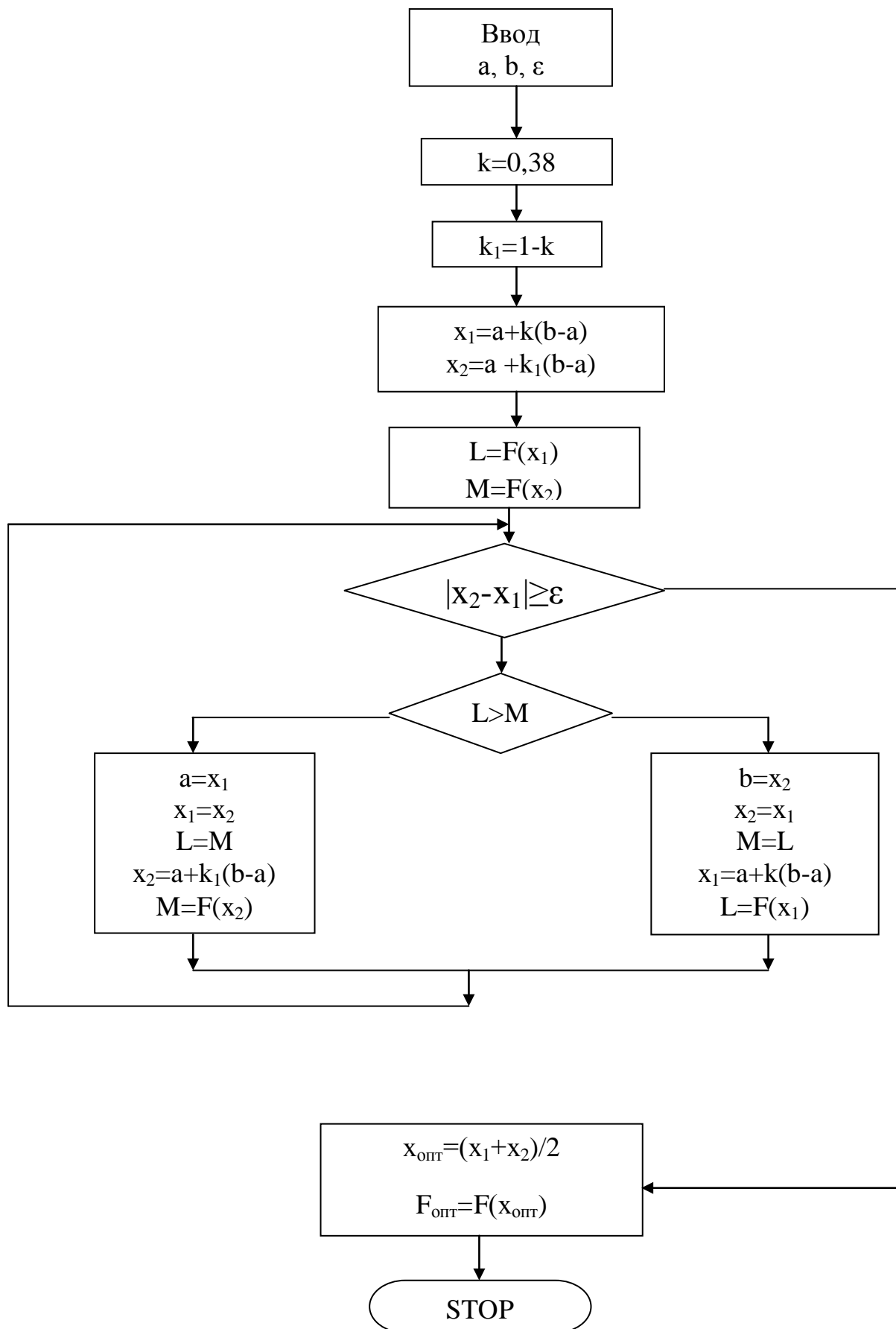


Рисунок 4.2 – Блок – схема метода „Золотий перетин”

## 5. Лабораторна робота 5

### КОНСТРУКТИВНИЙ ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ОБМУРІВКИ

Щільність теплового потоку від зовнішньої поверхні обмурівки у навколишній простір можна розрахувати за законом Ньютона-Ріхмана:

$$q_{oc} = \alpha_{oc}(t_n - t_{oc}) \quad (5.1)$$

Коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні стінки в навколишнє середовище Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\alpha_{oc} = d_0 + d_1(t_n - 30) - d_2(t_n - 30)^2 + d_3(t_n - 30)^3 \quad (5.2)$$

де

- для вертикальної стінки

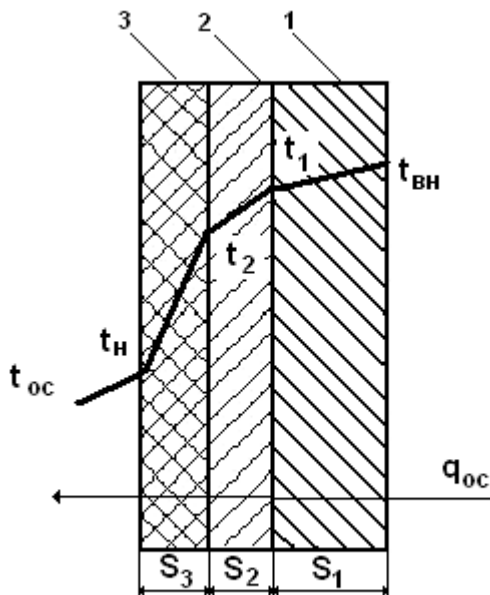
$$d_0=9,5; \quad d_1=98,15 \cdot 10^{-3}; \quad d_2=4,74 \cdot 10^{-4}; \quad d_3=1,74 \cdot 10^{-6};$$

