

Лекція:1. Основи теплопередачі. Визначення теплового навантаження при нагріванні і охолодженні без зміни і при зміні агрегатного стану. Рівняння теплопередачі, теплопровідності і передачі тепла конвекцією.

Мета: ознайомитися з процесами теплопередачі, основними рівняннями які їх описують.

План лекції

Вступ

1. Основи теплопередачі .
2. Рівняння теплового балансу.
3. Рівняння теплопередачі.
4. Рівняння теплопровідності.
5. Рівняння передачі тепла конвекцією.
6. Передача тепла через стінку.
7. Середній температурний напір і конвекція.

Висновки

Література

Питання

Вступ

При теплових процесах тепло передається від однієї речовини до другої. Рушійною силою любого процесу теплообміну є різниця температур більш нагрітого і менш нагрітого тіл, при наявності якої тепло довільно, у відповідності з II законом термодинаміки, переходить від більш нагрітого до менш нагрітого тіла. Речовини, які беруть участь в процесі переходу тепла (теплообміні) називаються теплоносіями. Речовина з більш високою температурою, яка в процесі теплообміну віддає тепло, називається гарячим теплоносієм, а речовина з більш низькою температурою, яка приймає тепло - холодним теплоносієм.

Існує два основних способи проведення теплових процесів: шляхом безпосереднього стикання теплоносіїв і передачею тепла через стінку, яка розділяє теплоносії.

При передачі тепла шляхом безпосереднього стикання теплоносії, як правило, змішуються одне з одним, що не завжди допустимо, тому даний спосіб застосовується порівняно рідко, хоча він значно простіший в апаратурному оформленні.

При передачі тепла через стінку теплоносії не змішуються і кожний з них рухається по окремому каналу; поверхня стінки, яка розділяє теплоносії, використовується для передачі тепла і називається поверхнею теплообміну.

Основи теплопередачі.

Розрізняють сталі і несталі процеси теплопередачі. При сталому (стаціонарному) процесі температура в кожній точці апарату не змінюється з часом, тоді як при сталому процесі температура змінюється з часом. Сталі процеси відповідають безперервній роботі апаратів з постійним режимом; несталі процеси протікають в апараті періодичної дії, а також при пуску і зупинці апаратів безперервної дії і зміні режиму їх роботи.

Передача тепла від одного тіла до другого може відбуватися шляхом:

- теплопровідності;
- конвекції;
- випромінювання.

Передача тепла теплопровідністю здійснюється шляхом переносу тепла при безпосередньому стиканні окремих частинок тіла. При цьому енергія передається від однієї частинки до другої в результаті коливального руху частинок, без їх переміщення один відносно одного.

Передача тепла конвекцією відбувається тільки в рідинах і газах шляхом переміщення їх частинок. Переміщення частинок обумовлене рухом всієї маси рідини або газу (примусова конвекція), або різницею густин рідини в різних точках об'єму, яка викликана нерівномірним розподілом температури в масі рідини або газу (вільна або природна конвекція). Конвекція завжди супроводжується передачею тепла шляхом теплопровідності.

Передача тепла випромінюванням відбувається шляхом переносу енергії у вигляді електромагнітних хвиль. В цьому випадку теплова енергія перетворюється в променеву енергію (випромінювання).

Розглянуті види передачі тепла рідко зустрічаються в чистому вигляді, як правило вони супроводжують один одного (складний теплообмін). Так при передачі тепла через стінку перенос тепла від гарячого теплоносія до стінки і від стінки до холодного теплоносія здійснюється конвекцією, а через стінку - теплопровідністю. Втрати тепла з нагрітої поверхні в навколишнє середовище відбувається шляхом конвекції і випромінювання.

Рівняння теплового балансу.

