**Основи теорії теплообміну**

**Теплопровідність**

**Теплопередача** - це процес переносу теплоти від одного теплоносія до іншого через поділяючу стінку. Теплопередача пов'язана з досить складними процесами й при її вивченні необхідно знати закони теорії теплообміну й методи аналізу, які застосовуються у фізиці, термодинаміці, гідродинаміці й хімії.

Складний процес переносу теплоти розбивають на ряд більш простих. Такий прийом спрощує його вивчення. Окрім того, кожен простий процес переносу теплоти підкоряється своїм законам. Існує три найпростіших способи передачі теплоти: теплопровідність, конвекція, випромінювання.

Явище ***теплопровідності*** складається в переносі теплоти мікрочастинками (молекулами, атомами, електронами й т.п.). Такий теплообмін може відбуватися в будь-яких тілах з неоднорідним розподілом температур.

***Конвекційний теплоперенос (конвекція)*** спостерігається лише в рідинах і газах. Конвекція - це перенос теплоти разом з макроскопічними об'ємами речовини. Варто знати, що одночасно з конвекцією завжди існує й теплопровідність. Проте конвекція звичайно є визначальною, тому що вона інтенсивніше теплопровідності.

Конвекцією можна передавати теплоту на дуже великі відстані (наприклад, під час руху газу трубами). Середовище, що рухається (рідина або газ), використовується для переносу теплоти, називається ***теплоносієм***.

Третім способом переносу теплоти є ***випромінювання***. За рахунок випромінювання теплота передається у всіх промінепрозорих середовищах, у тому числі й у вакуумі. Носіями енергії при теплообміні випромінюванням є фотони, випромінювані та поглинаючі тіла, що беруть участь у теплообміні.

У більшості випадків перенос теплоти здійснюється декількома способами одночасно. Наприклад, конвекційна теплопередача від газу до стінки практично завжди супроводжується паралельним переносом теплоти випромінюванням.

**1.2.1. Основні поняття та визначення**

Інтенсивність переносу теплоти характеризується щільністю теплового потоку. ***Щільність теплового потоку*** - це кількість теплоти, передана за одиницю часу через одиничну щільність поверхні, *q* [Вт/м2].

***Потужність теплового потоку*** або просто ***тепловий потік*** - це кількість теплоти, переданої за одиницю часу через довільну поверхню *F:*

*q* = *Q*/*F*, Вт/м2. (1.116)

*Поверхня теплообміну F* - це поверхня, через яку відбувається передача теплоти. Наприклад, при остиганні теплоносія в трубі діаметром *d* і довжиною *l*, теплота передається від гарячого теплоносія до навколишнього середовища через циліндричну поверхню труби. У цьому випадку .

Перенос теплоти залежить від розподілу температури за об'ємом тіла або простору. *Температурним полем* називається сукупність миттєвих значень температури у всіх точках тіла або системи тіл у цей момент часу. Математичний опис температурного поля має вигляд:

*t* = *f*(*x*,*y*,*z*,τ) , (1.117)

де *t* – температура, °С;

*x*, *y*, *z* - просторові координати;

τ - час, хвил.

Температурне поле, описуване наведеним рівнянням, називається нестаціонарним. У цьому разі температура залежать від часу.

У тому разі, коли розподіл температури в тілі не змінюється згодом, температурне поле називається стаціонарним:

*t* = *f*(*x*,*y*,*z*). (1.118)

Якщо температура змінюється тільки за однією або двома просторовими координатами, то температурне поле називається відповідно одно- і двомірним:

*t* = *f*(*x*,y) (1.119)

Температурні поля (1.117) і (1.118) називаються тривимірними.

Поверхня, у всіх точках якої температура однакова, називається ізотермічною. Ізотермічні поверхні можуть бути замкнутими, але не можуть перетинатися. Швидше всього температура змінюється під час руху напрямком, перпендикулярниму ізотермічній поверхні. Швидкість змінювання температури за нормаллю до ізотермічної поверхні характеризується градієнтом температури.

*Градієнт температури (grad t)* - є вектор, спрямований за нормаллю до ізотермічної поверхні й чисельно рівний похідній від температури за цим напрямком:

, (1.120)

де  - одиничний вектор, спрямований убік зростання температур нормально до ізотермічної поверхні.

