

## ***Тема 5. Теплообмінні апарати***

### ***5.1 Типи теплообмінних апаратів***

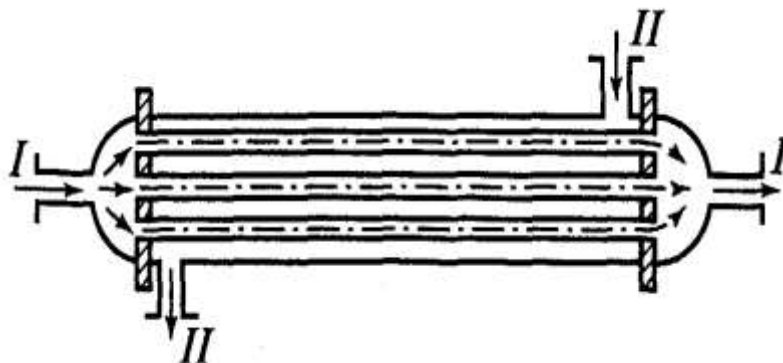
*Тепломасообмінні апарати* - це пристрої, в яких здійснюються процеси тепло- і масообміну між двома або кількома середовищами. Останні прийнято називати *теплоносіями*. Якщо апарат призначений тільки для передачі теплоти від одного середовища до іншого, то часто його називають *теплообмінником*.

Тепломасообмін між теплоносіями є одним з найбільш важливих і часто використовуваних в техніці процесів. Практично у всіх машинах і апаратах будь-

які перетворення енергії з одного виду в інший, а також передача енергії і речовини від одного теплоносія до іншого здійснюються за допомогою тепломасообміну. Наприклад, отримання пари заданих параметрів в сучасному парогенераторі засноване на процесі передачі теплоти від одного теплоносія (гарячих продуктів згоряння) до іншого (воді).

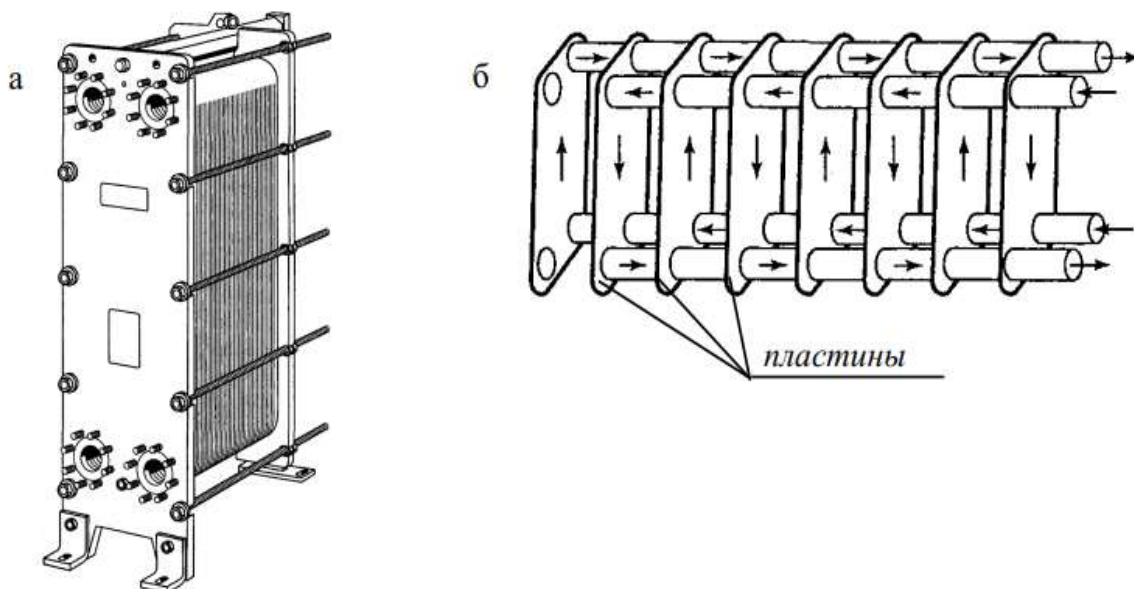
Тепломасообмін має місце в конденсаторах і градирнях теплових електростанцій, повітропідігрівниках доменних печей і тепловикористовуючих установках хімічної промисловості і в багатьох інших пристроях. Робочі процеси, що відбуваються в тепломасообмінних апаратах, можуть бути найрізноманітнішими: нагрівання, охолодження, випаровування, кипіння, конденсація, плавлення, затвердіння і більш складні процеси, які є комбінацією перерахованих. В процесі теплообміну може брати участь кілька теплоносіїв: теплота від одного з них може передаватися кільком і від кількох - одному. Тому тепломасообмінні апарати можна класифікувати за призначенням - підігрівачі, конденсатори, охолоджувачі, випарники, пароперетворювачі і т. п. Однак ця класифікація є не дуже зручною, оскільки кожен тепломасообмінний апарат призначений для якогось конкретного робочого процесу, а таких процесів в техніці досить багато. Більш зручно класифікувати тепломасообмінні апарати за принципом дії: на рекуперативні, регенеративні, змішувальні і теплообмінні пристрої з внутрішніми джерелами теплоти.