Кількість тепла, яке передається за одиницю часу від одного тіла до другого, називається тепловим потоком і виражається у Дж/с, або Вт, тобто в одиницях потужності. Значення теплового потоку, виражене в ккал/год., для переводу у Вт треба помножити на коефіцієнт 1,16, тобто

$$\text{Вт} = 1,16 \text{ ккал/год}$$

При теплообміні між теплоносіями відбувається зменшення ентальпії (тепловмісту) гарячого теплоносія і збільшення ентальпії холодного теплоносія. Хай кількість гарячого теплоносія, його початкова і кінцева ентальпії рівні відповідно G кг/с, I_1 і I_2 Дж/кг, а кількість холодного теплоносія і його початкова і кінцева ентальпії g кг/с, i_1 і i_2 Дж/с. Прийнемо також, що кількість тепла, яка передається від гарячого теплоносія до холодного, складає Q Вт (ця величина називається тепловим навантаженням апарату), а втрати тепла в навколишнє середовище рівні $Q_{\text{втр}}$ Вт (див. рис. 1.1.). Тоді рівняння теплового балансу запишеться у вигляді

$$G I_1 + g i_1 = G I_2 + g i_2 + Q_{\text{втр}}$$

Виконавши перетворення, одержимо

$$G(I_1 - I_2) = + Q_{\text{втр}}$$

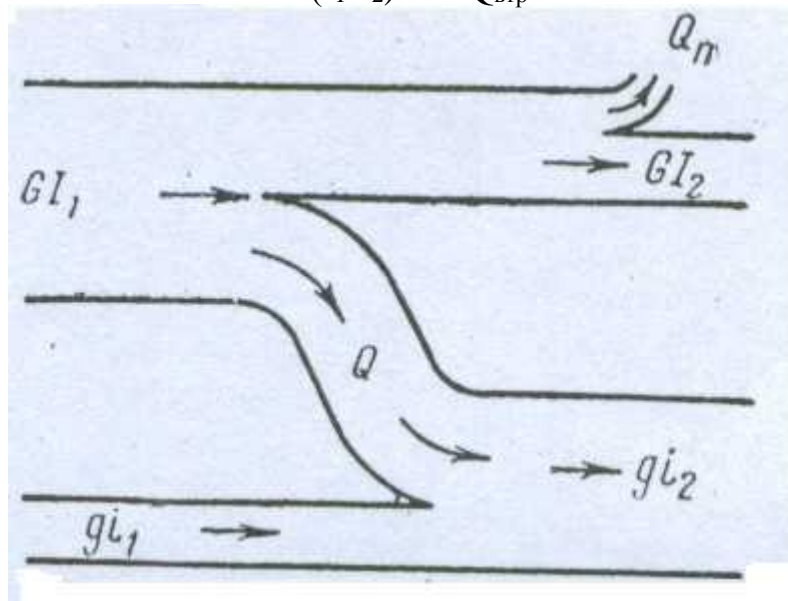


Рис. 1.1. Схема теплового балансу

Величина

$$Q_{\text{гар.}} = G(I_1 - I_2) \quad (1)$$

представляє собою кількість тепла відданого гарячим теплоносієм, а величина

$$Q_{\text{хол.}} = g(i_2 - i_1) \quad (2)$$

кількість тепла переданого холодному теплоносієві.

Таким чином

$$Q_{\text{гар.}} = Q_{\text{хол.}} + Q_{\text{втр}}$$

тобто тепло віддане гарячим теплоносієм частково передається холодному теплоносію, а частково витрачається на компенсацію втрат в навколишнє середовище.

В теплообмінних апаратах втрати тепла, як правило, невеликі (не більше 2-3 %) і ними можна знехтувати. Тоді рівняння теплового балансу прийме вигляд $Q = Q_{\text{гар.}} = Q_{\text{хол.}}$

$$\text{Або } Q = G(I_1 - I_2) = g(i_2 - i_1) \quad (3)$$

Визначення теплового навантаження при нагріванні і охолодженні без зміни агрегатного стану.

Якщо в апараті відбувається охолодження гарячого теплоносія, то

$$I_1 = cT_1 \text{ і } I_2 = cT_2$$

де c – питома теплоємність гарячого теплоносія в Дж/кг град;

T_1 і T_2 – температура теплоносія на вході в апарат і на виході з нього.

$$\text{Тоді } Q_{\text{гар.}} = Gc(T_1 - T_2) = W \cdot \Delta T \quad (4)$$

Причому тут ми будемо користуватися буквою T для позначення температури гарячого теплоносія в $^{\circ}\text{C}$ (а не в $^{\circ}\text{K}$), за винятком особливо обумовлених випадків.

