

## Конспект лекцій

## «ВИРОБНИЧІ ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ ОБ'ЄКТІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ»

## Введення

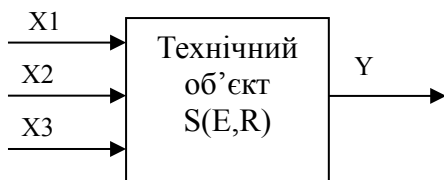
Сучасна промисловість характеризується швидким розвитком технологій і технічних засобів виробництва. Технологічні машини стають більш швидкодіючими та продуктивними, мають кращий коефіцієнт корисної дії, вищу надійність та простоту в обслуговуванні та управлінні з боку оператора, а технології більш ефективними та досконаліми. Основою прогресу виробництва є автоматизацію усіх його рівнів, починаючи від забезпечення бажаних або найліпших за заданих умов режимів роботи технологічного обладнання та їх вузлів до прийняття ефективних технологічних рішень за мінімальною участю людини.

З метою подальшого вивчення можливості вдосконалення виробничих процесів за рахунок автоматизації, в даній дисципліні буде розглянуто основні технологічні об'єкти та технічні системи що їх складають: фізичні та хімічні процеси, які протікають в технологічних об'єктах, реалізація та принцип дії окремих технічних систем а також їх математичні моделі та методи їх отримання.

## Лекція №1

## Загальна характеристика технологічних систем та об'єктів технології

*Система* це єдине ціле, що складається з певним чином зв'язаних між собою елементів. *Елемент* це неподільна на певній стадії дослідження частина системи. Тут та надалі будемо розглядати лише технічні (штучні системи) системи які створені цілеспрямовано за участю людини. З точки зору дослідження (аналіз, синтез) технічні системи розглядаються, як технічний об'єкт, який узагальнено можна представити наступним чином.



Де  $X_1$  — керовані та вимірювані величини, значення яких можна задати, кількісно визначити, наприклад, температура і час нагрівання зразка, швидкість переміщення, швидкість різання системи при механічній обробці.  $X_2$  — не керовані, але вимірювані величини, або обмежувальні вхідні величини, значення яких можна виміряти, але не можна задати, наприклад, величина припуску на заготовці, питома вага матеріалу, його теплопровідність, концентрація домішок у вихідних матеріалах.  $X_3$  — збурювальні величини, які впливають на процес функціонування, однак не можуть бути ні виміряні, ні цілеспрямовано змінені, наприклад, зношування з'єднань в обладнанні, його старіння, вібрації, зміщення налагоджених режимів.  $Y$  — вихідні параметри, що характеризують реакцію системи на зовнішні впливи. Розглянуті входи та виходи технологічного об'єкту, загалом, являють собою вектори. У випадку одиничної розмірності векторів технологічний об'єкт є одномірним. У протилежному випадку ТО є багатомірним. Внутрішні параметри об'єкта  $S = \{E, R\}$ , описують елементи системи  $E$  та зв'язки між ними  $R$ .

Технологічна система як складний технічний об'єкт має низку характерних ознак. За нормативним документом, **технологічна система** — це сукупність функціонально взаємозв'язаних засобів технологічного спорядження, предметів виробництва та виконавців для здійснення в регламентованих умовах виробництва заданих технологічних процесів та операцій.

**Технологічним об'єктом** (ТО) називають сукупність сумісно функціонуючого технологічного обладнання та технологічного процесу, що на них реалізується. До ТО відносять, як окремі технологічні агрегати і установки, що реалізують локальний технологічний процес, так і цілі виробництва. (наприклад, котельня, енергетична підстанція). В подальшому ми будемо розглядати технологічні об'єкт, як технічні системи що реалізують призначену функцію за рахунок спеціально організовані дії над ними.

Технологічна система як технічний об'єкт має два аспекти опису: *функціональний*, що являє собою опис процесу, який цією технологічною системою реалізується, і *технічний*, який включає опис технічних засобів та зв'язків між ними. Опис технічних засобів для виготовлення виробу визначає поняття **технологічного комплексу**— сукупність функціонально взаємозв'язаних засобів технічного спорядження для виконання в регламентованих умовах виробництва заданих технологічних процесів та операцій.

Процеси, які реалізують більшість технологічних систем, можуть бути розділені залежно від їх складності на: *виробничий процес, технологічний процес і технологічну операцію*.

**Виробничий процес** — це сукупність усіх дій людей та знарядь виробництва, необхідних на підприємстві для виготовлення чи ремонту виробів. Він включає як усі основні процеси, які безпосередньо пов'язані зі зміною стану предмета виробництва (механічної обробки, складання тощо) і необхідні для отримання із вихідних матеріалів готового виробу, так і допоміжні (транспортування предметів виробництва, їх зберігання, ремонт і обслуговування обладнання тощо), які виконуються на підприємстві і необхідні для здійснення основних. Кожен виробничий процес має в своєму складі технологічні процеси.

**Технологічний процес** — це частина виробничого процесу, що включає цілеспрямовані дії, пов'язані зі зміною та (або) визначенням стану предмета праці. Технологічні процеси розділяють за технологічним методом, покладеним в основу процесу. Розрізняють технологічні процеси механічної обробки, складання, термічної обробки, фарбування, переробки, пакування, лиття, штампування тощо.

Технологічні процеси, залежно від їх складності, поділяються на технологічні операції.

**Технологічна операція** — це завершена частина технологічного процесу, що виконується на одному робочому місці.

Залежно від виду технологічного процесу (ТП), який реалізується технічною системою, розрізняють виробничу систему, технологічну систему (ТС), операційну систему (рис. 1.1).

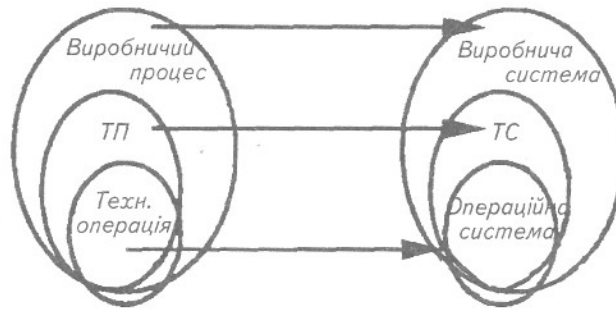


Рис 1.1. Співвідношення понять видів процесів та систем, що їх реалізують.

Метою функціонального проектування виробничої системи є створення структури виробничого процесу, технологічної системи — створення технологічного процесу, а операційної — технологічної операції.

### Контроль

Література: Б.О. Пальчевський. Дослідження технологічних систем.

Питання за лекцією:

1. Представлення технічної системи, як об'єкту дослідження;
2. Структурний опис технічного об'єкту, означення та зміст входів, виходів та внутрішніх параметрів його параметрів;
3. Означення технологічної системи та об'єкту;
4. Функціональний і технічний опис технологічної системи, поняття технологічного комплексу;
5. Означення виробничого та технологічного процесу;
6. Схема співставлення видів процесів та систем, що їх реалізують.

### Самостійна робота:

Питання на самостійний розгляд:

Література: Б.О. Пальчевський. Дослідження технологічних систем (ст. 48-51).

1. Види входів технологічної системи, як технічного об'єкту;
2. Класифікаційні ознаки технологічних систем;
3. Характеристика неперервних технологічних процесів;
4. Характеристика дискретних технологічних процесів;
5. Поняття робочого циклу технологічного процесу;
6. Види технологічних систем за технологічним методом;
7. Характеристика допоміжних технологічних процесів;
8. Означення технологічного та транспортного переходу.

## Лекція №2

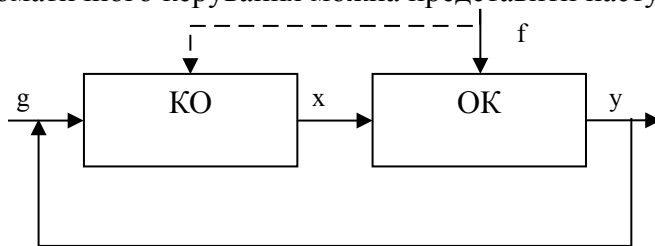
### Властивості технологічних систем, як об'єктів керування

Сенс створення та існування будь якої штучної, технічної системи, як це було сказано раніше, полягає у виконанні покладеної на неї функції, яку вона повинна виконувати в зазначених умовах. Таким чином постає питання, яким чином можна управляти технічною системою, для досягнення поставленої мети? Для відповіді на це запитання необхідним є дослідження того, як система реагує на зовнішні «природні» та штучні впливи. Для цієї мети, як правило, прибігають до деякого апарату аналогій, з іншою системою або явищем, яка реагує на в такий же спосіб, що і досліджувана система. Такий процес встановлення аналогії та закономірностей отримав назву моделювання. Тут і наділі

в різних проявах застосування, будемо розглядати один з типів моделювання а саме математичне моделювання.

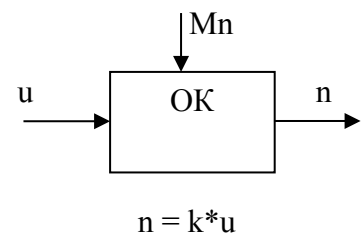
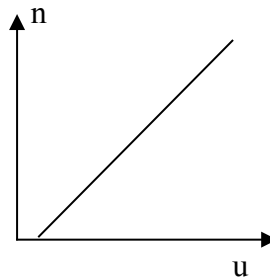
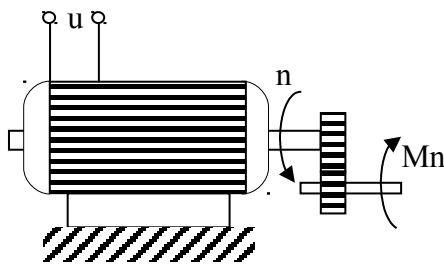
Для можливості забезпечення автоматизованого або автоматичного управління використовуються технічні системи, які формують певні впливи та технологічний об'єкт в такий спосіб, що цього або в повній або в частковій мірі достатньо, щоб цей об'єкт виконував покладену на нього функцію. Тут розглянемо такі технічні системи, в яких управління формується автоматично, що називаються системами автоматичного керування (САК).