*Рекуперативні теплообмінні апарати* є пристроями, в яких дві рідини з різними температурами течуть в просторі, розділеному твердою стінкою. Теплообмін відбувається за рахунок конвекції і теплопровідності стінки, а якщо хоч одна з рідин є випромінюючим газом, то і за рахунок теплового випромінювання. Прикладом таких апаратів є котли, підігрівачі, конденсатори, випарні апарати і ін. При теплообміні в апаратах такого типу тепловий потік в кожній точці поверхні розділової стінки зберігає постійний напрям. Процес теплообміну протікає безперервно і має зазвичай стаціонарний характер. На рис. 5.1 показаний приклад рекуперативного теплообмінника, в якому один з теплоносіїв протікає всередині труб, що знаходяться всередині кожуха, а другий омиває зовнішні поверхні цих труб. Тому такі апарати називають кожухотрубні.



*Рисунок 5.1. Найпростіший рекуперативний теплообмінник кожухотрубного типу: I – горячий теплоносій; II – холодний теплоносій*

Стінка, яка омивається з обох сторін теплоносіями, називається робочою поверхнею теплообмінника. В даний час в системах тепlopостачання замість кожухотрубних підігрівачів все частіше встановлюються пластинчасті теплообмінники, які також відносяться до рекуперативним апаратів (рис. 4.2).



*Рисунок 5.2. – Пластинчастий водо-водяний теплообмінник: а - загальний вид ; б - схема руху теплоносіїв*

Пластинчасті теплообмінники мають цілу низку переваг в порівнянні з кожухотрубними:

- коефіцієнт теплопередачі в 3 - 4 рази більше, ніж в кожухотрубних, завдяки спеціальному гофрованого профілю пластин;
- робоча поверхня в 3 - 4 рази менше, тому вони більш компактні і мають меншу металоємність;
- легко розбираються, швидко чистяться, можна швидко замінити прокладку або пластину і збільшити поверхню теплообміну.

*Регенеративні теплообмінники* - це такі апарати, в яких одна і та ж поверхня нагріву через певні проміжки часу омивається то гарячою, то холодною рідиною (рис. 5.3, 5.4). Поверхня нагріву регенератора називається *теплоакумулюючою насадкою*. Спочатку насадка відбирає (акумулює) теплоту від гарячого теплоносія I і нагрівається, а потім віддає енергію холодного теплоносія II. У різні періоди часу теплообміну (нагрів або охолодження поверхні нагрівання) напрямок теплового потоку в кожній точці поверхні нагрівання змінюється на протилежне.

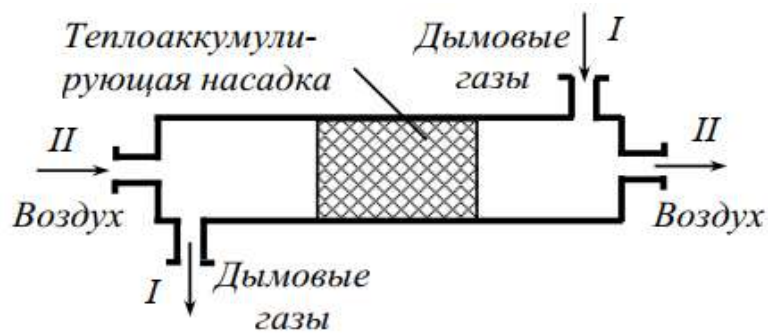


Рисунок 5.3. Найпростіший регенеративний теплообмінник з нерухомою насадкою: I – гарячий теплоносій; II – холодний теплоносій

