

## Лекція 12

**Основні поняття і визначення теорії теплообміну. Передача теплоти теплопровідністю, конвекцією і тепловим випромінюванням. Складний теплообмін. Теплопровідність. Основні поняття і визначення. Закон Фур'є. Коефіцієнт теплопровідності. Механізм передачі теплоти в твердих тілах. Диференційне рівняння теплопровідності. Теплопровідність при стаціонарному режимі. Теплопровідність одношарової і багатшарової плоскої, циліндричної стінок при граничних умовах першого роду.**

### Теорія тепломасообміну (теплопередача)

Теорія тепломасообміну (теплопередача)—наука про закономірності процесів розповсюдження теплоти в просторі з різнорідними полями температур. Якщо є тіла з різними температурами, то починається передача теплоти від тіл з вищою температурою до тіл з нижчою доволно до вирівнювання температур цих тіл.

Теплота розповсюджується в просторі трьома способами:

1. Теплопровідність—перенос теплоти безпосередньо при дотику елементарних частинок тіл з різними температурами. У чистому вигляді теплопровідність властива твердим тілам, але має місце при переносі теплоти в газах і рідинах.
2. Теплова конвекція — передача теплоти шляхом переміщення в просторі об'ємів середовища з різними температурами.
3. Теплове випромінювання—складне явище, що поєднує випромінювання теплової енергії тілом, розповсюдження її в просторі з допомогою електромагнітних хвиль та поглинання іншими тілами.

Теплопередача—передача теплоти від одного рухомого середовища до іншого через нерухому стінку.

Тепловіддача—передача теплоти від рухомого середовища до нерухомої стінки або навпаки. Щодо тепловіддачі розрізняють внутрішню задачу—теповіддача від рухомого середовища до внутрішньої поверхні труби і

зовнішню задачу—тепловіддача від зовнішньої поверхні труби до оточуючого середовища.

Складний теплообмін—обмін теплотою між тілами трьома способами в рівновеликих долях.

### Температурне поле. Градієнт температури.

Якщо любе тіло з різними температурами в його точках перетнути площиною, то на ній можна отримати сімейство кривих ізотерм, які замикаються на цій площині, або закінчуються на межі тіла.

Ізотерма—крива, що з'єднує точки тіла з однаковою температурою. В залежності від кількості координат і наявності часу, температурні поля називаються трьохмірним нестационарним, що описується рівнянням  $t = f(x, y, z, \tau)$ .

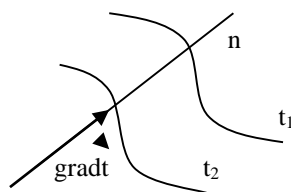


Рис. 12.1. Температурне поле з градієнтом температури

Градієнт температури, векторна величина, яка направлена в бік зростання температури і рівна відношенню нескінченно малого приросту температури до приросту відстані по нормалі (найкоротша відстань) між двома сусідніми ізотермами і підраховується з рівняння,

$$\overrightarrow{gradt} = \frac{\partial t}{\partial n} \quad [K/m].$$

де  $t$  – температура, К;  $n$  – відстань, м.

Вектор  $\overrightarrow{gradt}$  направлений в бік її зростання, а вектор переносу теплоти має протилежний напрямок, оскільки теплота передається від точки тіла з більшою температурою до точки тіла з меншою.

### Теплопровідність. Закон Фур'є.

Теплопровідність в чистому вигляді спостерігається лише в твердих тілах, нерухомих газах і рідинах при неможливості виникнення в останніх конвекції. В основі задач теплопровідності лежить запропонована Фур'є гіпотеза про пропорційність густини теплового потоку  $q$  і  $gradt$ , тобто

$$\vec{q} = -\lambda \cdot gradt,$$

де  $q$  - густина теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>;  $gradt$  - градієнт температури, К/м;  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності (пропорційності) даного тіла, Вт/(м·К).