Узагальнено технічну систему для випадку одномірного об'єкту, як систему автоматичного керування можна представити наступною структурною схемою.

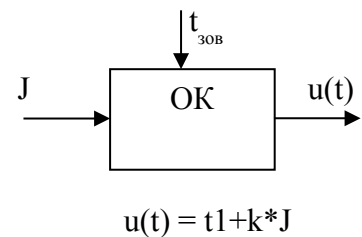
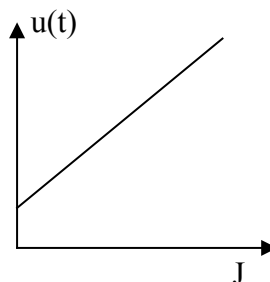
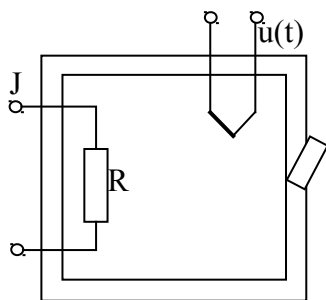


Тут КО – керуючий об'єкт, ОК – об'єкт керування, що є технічним об'єктом за лекцією 1,  $g$  – задавальна дія,  $f$  – збурювальна дія ( $X3$  та/  $X2$ ),  $x$  – керуюча дія ( $X1$ ),  $y$  – вихідна дія. В залежності від наявності зворотного зв'язку розрізняють розімкнені та замкнені САК.

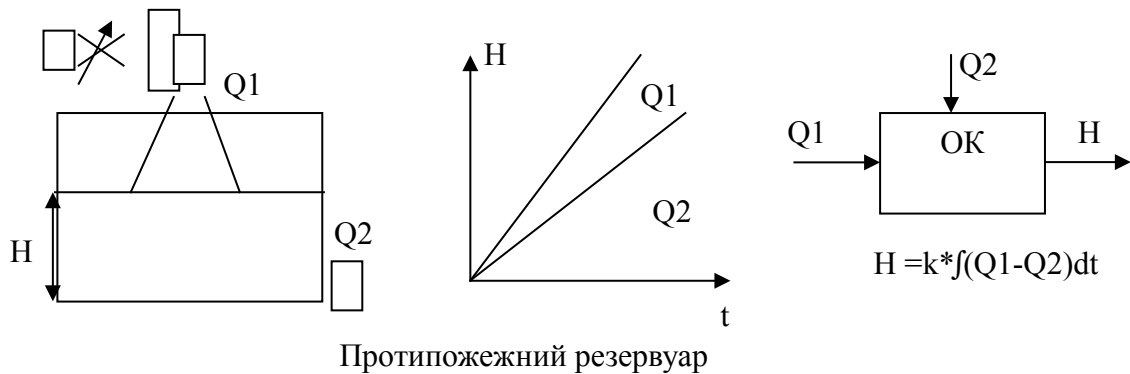
Розглянемо деякі типові технологічні системи як ОК.



Двигун постійного струму



Електропіч



### Ємність ОК.

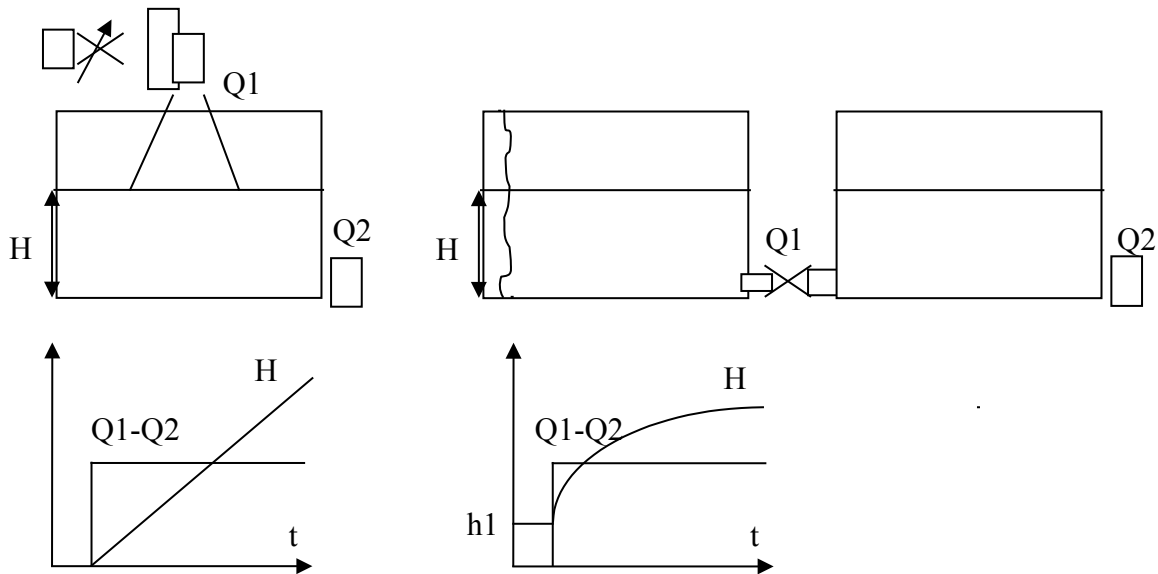
Загальною властивістю ОК є його здатність накопичувати ту чи іншу форму матерії: тепло, рідину, електричну енергію, тощо. Така здатність до накопичення може виражати як мету існування ОК (резервуар для води) так і обумовлюватись інерційними властивостями, які притаманні будь-якому матеріальному об'єкту або явищу. Конкретно до технічних систем, інерційну властивість можна пояснити неможливістю миттєвого перетворення одного виду енергії або матерії в іншу (наприклад, електричний двигун: електрична – механічна енергія, мішалка: компоненти – розчин). Властивість накопичення енергії виражається коефіцієнтом ємності.

*Коефіцієнт ємності* – кількість матерії (теплоти, рідини, енергії, тощо), яку необхідно підвести чи відвести від ОК для зміни регульованої величини на одиницю. Наприклад: кількість рідини в м<sup>3</sup> для зміни рівня води в резервуарі на 1м, об'єм газу в м<sup>3</sup> для підвищення температури в топці на 1 градус.

Коефіцієнт ємності не обов'язково є константою (виражає лінійну залежність від вимірюваних вхідних величин ОК). Наприклад, якщо стінки резервуара мають конусоподібну форму. Коефіцієнт ємності виражає інерційність технологічного об'єкту. Чим він менше, тим швидше об'єкт реагує на зміну вхідних матеріальних потоків, що необхідно враховувати при управлінні.

### Самовирівнювання ОК.

Процеси, що протікають в ОК характеризуються здатністю до самовирівнювання, яка може бути додатною та від'ємною. Додатне самовирівнювання характеризує здатність вихідного (регульованого) параметра ОК прагнути до певного постійного у часі значення при змінних вхідних параметрах та за відсутністю КО. Прикладом ОК з властивістю самовирівнювання є повітряна куля, при зміні ваги баласту якої досягається певна висота. Приклади ОК з самовирівнюванням та без самовирівнювання



### Ступінь самовирівнювання ОК.

Ступінь самовирівнювання ОК визначає, наскільки сильно впливає зміна певного вхідного параметру ОК на вихідний. Він виражається коефіцієнтом самовирівнювання:

$$\rho = \frac{d(q_1 - q_2)}{dh} = \frac{dQ}{dh} \approx \frac{\Delta Q}{\Delta h} = \frac{\Delta x}{\Delta y},$$

де  $q_1$  – відносний приток матерії до ОК,

$q_2$  – відносний расход,

$h$  – відносне відхилення вихідного параметру ОК.

Із поняттям ступеню самовирівнювання пов'язаний коефіцієнт навантаження ОК

$$z = \frac{\rho}{\rho_{\max}},$$

де  $\rho$  – коефіцієнт самовирівнювання при номінальному режимі роботи ОК,

$\rho_{\max}$  – коефіцієнт самовирівнювання при граничному (критичному) режимі роботи

ОК.

(Приклади ОК: із ідеальним самовирівнюванням: Кип'ятіння води та резервуар з переливом –  $\Delta x \neq 0$ ,  $\Delta y = 0$ ?  $\rho = \infty$ ; ОК: із додатним чи від'ємним самовирівнюванням: резервуар з керуванням по притоку (расходу) –  $\Delta x > 0$ ,  $\Delta y > 0$ , ( $\Delta y < 0$ ),  $\rho > 0$ , ( $\rho < 0$ ); ОК: без самовирівнювання: резервуар із сталим расходом –  $\Delta x < \infty$ ,  $\Delta y = \infty$ ,  $\rho = 0$ .(додаток 1))

### Контроль

Питання за лекцією:

1. Які системи називають системами автоматичного керування (САК);
2. Узагальнена структурна схема САК, позначення та зміст входів і виходів;
3. Поняття та зміст ємності ОК;
4. Означення коефіцієнта ємності ОК, залежність від вимірюваних вхідних величин;
5. Поняття та зміст властивості самовирівнювання ОК. Приклад.
6. Поняття ступеню самовирівнювання ОК. Коефіцієнт самовирівнювання.

7. Зміст та вираз коефіцієнту навантаження ОК.

**Самостійна робота:**

Питання на самостійний розгляд:

Література: Б.О. Пальчевський. Дослідження технологічних систем (ст. 27-32).

1. Поняття моделі та моделювання. Основні вимоги, що висуваються до моделей;
2. Зміст створення моделей при невідомій структурі технічного об'єкта;
3. Принцип створення моделі об'єкта на основі моделей простих явищ. Приклад конструювання складних моделей.

**Лекція №3**

**Математичні моделі, характеристики і показники технологічних систем та їх елементів**

Математичною моделлю є сукупність математичних важностей, що визначають стан та вихідний сигнал системи (функцію) від вхідних впливів. Умови функціонування технічної системи, як ОК визначають поняття режиму роботи. З точки зору теорії управління виділяють 2 режими: статичний (усталений) та динамічний (перехідний). (структурна схема ОК). Статичний режим характеризується постійністю параметрів ОК  $x, u, f$ . Залежність вихідного (керуемого) параметра ОК від вхідного називається *статичною характеристикою* технічної або технологічної системи за заданим вхідним параметром:  $y = f(x)$ . В залежності від характеристики, об'єкти можуть бути лінійними або нелінійними. Крутизна статичної характеристики визначає чутливість ОК, як тангенс кута нахилу до вісі вхідного параметру. Статичний режим роботи описує статична модель системи.