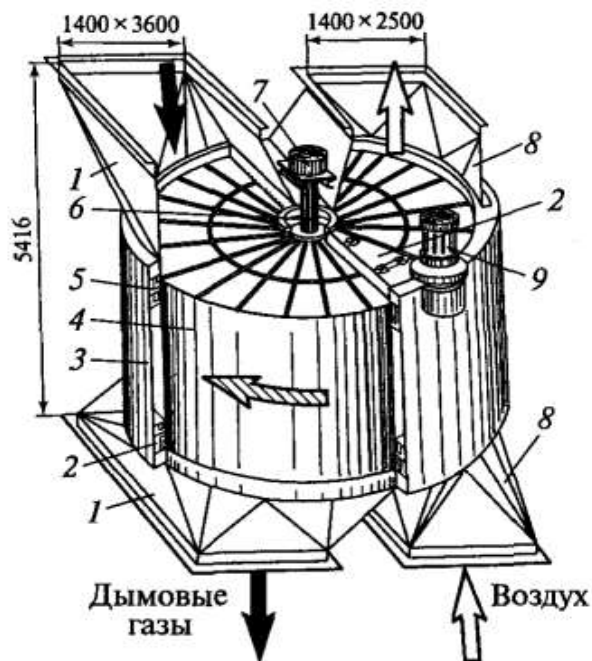


Рисунок 5.4. Регенеративний повітря підігрівач з насадкою, що обертається: 1- газові патрубки; 2,5 – радіальне та периферійне ущільнення; 3- нерухомий зовнішній кожух; 4 – насадка; 6 – вал ротора; 7 – верхній та нижній підшипники

Таким чином, в регенераторах теплообмін завжди відбувається в нестационарних умовах, тоді як рекуперативні теплообмінні апарати здебільшого працюють в стаціонарному режимі. Типовим прикладом регенеративних апаратів є повітря підігрівачі мартенівських і доменних печей. Теплоакумулююча насадка регенеративних апаратів може бути виконана з різних матеріалів і при роботі апарату залишатися нерухомою або переміщатися. Як приклад на рис. 5.4 представлена схема регенеративного повітря підігрівача котельного агрегату, з насадкою, що обертається. Ротор регенератора має насадку з тонких гофрованих сталевих листів, яка повільно обертається зі швидкістю 2 - 5 об/хв. До кожуха приєднуються повітряний і газовий короба. Під час роботи теплообмінника при

обертанні ротора нагріті елементи насадки безперервно переходять з порожнини гарячих газів в порожнину холодного повітря, а охолоджені елементи - навпаки.

*Змішувальні тепломасообмінні апарати* - це пристрої, в яких здійснюється тепломасообмін при безпосередньому контакті і змішуванні гарячого та холодного середовищ. Тому такі апарати іноді називають контактними (рис. 5.5). Найбільш важливим фактором в робочому процесі змішувального тепломасообмінного апарату є поверхня зіткнення теплоносіїв, яка створюється в насадці або на тарілках за рахунок розбиття теплоносіїв на тонкі струмені.

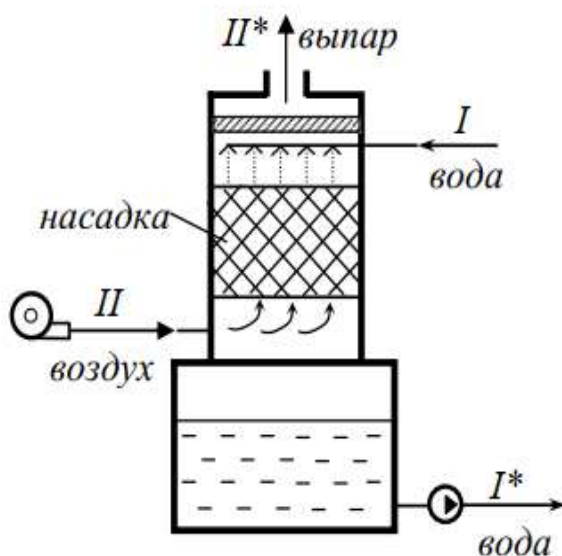


Рисунок 5.5. Принципова схема змішувального тепломасообмінного апарату:  $I, I^*$  - перший теплоносій з початковими і кінцевими параметрами;  $II, II^*$  - другий теплоносій з початковими і кінцевими параметрами

Типовим прикладом таких теплообмінників є градирні теплових електричних станцій. В градирнях вода охолоджується атмосферним повітрям. Повітря безпосередньо стикається з водою і перемішується з парою, що виникає через часткове випаровування води. Крім градирень, до камер змішувачів тепломасообмінних апаратів відносяться деаератори, декарбонізатори, контактні економайзери, скрубери та інші.

У теплообмінниках з внутрішніми джерелами енергії застосовуються не два, як зазвичай, а один теплоносій, який відводить теплоту, виділену в самому апараті. Прикладом таких апаратів можуть служити ядерні реактори, електронагрівачі і інші пристрої. Незалежно від принципу дії теплообмінні апарати, що застосовуються в різних областях техніки, як правило, мають свої спеціальні назви. Ці назви визначаються технологічним призначенням і конструктивними особливостями теплообмінних пристроїв. Однак з теплотехнічної точки зору всі апарати мають одне призначення - передачу

теплоти і речовини від одного теплоносія до іншого або поверхні твердого тіла до рухомих теплоносіїв. Останнє і визначає ті загальні положення, які лежать в основі теплового розрахунку будь-якого теплообмінного апарату.