**1.2.2 Теорія теплопровідності**

**Закон Фур'є.** Теорія теплопровідності розглядає тіло як безперервне середовище. Відповідно до основного закону теплопровідності - ***закону Фур'є*** - вектор щільності теплового потоку, переданого теплопровідністю, пропорційний вектору градієнта температури:

, (1.121)

де  - коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м⋅К).

***Коефіцієнт теплопровідності*** характеризує здатність речовини, з якої складається розглянуте тіло, проводити теплоту.

Знак «-» вказує на протилежний напрямок вектора теплового потоку й вектора градієнта температури. Вектор щільності теплового потоку *q* завжди спрямований убік найбільшого зменшення температури.

Скалярна величина вектора щільності теплового потоку,Вт/м²:

, (1.122)

З формули маємо, що коефіцієнт теплопровідності визначає щільність теплового потоку при градієнті температури 1 К/м.

Коефіцієнт теплопровідності є фізичним параметром і залежить від хімічної природи речовини і його фізичного стану (щільності, вологості, тиску, температури). Діапазони зміни  для різних матеріалів наведені на рис. 1.20.

λ

Пари

Рідини

Вогнетриви

 Метали

10-3

10-2

10-1

1

10

102

103

Рисунок 1.20 - Теплопровідність при стаціонарному режимі

**Одношарова плоска стінка.** Розглянемо однорідну плоску стінку товщиною δ, на поверхнях якої підтримуються температури *tс*1 й *tс*2, причому *tс*1 > *tс*2 (рис. 1.17). Температура змінюється тільки за товщиною стінки - за однією координатою *х*, коефіцієнт теплопровідності . Теплового потоку в цьому випадку, відповідно до закону Фур'є, визначається за формулою:

δ

,Вт/м² (1.123)

або

*t*

*q* = Const

 *tc*1

*tc*2

*x*

Рисунок 1.21- Змінювання температури за товщиною однорідної плоскої стінки

, Вт/м² (1.124)

де , причому *tс*1 > *tс*2;

 - внутрішній термічний опір теплопровідності стінки, (м2⋅К)/Вт.

Розподіл температур у плоскій однорідній стінці - лінійний.

У більшості практичних завдань приблизно передбачається, що коефіцієнт теплопровідності  не залежить від температури й однаковий за всією товщиною стінки. Значення  знаходять у довідниках за середньої температури .

Тепловий потік (потужність теплового потоку) визначається за формулою:

, (1.125)

**Багатошарова плоска стінка.**Розглянемо для тих же умов багатошарову плоску стінку з товщиною шарів δ1, δ2,…,δnс відповідними коефіцієнтами теплопровідності λ1, λ2,…,λn (рис. 1.22). Тут шари щільно прилягають

Рисунок 1.22 - Розподіл температур за товщиною багатошарової плоскої стінки

*tc*2

*t*

*x*

δ1

q = сonst

 *tc*1

*tc*3

*tc*1

δ2

δ3

λ1  λ2 λ3

друг до друга.

У цьому разі щільність теплового потоку визначається по формулі:

 , (1.126)

де *n* - число шарів багатошарової стінки;

*tc*1 й *tc*(*n*+1) - температури на зовнішніх границях багатошарової стінки, °С;

- повний термічний опір багатошарової плоскої стінки,(м²К)/Вт.

Щільність теплового потоку, що проходить через всі шари, у стаціонарному режимі однакова. А тому що коефіцієнт теплопровідності λ різний, то для плоскої багатошарової стінки розподіл температур - ламана лінія.

Розрахувавши тепловий потік через багатошарову стінку, можна знайти температуру на границі будь-якого шару. Для *k*-го шару можна записати:

 (1.127)

**Однорідна циліндрична стінка.** Завдання про поширення теплоти в циліндричній стінці також одномірне, якщо її розглядати в циліндричних координатах (рис. 1.23). Температура змінюється тільки уздовж радіуса *r*, а за довжиною й за її периметром залишається незмінною.