Динамічний режим – це такий режим роботи системи, при якому у часі змінюється хоча б один з параметрів ОК. Динамічна характеристика описується виразом  $y(t) = f(x(t))$ . Динамічна модель описує динамічний режим роботи системи. При створенні моделей використовуються два підходи: аналітичний та експериментальний. Перший використовується до більш вивчених ОК із відомими закономірностями та нескладною внутрішньою структурою. Другий більш універсальний і широко застосовується при складанні моделей складних ТС.

**Математичний апарат та моделі при дослідженні ТС.**

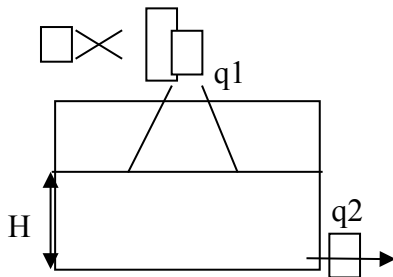
Розглядаючи ТС, як САК в самому загальному представленні розрізняють лінійні та нелінійні САК. В свою чергу лінійні поділяють на неперервні та дискретні. В залежності, зокрема, від типу САК використовується свій математичний апарат при складанні моделей ТС. У випадку неперервних ОК використовується апарат інтегро-диференціальних обчислень, у випадку дискретних – диференційно-різницевих. Нелінійні ОК найбільш складні у відношенні досліджень та проектування.

Більшість процесів в ТС можна розглядати як лінійні. Багато з них неперервні за суттю фізичних процесів. При їх складанні, як відмічалось, застосовують диференціальні рівняння, що складаються на основі фізичних та хімічних законів.

Розглянемо побудову математичних моделей роботи двох простих ТС.

**Резервуар із керуванням розходу.**

Вхідними даними є до складання моделі є:



$q1$  – керований приход рідини в резервуар;

$q2$  – расход рідини;

$h$  – керуємий рівень рідини;

$S$  – площа перерізу резервуару;

$q10, q20$  – значення расходів, що встановились;

$q10=q20$  – умова рівноваги ОК –  $\Delta h=0$ .

Зобразимо структурну схему ОК:



Якщо умова рівноваги порушується, рівень рідини буде змінюватись із швидкістю прямо пропорційній різниці:

$$(q10 + \Delta q1) - (q20 + \Delta q2) = \Delta q$$

$$\Delta q = \Delta q1 - \Delta q2$$

Та обернено пропорційній площі перерізу резервуару

$$\frac{d\Delta h}{dt} = \Delta q \frac{1}{S}$$

Расход рідини залежить від гідростатичного тиску, що визначається висотою рівня рідини:

$$q2 = f(h)$$

При малій зміні рівня, наближено можна вважати

$$\Delta q2 = a \cdot \Delta h,$$

Де  $a$  залежить від  $\Delta h$ , але при малих змінах останнього його можна вважати константою. Тоді:

$$S \frac{d\Delta h}{dt} + a\Delta h = \Delta q1$$

Поділимо вираз на  $a$

$$S \frac{d\Delta h}{a \cdot dt} + \Delta h = \Delta q1 / a$$

Та зробимо заміну

$$S / a = T; 1 / a = K,$$

тоді:

$$T \frac{d\Delta h}{dt} + \Delta h = K \cdot \Delta q1$$



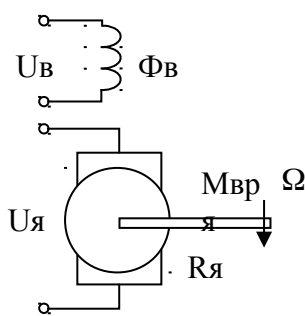
Якщо ОК розглядається в статичному режимі ( $\frac{d\Delta h}{dt}=0$ ) отримаємо рівняння статички

$$\Delta h = K \cdot \Delta q_1.$$

В загальному позначенні входів-виходів отримаємо рівняння динаміки ОК

$$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K \cdot x(t).$$

**Двигун постійного струму із незалежним збудженням.**



Вхідними даними є до складання моделі є:

$U_b$  – напруга якірного кола;

$R_b$  – опір якірного кола;

$\Omega$  – кутова швидкість обертання валу;

$M_{вр}$  – обертаючий момент двигуна;

$C_e$  – електро-механічна постійна двигуна;

$C_m$  – механо-електрична постійна двигуна;

Рівняння рівноваги двигуна визначається виразом:

$$I_a = \frac{U_a - C_e \cdot \Omega}{R_a}$$

$$M_{вр} = C_m \cdot I_a$$

В усталеному режимі роботи, коли  $\Omega$  - постійна  $M_{вр} = M_n$  (момент навантаження):

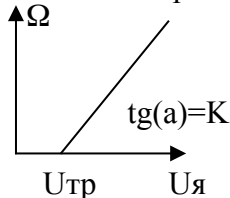
$$\Omega_{уст} = \frac{U_a}{C_e} - \frac{M_n}{C_m \cdot C_e} R_a.$$

Прийнявши  $\frac{M_n}{C_m} R_a = U_{тр}$  та  $\frac{1}{C_m} = K$  отримаємо кінцеве рівняння статичного режиму

роботи двигуна:

$$\Omega_{уст} = K(U_a - U_{тр}).$$

Статична характеристика ТО виглядає наступним чином:



В динамічному режимі крім статичного моменту навантаження діє динамічний момент – момент інерції  $J$ . Із рівноваги моментів впливає:

$$M_{вр} = M_n + J \frac{d\Omega}{dt}.$$

З рівняння рівноваги у статичному режимі отримаємо:

$$\frac{C_m \cdot U_a - C_m \cdot C_e \cdot \Omega}{R_a} = M_n + J \frac{d\Omega}{dt},$$

або, переписавши:

$$\frac{J \cdot R_a}{C_m \cdot C_e} \frac{d\Omega}{dt} + \Omega = \frac{1}{C_e} (U_a - U_{тр}).$$

Роблячи заміну:  $\frac{J \cdot R_{\text{я}}}{C_{\text{м}} \cdot C_{\text{е}}} = T$  та  $\frac{1}{C_{\text{е}}} = K$  кінцево отримаємо:

$$T \frac{d\Omega}{dt} + \Omega = K(U_{\text{я}} - U_{\text{тп}})$$

Представляючи математичну модель ОК у вигляді структурної схеми



Маємо наступні вирази:

- для статичного режиму роботи:  $y = K(x - x_0)$ ,
- для динамічного:  $T \frac{dy}{dt} + y = K(x - x_0)$ .

Для отримання значення вихідного параметру ОК в динамічному режимі роботи необхідно розв'язати лінійні однорідні диференціальні рівняння.  
(показники самостійно)

### Контроль

Питання за лекцією:

1. Які з точки зору теорії автоматичного керування існують режими роботи технічних систем, чим вони характеризуються;
2. Що називається статичною характеристикою системи, навести приклад;
3. Що називається чутливістю ОК, навести приклад на довільній лінійній статичній характеристиці.
4. На які системи в загальному представленні з токи зору ТАК поділяються ТС, надати коротку характеристику;
5. Рівняння статички на динаміки резервуара з керуванням розходу.
6. Рівняння статички на динаміки двигуна постійного струму з незалежним збудженням.

### Самостійна робота:

Питання на самостійний розгляд:

Література: Б.О. Пальчевський. Дослідження технологічних систем (ст. 57-62).

1. Поняття надійності та безвідмовності, технологічних систем;
2. Поняття довговічності та ремонтпридатності технологічних систем;
3. Поняття відновлювальності ТО.
4. Показники безвідмовності ТС: наробка між відмовами, ймовірність безвідмовної роботи.
5. Показники безвідмовності ТС: ймовірність відмови, середня наробка на відмову
6. Продуктивність ТС та коефіцієнт використання технологічної системи.

### Лекція №4

#### Основи теплообмінних процесів.

Під теплообміном розуміють процес перенесення теплової енергії поміж речовинами, що приймають в ньому участь в напрямку менш нагрітого тіла (або тіл). Розрізняють три види теплообміну: теплопровідність, теплообмін через конвекцію та теплообмін через випромінювання. Сукупність значень температури в усіх точках простору, що

розглядається, у певний момент часу називають *температурним полем*. Математично температурне поле задають як функцію координат:

$$t = f(x, y, z)$$

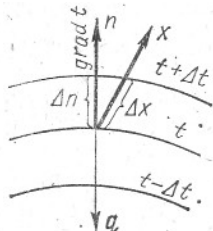


Рис.4.1. Температурне поле

В залежності від кількості напрямків, в яких змінюється температурне поле, воно може бути одно- дво- або тривимірним.

Поверхня, в усіх точках якої температура однакова, називається *ізотермічною*. Сукупність ізотермічних поверхонь визначають сім'ю ізотерм. Температура змінюється лише в напрямках, що перетинають ізотермічні поверхні (рис. 4.1). При цьому найбільша зміна температури на одиницю довжини відбувається в напрямку нормалі  $n$  до ізотермічної поверхні. У разі контакту поверхонь двох тіл із різною поверхневою температурою, різниця температур між ними вздовж нормалі до ізотермічних поверхонь називається *температурним напором*.

Теплові процеси можуть бути стаціонарними – без зміни форми та положення ізотермічних поверхонь, та нестаціонарними.

В основі теплових процесів покладено рівняння теплового балансу. Якщо є два взаємодіючих теплоносія із відмінною температурою то теплоємність кожного з них визначається наступним виразом:

$$Q = C \cdot G \cdot t^0,$$

де  $C$  – питома теплоємність речовини;

$G$  – кількість теплоносія;

$t$  – температура.

В результаті теплообміну кількість відданого та отриманого тепла становить:

$$\Delta Q_z = \Delta Q_x + \Delta Q_{\text{втрат}}.$$

Зазвичай  $\Delta Q_{\text{втрат}}$  не перевищує 2-3%.

### Теплопровідність.

Теплопровідність — вид теплообміну, при якому перенесення теплової енергії в нерівномірно нагрітому середовищі відбувається без макроскопічного руху середовища. Умовою теплопровідності є безпосередній контакт взаємодіючих тіл за рахунок нерівномірного розподілу температури в різних їх точках контакту.