## 5.2 Тепловий розрахунок рекуперативних теплообмінних апаратів

Теплові розрахунки теплообмінних апаратів можуть бути конструктивними і перевірочними.

*Конструктивні (проектні) теплові розрахунки* виконуються при проектуванні нових апаратів, метою розрахунку є визначення поверхні теплообміну.

*Перевірочні теплові розрахунки* виконуються в разі, якщо відома поверхня нагріву теплообмінного апарату і потрібно визначити кількість переданої теплоти і кінцеві температури робочих рідин. Тепловий розрахунок теплообмінних апаратів зводиться до спільного вирішення рівнянь теплового балансу і теплопередачі. Ці два рівняння лежать в основі будь-якого теплового розрахунку.

Розглянемо стаціонарний режим роботи теплообмінника, зображеного на рис. 5.6.

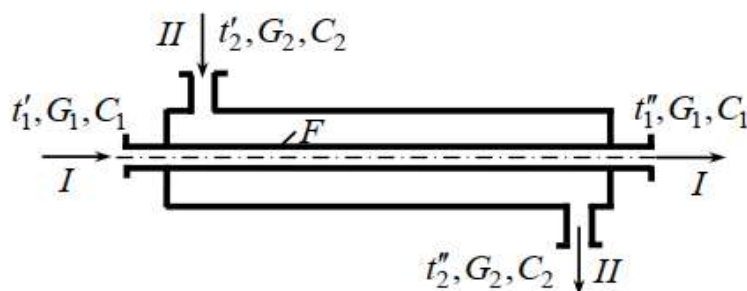


Рисунок 5.6. Принципова схема рекуперативного теплообмінного апарату типу «труба» в «трубі»

Рівняння теплового балансу для такого теплообмінника виглядає наступним чином:

$$Q = G_1 \cdot C_1 (t_1' - t_1'') = G_2 \cdot C_2 (t_2'' - t_2'). \quad (5.1)$$

Тут і надалі індекс «1» означає, що дана величина віднесена до гарячого теплоносія, а індекс «2» - до холодного. Позначення (штрих) відповідає величині для розрахунку на вході в теплообмінник, (два штриха) - на виході.

Для апаратів з зміною агрегатного стану одного з теплоносіїв можна записати в наступному вигляді

$$Q = D_1(i_1 - i_k) \eta_n = G_2 \cdot C_2 (t_2'' - t_2'). \quad (5.2)$$

У рівняннях (5.1) і (5.2)  $Q$  - теплова продуктивність, Вт;  $G_1$  і  $G_2$  - витрати теплоносіїв, незмінні агрегатного стану, кг/с;  $D_1$  - витрата теплоносія, що змінює

агрегатний стан, кг/с;  $C_1$  і  $C_2$  - теплоємності теплоносіїв, Дж / (кг·К);  $t_1$  і  $t_2$  - температури теплоносіїв, °С;  $i_1$  і  $i_k$  - ентальпії пари і конденсату, Дж/кг;  $\eta_n$  - коефіцієнт, що враховує втрати теплоти апаратом в навколишнє середовище.

На основі рівнянь (5.1) і (5.2) визначають витрати теплоносіїв:

а) для теплообміну без зміни агрегатного стану теплоносіїв

$$G_1 = \frac{Q}{C_1(t_1' - t_1'')\eta_n} \quad \text{та} \quad G_2 = \frac{Q}{C_1(t_2'' - t_2')\eta_n} . \quad (5.3)$$

б) для теплообміну зі зміною агрегатного стану одного з теплоносіїв

$$D_1 = \frac{G_2 \cdot C_2(t_2'' - t_2')}{(i_1 - i_k)\eta_n} \quad (5.4)$$

Поверхня нагріву теплообмінника визначають з рівняння теплопередачі:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t_{cp}, \quad (5.5)$$

де  $k$  - коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);

$F$  - площа поверхні теплообміну, м<sup>2</sup>;

$\Delta t_{cp}$  - середній по поверхні температурний напір між теплоносіями, °С.

При конструктивному розрахунку теплообмінних апаратів теплова продуктивність  $Q$ , Вт, задається, а потрібно визначити площу поверхні теплообміну  $F$ , м<sup>2</sup>. Остання знаходиться з рівняння (1.237)

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_{cp}} . \quad (5.6)$$

З цього рівняння випливає, що при знаходженні поверхні теплообміну завдання зводиться до обчислення коефіцієнта теплопередачі  $k$ , Вт / (м<sup>2</sup>·°С), і усередненого по всій поверхні температурного напору  $\Delta t_{cp}$ , °С.

Коефіцієнт теплопередачі для плоскої стінки може бути знайдений по формулою (4.18).