*d*1

*d*2

*tC*1

*tC*2

*t*

Відповідно до закону Фур'є, тепловий потік через однорідну циліндричну стінку довжиною l визначається за формулою:

 (1.128)

Рисунок 1.23 - Змінювання температури за товщиною однорідної циліндричної стінки

Тепловий потік Q через циліндричну стінку можна віднести до одиниці довжини l:

 (1.129)

де ql - лінійна щільність теплового потоку, Вт/м;

 - лінійний термічний опір теплопровідності труби, (м²К)/Вт.

При значеннях d2/d1 близьких до одиниці розрахунки Rlλ повинні робитися з високою точністю, тому що при округленні d2/d1 до одного знаку після коми погрішність обчислення логарифма буде більше 10 %. З точністю до 4 % при d2/d1<2 у практичних розрахунках рекомендується користуватися формулою для плоскої стінки:

 , (1.130)

де *dcp*= 0,5 (*d*1 + *d*2) - середній діаметр труби, м.

У товщі однорідної циліндричної стінки температура змінюється за логарифмічним законом.

**Багатошарова циліндрична стінка.** Аналогічно багатошаровій плоскій стінці, повний термічний опір багатошарової циліндричної стінки можна записати:

, (м²К)/Вт, (1.131)

де *di,* *di*+1 - відповідно внутрішній і зовнішній діаметри i-го шару, м.

Тоді лінійна щільність теплового потоку буде:

, Вт/м. (1.132)

Для багатошарової циліндричної стінки розподіл температур - ламана логарифмічна лінія.

**1.2.3 Теплопередача**

У техніці часто доводиться розраховувати стаціонарний процес переносу теплоти від одного теплоносія іншому через поділяючу стінку. Такий процес називається **теплопередачею**.

**Плоска стінка.** Розглянемо теплопередачу між двома рідинами через поділяючу багатошарову плоску стінку (рис. 1.24). Тут передача теплоти ділиться на три процеси:

1) На початку теплота передається від гарячого теплоносія *tж*1 до поверхні стінки шляхом конвективного теплообміну, що може супроводжуватися випромінюванням. Інтенсивність процесу тепловіддачі характеризується коефіцієнтом тепловіддачі α1.

δ1

δ2

δn

tЖ1

tЖ2

tC1

tC2

tC3

tC(n+1)

λ1

λ2

λn

t

Рідина 1

Рідина 2

tcn

2) Потім теплота теплопровідністю переноситься по черзі від однієї поверхні стінки до іншої, котра характеризується коефіцієнтом теплопровідності λ (λ1,…,λn).

3) І, нарешті, теплота знову шляхом конвективного теплообміну передається від поверхні стінки до холодної рідини *tж*2. Цей процес характеризується коефіцієнтом тепловіддачі α2.

Рисунок 1.24 - Розподіл температур при теплопередачі через багатошарову плоску стінку

При стаціонарному режимі щільність теплового потоку у всіх трьох процесах однакова й може бути записана таким чином:

- за законом Ньютона - Рихмана

, (1.133)

- за законом Фур'є

, (1.134)

- за законом Ньютона - Рихмана

, (1.135)

де  й  - термічний опір зовнішньої тепловіддачі відповідно від гарячого теплоносія до стінки й від стінки до холодного теплоносія.

З вищенаведених рівнянь склавши систему рівнянь:

, (1.136)

і склавши праві й ліві частини, одержимо рівняння теплопередачі через багатошарову плоску стінку:

 (1.137)

або

, (1.138)

де  - температурний напір, заданий умовами завдання;

*Rk* - термічний опір теплопередачі від гарячого теплоносія до холодного.

Величина, зворотна *Rk*, називається ***коефіцієнтом теплопередачі*** *К*:

, Вт/(мК). (1.139)

Коефіцієнт теплопередачі *К* характеризує інтенсивність процесу теплопередачі від гарячого теплоносія до холодного через поділяючу їхню стінку.

Тоді рівняння теплопередачі можна записати:

 (1.140)

або

 (1.141)

Граничні температури визначаються як

, (1.142)

Очевидно, що для одношарової плоскої стінки формули справедливі, де

,  , *tc*(*n*+1) = *tc*2. (1.143)

**Циліндрова стінка.** Розглянемо теплопередачу між двома рідинами через поділяючу їх багатошарову циліндричну стінку.

Аналогічно теплопередачі через плоску стінку, лінійну щільність теплового потоку через багатошарову циліндричну стінку при стаціонарному режимі можна записати:

- за законом Ньютона - Рихмана

, (1.144)

- за законом Фур'є

, (1.145)

- за законом Ньютона - Рихмана

, (1.146)

де  й  - термічні опори внутрішньої й зовнішньої тепловіддачі на одиницю довжини, (мК)/Вт.