*Тепловим потоком* (потужністю теплового потоку)  $\Phi$  називають кількість теплоти, яка проходить за одиницю часу через довільну поверхню. Вектор теплового потоку завжди напрямлений у бік зменшення температури. Одиниця теплового потоку — ват (Вт).

Кількісно інтенсивність теплообміну характеризується *поверхневою густиною теплового потоку*, яка є відношенням теплового потоку  $\Phi$  до одиниці, площі  $A$  поверхні, через яку проходить тепловий потік:

$$q = \Phi / A$$

Одиниця вимірювання густини теплового потоку — ват на квадратний метр (Вт/м).

Основний закон теплопровідності описується наступним виразом, що називається законом Фур'є:

$$q = -\lambda \partial t / \partial n = -\lambda \text{ grad } t$$

Коефіцієнт пропорційності  $\lambda$  є фізичний параметр речовини, що називається коефіцієнтом *теплопровідності*, яка характеризує здатність речовини проводити теплоту. Одиниця теплопровідності — ват на метр-кельвін [Вт/(м • К)]. Теплопровідність дорівнює густині теплового потоку через одношарову стінку при різниці температур, що дорівнює 1°. Чим більше значення  $\lambda$ , тим кращим провідником теплоти є речовина. Матеріали, теплопровідність яких менша за 0,2 Вт/(м • К), називають *теплоізоляційними*.

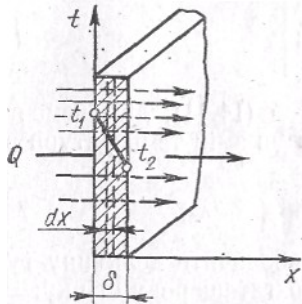
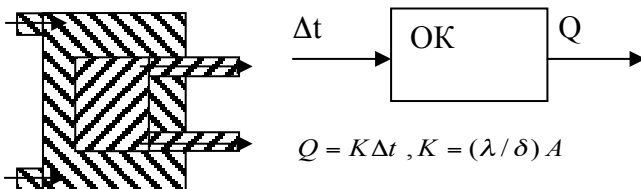


Рис.4.2. Тонка одношарова стінка

Розглядаючи процес теплопровідності через одношарову стінку (рис 4.2) загальна кількість теплоти що проходить через неї визначається наступним виразом:

$$Q = q A \tau = (\lambda / \delta) \Delta t A \tau$$

Де  $\delta$  - товщина стінки,  $\lambda/\delta$  - теплова провідність стінки,  $A$  - площа поверхні передачі,  $\Delta t$  - різниця температур поверхонь,  $\tau$  - час теплообміну. Спрощена модель теплообмінника:



### Конвекційний теплообмін.

*Конвекцією* називають процес перенесення теплоти під час переміщення макрочасток (газу або рідини). *Конвективним* називають теплообмін, зумовлений спільною дією конвективного і молекулярного перенесення теплоти, здійснюється одночасно двома способами: конвекцією і теплопровідністю.

Конвективний теплообмін між середовищем, що рухається, і поверхнею, яка відокремлює його від іншого середовища (твердого тіла, рідини чи газу), називають *тепловіддачею*.

Тепловий потік  $\Phi$ , що проходить через поверхню твердого тіла, що омивається конвекційним потоком, визначається наступним чином:

$$\Phi = \alpha A (t_p - t_{cm})$$

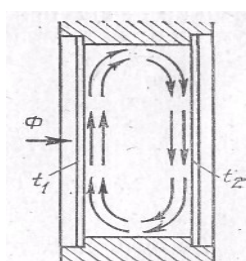


Рис.4.3. Теплообмін конвекцією

де  $A$  поверхня, яка бере участь у теплообміні,  $t_{ст}$  — температура поверхні стінки, а  $t_p$  — температура середовища, що омиває поверхню стінки. Коефіцієнт пропорційності  $\alpha$ , який враховує конкретні умови теплообміну між рідиною і поверхнею тіла, називають *коефіцієнтом тепловіддачі*.

Густина теплового потоку визначається наступним чином

$$q = \alpha (t_p - t_{cm})$$

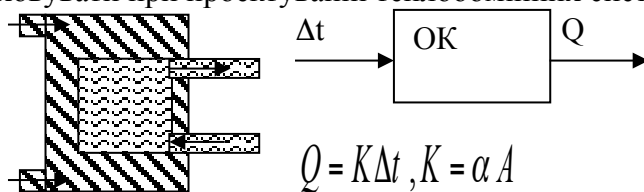
Тепловіддача є досить складним процесом, і коефіцієнт тепловіддачі залежить від багатьох факторів, основними з яких є: а) причина виникнення течії рідини; б) режим течії рідини (ламінарний чи турбулентний); в) фізичні властивості рідини; г) форма і розміри тепловіддавальної поверхні.

За причиною виникнення рух рідини буває вільним і вимушеним.

Вільний (тепловий) рух виникає в нерівномірно прогрітому середовищі, через властивість зменшення щільності нагрітих тіл, що підіймаються над більш холодними. В

такий спосіб створюється природна циркуляція робочого тіла в замкненому середовищі, прикладом якого може бути віконна рама (рис 15.1).

*Вимушений рух* робочого тіла зумовлений дією сторонніх збудників: вентиляторів, насосів тощо. Інтенсивність теплообміну визначається швидкістю руху робочого тіла та режимом його течії. При *ламінарній течії* частинки рідини рухаються не змішуючись при цьому теплообмін здійснюється в основному шляхом теплопровідності. При *турбулентній течії* теплота всередині потоку поширюється як теплопровідністю, так і перемішуванням майже всієї маси рідини та є більш ефективним. Форми і розміри тепловіддавальної поверхні істотно впливають на тепловіддачу, що також необхідно враховувати при проектуванні теплообмінних систем. Спрощена модель теплообмінника:



#### Теплообмін випромінюванням.

Процес випромінювання полягає у здатності тіла випускати електромагнітні хвилі, що при контакті з іншим тілом передають власну кінетичну енергію. Випромінювання різних тіл залежить від природи тіла, його температури і стану поверхні. Випромінювання, яке визначається тільки температурою та оптичними властивостями випромінюючого тіла, називають *тепловим випромінюванням*. До них належать світлові (видимі) і теплові (інфрачервоні) промені.

*Потоком випромінювання*  $\Phi$  називають випромінювання, що відбувається за одиницю часу через довільну поверхню:

$$\Phi = Q / \tau$$

*Поверхневою густиною*  $q$  потоку випромінювання називають відношення потоку випромінювання до площі поверхні

$$q = \Phi / A$$

де  $A$  — площа поверхні, через яку проходить потік випромінювання  $\Phi$ .

З усього потоку випромінювання  $\Phi$ , що падає на поверхню тіла, частина  $\Phi_a$  поглинається тілом, частина  $\Phi_r$  відбивається від нього, а частина  $\Phi_d$  проходить крізь тіло. В залежності від цього, розрізняють тіла, близькі до абсолютно чорного, білого чи прозорого.

Закон Стефана-Больцмана. Кількість енергії, що випромінюється в одиницю часу у вакуум прямо пропорційна площині тіла та абсолютній його температурі в 4 ступені:

$$Q = C \cdot A \cdot (T/100)^4,$$

де  $C$  — коефіцієнт випромінювання тіла:  $C = \xi \cdot C_0$ ,  $C_0$  — к-т випромінювання абсолютно чорного тіла  $C_0 = 5,68 \text{ Ват}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ,  $\xi$  — ступінь чорноти тіла (сталь — 0.82, алюміній — 0.11).

Кількість енергії, що випромінюється в одиницю часу у менш нагрітій простір становить:

$$Q = C_0 \xi \cdot A \cdot ((T/100)^4 - (T_p/100)^2)$$

На відміну від твердих тіл, гази випромінюють енергію не лише поверхнею а всім об'ємом а також в певних інтервалах довжини хвиль. Значною випромінювальною і вбирною здатністю, що важливо для практики, наділені багатоатомні гази (вуглекислота, водяна пара, аміак та ін.)

**Контроль**

Питання за лекцією:

1. Поняття теплообміну та його види;
2. Означення теплового потоку та його густини;
3. Поняття температурного поля та ізотермічної поверхні;
4. Закон теплового балансу, сутність та рівняння;
5. Означення теплопровідності. Тепловий потік та його густина при теплообміні теплопровідністю.
6. Рівняння кількості теплоти через одношарову стінку, спрощена модель теплообмінника, як ОК;
7. Означення конвекції, тепловий потік та його густина при конвективному теплообміні;
8. Рівняння кількості теплоти через що передається при конвективному теплообміні, спрощена модель теплообмінника, як ОК;
9. Охарактеризувати теплообмін випромінюванням, потік випромінювання та його густина при теплообміні випромінюванням;
10. Закон Стефана-Больцмана. Поняття чорного тіла. Класифікація тіл за здатністю до поглинання випромінювання.

**Самостійна робота:**

Питання на самостійний розгляд:

Нема

**Лекція №5****Теплообмінні апарати виробництва та технологічні способи отримання тепла.**

Теплообмін між гарячим і холодним середовищем через роздільну тверду стінку є одним з найважливіших і часто використовуваних у техніці процесів. Наприклад, утворення пари заданих параметрів у котлоагрегатах ґрунтується на процесі передавання теплоти від одного теплоносія до іншого. У багатьох теплообмінних пристроях, які застосовуються в різних галузях промисловості, основним робочим процесом є процес теплообміну між теплоносіями. Такий теплообмін називають *теплопередачею*.

Теплопередача в реальних ТС виконується одночасної декількома видами теплообміну. Широкого використання знайшов вид теплопередачі на основі теплообміну теплопровідністю та конвекцією.

*Теплообмінним апаратом* називають пристрій, призначений для нагрівання чи охолодження теплоносія. В ягості теплоносія застосовують рідину або газ. Теплоносії бувають *гріючими* і *нагрівними*. Так, наприклад, гарячий газ у топці котла є гріючим теплоносієм, а вода в котлі — нагрівним; вода в опалювальному радіаторі — гріючий теплоносій, а повітря, що розносить теплоту по приміщенню, — нагрівний.