У разі циліндричної стінки розрахунок також можна проводити за формулою (4.18), при цьому похибка розрахунку не буде перевищувати 1 - 3%. Для забезпечення найкращих умов теплопередачі необхідно, щоб середній температурний напір між теплоносіями був максимальний. Характер зміни температур теплоносіїв уздовж поверхні нагріву залежить від схеми їх руху і співвідношення їх водяних еквівалентів.

### **5.3 Поняття водяного еквівалента. Схеми руху теплоносіїв в теплообмінних апаратах**

Під водяним еквівалентом  $W$ , Вт/°С, розуміють добуток питомої ізобарної теплоємності  $c$ , Дж / (кг·°С), на масову витрату теплоносія  $G$ , кг/с,

$$W = c \cdot G . \quad (5.7)$$

Тоді рівняння (5.2) без урахування втрат в навколишнє середовище можна записати в наступному вигляді:

$$W_1(t_1' - t_1'') = W_2(t_2'' - t_2') . \quad (5.8)$$

З останнього рівняння можна отримати відношення водяних еквівалентів:

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_1''} . \quad (5.9)$$

На практиці зустрічаються різні схеми руху гарячих і холодних теплоносіїв. Рух теплоносіїв може бути протічійним (рис. 5.7 а), протитечійним (рис. 5.7 б), перехресним (рис. 5.7 в) складним, що представляє собою комбінацію декількох простих (рис. 5.7 г, д). Залежно від того здійснюється протічія або протитечія, у величини водяних еквівалентів виходить чотири характерні пари зміни температур теплоносіїв уздовж поверхні нагрівання (рис. 5.8 а, б і 5.9 а, б).

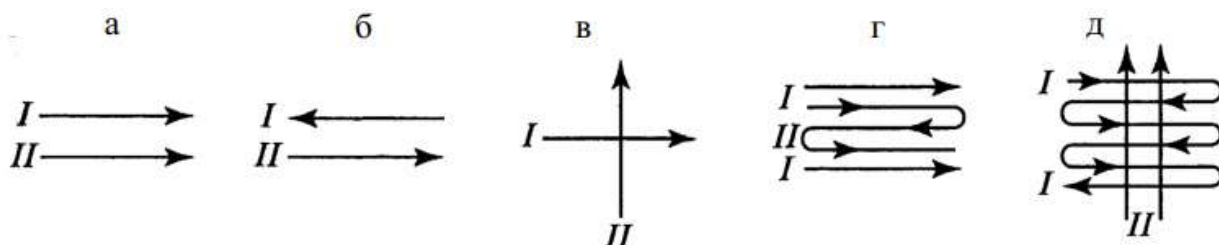


Рисунок. 5.7. Схеми руху теплоносіїв в теплообмінниках: *протічія (а); протитечія (б); перехресний ток (в); одночасно протіток та протівоток (г); багаторазово перехресний ток (д)*

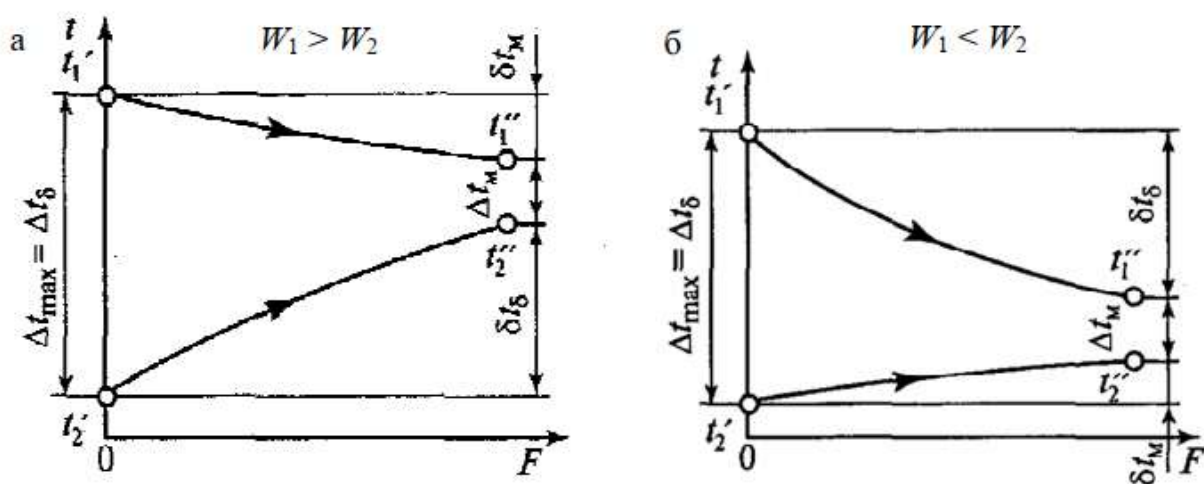


Рисунок 5.8. Зміна температур теплоносіїв по поверхні теплообмінного апарату при протічії