- для верха горизонтальної стінки

$$d_0=9,7; \quad d_1=0,1; \quad d_2=4,43 \cdot 10^{-4}; \quad d_3=1,35 \cdot 10^{-6};$$

- для низу горизонтальної стінки

$$d_0=9,3; \quad d_1=91,5 \cdot 10^{-3}; \quad d_2=3,88 \cdot 10^{-4}; \\ d_3=1,37 \cdot 10^{-6};$$



1 - шар вогнетриву; 2 - шар легковагу;  
3 - шар ефективної теплоізоляції

Рисунок 5.1 – Схема плоской шарів обмурівки тришарової обмурівки

Рівняння (5.2) отримано при обробці даних по методу найменших квадратів і справедливо для  $t_n=25\dots 210^\circ\text{C}$ .

У більшості випадків обмурівка виконується тришаровою (рисунок 5.1).

Питомий тепловий потік через плоску багатшарову стінку, Вт/м<sup>2</sup>:

$$q_{oc} = \frac{t_{вн} - t_n}{\sum_{i=1}^n R_i}$$

де  $\sum_{i=1}^n R_i$  сумарний тепловий опір, (м<sup>2</sup>·К)/Вт;

$$\sum_{i=1}^n R_i = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{S_n}{\lambda_n}$$

$S_i$  – товщина  $i$ -го шару обмурівки, м;

$\lambda_1$  – коефіцієнт теплопровідності  $i$ -го шару обмурівки, Вт/(м·К);

$t_{вн}$  – температура на внутрішній поверхні обмурівки (з боку газів),°С ;

$t_{н}$  – температура на зовнішній поверхні обмурівки,°С .

У місцях доступних людині ця температура не повинна перевищувати 50°С ( $t_{н} \leq 50^{\circ}\text{C}$  за санітарними нормами).

Температура на границі шарів, °С

$$t_1 = t_{вн} - q_{oc} \cdot R_1 \quad (5.4)$$

$$t_2 = t_{вн} - q_{oc}(R_1 + R_2) = t_1 - q_{oc} \cdot R_2 \quad (5.5)$$

### **Методика конструктивного теплового розрахунку обмурівки**

При конструктивному тепловому розрахунку задане розташування обмурівки в просторі, температура на внутрішній поверхні  $t_{вн}$ , °С, щільність теплового потоку крізь обмурівки  $q_{oc}$ , Вт/м<sup>2</sup> чи температура зовнішньої поверхні  $t_{н}$ , °С, температура навколишнього середовища  $t_{oc}$ , °С, матеріал вогнетриву і його товщина.

Рішення задачі полягає у виборі матеріалу шару легковагу і шару ефективної теплоізоляції, у визначенні їхньої товщини і розподілі температури по товщині обмурівки. Для забезпечення надійної роботи обмурівки необхідно, щоб максимальна температура шару легковагу і шару ефективної теплоізоляції не перевищувала максимально припустиму температуру для цих шарів, тобто

$$t_1 \leq t_{раб2}^{max}; \quad t_2 \leq t_{раб3}^{max} .$$

## Послідовність розрахунку

Розглянемо послідовність розрахунку для обмурівки, що складається з одного, двох і трьох шарів.

Вважаємо, що відомо температури  $t_{вн}$ ;  $t_n$ ;  $t_{oc}$

1. По формулі (5.2) розрахувати коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_{oc}$  у залежності від розташування стінки в просторі.
2. Розрахувати щільність теплового потоку, що відводиться від стінки у навколишній простір:

$$q_{oc} = \alpha_{oc}(t_n - t_{oc}).$$

3. Визначити сумарний термічний опір обмурівки

$$\sum R = \frac{t_{вн} - t_n}{q_{oc}}.$$

4. Якщо обмурівка складається з одного шару, то необхідно вибрати матеріал шару.
5. Розрахувати коефіцієнт теплопровідності матеріалу при середній температурі по товщині шару

$$\lambda_1 = A_1 + B_1 \cdot 0,5(t_{вн} + t_n).$$

6. Знайти товщину обмурівки:

$$S_1 = \lambda_1 \cdot \sum R.$$

7. Якщо обмурівка обрана двошарова, то необхідно вибрати матеріал і товщину шару вогнетриву, вибрати матеріал легкового шару, виходячи з умов надійності роботи:

$$t_1 = t_{раб2}^{\max} - \Delta t_2, \quad \text{де } \Delta t_2 = 80 \dots 100^\circ\text{C}$$

При виборі матеріалу можна орієнтовно вважати:

$$t_1 \approx t_{вн} - (50 \dots 100)^\circ\text{C}.$$

8. Розрахувати температуру  $t_1$  на границі шарів

$$\lambda_1 = A_1 + B_1 \frac{t_1^{(к)} + t_{вн}}{2},$$

$$t_1 = t_{вн} - q_{oc} \frac{S_1}{\lambda_1}.$$

Тому що,  $\lambda_1 = f(t)$ , то пошук температури  $t_1$  ведеться методом послідовних наближень до досягнення заданої точності, тобто

$$\frac{|t_1^{(k)} - t_1^{(k+1)}|}{t_1^{(k)}} \leq \varepsilon,$$

де  $\varepsilon$  - погрішність розрахунку ( $\varepsilon=0,02...0,05$ ).