*За принципом дії* теплообмінні апарати поділяють на рекуперативні, регенеративні і з внутрішнім тепловиділенням.

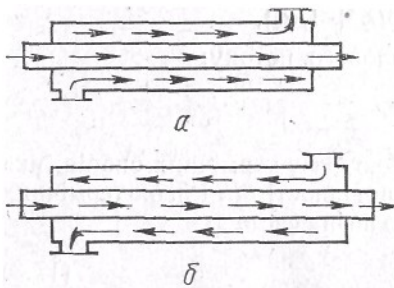


Рис.5.1. а) прямоточні, б) протитічний теплообмінники

У **рекуперативних** теплообмінних апаратах теплота від гріючого теплоносія до нагрівного передається через роздільну (звичайно металеву) стінку. До них належать: парогенератори, пароперегрівники, водопідігрівники, повітряпідігрівники й різні випарні апарати.

Рекуперативні теплообмінні апарати поділяють на прямоточні, протитечійні, перехресної течії та змішаної течії.

У прямоточному теплообмінному апараті холодний і гарячий теплоносії проходять паралельно в одному напрямку (рис. 5.1, а). У протитечійному апараті теплоносії проходять паралельно, але в протилежних напрямках (5.1, б).

Рекуперативні апарати прості за будовою, компактні і забезпечують сталість температур теплоносіїв у часі. В основному апарати виготовлено з металу. Теплотехнічно протитечійні апарати більш вигідні, ніж прямоточні. Критерієм для оцінки їхньої ефективності є середній температурний напір  $\Delta t_{cp}$  тобто середня різниця температур гріючої і нагрівної рідини. У протитечійній схемі майже завжди,  $\Delta t_{cp}$  більший, ніж у прямоточній, тому вони більш компактні та металоємні.

У **регенеративних** теплообмінних апаратах та ж сама поверхня нагрівання (чи охолодження) по черзі омивається гарячим та холодним теплоносієм через певні проміжки часу. Спочатку по каналах регенератора пропускають гарячий теплоносій — продукти згоряння доменних і мартенівських печей, вагранок тощо. Поверхня нагрівання регенератора, відбираючи теплоту від гарячих газів, нагрівається, а потім віддає цю теплоту холодному теплоносію.

Регенеративні теплообмінники застосовують у металургійних, скловарних та інших аналогічних печах, куди треба подавати підігріте повітря.

У **змішувальних теплообмінниках** теплообмін здійснюється при безпосередньому стиканні і змішуванні гарячого й холодного теплоносіїв. Змішувальними теплообмінними апаратами є градирні, скрубери тощо.

**Апарати з внутрішнім тепловиділенням** дістали таку назву тому, що всередині самого апарата відбувається якийсь технологічний процес з виділенням теплоти. Для того щоб охолодити стінки апарата, застосовують теплоносії (не два, як звичайно, а один), який забирає теплоту від стінок і таким чином охолоджує їх. До таких апаратів належать ядерні реактори, електронагрівники та інші пристрої, в яких технологічний процес відбувається з виділенням теплоти і підвищенням температури.

На ступінь теплопередачі впливає стан поверхонь, через які відбувається теплообмін. Забруднення поверхонь стінок пилом, сажею, накипом, призводить до зниження коефіцієнту теплопровідності до 0,1... 0,2 Вт/(м • К) та аварійних ситуацій.

Розглянемо спрощену модель рекуперативного теплообмінника. Теплопередача відбувається на основі теплообміну теплопровідністю та конвекцією через одношарову

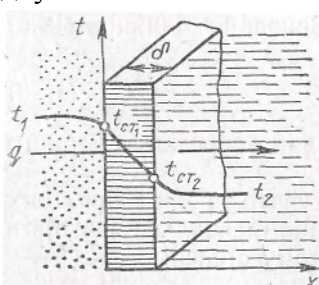


Рис.5.2. Теплообмін двох середовищ через стінку.

стінку (рис. 5.2), товщина якої дорівнює  $\delta$ . Теплопровідність матеріалу стінки дорівнює  $\lambda$ . Температури середовищ, що омивають стінку зліва й справа, відомі і дорівнюють  $t_1$  і  $t_2$ . Припустимо, що  $t_1 > t_2$ . Тоді температури поверхонь стінки будуть відповідно  $t_{cr1} > t_{cr2}$ . Треба визначити густину теплового потоку  $q$ , що проходить крізь стінку від гріючого середовища до нагрівного.

У стаціонарному режимі роботи ТС, теплота, віддана стінці першим теплоносієм (гарячим), передається через неї другому теплоносію (холодному). Теплообмін відбувається в 3 фази: конвекція-теплопровідність-конвекція. Оскільки площа контакту в усіх фазах однакова, то густина теплового потоку відповідно також буде однаковою в процесі теплообміну.

$$q = \alpha_1(t_1 - t_{cm1})$$

$$q = (\lambda / \sigma)(t_{cm1} - t_{cm2}) .$$

$$q = \alpha_2(t_{cm1} - t_2)$$

Повний температурний напір дорівнює:

$$t_1 - t_2 = q(1/\alpha_1 + \sigma/\lambda + 1/\alpha_2) ,$$

звідки знайдемо значення густини теплового потоку:

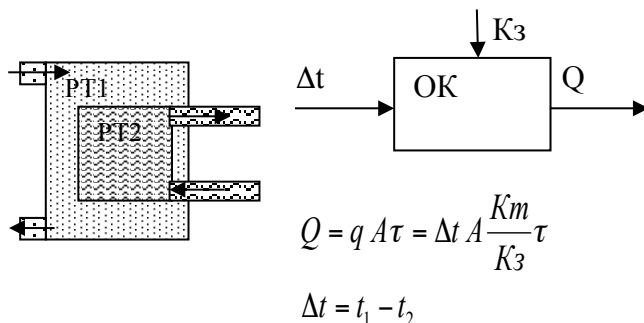
$$q = (t_1 - t_2) / (1/\alpha_1 + \sigma/\lambda + 1/\alpha_2)$$

Знаменник останнього виразу представляє собою коефіцієнт теплопередачі  $K_3$ .

Враховуючи втрати через стан забруднення поверхон ( $K_3$ ) запишемо вираз для кількості теплоти, що передається нагрівному теплоносію

$$Q = q A \tau = \Delta t A \frac{K_m}{K_3} \tau$$

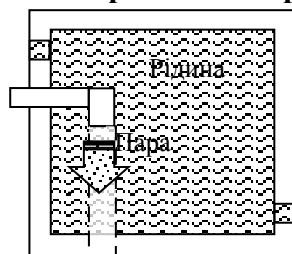
$$\Delta t = t_1 - t_2$$



### Шляхи отримання тепла в теплообмінних апаратах.

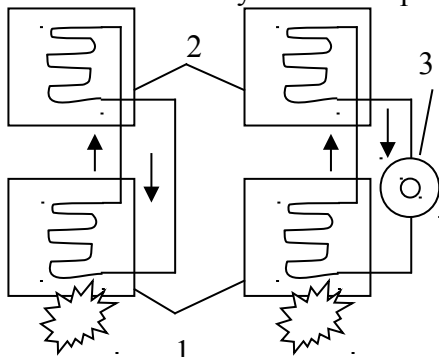
Для отримання та передачі необхідної кількості тепла в теплообмінниках використовують ряд технологічних способів. Наведемо декілька основних, що знайшли широке використання у виробничих процесах.

#### Нагрівання паром.



Водяна пара є одним з найпоширеніших теплоносіїв з температурою 150-170гр. Перевагами використання пари є велика теплоємність та тепловіддача, зручність транспортування та легкість у регулюванні температурного режиму. Використовують насичену пару (6-10ат.) та відпрацьовану (2-3ат.). Нагрів паром може виконуватись у рекуперативних (регенеративних) теплообмінниках – глуха пара, та змішувальних – гостра пара. Для отримання температури >170гр використовують пару висококиплячих рідин та ртуті (t до 500гр.). Важливим контрольованим параметром парової ТС є тиск з ростом якого пара перегрівається та може бути вибухонебезпечною.

**Нагрівання горячою рідиною.** Нагрівання, як правило виконується в рекуператорах із вільним або вимушеним обертанням теплоносія.

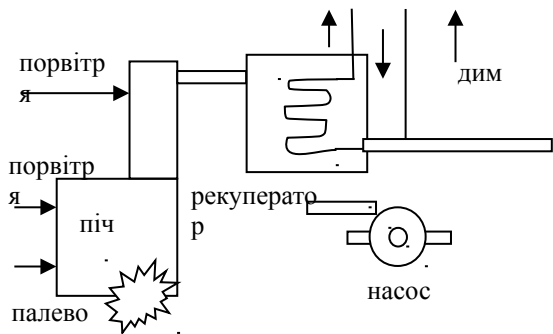


1 – піч (топка), 2 – теплообмінник, 3 – насос.

В якості рідини використовують зазвичай воду при тиску до 225ат з температурою до 350гр або розплавлені легкоплавкі метали і сплави(олово, свинець вісмут) з температурою до 1000гр.

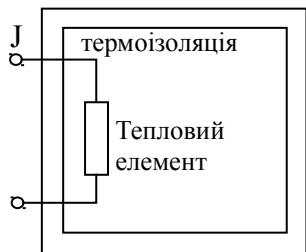


**Нагрівання гарячими газами.** Гарячими газами виступають топкові гази високої температури, що змішуються з повітрям та пропускаються через теплообмінники.



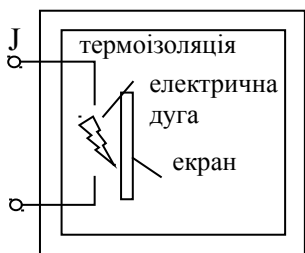
Відпрацьований газ виводиться в повітря у вигляді диму. При даному способі нагрівання можливе отримання температури теплоносія до 1000гр. Недоліками є низька теплоємність, не транспортабельність топкових газів, забруднення оточуючого середовища.