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності будь-якого тіла (газу, рідини, твердого тіла, суміші) визначається для даного конкретного тіла лише в результаті його лабораторних досліджень. Ніяким аналітичним шляхом коефіцієнт теплопровідності для даного тіла отримати не можливо. Коефіцієнт теплопровідності для будь-якого тіла залежить від його температури та із зростанням температури тіла коефіцієнт теплопровідності зростає прямопропорційно. Для кожного тіла при конкретній температурі коефіцієнт теплопровідності береться з таблиць. Коефіцієнт теплопровідності для газів— 0,5 - 0,05 Вт/(К·м); води—0,5 - 0,7 Вт/(К·м); сталей—20 - 100 Вт/(К·м). В самому загальному випадку процес теплопровідності через тіло у формі куба з одиничною довжиною грані і додатковим джерелом теплоти в середині куба описується диференціальним рівнянням теплопровідності, що має вигляд

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{c \cdot \rho},$$

де  $\frac{\partial t}{\partial \tau}$  - зміна температури одиничного об'єму тіла з часом, К/с;  $a$  - коефіцієнт

температуропровідності одиничного об'єму твердого тіла, м<sup>2</sup>/с,  $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ ,

де  $\rho$  – густина тіла,  $\text{кг/м}^3$ ;  $c$  – теплоємність тіла  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $q_v$  – кількість теплоти, яка виділяється в одиничному об'ємі тіла за рахунок внутрішніх джерел,  $\text{Дж}$ ;  $\nabla$  – оператор Лапласа

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z},$$
$$\nabla^2 t = \left[ \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right].$$

Із загального рівняння теплопровідності при наявності умов однозначності виділяють конкретну простішу задачу теплопровідності, що описує дане фізичне явище теплопровідності. Існують різні умови однозначності:

- 1) геометричні, які описують розміри і форму тіла, в якому розглядають процес теплопровідності;
- 2) фізичні, які описують характерні фізичні властивості тіла;
- 3) часові—характеризують розподіл температур тіла на початку і в кінці розгляду процесу теплопровідності (початковий і кінцевий момент часу);
- 4) граничні—характеризують взаємодію тіла з оточуючим середовищем.

В свою чергу граничні умови є трьох видів:

- а) першого роду—задані законом розподілу температур по всій поверхні і з часом;
- б) другого роду—задаються густиною теплового потоку для поверхні тіла з часом;
- в) третього роду—задаються температурою омиваючого середовища із зовні тіла і законом тепловіддачі між зовнішньою поверхню тіла і омиваючим середовищем (законом Ньютона-Ріхмана).

### **Процеси теплопередачі**

Теплопередача—передача теплоти від одного рухомого середовища до іншого через нерухому стінку (рис. 12.2.).

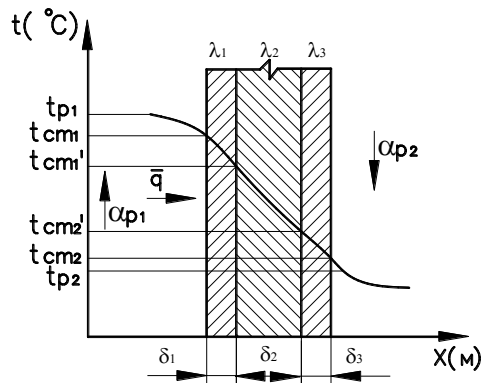


Рис. 12.2. Фізична модель теплопередачі через трьохшарову плоску стінку

Дано трьохшарову плоску стінку з товщинами  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  в метрах.  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  – відповідно коефіцієнти теплопровідності шарів стінки, Вт/(м·К).

В протилежних напрямках вздовж стінки рухаються гарячий теплоносій (гріюче середовище) зліва і справа—нагріваєме середовище.

Густина  $\vec{q}$  теплового потоку, направлена по нормалі до повздовжньої осі стінки, Вт/м<sup>2</sup>.

$t_{p1}, t_{p2}$  – температури гарячого і холодного теплоносіїв, °С.