9. Якщо отримане значення температури  $t_1$  задовольняє умові  $t_1 = t_{раб2}^{max} - \Delta t_2$ , то розрахунок необхідно продовжувати:

- визначити коефіцієнт теплопровідності

$$\lambda_2 = A_2 + B_2 \frac{t_1 + t_H}{2}$$

- розрахувати термічний опір шару легковагу

$$R_2 = \frac{t_1 - t_H}{q_{oc}}$$

- знайти товщину шару легковагу

$$S_2 = \lambda_2 \cdot R_2.$$

Якщо умова не виконується, то проаналізувати варіант, що дозволять домогтися виконання умови працездатності і повторити розрахунок з п. 7.

10. У випадку тришарової обмурівки необхідно вибрати матеріал і товщину робочого шару, матеріали шару легковагу і шару ефективної теплоізоляції, виходячи з умов надійності роботи

$$t_1 \leq t_{раб2}^{max} - \Delta t_2, \quad t_2 \leq t_{раб3}^{max} - \Delta t_3, \quad \text{де } \Delta t_3 = 50 \dots 70^\circ\text{C}.$$

11. Розрахувати температуру на границі вогнетривкого і легковаго шару по формулі п. 8.

12. Прийняти температуру на границі легковаго шару і шару ефективної теплоізоляції

$$t_2 \leq t_{раб3}^{max} - \Delta t_3.$$

13. Визначити:

- коефіцієнт теплопровідності легковаго шару

$$\lambda_2 = A_2 + B_2 \frac{t_1 + t_H}{2};$$

- термічний опір

$$R_2 = \frac{t_1 - t_H}{q_{oc}}$$

- товщина шару

$$S_2 = \lambda_2 \cdot R_2.$$

14. Для шару ефективної теплоізоляції визначити:

- коефіцієнт теплопровідності матеріалу

$$\lambda_3 = A_3 + B_3 \frac{t_2 + t_H}{2}$$

- термічний опір

$$R_3 = \sum R - \frac{S_1}{\lambda_1} - R_2$$

- товщина шару

$$S_3 = \lambda_3 \cdot R_3.$$

Граф-схеми програми конструктивного теплового розрахунку приведені на рисунках 5.2, 5.3.

Вихідні дані для конструктивного теплового розрахунку приведені у додатку 3.

Приклад: Виконати конструктивний тепловий розрахунок двошарової обмурівки. Робочий шар виконаний із шамоту, коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_1 = 0,84 + 0,58 \cdot 10^{-3}t$ , теплоізоляційний шар з піношамоту з коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda_2 = 0,84 + 0,58 \cdot 10^{-3}t$ . Максимально допустима робоча температура піношамоту  $t_{раб2}^{max} = 1200^\circ C$ . Температура на внутрішній поверхні робочого шару  $t_{вн} = 1400^\circ C$ , на зовнішній поверхні піношамоту температура  $t_H = 50^\circ C$ , температура навколишнього середовища  $t_{oc} = 20^\circ C$ . Товщину вогнетривкого шару, виходячи з умов будівельної міцності, прийmemo рівною  $S_1 = 0,928$  м.

Коефіцієнт тепловіддачі для вертикальної стінки:

$$\alpha_{oc} = d_0 + d_1(t_H - 30) - d_2(t_H - 30)^2 + d_3(t_H - 30)^3 =$$

$$= 9,5 + 98,15 \cdot 10^{-3}(50 - 30) - 4,74 \cdot 10^{-4}(50 - 30)^2 +$$

$$+ 1,74 \cdot 10^{-6}(50 - 30)^3 = 11,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$$

Розраховуємо щільність теплового потоку, що відводиться від стінки в навколишній простір

$$q_{oc} = \alpha_{oc}(t_H - t_{oc}) = 11,3(50 - 30) = 338,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Визначаємо сумарний термічний опір:

$$\sum R = \frac{t_{вн} - t_H}{q_{oc}} = \frac{1400 - 50}{338,6} = 3,99 \approx 4 \frac{\text{м}^2\text{К}}{\text{Вт}}$$

Розрахуємо коефіцієнт теплопровідності при середній температурі припускаючи, що обмурівка цілком виконана з робочого вогнетриву.