Аналогічно при нагріванні холодного теплоносія

$$Q_{\text{хол.}} = gc(t_2 - t_1) = w \cdot \Delta t \quad (5)$$

де c – питома теплоємність холодного теплоносія в Дж/кг град;

t_1 і t_2 - температура теплоносія на вході в апарат і на виході з нього.

Величини $\Delta T = (T_1 - T_2)$ і $\Delta t = (t_2 - t_1)$ – називаються температурними перепадами і виражають зміну температури теплоносіїв в процесі теплообміну. Добуток кількості теплоносія на його питому теплоємність називається водяним еквівалентом ($W = Gc$ і $w = gc$).

Питома теплоємність – це кількість тепла, передана одиниці речовини (1 кг, 1 м³, 1 моль) для зміни його температури на 1 $^{\circ}\text{C}$. Згідно міжнародної системи одиниць СІ, питомі теплоємності виражаються в Дж/кг град. В довідникових таблицях значення питомих теплоємностей речовин, як правило, приводяться в ккал/кг град. Для переводу цих значень в Дж/кг град їх треба помножити на коефіцієнт 4190. Таким чином в системі СІ питома теплоємність води = 4190 Дж/кг град = 1 ккал/кг град; питома теплоємність повітря = 1000 Дж/кг град = 0,24 ккал/кг град.

Визначення теплового навантаження при зміні агрегатного стану.

При конденсації пароподібного теплоносія величини I_1 і I_2 в рівнянні (1) представляють собою відповідно ентальпію поступаючої пари і виходячого конденсату. Якщо пара поступає перегрітою з температурою T_1 , то величина GI_1 складається з ентальпії рідини при температурі насичення T_n , тепла, яке витрачається на випарювання рідини і рівне теплу конденсації пари $Q_{\text{конд.}}$, а також тепла, необхідного для перегріву пари, тобто

$$GI_1 = Gc_p T_n + G_{\text{конд.}} + Q_{\text{пер.}}$$

Величина $I_2 = C_p T_2$ (де T_2 - температура виходячого конденсату). Тоді рівняння (1) після ряду перетворень прийме вигляд:

$$Q_{\text{гар.}} = G(I_1 - I_2) = Q_{\text{пер.}} + Q_{\text{конд.}} + Q_{\text{охол.}}$$

Тепло, яке віддається при охолодженні перегрітої пари, рівне теплу, яке витрачається на перегрів при його одержанні і складає

$$Q_{\text{пер.}} + G C_p (T_1 - T_n)$$

Тепло, яке віддається при конденсації пари, рівне теплу, яке витрачається на випаровування рідини

$$Q_{\text{конд.}} = G r$$

Тепло, яке віддається при охолодженні конденсату, складає

$$Q_{\text{охол.}} = G C_p (T_n - T_2)$$

в цих рівняннях C_p і C_p – питомі теплоємності пари і рідини, Дж/кг град
 r – теплота випарювання, Дж/кг

При конденсації насиченої пари без охолодження конденсату

$$Q_{\text{гар.}} = Q_{\text{конд.}} = G r$$

Рівняння теплопередачі.

Для протікання процесу передачі тепла необхідна наявність деякої різниці температур між гарячим і холодним теплоносіями. Ця різниця температур є рушійною силою процесу теплопередачі і називається температурним напором. Якщо T – температура гарячого теплоносія; t – температура холодного теплоносія, то температурний напір

$$\Theta = T - t$$

Чим більший температурний напір, тим більша швидкість передачі тепла, причому кількість тепла, яке передається від гарячого теплоносія до холодного (тобто теплове навантаження апарату), пропорційна поверхні теплообміну F , температурному напору Θ і часу τ .

$$Q = K F \Theta \tau \quad (8)$$

де K – коефіцієнт пропорційності, який називається коефіцієнтом теплопередачі і який представляє собою кількість тепла, яка передається через одиницю поверхні за одиницю часу при температурному напорі рівнім 1. Розмірність коефіцієнта теплопередачі

$$[K] = \left[\frac{Q}{F \Theta \tau} \right] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{град}} \right] = \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}} \right]$$

