



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”



ДОСЛІДЖЕННЯ СТАЦІОНАРНОЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ЧЕРЕЗ ЦИЛІНДРИЧНУ СТІНКУ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРОВЕДЕННЯ НДРС З КУРСУ «ПРОЦЕСИ
ТА АПАРАТИ ХІМІЧНИХ І НАФТОПЕРЕРОБНИХ ВИРОБНИЦТВ»

Київ НТУУ «КПІ» 2008

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

**ДОСЛІДЖЕННЯ СТАЦІОНАРНОЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ
ЧЕРЕЗ ЦИЛІНДРИЧНУ СТІНКУ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРОВЕДЕННЯ НДРС З КУРСУ «ПРОЦЕСИ
ТА АПАРАТИ ХІМІЧНИХ І НАФТОПЕРЕРОБНИХ ВИРОБНИЦТВ»

Для студентів інженерно-хімічного та хіміко-технологічного факультетів всіх
форм навчання

Затверджено
на засіданні кафедри
машин та апаратів
хімічних і нафтопереробних
виробництв
Протокол № 4 від 15.10.08 р.

Київ НТУУ «КПІ» 2008

Дослідження стаціонарної теплопровідності через циліндричну стінку:
Метод. вказівки до проведення НДРС з курсу „Процеси та апарати хімічних і
нафтопереробних виробництв” для студентів інженерно-хімічного та хіміко-
технологічного факультетів всіх форм навчання / Укл. О.Г. Зубрій,
Л.Б.Радченко – К.: КПІ, 2008. – 12 с.

Укладач

О.Г. Зубрій, канд. техн. наук, доцент
Л.Б.Радченко докт. техн. наук, професор

Відповідальний редактор

Я.М.Корнієнко, доктор техн. наук, професор

Рецензент

: А.І. Кубрак техн. наук, професор

1. ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Передача тепла через циліндричну стінку при граничних умовах другого й третього роду відбувається в апаратах, які мають електронагрівники опору (підігрівники повітря, сушарки, циліндри черв'ячних екструдерів, пускові електронагрівники колон синтезу аміаку та ін.) В установках безперервної дії найбільший інтерес представляє стаціонарний режим теплообміну, тобто режим характерний тим, що температурне поле не залежить від часу. Він встановлюється через деякий час після пуску установки й підтримується протягом усього часу роботи аж до початку зупинки апарата. Тому вивчення характеру розподілу температур при стаціонарному режимі має важливе практичне значення.

метою даної роботи є експериментальне дослідження стаціонарного одномірного температурного поля циліндричної стінки й порівняння отриманих даних з результатами теоретичних розрахунків

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Розглянемо процес нагріву довгої циліндричної труби, що у початковий момент часу має постійну по перетину й довжині температуру, що дорівнює температурі навколишнього середовища (рис. 1). Нехай у певний момент часу до внутрішньої поверхні труби підводиться тепловий потік q_L починається розігрів труби (гранична умова другого роду на внутрішній стінці). При цьому спочатку прогриваються внутрішні шари (криві 1-3), а температура зовнішньої поверхні залишається незмінною. Тепло в цьому випадку йде тільки на нагрівання стінки. Надалі температура зовнішньої поверхні труби почне підвищуватися (криві 4,5), що, у свою чергу, викликає перенос тепла в навколишнє середовище. При цьому частина тепла витрачається на нагрівання труби, а інша частина приділяється

навколишнім повітрям. Частка останньої збільшується з ростом температури зовнішньої поверхні стінки.

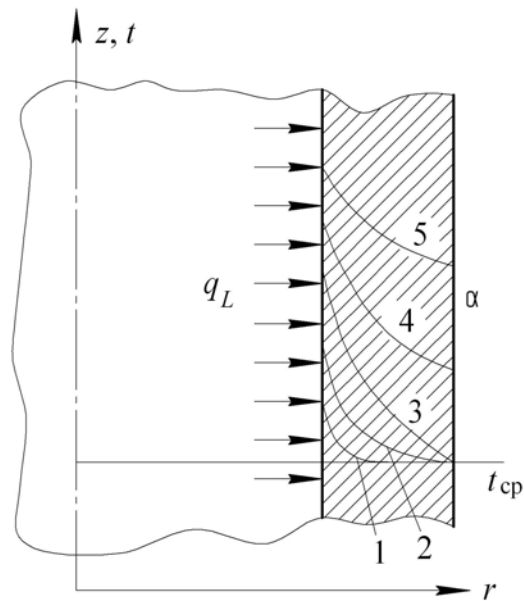


Рис.1 Зміна температури стінки при розігріві.

Нарешті, настає момент, коли весь тепловий потік передається в навколишнє середовище - встановлюється рівноважний стан, при якому температури перестають змінюватися в часі (крива 5).

Ціль роботи - дослідити описаний режим. Для цього досить визначити температуру в n точках по перетину труби й зрівняти їх з результатами теоретичного розв'язання.