$$\lambda_1 = 0,84 + 0,58 \cdot 10^{-3} \frac{1400 + 50}{2} = 1,26 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Товщина одношарової обмурівки

$$S_1 = \lambda_1 \cdot \sum R = 1,26 \cdot 4 = 5,04 \text{ м.}$$

n=2

$$t_1 \leq t_{раб2}^{\max} - \Delta t_2$$

<p>Уведення <math>(n, d_0, d_1, d_2, d_3, t_{вн}, t_{oc}, t_H, \varepsilon)</math></p> $\alpha_{oc} = d_0 + d_1(t_H - 30) - d_2(t_H - 30)^2 +$ $+ d_3(t_H - 30)^3$ $q_{oc} = \alpha_{oc}(t_H - t_{oc})$ $\sum R = \frac{t_{вн} - t_H}{q_{oc}}$	<p>Уведення <math>(S_1, a_2, b_2, \Delta t_2, t_{раб2}^{\max})</math></p> $t_2 = t_H$ <p><math>ST2(S_1, a_1, b_1, t_{вн}, t_1, \varepsilon, R_1, q_{oc})</math></p>	<p><math>ST22(t_1, t_2, a_2, b_2, q_{oc}, R_2, S_2)</math></p> <p>Вивід</p> <p>Друк тексту „Змінити матеріал чи товщину робочого шару”</p> $t_1 \leq t_{раб2}^{\max} - \Delta t_2$
<p>Уведення <math>(a_1, b_1)</math></p> <p><math>ST1(a_1, b_1, t_{вн}, t_H, \sum R, S_1)</math></p> <p>Вивід <math>(n, S_1, t_{вн}, t_H, q)</math></p>	<p>Уведення <math>(a_1, b_1, a_2, b_2, \Delta t_2, t_{раб2}^{\max}, a_3, b_3, \Delta t_3, t_{раб3}^{\max})</math></p> <p><math>ST2(t_1, t_{вн}, a_1, b_1, q_{oc}, R_1, S_1)</math></p> $t_2 = t_{раб3}^{\max} - \Delta t_3$	<p><math>ST22(t_1, t_2, a_2, b_2, q_{oc}, R_2, S_2)</math></p> $R_3 = R_2 - (R_1 + R_2)$ <p><math>ST1(a_3, b_3, t_H, S_3, R_3)</math></p> <p>Вивід <math>(n, S_1, S_2, S_3, t_{вн}, t_1, t_2, q_{oc})</math></p> <p>Друк тексту „Змінити матеріал чи товщину робочого шару”</p>



Рисунок 5.2 – Граф-схема конструктивного теплового розрахунку обмурівки

$ST1(a_1, b_1, t_{\text{вн}}, t_n, R : \text{real}; \text{var } S : \text{real})$ $t = 0,5 * (t_{\text{вн}} + t_n)$ $\lambda = a + b * t$ $S = \lambda * R$	$ST2(S, \varepsilon, t_{\text{вн}}, a_1, b_1, q : \text{real}; \text{var } t_1 : \text{real})$ <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 5px auto;"> <math>t_1 - t_{11} \geq \varepsilon \cdot t_1</math> </div> $t_1 = 0$ $t_{11} = t_{\text{вн}} - 100$ $t = 0,5 * (t_{11} - t_{\text{вн}})$ $t_{11} = t_{\text{вн}}$ $\lambda = a_1 + b_1 * t$ $R = \frac{S}{\lambda}$ $t_1 = t_{\text{вн}} - q \cdot R$
$ST22(t_1, t_2, a, b, q, R : \text{real}; \text{var } S : \text{real})$ $t = 0,5 * (t_1 + t_2)$ $\lambda = a + b * t$ $R = (t_1 - t_2) / q$ $S = \lambda * R$	

Рисунок 5.3 – Граф-схема окремих процедур конструктивного теплового розрахунку

Товщина вогнетривкого шару приймемо рівну  $S_1 = 0,928$ . Визначаємо орієнтовану температуру на стику шарів (рисунок 5.4).

$$t_1 = t_{\text{вн}} - (50 \dots 100) = 1400 - 100 = 1300^\circ\text{C}.$$

Визначаємо коефіцієнт теплопровідності робочого шару:

$$\lambda_1 = 0,84 + 0,58 \cdot 10^{-3} \frac{1400 + 1300}{2} = 1,62 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Розраховуємо температуру на стику шарів:

$$t_1 = t_{\text{вн}} - q_{\text{ос}} \frac{S_1}{\lambda_1} = 1400 - 338,6 \frac{0,928}{1,62} = 1206^\circ\text{C}.$$

Отримана температура  $t_1(1206^\circ\text{C}) > t_{\text{раб2}}^{\text{max}}(1200^\circ\text{C})$ , тобто умови працездатності не виконуються. Одним зі способів виконання умов працездатності є збільшення товщини робочого шару. Збільшимо товщину вогнетривкого шару на одну цеглу:

$$S_1 = 0,928 + 0,232 = 1,16 \text{ м.}$$

Обчислюємо температуру  $t_1$ :

$$t_1^{(1)} = t_{\text{вн}} - q_{\text{ос}} \frac{S_1}{\lambda_1} = 1400 - 338,6 \frac{1,16}{1,62} = 1190 \text{ }^\circ\text{C}$$

Уточнюємо коефіцієнт теплопровідності:

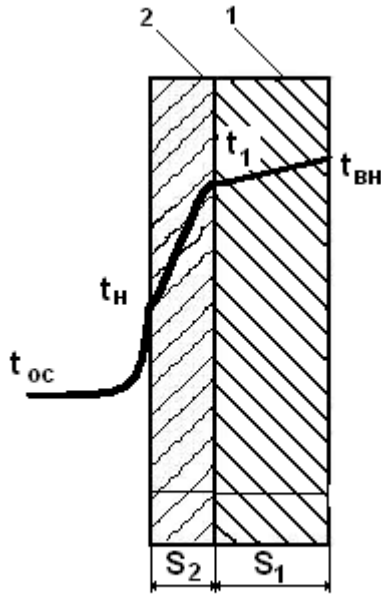
$$\lambda_1 = 0,84 + 0,58 \cdot 10^{-3} \frac{1400 + 1190}{2} = 1,59 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Температура на стику шарів:

$$t_1^{(2)} = 1400 - 338,6 \frac{1,16}{1,59} = 1153 \text{ }^\circ\text{C}$$

Уточнюємо коефіцієнт теплопровідності:

$$\lambda_1 = 0,84 + 0,58 \cdot 10^{-3} \frac{1400 + 1153}{2} = 1,58 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$



**Рисунок 5.4 - Схема двшарової обмурівки**

Уточнюємо температуру на стику шарів:

$$t_1^{(3)} = 1400 - 338,6 \frac{1,16}{1,58} = 1151 \text{ }^\circ\text{C}$$

Визначаємо погрішність обчислення температури:

$$\frac{|t_1^{(2)} - t_1^{(3)}|}{t_1^{(2)}} = \frac{1153 - 1151}{1153} = 0,002 < \varepsilon = 0,05.$$

Умова працездатності не виконується, оскільки:

$$t_1 \leq t_{\text{раб2}}^{\text{max}} - (80 \dots 100) \text{ }^\circ\text{C}$$

$$1151 \leq 1200 - 80 \quad (1151 > 1120)$$

У зв'язку з цим збільшуємо товщину вогнетривкого шару на одну цеглу:

$$S_1 = 1,16 + 0,232 = 1,392 \text{ м.}$$

Обчислюємо температуру на стику шарів:

$$t_1^{(1)} = 1400 - 338,6 \frac{1,392}{1,58} = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$$

Уточнюємо коефіцієнт теплопровідності:

$$\lambda_1 = 0,84 + 0,58 \cdot 10^{-3} \frac{1400 + 1100}{2} = 1,56 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Уточнюємо температуру  $t_1$ :

$$t_1^{(2)} = 1400 - 338,6 \frac{1,392}{1,56} = 1098 \text{ }^\circ\text{C}$$

Знаходимо погрішність обчислення температури  $t_1$ :

$$\frac{|t_1^{(1)} - t_1^{(2)}|}{t_1^{(1)}} = \frac{1100 - 1098}{1100} = 0,002 < \varepsilon = 0,05.$$

Умова працездатності виконується, тому що:

$$t_1(1100) \leq t_{\text{паб}2}^{\text{max}} - \Delta t_2 = 1200 - 80 = 1120 \text{ }^\circ\text{C}$$

Визначаємо коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційного шару:

$$\lambda_2 = 0,1 + 0,145 \cdot 10^{-3} \frac{t_1 + t_H}{2} = 0,1 + 0,145 \cdot 10^{-3} \frac{1100 + 50}{2} = 0,18 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Розраховуємо термічний опір теплоізоляційного шару:

$$R_2 = \frac{t_1 - t_2}{q_{\text{oc}}} = \frac{1100 - 50}{338,6} = 3,1 \frac{\text{м}^2\text{К}}{\text{Вт}}.$$

Товщина теплоізоляційного шару:

$$S_2 = \lambda_2 \cdot R_2 = 0,18 \cdot 3,1 = 0,558 \text{ м.}$$

Товщина обмурівки, що складається з двох шарів:

$$\sum S = S_1 + S_2 = 1,392 + 0,558 = 1,95 \text{ м.}$$

Для забезпечення однієї і тієї ж щільності теплового потоку в навколишній простір необхідна одношарова обмурівка товщиною  $S_1 = 5,04$ , а двошарова  $\sum S = 1,95$  м.