Якщо Q виражено в ккал, а τ в год., то розмірність коефіцієнта теплопередачі $[K] = \left[\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{град}} \right]$

$$[K] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{град}} \right] = 1,16 \left[\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{град}} \right]$$

При безперервних процесах під тепловим навантаженням Q розуміють кількість тепла, яке передається за одиницю часу (Вт); тоді рівність (8) можна написати у вигляді

$$Q = K F \Theta \quad (9)$$

В процесах теплообміну температури теплоносіїв, а значить і температурний напір, як правило, змінюються, тому при користуванні рівняннями (8) і (9) в них слід відставляти деяке середнє значення температурного напору $\Theta_{\text{сер}}$.

Рівняння теплопровідності.

Якщо тепло переноситься шляхом теплопровідності через стінку, то згідно закону Фур'є, кількість тепла, яке передається пропорційна поверхні F , різниці температур між обома поверхнями стінки $\Theta_{ст} = t_{ст1} - t_{ст2}$, часу τ і зворотно-пропорційна товщині стінки δ

$$Q = \frac{\lambda \cdot F \cdot (t_{cm1} - t_{cm2}) \cdot \tau}{\delta} = \frac{\lambda \cdot F \cdot \Theta_{ст} \cdot \tau}{\delta} \quad (10)$$

де $t_{ст1}, t_{ст2}$ – температура поверхонь стінки;

λ – коефіцієнт теплопровідності або просто теплопровідність.

$$[\lambda] = \left[\frac{Q \cdot \delta}{F \cdot \tau \cdot \Theta_{ст}} \right] = \left[\frac{Дж \cdot м}{м^2 \cdot с \cdot град} \right] = \left[\frac{Вт}{м \cdot град} \right] = 1,16 \left[\frac{ккал}{м \cdot год \cdot град} \right]$$

Коефіцієнт теплопровідності представляє собою кількість тепла, яка проходить за одиницю часу через одиницю поверхні при різниці температур 1°C на одиницю товщини стінки. Цей коефіцієнт залежить від властивостей матеріалу стінки і від її температури. З підвищенням температури теплопровідність більшості твердих тіл, а також газів зростає, а теплопровідність рідин (крім води і деяких інших) зменшується.

Рівняння передачі тепла конвекцією.

При передачі тепла конвекцією біля поверхні стінки, вздовж якої рухається теплоносій і через яку проходить тепло, утворюється ламінарний граничний шар. Через цей шар тепло передається шляхом теплопровідності, в той час як за межами шару, в основній масі теплоносія, температура в кожному поперечному перерізі майже постійна (мало змінюється по мірі віддалення від стінки). Вирівнювання температури в основній масі відбувається в результаті перемішування теплоносія при русі окремих його частинок. Зі збільшенням турбулентності потоку перемішування посилюється, що приводить до зменшення товщини прикордонного шару і збільшенню кількості тепла, що передається.

Якщо різниця температур між основною масою теплоносія і поверхнею стінки складає $\Theta_{\text{част.}}$, то кількість тепла, що передається, згідно закону Ньютона, пропорційна поверхні стінки F , частковому температурному напору $\Theta_{\text{част.}}$ і часу τ :

$$Q = \alpha \cdot F \cdot \Theta_{\text{част.}} \cdot \tau \quad (11)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м² град;

F – поверхня стінки, м²;

$\Theta_{\text{част.}}$ – різниця температур між основною масою теплоносія і поверхнею стінки, град;

τ – час передачі тепла, с.

Передача тепла через стінку.

Розглянемо складний процес передачі тепла через плоску стінку від гарячого теплоносія до холодного. Характер зміни температур представлений на рис. 1.2. В шарі гарячого теплоносія температура змінюється від T до $t_{ст1}$, по товщині стінки від $t_{ст1}$ до $t_{ст2}$ і в шарі холодного теплоносія від $t_{ст2}$ до t .