**Нагрів електричним струмом.** Розрізняють наступні типи нагріву даного виду:



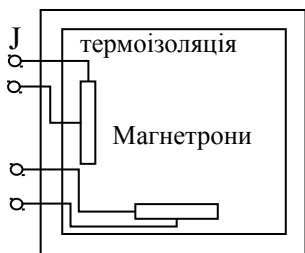
нагрів за рахунок електроопору, електричною дугою та діелектричний нагрів.

При нагріві опором застосовуються теплові елементи які передають тепло конвекцією або випромінюванням. Температура нагріву ТС може складати 1000-1100 гр. Регулювання температури виконується силою струму або кількістю увімкнених теплових елементів.



При нагріванні дугою використовують дугові печі з температурою нагріву до 2000 гр. Розрізняють нагрівання відкритою дугою, коли утворена поміж електродами електрична плазма безпосередньо опромінює ТС, та закритою – нагрів за рахунок теплопровідності.

**Діелектричне нагрівання – утворення тепла за рахунок нагрівання діелектриків у змінному електричному полі.**



Діелектрик підключають до джерела СВЧ, що викликає поляризацію вільних заряджених частинок та виникненню струму зміщення, протікання якого супроводжується виділенням теплоти. При частотах. До 300Мгц я якості діелектрика використовують конденсатори, при більших – об'ємні резонатори (мікрохвильова піч). Перевагами даного методу є швидкість та легка керованість процесу, можливість нагрівання матеріалів з низькою теплопровідністю.

**Контроль**

Питання за лекцією: Плановский А.Н., Ромм В.М. Процесы и аппараты химической технологии. – М.: "Химия", 1967 г.

1. Означення та класифікація теплообмінних апаратів;

2. Рекуперативні теплообмінні апарати, із різновиди, критерій оцінки;
3. Регенеративні теплообмінні апарати, принцип дії та приклади застосування;
4. Змішувальні теплообмінні апарати та апарати з внутрішнім тепловиділенням, приклади теплообмінних апаратів;
5. Спрощена модель рекуперативного теплообмінного апарата. Структурна схема та математичні співвідношення;
6. Способи отримання тепла у виробництві;
7. Нагрівання паром, гарячою рідиною та газами. Принцип та спрощене функціональне представлення апаратів;
8. Нагрівання електричним струмом. Способи нагрівання. Принцип та спрощене функціональне представлення апаратів.

**Самостійна робота:** Горбис Э.Р., Календерьян В.А. Теплообменники с проточными дисперсными теплоносителями. – М.: “Энергия”, 1975 г. Друскин Л.И. Сжигание газа в промышленных печах и котлах. М., 1962 г.(Лес3Т2.doc)

Питання на самостійний розгляд:

1. **Топкові пристрої.** Означення та призначення. Класифікація за способом спалення енергоносія.
2. **Шаровий спосіб спалення енергоносія.** Принцип, ілюстрація процесу, переваги та недоліки.
3. **Факельний спосіб спалення енергоносія.** Принцип, ілюстрація процесу, переваги та недоліки.
4. **Вихровий спосіб спалення енергоносія.** Принцип, ілюстрація процесу, переваги та недоліки.
5. **Котельні установки.** Означення та основні технічні підсистеми (елементи), що їх складають.
6. **Класифікація котельних установок та основні робочі їх характеристики.**
7. **Газотрубні котли.** Будова, основні види та характерні ознаки.
8. **Водотрубні котли.** Будова, основні види та характерні ознаки.
9. **Параметри регулювання паросилових установок.**

### **Лекція №6**

#### **Холодильні установки та способи отримання холоду. Компресори та насоси.**

Процеси, напрямлені на зниження температури (відбирання тепла) в певній ТС називаються процесами охолодження. Робоче тіло, що відбирає тепло називається холодильним агентом або *хладогентом*. В якості хладогентів в промисловості застосовують повітря, воду та штучні хладогенти (аміак, фреон, вуглекислоту, сірчистий ангідрид та ін.)

При охолодженні повітрям воно направляється на нагрітий об'єкт та за рахунок конвекції відводиться гаряче тепло. Метод малоефективний через співвідношення відведеної теплоти та затрати на створення повітряного потоку, наприклад, вентиляторами. Більш широке використання знайшли пристрої переливання гарячої води через повітряні шари – градирні. Максимальне охолодження до температури оточуючого середовища.

Проохолодженні водою використовують для охолодження нагрітих тіл та газів, омиванням або розпилюванням. При цьому вода може використовуватись багатократно у замкнутому циклі пропускаючись при охолодженні через градирні, або однократно –

потрапляючи та повертаючись з водоймищ. Максимальне охолодження також відбувається до температури оточуючого середовища.

Холодильні установки призначені для штучного охолодження. Низьких температур досягають за рахунок *властивості рідини охолоджуватись під час дроселювання* під дією високого тиску і поглинати теплоту під час випаровування. Установки, що працюють за цим принципом, називають *паровими компресійними установками* в яких використовують штучні хладогенти, частіш за все аміак та фреон.

В установках другого типу використовується *адіабатне розширення* якого-небудь газу, наприклад повітря, при цьому температура газу знижується, і він може використовуватись як джерело вироблення холоду. Такі установки, в яких не відбувається зміни агрегатного стану робочого тіла, називають *газовими*.

І в паровій, і в газовій установках підвищення тиску робочого тіла здійснюється в компресорі, тому вони мають загальну назву — *компресійні*.

У деяких холодильних установках роль компресора виконує особлива хімічна речовина *абсорбент*. Такі установки називають *абсорбційними*.

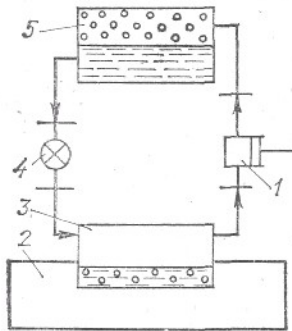


Рис.6.1. Схема холодильної компресійної установки

**Принцип роботи компресійної установки.** На рис. 6.1 подано схему холодильної компресійної установки. В холодильній камері 2 за допомогою холодоагента підтримується усталена температура. Температуру холодоагента знижують, пропускаючи його через дросельний клапан 4. Під час дроселювання холодоагент переходить у стан вологої насиченої пари і в такому стані надходить до трубок випарника 3 холодильної камери. Перебуваючи в термічному контакті з охолоджуваними тілами холодильної камери, холодоагент, відбираючи від них теплоту, випаровується і, охолоджуючи таким чином камеру, видаляється з неї у вигляді майже сухої пари. Для повторного використаний холодоагент направляють у компресор 1, де він стискається до стану перегрітої пари. Перегріта в компресорі пара спрямовується до конденсатора 5, де вона охолоджується, потім конденсується і в стані вологої насиченої пари знову надходить у дросельний клапан, і цикл повторюється. (самостійно, робочий цикл Карно компресійної установки)

**Принцип роботи абсорбційної установки.** Абсорбційна установка так само, як і компресійна, має в своєму складі конденсатор, дросельний вентиль і холодильну камеру з випарником 1. Замість компресора до установки включено три агрегати (рис. 6.2): абсорбер 1, насос 2 і кип'ятильник 3.

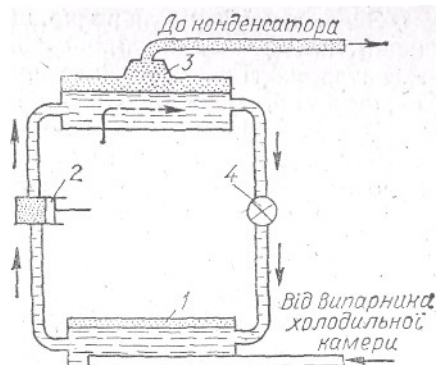


Рис.6.2. Схема холодильної абсорбційної установки.

Цикл абсорбційної установки проходить по такій схемі. Спрацьована у випарнику холодильної камери суха насичена пара спрямовується з нього, до резервуара-абсорбера 1, заповненого речовиною-абсорбентом, здатним поглинати (розчинювати) пари аміаку. Найдешевшим і найзручнішим абсорбентом є вода, яка утворює з аміаком водно-аміачний розчин. Процес розчинення аміаку в воді супроводжується виділенням теплоти. Підвищення температури розчину може спричинити зворотну дію — випаровування

аміаку. Тому абсорбція пари водою повинна відбуватись з відведенням теплоти з абсорбера.

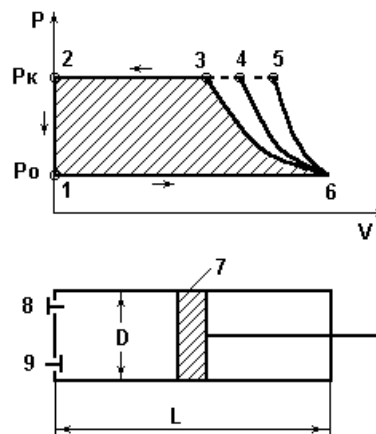
Добутий в абсорбері концентрований розчин аміаку подається насосом 2 до кип'ятильника 3, де він підігривається теплою із зовні та виварується. Пара аміаку спрямовується до конденсатора, а потім через дросельний вентиль до випарника холодильної камери. Слабкий водно-аміачний розчин, що залишився в кип'ятильнику, через вентиль 4 повертається до абсорбера.

Ефективність охолодження визначає *холодильний коефіцієнт*. Для компресійної установки він визначається як  $\varepsilon = q_2 / (q_1 - q_2)$ , де  $q_2$  – відведена теплота;  $q_1 - q_2 = wk$  – питома робота, споживана компресором. Для адсорбційної установки  $\varepsilon = q_2 / q_1$  де  $q_2$  – відведена теплота,  $q_1$  – підведена питома теплота при випаровуванні хладогента.

### Компресори та насоси.

Компресори – пристрої, призначені для нагнітання (переміщення під тиском) газів та повітря в ТС. Компресори поділяють за ступенем нагнітання: Низького тиску (до 0,1 атм); середнього – газодувки (до 3 атм); високого (більше 3 атм); вакуумні насоси (менше 0,5 атм). За конструктивним виконанням компресори поділяють: Поршневі, ротаційні, центробіжні, осьові та струйні. В свою чергу насоси – пристрої призначені для нагнітання рідини в ТС. Характеризуються продуктивністю та напором у вихідній магістралі. Мають однакові конструктивні класифікаційні ознаки.