## Перелік посилань

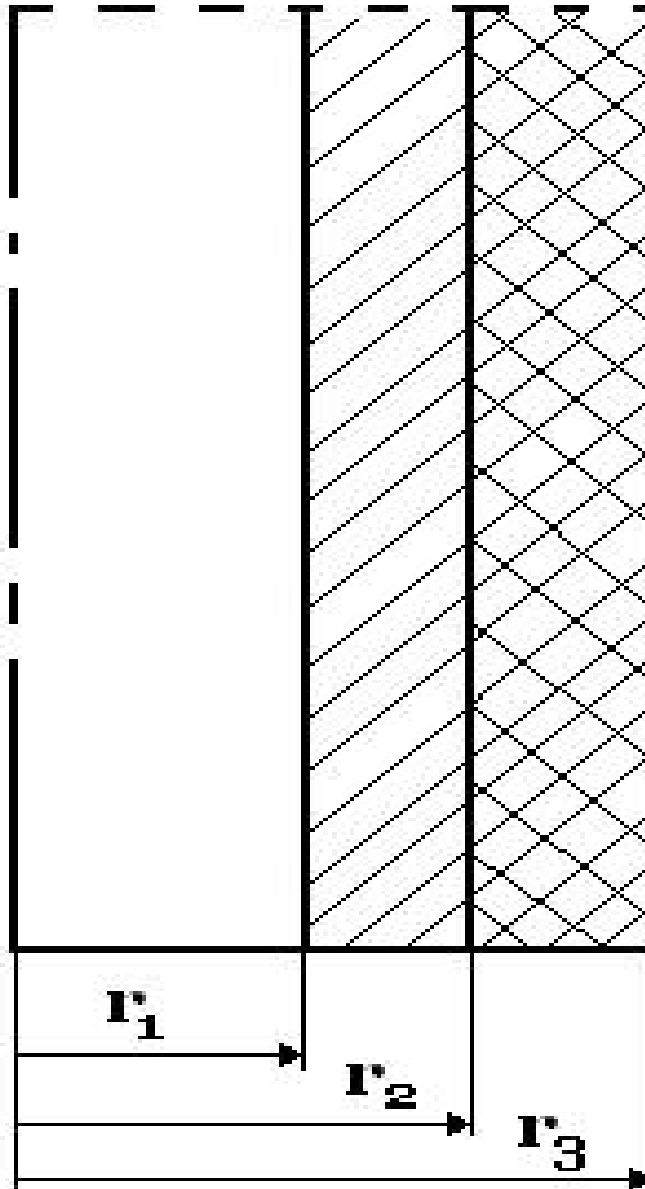
1. Гинкул С.И., Шелудченко В.И., Кравцов В.В., Палкина С.В. Теплообмен – Донецк: Норд – Пресс, 2006. – 298 с.
2. Автоматизированное проектирование теплотехнических установок / С.И. Гинкул, В.И. Шелудченко, В.В. Кравцов, С.В. Палкина – Севастополь: Вебер, 2003. – 141с.

Додаток 1. Вихідні дані для розрахунку критичного радіуса ізоляції.

Паропровід з внутрішнім радіусом  $r_1$  і зовнішнім радіусом  $r_2$  покритий шаром ізоляції радіусом  $r_3$ . Коефіцієнт теплопровідності трубопроводу  $\lambda_c$ , ізоляції  $\lambda_i$ . Коефіцієнт тепловіддачі до внутрішньої поверхні трубопроводу  $\alpha_1$  і від зовнішньої поверхні ізоляції до другої рідини  $\alpha_2$ .

Знайти при якому радіусі  $r_3 = r_{кр}$  термічний опір циліндричної стінки буде мінімальним.

$$\sum R_c = \frac{1}{\alpha_1 r_1} + \frac{1}{\lambda_c} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\alpha_2 r_3} \rightarrow \min$$



Таблиця № 1 – Вихідні дані для розрахунку

№ п/п	Коеф. тепло- віддачі $\alpha_1$ , Вт/м <sup>2</sup> К	Внутріш- ній ра- діус $r_1$ , м	Коеф. тепло- провідності матеріала паропровода $\lambda_c$ , Вт/мК	Зовнішній радіус $r_2$ , м	Коеф. теплопровідності ізоляції, $\lambda_i$ , Вт/мК	Коеф. тепловіддачі $\alpha_2$ , Вт/м <sup>2</sup> К	Крок по координаті $h$ , м	Похибка розрахунку $\varepsilon$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	100	0,04	50	0,08	15	100	0,02	0,002
2	125	0,1	55	0,15	20	100	0,02	0,003
3	150	0,01	45	0,03	2	50	0,002	0,0004
4	175	0,015	40	0,05	2,5	50	0,002	0,0005
5	200	0,05	35	0,06	4	40	0,022	0,005
6	25	0,04	30	0,05	5	50	0,022	0,005
7	50	0,03	25	0,04	6	60	0,02	0,003
8	100	0,02	26	0,06	7	70	0,02	0,002
9	125	0,015	28	0,02	8	80	0,02	0,002
10	150	0,005	30	0,01	9	90	0,02	0,003
11	175	0,01	32	0,015	10	100	0,02	0,004
12	200	0,02	34	0,025	20	200	0,02	0,005
13	225	0,03	36	0,035	1	10	0,02	0,005
14	250	0,035	38	0,04	2	20	0,02	0,004
15	275	0,04	40	0,045	1,5	15	0,02	0,003
16	300	0,05	42	0,055	2,5	25	0,02	0,005
17	280	0,06	44	0,065	4,5	45	0,02	0,004
18	260	0,07	46	0,075	5,5	55	0,02	0,003
19	240	0,01	48	0,015	0,5	5	0,02	0,003
20	220	0,02	50	0,03	0,8	8	0,02	0,004
21	200	0,05	30	0,07	4	40	0,02	0,005
22	180	0,03	35	0,04	5	50	0,02	0,003
23	150	0,05	40	0,08	1	10	0,02	0,004
24	100	0,08	25	0,14	2	10	0,02	0,005
25	75	0,04	30	0,066	2	20	0,02	0,005
26	125	0,1	35	0,4	4	8	0,02	0,004
27	175	0,1	20	0,2	3	10	0,02	0,005
28	200	0,15	25	0,28	3,5	10	0,02	0,004
29	250	0,15	18	0,2	5	20	0,02	0,005

Інтервал невизначеності для варіантів:  $a=0$ ;  $b=0,5$  м.