Нехай задані наступні величини: питомий тепловий потік q , температура середовища t_{cp} геометричні розміри труби, фізичні властивості матеріалу труби й навколишнього середовища (повітря). Коефіцієнт C

Для теоретичного розв'язання скористуємося диференціальним рівнянням теплопровідності, що для циліндричної системи в координатах r, z, φ записується так:

$$\frac{dt}{d\tau} = a \cdot \left(\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dt}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2}{d\varphi^2} + \frac{d^2}{dz^2} \right) \quad (1)$$

де t - поточна температура; α - коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки.

Оскільки процес стаціонарний, то, $\frac{dt}{d\tau} = 0$ Тепловий потік q_L , на внутрішній поверхні труби вважаємо розподіленим рівномірно. У цьому випадку ізотермічні поверхні являють собою концентричні циліндри й температура в напрямку кута ϕ не міняється ($\frac{d^2t}{d\phi^2} = 0$).

Для досить довгої труби можна зневажити теплопровідністю уздовж координати z , тобто $\frac{d^2t}{dz^2} = 0$

З урахуванням цих допущень рівняння (1) приймає вид:

$$\frac{d^2t}{dr} + \frac{1}{r} \frac{dt}{dr} = 0 \quad (2)$$

Інтегруючи рівняння (2), одержуємо

$$\frac{dt}{dr} = \frac{C_1}{r} \quad (3)$$

Повторне інтегрування дає функцію

$$t = C_1 \cdot \ln r + C_2 \quad (4)$$

Для визначення постійні інтегрування C_1 і C_2 необхідно

задати дві граничних умови - на внутрішній ($r = R_1$) і зовнішній ($r = R_n$) поверхнях труби. Тепло на внутрішній поверхні труби передається теплопровідністю. Тому в точці $r=R_1$

$$q_L = -2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot \lambda \cdot \frac{dt}{dr} \quad (5)$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу труби.

Вважаємо, що значення λ не залежить від часу, температури й координат, тобто

$$\lambda = \text{const} \quad (6)$$

Рівняння (5) - умова на внутрішній поверхні, називається граничною умовою другого роду.

З урахуванням (5) і (6) рівняння (3) набуває вигляду:

$$\frac{dt}{dr} = \frac{C_1}{R_1} = -\frac{q_L}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot \lambda} \quad (7)$$

Звідки

$$C_1 = -\frac{q_L}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln r + C_2 \quad (8)$$

Підставляючи (8) в (4), одержуємо:

$$t = -\frac{q_L}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln r + C_2 \quad (9)$$

Із зовнішньої поверхні тепло виділяється в навколишнє середовище з інтенсивністю α (Вт/м² К) і при $r = R_n$, $t = t_n$

$$q_L = 2 \cdot \pi \cdot R_n \cdot \alpha \cdot (t_n - t_{cp}) \quad (10)$$

Два останніх рівняння дозволяють визначити постійну інтегрування

$$C_2 = t_{cp} + \frac{q_L}{2 \cdot \pi \cdot R_n \cdot \alpha} \quad (11)$$

Після підстановки (8) і (11) в (4) остаточно одержимо:

$$t = t_{cp} + \frac{q_L}{2 \cdot \pi \cdot R_n \cdot \alpha} \quad (12)$$

Рівняння (2) разом із граничними умовами й даними (6) про фізичні властивості матеріалу становлять повне математичне описання (математичну модель) процесу стаціонарної теплопровідності циліндричної стінки.

Коефіцієнт тепловіддачі α , який при розв'язанні рівняння теплопровідності вважався відомим, визначається як сума коефіцієнтів тепловіддачі за рахунок конвекції α_k і випромінювання α_l :

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_l \quad (13)$$

При природній конвекції α_k може бути знайдений із критеріального рівняння:

$$Nu = 0.5 \cdot (G_r \cdot Pr)^{0.25} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{CT}}\right)^{0.25} \quad (14)$$

де $Nu = \frac{\alpha_k \cdot 2 \cdot R_n}{\lambda_{CP}}$ - критерій Нуссельта,

$$G_r = \frac{g \cdot (2 \cdot R_n)^3}{\nu^2_{CP}} \cdot \beta \cdot (t_n - t_{CP}) - \text{критерій Грасгофа}$$

- Pr - критерій Прандля, взятий при температурі t_{CP} ; Pr_{CT} - критерій Прандля, взятий при температурі t_n

З огляду на те, що для повітря значення критерію Прандтля приблизно постійно у великому діапазоні зміни температур і дорівнює 0,7, то рівняння (14) можна спростити:

$$Nu = 0,457 \cdot Gr^{0,25} \quad (15)$$

У критерії Нуссельта й Грасгофа входять теплофізичні властивості повітря: коефіцієнт теплопровідності λ_{CP} , коефіцієнт кінематичної в'язкості ν_{CP} і коефіцієнт об'ємного розширення β . Ці властивості вибираються при температурі навколишнього повітря t_{CP} по таблицях або по наступних рівняннях, що апроксимують табличні дані:

$$\lambda_{CP} = 0,02419 + 9,0108 \cdot 10^{-5} \cdot t_{CP} - 1,6072 \cdot 10^{-7} \cdot t_{CP}^2, \quad (16)$$

$$\nu_{CP} = (13,282 + 0,086323 \cdot t + 1,4283 \cdot 10^{-4} \cdot t^2_{CP}) \cdot 10^{-6} \quad (17)$$

$$\beta = \frac{1}{t_{CP} + 273} \quad (18)$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням розраховується по залежності

$$\alpha_L = \varepsilon \cdot C_o \cdot \frac{\left(\frac{t_n + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_{CP} + 273}{100}\right)^4}{t_n - t_{CP}} \quad (19)$$

де $\varepsilon = 0,96$ - ступінь чорноти зовнішньої поверхні труби ;

$C_o = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4)$ - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла.

3. ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Елементом дослідження (рис. 2 є горизонтальна циліндрична труба 1 довжиною $L=0,3$ м, усередині якої міститься трубчастий електронагрівник 2. Його потужність Q регулюється автотрансформатором і заміряється ватметром. Електронагрівач забезпечує постійний по довжині тепловий потік

$q=Q/L$ на внутрішній поверхні циліндра (гранична умова другого роду). По товщині стінки труби закладені п'ять термопар 3, спаї яких знаходяться на різних радіусах $R_1 \dots R_5$. Термопара t_1 показує температуру внутрішньої, а t_5 зовнішньої поверхні труби. Розташування спаїв термопар на різних радіусах дозволяє експериментально одержати криву розподілу температури по товщині стінки.

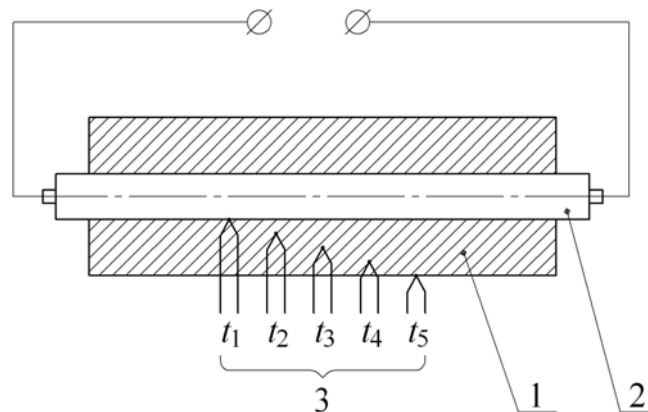


Рис. 2 Схема дослідного елемента.

ТермоЕДС термопар вимірюється за допомогою цифрового приладу, до якого вони підключаються по черзі за допомогою перемикача термопар.

4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ І ОСНОВНІ ВИМІРИ.

Для проведення досліджень варто перевірити справність установки, включити її в електричну мережу й за допомогою автотрансформатора встановити задану потужність електронагрівника. Підключивши до приладу одну з термопар, виждати, поки встановиться стаціонарний режим (температура перестане змінюватися в часі).

Після виходу на стаціонарний режим вимірюються наступні параметри: температури п'яти термопар t_i , потужність електронагрівника Q ; температура навколишнього повітря за показаннями встановленого в лабораторії термометра $t_{\text{ср}}$, а потім записуються в таблицю:

Крім того, у цю таблицю заносяться радіуси закладення термопар R_i , теплопровідність стінки циліндра λ довжина труби L .

λ Вт/(мК)	L м		Q Вт	$R_{1=}$	$R_{2=}$	$R_{3=}$	$R_{4=}$	$R_{5=}$	t_{cp}
				t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	
		1							
		2							
		3							

Виконавши вимірювання, змінюємо потужність нагрівача й приступаємо до виконання наступного дослідження.

5. ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для обробки результатів необхідно:

- 1) за рівняннями (16) – (18) або по таблицях знайти теплофізичні властивості повітря при температурі t_{cp} ;
- 2) обчислити за рівнянням (15) критерій Nu і потім коефіцієнт тепловіддачі конвекцією α_k ,
- 3) за рівнянням (19) знайти коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням α_L ,
і сумарний коефіцієнт тепловіддачі α , (рівняння(13));
- 4) знайти значення q_L і за рівнянням (12) визначити температуру-при різних значеннях радіусів ($R_1...R_5$)
- 5) побудувати теоретичну та експериментальну залежності температури від радіуса труби, пояснити отримані результати.

Всі обчислення виконуються в системі СІ.

Список літератури

1. Дытнерский Ю. И. Процеси і апарати хімічної технології: Учебник для вузов. Изд.2-е. В 2-х кн. Часть 1. М.: Химия, 1995.-400 с.: ил.
2. А.Г. Касаткин «Основные процессы и аппараты химической технологии Изд. 7-е. М.: «Химия», 1960.-829 с.

Навчальне видання

**ДОСЛІДЖЕННЯ СТАЦІОНАРНОЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ
ЧЕРЕЗ ЦИЛІНДРИЧНУ СТІНКУ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРОВЕДЕННЯ НДРС З КУРСУ
«ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ ХІМІЧНИХ І НАФТОПЕРЕРОБНИХ
ВИРОБНИЦТВ»

Для студентів інженерно-хімічного та хіміко-технологічного факультетів
всіх форм навчання

Укладач:

О.Г. Зубрій, канд. техн. наук

Л.Б. Радченко, докт. техн. наук, професор