$\alpha_{p1}, \alpha_{p2}$  – коефіцієнти тепловіддачі конвекцією від гарячого теплоносія до стінки і від протилежного боку стінки до холодного теплоносія, Вт/(м<sup>2</sup>К);

$t_{cm}$  – температура кожного шару стінки на їх межах, °С.

Якщо припустити, що  $\vec{q}$  в процесі тепловіддачі від гарячого теплоносія до нерухомої стінки рівна кількості теплоти, що передається через перший шар трьохшарової стінки, рівна кількості теплоти через другий шар і рівна кількості теплоти через третій шар, рівна кількості теплоти, що передається тепловіддачею справа від стінки до середовища, яке нагрівається.

То на основі попередніх принципів можна записати наступні рівняння

$$\begin{aligned}
 q &= \alpha_{p1} (t_{p1} - t_{cm1}) = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (t_{cm1} - t_{cm1'}) = \frac{\lambda_2}{\delta_2} (t_{cm1'} - t_{cm2'}) = \\
 &= \frac{\lambda_3}{\delta_3} (t_{cm2'} - t_{cm2}) = \alpha_{p2} (t_{cm2} - t_{p2}) = \\
 &= K (t_{p1} - t_{p2}) = \frac{1}{R} (t_{p1} - t_{p2}),
 \end{aligned}$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{p_1}} + \sum_{i=1}^3 \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{p_2}}}, \left[ \frac{Вт}{К \cdot м^2} \right],$$

$$R = \frac{1}{\alpha_{p_1}} + \sum_{i=1}^3 \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{p_2}}, \left[ \frac{К \cdot м^2}{Вт} \right].$$

$K$  – коефіцієнт теплопередачі.  $R$  – коефіцієнт термічного опору, величина обернена  $K$ .

### Теплопередача через циліндричну стінку

Особливість теплопередачі полягає в тому, що теплота, яка передається від гарячого середовища в середині циліндричної труби до холодного омиваючого середовища зовні ніби розширяється, оскільки внутрішня площа поверхні теплопередачі менша, ніж зовнішня (рис. 12.3).

Для такого випадку густина теплового потоку  $q$ , що передається теплопередачею від гарячого теплоносія всередині труби до холодного зовні підраховується за формулою

$$q = K_l \lambda (t_{p_1} - t_{p_2}),$$

де  $K_l$  – лінійний коефіцієнт теплопередачі через трубу довжиною один метр, Вт/(м·К) і визначається за формулою:

$$K_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{p_1} d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_{p_2} d_2}},$$

де  $\alpha_{p_1}, \alpha_{p_2}$  – коефіцієнти тепловіддачі конвекцією від гарячого теплоносія до внутрішньої стінки і від зовнішньої стінки до холодного, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки труби, Вт/(м·К);  $d_1, d_2$  – внутрішній і зовнішній діаметри труби, м.

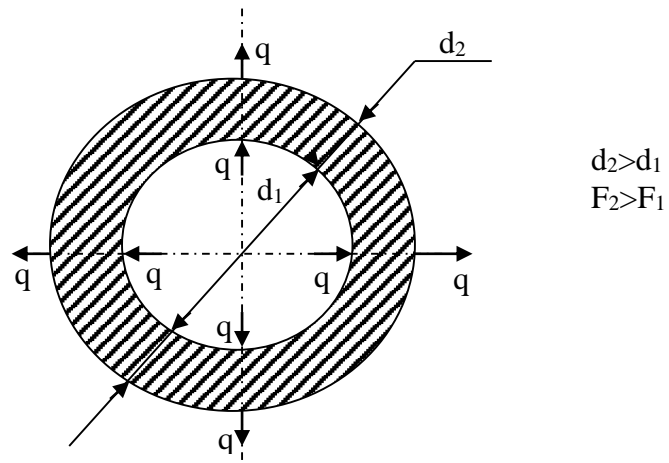


Рис. 12.3. Схема теплопередачі через циліндричну стінку