Додаток 2. Приклад знаходження мінімального лінійного термічного опору методом порозрядного наближення.

Лінійний термічний опір

$$\sum R_c = \frac{1}{\alpha_1 r_1} + \frac{1}{\lambda_c} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\alpha_2 r_3}, \quad (1)$$

$$\text{де } R_1 = \frac{1}{\alpha_1 r_1}, \quad R_2 = \frac{1}{\lambda_c} \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad R_3 = \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_3}{r_2}, \quad R_4 = \frac{1}{\alpha_2 r_3}.$$

Оскільки внутрішній і зовнішній радіуси циліндричної стінки не змінюються, то рівняння (1) можна переписати таким чином

$$\sum R = \sum R_c - \left( \frac{1}{\alpha_1 r_1} + \frac{1}{\lambda_c} \ln \frac{r_2}{r_1} \right).$$

і знаходити мінімум такої функції

$$\sum R = \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\alpha_2 r_3} \rightarrow \min,$$

$$\sum R = R_3 + R_4 \rightarrow \min.$$

Розглянемо приклад, приведений в додатку 1.

Для приклада знайдемо мінімум функції зі слідуючими даними: внутрішній радіус циліндра  $r_1 = 0,01$  м, зовнішній радіус циліндра  $r_2 = 0,015$  м. Коефіцієнт тепловіддачі від рідини до внутрішньої поверхні  $\alpha_1 = 100 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$ , коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні ізоляції до навколишнього повітря  $\alpha_2 = 50 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$ , коефіцієнт теплопровідності металеві труби  $\lambda_c = 40 \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$  і ізоляції  $\lambda_i = 1 \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$ . Похибка розрахунку  $\varepsilon = 0,0005$ , крок  $h=0,002$ .

Прийmemo  $r_3 = r_2$ , тоді

$$\sum R (r_3 = 0,015) = \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\alpha_2 r_3} = \frac{1}{1} \ln \frac{0,015}{0,015} + \frac{1}{50 \cdot 0,015} = 1,3 \frac{\text{мК}}{\text{Вт}}.$$

Збільшуємо радіус  $r_3$  на величину кроку  $r_3 = r_3 + h$ ,

$$r_3 = 0,015 + 0,002 = 0,017 \text{ м.}$$

$$\sum R(r_3 = 0,017) = \frac{1}{1} \ln \frac{0,017}{0,015} + \frac{1}{50 \cdot 0,017} = 1,292 \frac{\text{мК}}{\text{Вт}}.$$

Порівнюємо  $\sum R(r_3 = 0,015) = 1,3 > \sum R(r_3 = 0,017) = 1,292$ .

Так як функція зменшилась, величину радіуса  $r_3$  збільшуємо на величину кроку  $r_3 = r_3 + h = 0,017 + 0,002 = 0,019 \text{ м.}$

$$\sum R(r_3 = 0,019) = \frac{1}{1} \ln \frac{0,019}{0,015} + \frac{1}{50 \cdot 0,019} = 1,286 \frac{\text{мК}}{\text{Вт}}.$$

Порівнюємо  $\sum R(r_3 = 0,017) = 1,292 > \sum R(r_3 = 0,019) = 1,286$ .

Функція продовжує зменшуватись, через те радіус  $r_3$  збільшуємо на величину кроку  $r_3 = r_3 + h = 0,019 + 0,002 = 0,021 \text{ м.}$

$$\sum R(r_3 = 0,021) = \frac{1}{1} \ln \frac{0,021}{0,015} + \frac{1}{50 \cdot 0,021} = 1,288 \frac{\text{мК}}{\text{Вт}}.$$

Порівнюємо  $\sum R(r_3 = 0,019) = 1,286 < \sum R(r_3 = 0,021) = 1,288$ .

Так як функція збільшилась, то величину кроку зменшуємо і змінюємо знак на зворотній

$$h = -\frac{h}{2} = -\frac{0,002}{2} = -0,001.$$

Тоді  $r_3 = r_3 + h = 0,021 + (-0,001) = 0,02 \text{ м.}$

Находимо функцію при  $r_3 = 0,02 \text{ м.}$

$$\sum R(r_3 = 0,02) = \frac{1}{1} \ln \frac{0,02}{0,015} + \frac{1}{50 \cdot 0,02} = 1,287 \frac{\text{мК}}{\text{Вт}}.$$

Порівнюємо  $\sum R(r_3 = 0,021) = 1,288 > \sum R(r_3 = 0,02) = 1,287$ .

Так як функція зменшилась, то змінюємо радіус  $r_3$  на величину кроку  $r_3 = r_3 + h = 0,02 + (-0,001) = 0,019 \text{ м.}$

Функція при  $r_3 = 0,019 \text{ м.}$  раніше була знайдена, то порівнюємо функції

$$\sum R(r_3 = 0,02) = 1,287 > \sum R(r_3 = 0,019) = 1,286.$$

Оскільки функція продовжує зменшуватися то прибавляємо до радіусу  $r_3$  величину кроку



$$r_3 = r_3 + h = 0,019 + (-0,001) = 0,018 \text{ м.}$$

Находимо функцію при  $r_3 = 0,018$  м.

$$\sum R(r_3 = 0,018) = \frac{1}{1} \ln \frac{0,018}{0,015} + \frac{1}{50 \cdot 0,018} = 1,293 \frac{\text{мК}}{\text{Вт}}.$$

Порівнюємо  $\sum R(r_3 = 0,019) = 1,286 < \sum R(r_3 = 0,018) = 1,293$ .