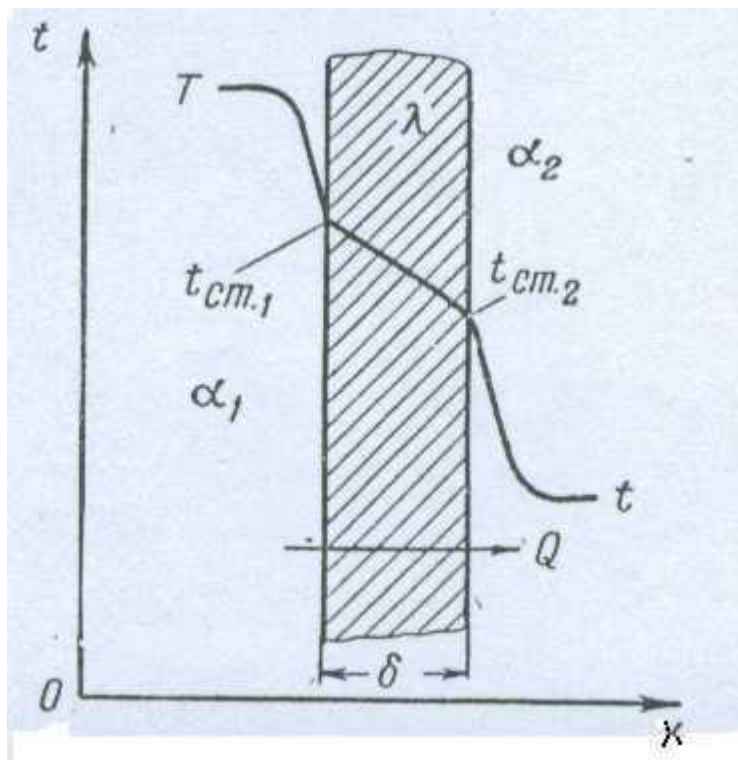


Рис.1.2. Передача тепла через плоску стінку.

Напишемо рівняння передачі тепла конвекцією від гарячого теплоносія до стінки, шляхом теплопровідності через стінку і конвекцією від стінки до холодного теплоносія:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= \alpha_1 F (T - t_{ст1}) \\ Q_{ст.} &= \frac{\lambda}{\delta} F (t_{ст1} - t_{ст2}) \\ Q_2 &= \alpha_2 F (t_{ст2} - t) \end{aligned} \right\} (A)$$

де α_1 і α_2 – коефіцієнти тепловіддачі від гарячого теплоносія до стінки і від стінки до холодного теплоносія.

Поверхня теплообміну F рівна поверхні стінки і при плоскій стінці є

величиною постійною.

При сталому процесі кількості тепла, які передаються від гарячого теплоносія до стінки Q_1 , через стінку $Q_{ст.}$ і від стінки до холодного теплоносія Q_2 повинні бути рівні між собою:

$$Q_1 = Q_{ст.} = Q_2 = Q$$

Визначимо з рівнянь (А) часткові температурні напори

$$\left. \begin{aligned} \Theta_1 &= T - t_{ст1} = \frac{Q}{\alpha_1 \cdot F} \\ \Theta_{ст.} &= t_{ст1} - t_{ст2} = \frac{Q}{\frac{\lambda}{\delta} \cdot F} \\ \Theta_2 &= t_{ст2} - t = \frac{Q}{\alpha_2 \cdot F} \end{aligned} \right\} \text{ (Б)}$$

а з рівняння (9) загальний температурний напір

$$\Theta = T - t = \frac{Q}{K \cdot F} \text{ (В)}$$

Відношення $g = \frac{Q}{F}$, представляє собою кількість тепла, яке передається за одиницю часу через одиницю поверхні, і називається питомим тепловим навантаженням, або густиною теплового потоку (розмірність Вт/м²).

Величини $r_1 = \frac{1}{\alpha_1}$ і $r_2 = \frac{1}{\alpha_2}$ (зворотні коефіцієнти тепловіддачі) називаються тепловими (термічними) опорами при переході тепла через пограничний шар теплоносія. Аналогічно $r_{ст.} = \frac{\delta}{\lambda}$ буде тепловим опором стінки, а $r = \frac{1}{K}$ – загальним тепловим опором при переході тепла від одного теплоносія до другого. Розмірності теплового опору – м² град/Вт.