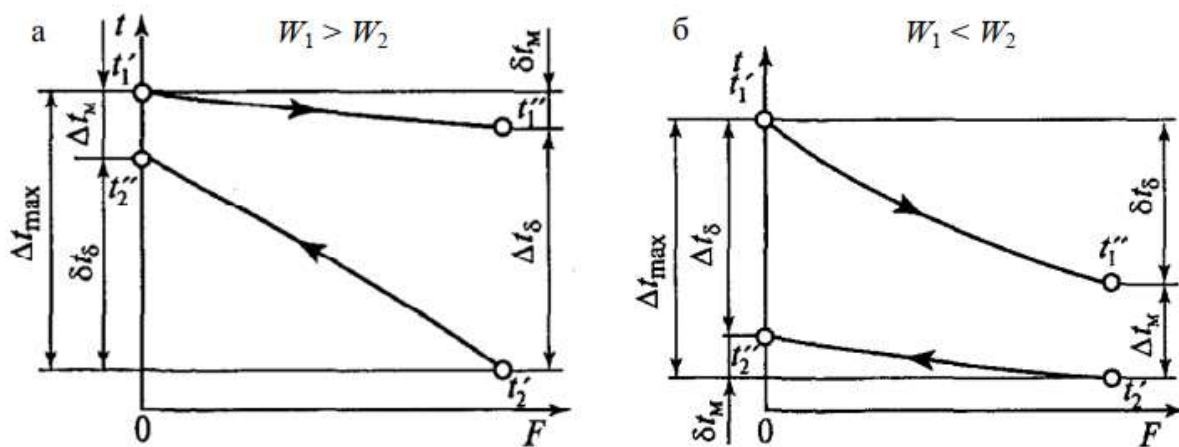


Рисунок 5.9. Зміна температур теплоносіїв по поверхні теплообмінного апарату при протитечії

З графіків на рис. 5.8 і 5.9, а також з рівняння (5.9) випливає, що більша зміна температури по поверхні теплообміну виходить для того теплоносія, у якого водяний еквівалент менше.

За графіками видно, що при прямотечії температура  $t_1''$  завжди більше, ніж  $t_2''$ , а при протитечії температура  $t_2''$  може бути більше, ніж  $t_1''$ . Отже, при одній і тій самій початковій температурі холодної рідини  $t_2'$  при протитечії її можна нагріти до більш високої температури, ніж при прямотечії.

За рахунок цього фактора середнє значення температурного напору при протитечії більше, ніж при прямотечії, тому при протитечії теплообмінник виходить більш компактним і менш металомістким.

В результаті, протитечійна схема руху теплоносіїв в теплообмінному апараті є більш вигідною в порівнянні з прямоточною.

#### 5.4 Визначення середнього температурного напору

Зміну температур робочих рідин для найпростіших випадків можна отримати аналітичним шляхом. Розглянемо найпростіший теплообмінний апарат, що працює за схемою прямотока (рис. 5.6). Для елемента поверхні теплообміну  $dF$  (рис. 5.10) рівняння теплопередачі запишеться як

$$dQ = k \cdot dF \cdot \Delta t, \quad (5.10)$$

При цьому температура первинного теплоносія знизиться на  $dt_1$ , а другого підвищиться на  $dt_2$ . Відповідно,

$$dQ = -W_1 dt_1 = W_2 dt_2. \quad (5.11)$$

Вирішуючи разом рівняння (5.10) та (5.11), після інтегрування в межах від 0 до  $F$  та від  $\Delta t'$  до  $\Delta t''$  отримаємо вираз для визначення середнього по поверхні температурного напору  $\Delta t_{\text{ср}}$ , °С

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}}. \quad (5.12)$$

Тут  $\Delta t'$ ,  $\Delta t''$  – різниця температур теплоносіїв на вході та на виході з апарату, °С.