Оскільки функція збільшилась, то зменшуємо величину кроку і змінюємо знак на зворотній

$$h = -\frac{h}{2} = -\left(-\frac{0,002}{2}\right) = 0,0005.$$

Оцінюємо похибку  $|h| \leq \varepsilon$  ( $0,0005 \leq 0,0005$ ).

Оскільки точність розрахунку досягнута, то приймаємо критичний радіус  $r_{кр} = r_3 + h = 0,019$  м.

### Додаток 3. Вихідні дані для конструктивного теплового розрахунку двошарової стінки

Виконати конструктивний тепловий розрахунок двошарової обмурівки. Робочий шар виконаний з вогнетривкого матеріалу з коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda_1$  (Казанцев Е.И. с. 132), теплоізоляційний шар з матеріалу з коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda_2$  (Казанцев Е.И. с. 151). Максимально допустима робоча температура теплоізоляційного шару  $t_{раб2}^{max}$ . Температура на внутрішній поверхні робочого шару  $t_{вн}$ , на зовнішній поверхні теплоізоляційного шару  $t_н$ , температура навколишнього середовища  $t_{oc}$ . Товщину вогнетривкого шару, виходячи з умов будівельної міцності, прийняти рівною  $S_1$ .

Таблиця № 2 – Вихідні дані для розрахунку

№	Вогнеупорна цеглина	Теплоізоляційна цеглина	Температура °С				S <sub>1</sub> , м
			t <sub>раб2</sub> <sup>max</sup>	t <sub>вн</sub>	t <sub>н</sub>	t <sub>ос</sub>	
1	Динасовий	Легковага цеглина	1350	1500	35	10	0,696
2	Шамотний	Легковаг ρ=1000	1250	1450	40	5	0,696
3	Магнезитовий	Легковаг ρ=1300	1400	1550	45	15	0,928
4	Напівкислий вогнетривкий	Вогнетривкий легковаг	1250	1400	50	25	0,696
5	Хромітовий	Пінолегковаг	1200	1350	55	20	0,696
6	Динасовий	Піношамот ρ=600	1200	1450	60	30	0,928
7	Шамотний	Піношамот ρ=950	1200	1400	65	5	0,928
8	Магнезитовий	Напівкислий шамот	1300	1500	70	10	1,16
9	Напівкислий вогнетривкий	Легковага цеглина	1200	1350	75	20	0,696
10	Хромітовий	Легковаг ρ=1000	1100	1300	80	15	0,696
11	Динасовий	Легковаг ρ=1300	1200	1400	85	30	0,928
12	Шамотний	Вогнетривкий легковаг	1100	1350	90	25	0,928
13	Магнезитовий	Пінолегковаг	1250	1450	90	5	0,928
14	Напівкислий вогнетривкий	Піношамот ρ=600	1150	1300	45	10	0,696
15	Хромітовий	Піношамот ρ=950	1100	1250	35	15	0,696
16	Динасовий	Напівкислий шамот	1200	1350	40	25	0,696
17	Шамотний	Легковага цеглина	1150	1300	55	20	0,696
18	Магнезитовий	Легковаг ρ=1000	1200	1400	60	30	0,928
19	Напівкислий вогнетривкий	Легковаг ρ=1300	1000	1250	65	35	1,16
20	Хромітовий	Вогнетривкий легковаг	1000	1200	35	5	0,928
21	Динасовий	Пінолегковаг	1350	1550	75	10	1,16
22	Шамотний	Піношамот ρ=600	1200	1375	70	15	0,928
23	Магнезитовий	Піношамот ρ=950	1400	1600	100	20	1,16
24	Напівкислий вогнетривкий	Напівкислий шамот	1200	1375	85	30	0,928
25	Хромітовий	Легковага цеглина	1000	1275	80	25	0,928
26	Шамотний	Пінолегковаг	1300	1400	40	20	0,696
27	Динасовий	Піношамот ρ=600	1350	1450	50	25	0,696
28	Магнезитовий	Легковага цеглина	1400	1500	85	30	0,928
29	Напівкислий вогнетривкий	Піношамот ρ=950	1250	1375	90	35	0,696
30	Шамотний	Легковаг ρ=600	1200	1400	80	25	0,696
31	Магнезитовий	Напівкислий шамот	1350	1600	90	20	0,928
32	Динасовий	Піношамот ρ=600	1300	1500	100	30	0,696

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ  
ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ДИСЦИПЛІНИ  
„ОСНОВИ КОНСТРУЮВАННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ УСТАНОВОК”  
(Для студентів спеціальності 50401 „Промислова теплотехніка”)**

Укладачі:

доцент, професор

Гінкул Станіслав Іванович

асистент

Касютіна Тетяна Геннадіївна