Вводячи питоме теплове навантаження і теплові опори, рівняння (Б) можна написати у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \Theta_1 &= q r_1 \\ \Theta_{ст.} &= q r_{ст.} \\ \Theta_2 &= q r_2 \end{aligned} \right\} \text{ (Г)}$$

а рівняння (В) у формі

$$\Theta = g r \text{ (Д)}$$

Так як загальний температурний напір рівний, очевидно, сумі часткових температурних напорів

$$\Theta = \Theta_1 + \Theta_{ст.} + \Theta_2$$

то підставивши значення Θ_1 , $\Theta_{ст.}$, Θ_2 і Θ з рівнянь (Г) і (Д), після скорочення на g одержимо

$$r = r_1 + r_{ст.} + r_2 \text{ (Е)}$$

тобто, загальний тепловий опір рівний сумі всіх часткових теплових опорів. Підставляючи приведені вище значення теплових опорів r , r_1 , $r_{ст.}$ і r_2 в рівняння (E), знаходимо

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_{cm.}} + \frac{1}{\alpha_2} \quad \text{або} \quad K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (12)$$

Це рівняння є дуже важливим, так як дозволяє визначити значення коефіцієнта теплопередачі K , якщо відомі коефіцієнти тепловіддачі α_1 і α_2 обох теплоносіїв, а також товщина δ і теплопровідність λ поділяючої їх стінки. Якщо стінка складається з декількох шарів товщиною $\delta_1, \delta_2, \delta_3 \dots$ (див. рис 1.3.) то теплові опори шарів будуть рівні

$$\frac{\delta_1}{\lambda_1}, \frac{\delta_2}{\lambda_2}, \frac{\delta_3}{\lambda_3}, \dots,$$

а теплові опори всієї стінки складуть

$$r_{cm.} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \dots + \sum \frac{\delta}{\lambda}$$

В цьому випадку рівняння (12) прийме наступний вигляд

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (13)$$

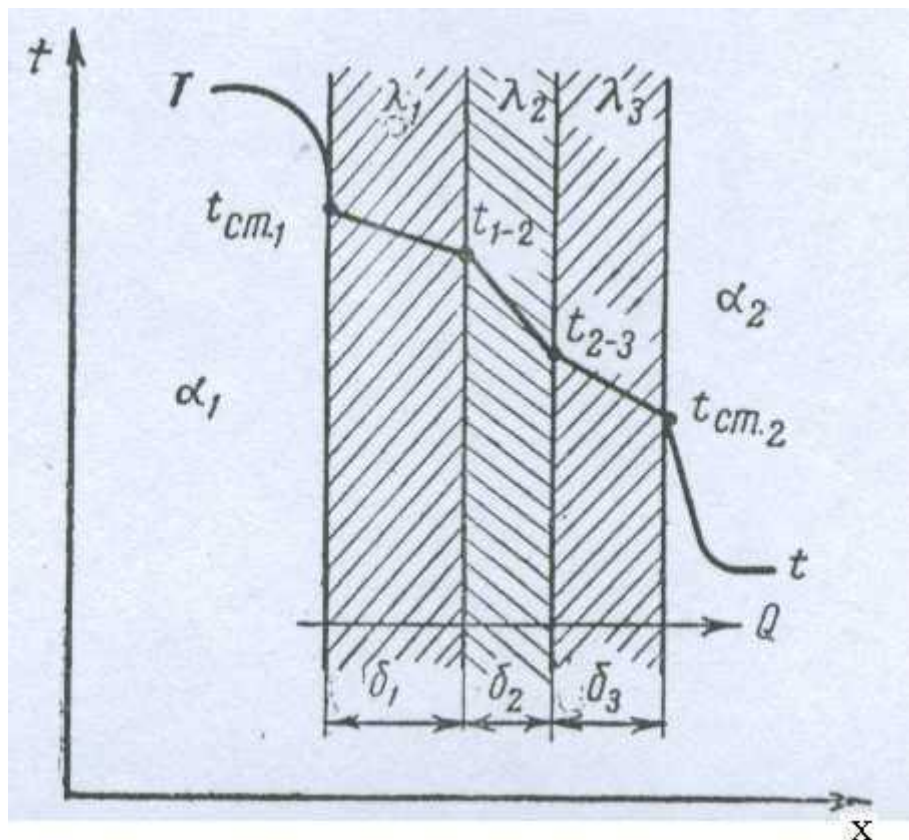


Рис. 1.3. Передача тепла через багатошарову плоску стінку.