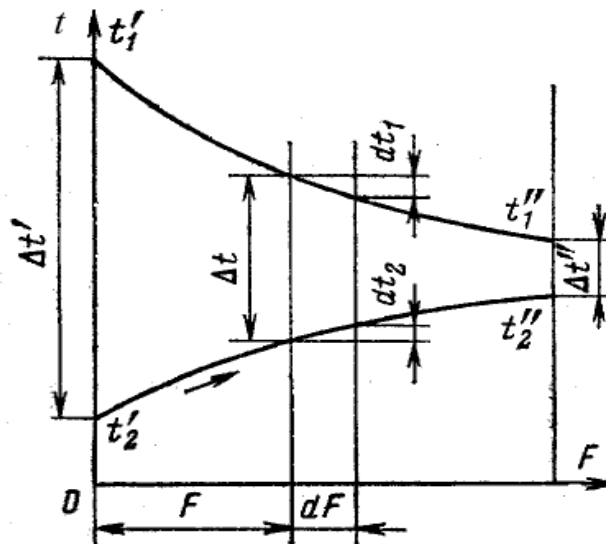


Рисунок 5.10. Зміна різниці температур теплоносіїв вздовж поверхні нагріву

Формула (5.12) справедлива тільки для проточної схеми руху теплоносіїв. У протитечійному теплообмінному апараті теплоносії рухаються назустріч один одному і значення  $\Delta t$  на кінцях визначаються вже по різниці температур на вході гріючого теплоносія і на виході нагріваємого і навпаки.

Для протитечійної схеми руху різниця температур теплоносіїв на виході з теплообмінника може бути більше, ніж на вході. Тому формулу (5.12) часто записують в наступному вигляді:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}}, \quad (5.13)$$

де  $\Delta t_{\text{б}}$ ,  $\Delta t_{\text{м}}$  – більша та менша різниці температур між гріючим і нагріваємым теплоносієм з боку входу і виходу з теплообмінника, °С.

Остання формула може бути використана як при прямотоці, так і при протитечії. Отримана за формулою (5.13) різниця температур  $\Delta t_{\text{ср}}$  називається середньологарифмічним температурним напором. Формула (5.13) справедлива для найпростіших схем апаратів за умови сталості масової витрати теплоносіїв і

коефіцієнта теплопередачі вздовж всієї поверхні теплообміну. У тих випадках, коли температура теплоносіїв уздовж поверхні теплообміну змінюється незначно і  $\Delta t_m / \Delta t_{\theta} \geq 0,6$ , середню різницю температур можна обчислювати як середню арифметичну з крайніх напорів по формулі

$$\Delta t_{\text{ср}}^{\text{ар}} = 0,5(\Delta t_{\theta} + \Delta t_{\text{в}}) = \frac{t_1' - t_1''}{2} + \frac{t_2' - t_2''}{2} . \quad (5.14)$$

При розрахунку середнього температурного напору для апаратів з перехресною течією і більш складними схемами руху теплоносіїв спочатку визначається середньо логарифмічний температурний напір, як для чисто протитечій цих апаратів, а потім обчислюють допоміжні величини  $P$  і  $R$  за формулами

$$P = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'} , \quad (5.15)$$

$$R = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} . \quad (5.16)$$

За розрахованими значеннями  $P$  і  $R$  зі спеціальних допоміжних графіків, один з яких зображений на рис. 5.11, береться поправка  $\varepsilon \Delta t = f(P, R)$ .

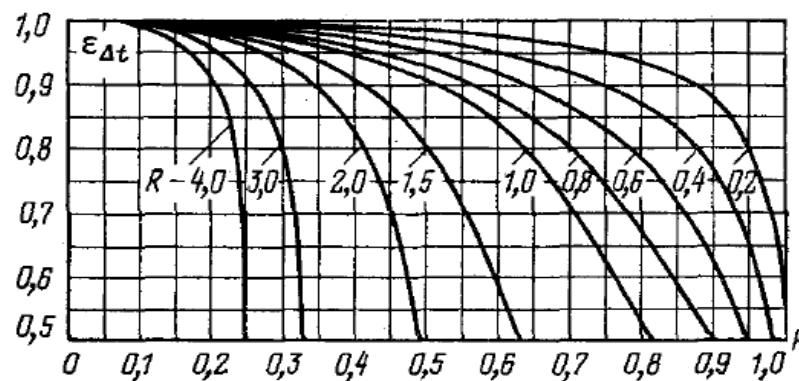


Рисунок 5.11. Графік для визначення поправки  $\varepsilon \Delta t$  при одночасному перехресному струмі і протитечії

Середній температурний напір в даному випадку знайдеться як

$$\Delta t_{\text{ср}}^{\text{ЛГ}} = \Delta t_{\text{ср}} \varepsilon_{\Delta t} , \quad (5.17)$$

де  $\Delta t_{\text{ср}}$  - среднелогарифмічеській температурний напір для протиточного теплообмінника, який визначається за формулою (5.12).

### 5.5 Визначення кінцевих температур теплоносіїв

У багатьох випадках за заданими температурами теплоносіїв на вході в теплообмінний апарат  $t_1'$  та  $t_2'$  °С, відомими значеннями площі поверхні теплообміну  $F$ , м<sup>2</sup>, і значенням коефіцієнта теплопередачі  $k$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К), необхідно

визначити кінцеві температури теплоносіїв  $t_1''$  та  $t_2''$ , °C, та теплову продуктивність  $Q$ , Вт, апарату.