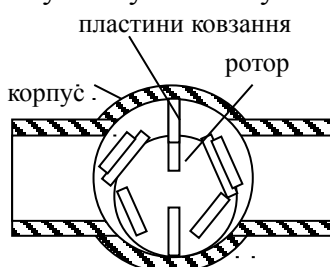
Поршневі компресори і насоси. Класифікують за кількістю ступенів нагнітання газу. На малюнку 6.3. переставлена схема та індикаторна діаграма роботи одноступеневого компресора.



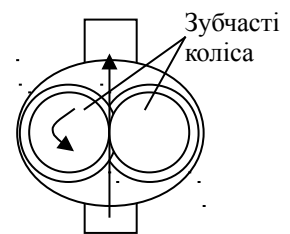
6.3. Функціональна схема та індикаторна діаграма одноступеневого компресора

Для охолодження нагрітого при стисненні газу використовують холодильні агрегати. Вважаючи процес стиснення газу близьким до ізотермічним його ілюструють за допомогою індикаторної діаграми. Рівень тиску газу у вихідній магістралі складає до 5 атм. Для більшого його значення використовують багатоступеневі поршневі компресори. Поршневі насоси мають практично аналогічну будову. Перевагами поршневих насосів є незалежність продуктивності від расходу рідини та напору у вихідній магістралі. Мають великий ккд.

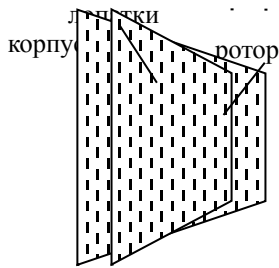
Ротаційні (шиберні) компресори мають інше конструктивне виконання, приведенне на наступному малюнку.



Так само, як і поршневі компресори, роторні можуть бути одно- та багатоступеневими. Одноступеневі формують тиск до 5 атм.



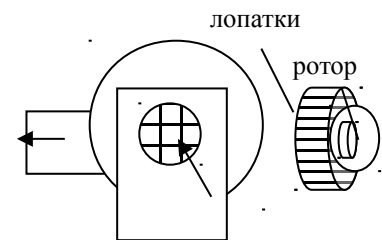
атм. Роторні насоси можуть мати також наступне виконання, яке фактично не використовується у компресорах. Рідина стискається за рахунок сумісно обертаючихся зубчастих коліс або черв'ячної передачі. Таке конструктивне виконання застосовують переважно для створення насосів ніж компресорів через невисокий К.К.Д останніх. Перевагами ротаційних насосів як і компресорів є порівняно велика продуктивність та простота передатних механізмів від приводів.



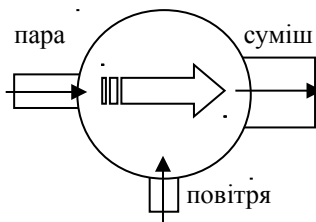
Осьові компресори мають будову, представлену на наступному малюнку. Статор на ротор вкриті лопатками. При обертанні ротора газ стискається до 6 атм. Недоліком осьових компресорів є високий перенагрів газу та самого компресора.

Таке конструктивне виконання рідко використовується для насосів, переважно для мініатюрних із невисокими вимогами до продуктивності та режиму течії рідини, близького до ламінарного.

Центробіжні компресори основані на принципі центрифугування, загальна схема яких представлена на наступному малюнку. Обертаючись на високій швидкості газ притискається до поверхонь статора на витісняється у магістраль, а за рахунок розрядження газу всередині барабана він всмоктується ззовні. Подібне конструктивне оформлення мають насоси великої потужності та расходу (водопостачання міст).



Струйні компресори працюють на реактивному принципі. В якості рушійної сили використовують стиснені гази або рідини, отримані, як результат відпрацювання інших ТС (наприклад, пара). Часто така конструкція використовується у сверхпродуктивних насосах за умови невеликого вихідного напору у магістралі.



### Контроль

Питання за лекцією: Плановский А.Н., Ромм В.М. Процесы и аппараты химической технологии. – М.: "Химия", 1967 г. Друскин Л.И. Сжигание газа в промышленных печах и котлах.

1. Сутність процесу охолодження. Означення хладагентів та основні їх різновиди. Навести приклади.
2. Основні фізичні властивості, що лежать в основі холодильних установок та їх класифікація.
3. Компресійні установки. Функціональна схема, призначення елементів, принцип дії. Холодильний коефіцієнт.
4. Абсорбційні установки. Функціональна схема, призначення елементів, принцип дії. Холодильний коефіцієнт.
5. Компресори та насоси. Означення і класифікація.
6. Поршневі та ротаційні компресори і насоси. Конструктивне виконання і принцип дії. Переваги та недоліки.

7. Осьові, центробіжні та струйні компресори і насоси. Конструктивне виконання і принцип дії. Переваги та недоліки.

**Самостійна робота:** Горбис Э.Р., Календерьян В.А. Теплообменники с проточными дисперсными теплоносителями. – М.: “Энергия”, 1975 г. Друскин Л.И. Сжигание газа в промышленных печах и котлах. М., 1962 г. (робочий цикл...doc ) Иванова Г.В. Автоматизация технологических процессов основных химических производств: Методическое пособие. Часть 1/ СПбГТИ(ТУ).-СПб., 2003.- 70с. Материалы к лекции №4 (у лектора)

Питання на самостійний розгляд:

1. Етапи робочого циклу Карно для компресійної установки за  $p$ -діаграмою.
2. Основні показники роботи насосів.
3. Визначення продуктивності та напору насосів.
4. Визначення корисної потужності та К.К.Д насоса.
5. Діаграма основні характеристики центробіжних насосів.

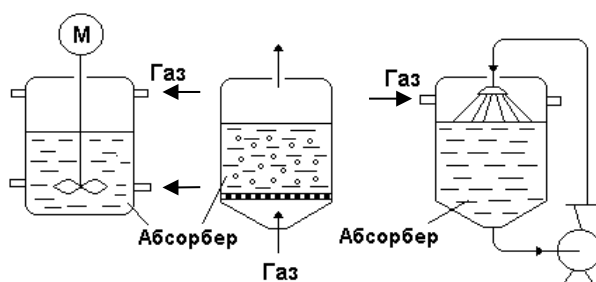
### Лекція №7

#### Масообмінні процеси та їх конструктивні рішення.

Масообмінні процеси – це процеси, що супроводжуються переходом однієї або декількох речовин з однієї фази в іншу. Швидкість масопередачі при заданій температурі залежить від інтенсивності молекулярної дифузії, тобто здатності мимовільного проникнення однієї речовини в інше за рахунок безладного руху молекул. Процес переносу маси з однієї фази в іншу відбувається за рахунок різниці концентрацій речовини в цих фазах доти, поки не будуть досягнуті умови рівноваги. Рушійна сила процесу масопередачі визначається різницею концентрацій фаз (виражається через різницю між робочими й рівноважними концентраціями компонента, що розподіляє, у першій і другій фазах відповідно). Кількість маси, передана з однієї фази в іншу, залежить від поверхні розділення фаз, тривалості процесу й різниці концентрацій.

Основними різновидами масообмінних процесів є: абсорбція, адсорбція, перегонка, ректифікація, кристалізація, сушіння й екстракція.

А б с о р б ц и є й називають процес поглинання газу або пари рідким поглиначем. Зворотний процес - виділення з рідин розчиненого газу - називають десорбцією. Абсорбція характеризується вибірковістю (селективністю), де кожна речовина поглинається певним поглиначем. Розрізняють абсорбцію просту, засновану на фізичному поглинанні компонента рідким поглиначем, і хемосорбцію, що супроводжується хімічною реакцією між компонентом, що витягається, і рідким поглиначем. Прикладом простої абсорбції служить виробництво газування або соляної кислоти, хемосорбція широко застосовується у виробництві сіркою й азотної кислот, азотних добрив і т.д. Апарати, у яких ідуть дані процеси, називають *абсорберами*. За принципом організації процесу абсорбування абсорбери поділяють на поверхневі барботажні та розпилюючі.



Поверхневі абсорбери бувають дзеркальними та плівковими. Дзеркальні являють собою багатоярусний резервуар, кожен ярус якого являє собою плоске дзеркало на поверхню якого заповнена абсорбером. Газ повільно підіймається змійкоподібними газоходами так, щоб максимально проходити над поверхнею всіх дзеркал. Дані абсорбери малоефективні та малопродуктивні. У плівковому абсорбері рідина повільно плівкоподібно стікає по поверхнях чисельних патрубків а газ подається знизу уверх. Всередині патрубків протікає охолоджуюча рідина.

У барботажних абсорберів газ проходить через рідину у вигляді бульбашків. У сітчастих барботажних абсорберів газ проходить через яруси відділені один від одного сітками через які абсорбер стікає донизу. У напірних барботажних абсорберах газ через насадку подається знизу у сасуд з абсорбером під тиском. У розпилюючих абсорберах абсорбер розпилюється зверху на газ, що підіймається.

**А д с о р б ц и я** - це процес виборчого поглинання одного або декількох компонентів з рідкої або газової суміші твердим поглиначем - адсорбентом. Як адсорбенти широко застосовують тверді речовини з високорозвиненою поверхнею й високою пористістю (активні вугілля, силікагелі, алюмогелі, цеоліти - водні алюмосилікати кальцію й натрію й ін.) Адсорбція застосовується в промисловості для очищення й сушіння рідин і газів, для поділу сумішей різних рідин і газоподібних речовин, витягу летучих розчинників, посвітління розчинів, для очищення води й ін. Адсорбція використовується в хімічній, нафтовій, лакофарбовій, поліграфічній і іншій галузях промисловості.

Для поглинання летучих розчинників і пар органічних речовин найчастіше використовують активоване вугілля (протигази), для сушіння газів - силікагелі й цеоліти, для очищення води від розчинених солей - іоніти. Адсорбери працюють як фільтри (звичайно з нерухомим шаром адсорбенту). Всі вони періодичної дії: після насичення адсорбент повинен бути відновлений (регенерований) зворотним процесом - десорбцією. Остання протікає при нагріванні адсорбенту гострою парою, що відганяє поглинені речовини. Потім адсорбент сушать, прохолоджують і використовують знову.