Середній температурний напір і конвекція.

При проточній і протиточній температурний напір визначається як середнє логарифмічне із значень максимального $\Theta_{\text{макс.}}$ і мінімального $\Theta_{\text{мін.}}$ температурних напорів

$$\Theta_{\text{сер.}} = \frac{\Theta_{\text{макс.}} - \Theta_{\text{мін.}}}{2,31 \lg \frac{\Theta_{\text{макс.}}}{\Theta_{\text{мін.}}}}$$

Якщо відношення $\frac{\Theta_{\text{макс.}}}{\Theta_{\text{мін.}}} < 2$, то з достатньою точністю (помилка не менше 4 %) можна користуватися середньоарифметичним значенням

$$\Theta_{\text{сер.}} = \frac{\Theta_{\text{макс.}} + \Theta_{\text{мін.}}}{2}$$

Коефіцієнт тепловіддачі при передачі тепла конвекцією визначається з однієї сторони, опором ламінарного прикордонного шару, а з другої – опором при теплообміні між основною масою теплоносія і прикордонним шаром. Орієнтовні значення коефіцієнтів тепловіддачі для типових процесів теплообміну приведені нижче:

Процеси теплообміну	Коефіцієнт тепловіддачі α , Вт/м ² град
Нагрівання і охолодження газів (атм. тиск)	10-50
Нагрівання і охолодження органічних рідин	50-1500
Нагрівання і охолодження води	200-10000
Кипіння води	500-10000
Конденсація водяних парів	4000-15000
Конденсація парів органічних рідин	500-2000

Втрати тепла в навколишнє середовище.

Віддача тепла від поверхні апарату в навколишнє середовище відбувається шляхом конвекції і випромінювання; тому при розрахунку втрат тепла в навколишнє середовище слід користуватися рівнянням

$$Q = \alpha \cdot F (t_{\text{ст.}} - t),$$

де $\alpha = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}$

$\alpha_{\text{к}}$ – коефіцієнт тепловіддачі при конвекції;

$\alpha_{\text{л}}$ - коефіцієнт тепловіддачі при випромінюванні.

При розрахунку втрат тепла апаратом, який встановлено в приміщенні, для визначення загального коефіцієнту тепловіддачі можна застосовувати наступну приблизну формулу (при $t_{\text{ст.}}$ від 50 до 350 °C):

$$\alpha = 9,3 + 0,058 t_{\text{ст.}} \text{ Вт/м}^2 \text{ град}$$

Для зменшення втрат тепла в навколишнє середовище апарати покривають шаром теплової ізоляції, тобто шаром матеріалу з низькою теплопровідністю (теплоізоляційний матеріал). При нанесенні теплової ізоляції збільшується тепловий опір стінки і зменшується температура її зовнішньої поверхні. Цим досягається зменшення втрат тепла.

Висновки

1. Передача тепла від одного тіла до другого може відбуватися шляхом:
 - теплопровідності;
 - конвекції;
 - випромінювання.
2. При передачі тепла через стінку перенос тепла від гарячого теплоносія до стінки і від стінки до холодного теплоносія здійснюється конвекцією, а через стінку - теплопровідністю.
3. Втрати тепла з нагрітої поверхні в навколишнє середовище відбувається шляхом конвекції і випромінювання.

Література

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Химия, 1973.
2. Плановский А.Н., Рамм В.М., Каган С.З. Процессы и аппараты химической технологии. Химия, 1968.
3. Перри Дж. Справочник инженера-химика. Химия, 1969.
4. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Химия, 1969.
5. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена Наука, 1970.

Питання

1. Зобразіть схему теплового балансу.
2. Як змінюється теплове навантаження при нагріванні/охолодженні при зміні агрегатного стану і без зміни.
3. Напишіть рівняння теплового навантаження.
4. Напишіть рівняння теплопровідності.
5. Як передається тепло через стінку?
6. Як передається тепло через багат шарову стінку?