Аналогічно одержимо лінійну щільність теплового потоку:

, (1.147)

де *R*l*k* - лінійний термічний опір, (м⋅К)/Вт;

*K*l - лінійний коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м⋅К).

, (1.148)

Граничні температури циліндричної стінки визначаються як

, (1.149)

**1.2.4 Інтенсифікація теплопередачі**

Відповідно до рівняння теплопередачі (1.140), для інтенсифікації теплопередачі, потрібно або збільшити чисельник (*tж*1 -*tж*2) або зменшити термічний опір теплопередачі *Rk*. Температури теплоносіїв обумовлені вимогами технологічного процесу, тому змінити їх звичайно не вдається.

Термічний опір теплопередачі *Rk*, можна зменшити, впливаючи на кожну зі складових *R*α1, *R*λ, *R*α2. Однак, ефективніше зменшити найбільше з доданків:

, (1.150)

Виходить, якщо *R*λ набагато менше *R*α1 й *R*α2, то для істотного зменшення *Rk* необхідно зменшити *R*α тієї рідини, що має менший коефіцієнт тепловіддачі α. Тобто, допустимо, оребрити стінку необхідно з боку рідини з меншим коефіцієнтом тепловіддачі α.

Аналогічного результату можна досягти збільшивши й більший коефіцієнт тепловіддачі, але для цього потрібні додаткові витрати потужності на збільшення швидкості плину теплоносія.

Тепловий потік через оребрену стінку (рис. 1.25) визначається за формулою:

, (1.151)

δ

λ

F1

tж1

α1

F2p

tж2

α2p

де  - коефіцієнт теплопередачі через оребрену стінку, Вт/(мК).

εр = *F*2p/*F*1 - коефіцієнт оребрення, %

Рисунок 1.25 - До розрахунку теплопередачі через оребренну стінку

 *F*2p й *F*1 - площі відповідно оребреної і не оребреної поверхонь стінки, м2;

α1 - коефіцієнт тепловіддачі від оребреної поверхні стінки до рідини або газу, Вт/м²С˚.

Звідси видно, що із збільшенням коефіцієнта оребрення ε*р* збільшується коефіцієнт теплопередачі *Кр*, а значить і тепловий потік. Тому ребристими виконують радіатори опалення, корпуса двигунів, радіатори для охолодження води у двигунах внутрішнього згоряння.

**1.2.5 Теплова ізоляція**

Для зменшення втрат теплоти багато споруджень доводиться теплоізольовувати, покриваючи їхні стінки шаром матеріалу з малою теплопровідністю (λ < 0,2 Вт/(м⋅К)). Такі матеріали називаються ***теплоізоляторами***. Більшість теплоізоляторів складається з волокнистої, порошкової й пористої основи, заповненої повітрям. Термічний опір теплоізолятора створює повітря, а основа лише перешкоджає виникненню природної конвекції повітря й переносу теплоти випромінюванням.

Теплоізоляційні властивості матеріалів погіршуються із збільшенням щільності, температури та вологості матеріалу.

Для плоскої стінки збільшення товщини шару ізоляції збільшує її термічний опір *R*λ, у результаті чого збільшується сумарний термічний опір теплопередачі *Rk*. Значення *R*α1 й *R*α2 при цьому не міняється.

Для циліндричної стінки збільшення товщини шару ізоляції так само збільшує *R*λ, але одночасно зменшує *R*α2 = 1/π⋅*d*2⋅α2 (*d*2 - зовнішній діаметр циліндричної стінки). І при деяких умовах нанесення ізоляції на трубу може привести до збільшення тепловтрат.

Теплоізоляція циліндричної поверхні ефективно працює тільки за умови:

, (1.152)

де dkp - критичний зовнішній діаметр, м;

λз - коефіцієнт теплопровідності ізоляції.