Таке завдання доводиться вирішувати при перевірному розрахунку, коли теплообмінник вже є або, принаймні, спроектований. В основі розрахунків лежать рівняння теплового балансу (5.8) і теплопередачі (5.5).

Розглянемо випадок, коли температура уздовж поверхні теплообміну змінюється незначно ( $\Delta t_m / \Delta t_o \geq 0,6$ ) і розподіл температури по довжині поверхні можна прийняти лінійним. Для цього випадку середній температурний напір можна розрахувати за формулою (5.14).

З рівняння теплового балансу (5.8) визначаємо  $t_1''$  та  $t_2''$ , °C, по формулам:

$$t_1'' = t_1' - Q/W_1, \quad (5.18)$$

$$t_2'' = t_2' + Q/W_2. \quad (5.19)$$

Підставивши отримані значення  $t_1''$  та  $t_2''$  в рівняння (5.14), отримаємо:

$$\Delta t_{сеп}^{ap} = (t_1' - t_2') - \left( \frac{1}{2W_1} + \frac{1}{2W_2} \right) Q. \quad (5.20)$$

Підставивши праву частину виразу (5.20) в рівняння теплопередачі (5.5) та вирішивши останнє відносно  $Q$ , Вт, отримаємо

$$Q = \frac{t_1' - t_2'}{\frac{1}{kF} + \frac{1}{2W_1} + \frac{1}{2W_2}}. \quad (5.21)$$

Визначивши за формулою (5.21) значення  $Q$ , Вт, і підставивши його в рівняння (5.18) и (5.19), знайдемо **шукані** температури теплоносіїв  $t_1''$  та  $t_2''$ , °C, на виході з апарату.

Наведена методика розрахунку є наближеною і придатна тільки для орієнтовних розрахунків. У загальному випадку характер зміни температур уздовж поверхні теплообміну не є лінійним, а залежить від водяних еквівалентів, площі поверхні теплообміну і схеми руху теплоносіїв. Тому для прототечії і протитечії формули будуть різними.

Для прототечії схеми руху теплоносіїв отримані наступні рівняння:

$$t_1'' = t_1' - (t_1' - t_2')\Pi, \quad (5.22)$$

$$t_2'' = t_2' + (t_1' - t_2')\frac{W_1}{W_2}\Pi. \quad (5.23)$$

Здесь  $\Pi$  – вспомогательный параметр, который находится по формуле:

$$\Pi = \frac{1 - e^{-(1+W_1/W_2)kF/W_1}}{1 + W_1/W_2}. \quad (5.24)$$

Теплова продуктивність  $Q_{\Pi}$ , Вт, для проточного теплообмінника визначається за формулою:

$$Q_{\Pi} = W_1(t_1' - t_2') \quad (5.25)$$

Для протічній схеми руху теплоносіїв отримані наступні рівняння:

$$t_1'' = t_1' - (t_1' - t_2')Z, \quad (5.26)$$

$$t_2'' = t_2' + (t_1' - t_2')\frac{W_1}{W_2}Z. \quad (5.27)$$

Тут  $Z$  – допоміжний параметр, який знаходиться по формулі

$$Z = \frac{1 - e^{-(1-W_1/W_2)kF/W_1}}{1 - \frac{W_1}{W_2} \cdot e^{-(1-W_1/W_2)kF/W_1}} \quad (5.28)$$

Теплова продуктивність  $Q_Z$ , Вт, для протічній теплообмінника визначається за формулою

$$Q_Z = W_1(t_1' - t_2')Z. \quad (5.29)$$

Тепловая производительность  $Q_Z$ , Вт, противоточного теплообменника при одинаковых начальных температурах теплоносителей  $t_1'$  и  $t_2'$ , °С, всегда будет больше, чем тепловая производительность  $Q_{\Pi}$ , Вт, проточного теплообменника.

### **Контрольні питання до теми 5:**

1. Які пристрої називаються тепломасообмінними апаратами?
2. Як класифікуються тепломасообмінні апарати?
3. Опишіть принцип роботи і наведіть приклади рекуперативних, регенеративних, змішувальних тепломасообмінних апаратів і теплообмінників з внутрішніми джерелами енергії.
4. Вкажіть переваги і недоліки кожухотрубних і пластинчастих теплообмінників.
5. За якими схемами здійснюється рух теплоносіїв в тепломасообмінних апаратах?
6. Запишіть формулу для визначення водяного еквіваленту.
7. Які бувають види теплових розрахунків теплообмінників, в чому їх відмінність?
9. Напишіть основні рівняння, що застосовуються при тепловому розрахунку рекуперативних апаратів?