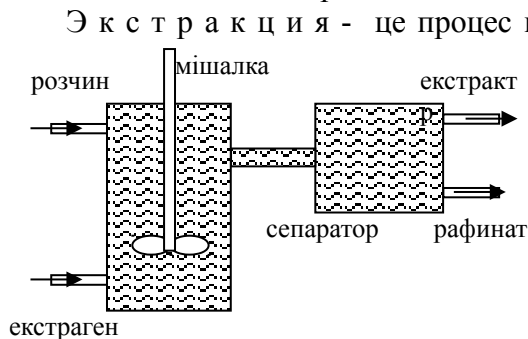
**П е р е г о н к а** і **р е к т и ф і к а ц и я** засновані на різних температурах кипіння фракцій, що складають рідину. Існують два принципово відмінних види перегонки: проста (однократна) перегонка й ректифікація.

Проста перегонка - це однократний процес часткового випару низькокиплячої фракції з наступною конденсацією парів, що утворилися, а ректифікація - це процес багаторазового (або безперервного) випарювання й конденсації парів вихідної суміші. У результаті ректифікації одержують більше чисті кінцеві продукти. Рідину, отриману в результаті цього, називають дистилатом, або ректифікатом. Процеси перегонки й ректифікації знаходять широке застосування в хімічній і спиртовій промисловості, у виробництві лікарських препаратів, у нафтопереробній промисловості й т.д.

**К р и с т а л л и з а ц и я** називається виділення твердої фази у вигляді кристалів з розчинів або розплавів. Кристалізація починається з утворення центрів (або зародків) кристалізації. Швидкість їхнього утворення залежить від температури, швидкості перемішування й т.д. З підвищенням температури швидкість росту кристалів збільшується, однак це приводить до утворення більше дрібних кристалів і часто викликає зниження рушійної сили процесу. Великі кристали легше одержати при повільному їхньому росту без перемішування й невеликих ступенів пересичення розчинів, однак це знижує продуктивність процесу кристалізації. Знаходження оптимальної швидкості кристалізації й становить одну з основних завдань цього процесу.

Широко застосовуються кілька способів кристалізації: кристалізація з охолодженням, кристалізація з видаленням частини розчинника, а також вакуум-кристалізація. Залежно від способу кристалізації застосовують кристалізатори періодичної й безперервної дії.

Кристалізація лежить в основі металургійних і ливарних процесів, одержання покриттів, плівок, застосовуваних у мікроелектроніці, а також використовується в хімічній, фармацевтичній, харчовій і іншій галузях промисловості. Кристалізація є завершальною стадією у виробництві мінеральних солей, добрив, органічних і особливо чистих речовин. Особливе значення в промисловості має процес кристалізації металів з розплавів.



Екстракція - це процес виборчого поглинання рідиною або парою цільових компонентів, що втримуються у вихідній твердій сировині. (Приклад - заварка чаю, кави, тощо).

*Екстрагент* – це речовина, що поглинає цільовий компонент. *Екстракт* – речовина-поглинач + цільовий компонент. *Рафінат* – залишок вихідної суміші без цільового компонента. Узагальнена схема екстракуючої установки можна представлена наступним чином. Сепарація може відбуватись під дією

гравітаційних або центробіжних сил.

**С у ш к о ю** називають процес видалення вологи з різних (твердих, рідких і газоподібних) матеріалів. Волога може бути вилучена випаром, сублімацією, виморожуванням, струмами високої частоти, адсорбцією й т.д. Частіше застосовується сушіння випаром за рахунок підведення теплоти. Більше економічним є послідовне видалення вологи фільтрацією, центрифугуванням (зі змістом залишкової вологи 10...40 %), а потім тепловим сушінням. За способом підведення тепла до матеріалу розрізняють: конвективну, контактну, радіаційну, діелектричну (СВЧ) сушку.

Апарати для цього процесу - сушки - розрізняються по використовуваному теплоносію (повітря, топкові гази, пара, електронагрів), організації (періодичної й безперервної дії), напрямку руху потоків матеріалу й теплоносія (прямоточні й протитечійні), стану шаруючи матеріалів (нерухомих, що пересипає, киплячий і т.д.).

У конвективних сушках - потік теплого (пального) повітря рухається на матеріал, що сушиться, що може перебуває в русі (протитечія), або в підвішеному стані й т.д.

У контактних сушарках теплота передається через поверхню, що гріє, з однієї сторони якої міститься теплоприймач, з іншої - теплоносієм. Вони призначені для пастоподібних і рідких продуктів, забруднення яких неприпустимо (харчова й фармацевтична промисловість).

У радіаційних сушках теплота передається випромінюванням керамічних плит. Їх застосовують для сушіння тонколистових матеріалів і лакофарбових покриттів. Інші види



сушарок (вакуумна, криогенна, ультразвукова, СВЧ) більше дорогі й застосовуються рідше.

### Контроль

Питання за лекцією: Плановский А.Н., Ромм В.М. Процессы и аппараты химической технологии. – М.: "Химия", 1967 г.

1. Означення масообмінних процесів. Рушійні сили та основні види масообмінних процесів;
2. Абсорбція. Сутність процесу. Основні конструктивні виконання абсорберів. Приклади застосування;
3. Адсорбція. Сутність процесу. Десорбція. Приклади застосування;
4. Перегонка і ректифікація. Сутність процесів. Приклади застосування;
5. Кристалізація. Види кристалізації. Приклади застосування.
8. Екстракція. Екстрагент екстракт рафінад. Узагальнена схема установки екстрагування. Приклади застосування.
9. Сушка. Способи сушки речовин. Класифікація сушильних установок.

### Самостійна робота:

Питання за лекцією: Плановский А.Н., Ромм В.М. Процессы и аппараты химической технологии. – М.: "Химия", 1967 г. (Разделение жидк и газ неоднородных смесей.pdf)

Питання на самостійний розгляд:

1. Види неоднорідних сумішей та методи їх розділення (с. 240)
2. Види та основні апарати для осадження речовин. Приклади застосування.
3. Фільтрування, як метод розділення речовин. Фільтруючі матеріали та застосування фільтрів.
4. Метод розділення речовин обстоюванням. Принцип дії апаратів розділення речовин.
5. Центрифугування. Принцип роботи установок центрифугування. Фактор розділу речовини.
6. Промислові апарати підчищення газу від пилу (с. 323).
7. Інерційні пиловловлювачі. Конструктивне виконання та принцип дії.
8. Центробіжні пиловловлювачі. Конструктивне виконання та принцип дії.
9. Електрофільтри. Конструктивне виконання та принцип дії.
10. Акустичні газові фільтри. Конструктивне виконання та принцип дії.

### Лекція №8

#### Експериментальні дослідження технологічних систем.

*Експеримент* – це науково поставлений дослід для цілеспрямованого вивчення викликаного явища при штучних умовах, коли можна простежити і виміряти реакцію явища, а також відтворювати його багаторазово. Експериментальні дослідження застосовуються при створенні і уточненні моделей та оцінці проектних рішень. Як відмічалося раніше експериментальний метод отримання моделей використовується при дослідженні складних ТС та процесів, які становлять більшість у виробництві. Об'єктом експериментального дослідження можуть бути технологічна система, її елементи, а також зв'язки між ними. (наприклад, виробнича технологія на різних стадіях виготовлення, технологічний процес та його операції, технологічне оснащення, діяльність персоналу).

Технологічна система, як об'єкт експериментального дослідження, має ряд особливостей:

- наявність значної кількості різномірних елементів (матеріали, цілеспрямовані дії персоналу, технічні засоби, енергетичні впливи тощо), взаємопов'язаних між собою та нерозривних у відношенні формування кінцевої функції (мети).
- сильна дія випадкових факторів, унаслідок чого навіть при незмінному налагодженні технологічної системи здійснюється розсіяння її вихідних характеристик.

Ці особливості визначають представлення технологічної системи чи її складових при експериментальному дослідженні у вигляді чорної скриньки, так само, як описувався технічний об'єкт. Оскільки в реальній ТС діє велика кількість факторів (входів), що впливають на стан останньої, перед проведенням експерименту проводять процедуру визначення ступеню впливу кожного фактору та ранжування, наприклад, через експертне опитування та залишаючи мінімальну але достатньо необхідну їх кількість. В залежності від типів факторів, що враховуються при експериментальному дослідженні (рис. 8.1) розрізняють наступні їх види:

*статистичний аналіз точності функціонування технологічної системи,  $Y=f(X3)$* , коли досліджується вплив випадкових збурень на вихідні показники (рис. 8.1,а), наприклад, статистичний аналіз якості продукції, аналіз стабільності перебігу технологічного процесу;

*пасивний експеримент,  $Y=f(X2)$* , який дає змогу визначити зв'язок між вхідними та вихідними параметрами в умовах дії збурень  $X3$  при природному перебізі досліджуваних процесів;

*активний експеримент,  $Y=f(X1)$* , який дає змогу визначити зв'язок між вхідними та вихідними параметрами в умовах дії збурень  $X3$  шляхом варіювання факторами за наперед складеним планом.

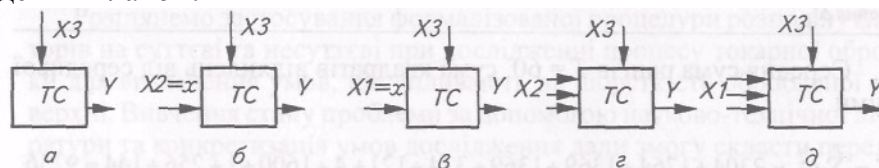


Рис. 8.1. Види експериментальних досліджень:

*а* - статистичний аналіз; *б* — однофакторний пасивний експеримент; *в* — однофакторний активний експеримент; *г* — багатофакторний пасивний експеримент; *д* — багатофакторний активний експеримент.

Залежно від розмірності вхідного вектора параметрів розрізняють:

- *однофакторний активний експеримент* (рис. 8.1,в), якщо  $X1=(x)$ , та *однофакторний пасивний експеримент* (рис. 8.1,б), коли вивчається дія лише одного фактора  $X2=(x)$ ;
- *багатофакторний активний експеримент* (рис.8.2,д), якщо  $X1=(x1,x2,...)$ , та *багатофакторний пасивний експеримент* (рис. 8.2,г), якщо  $X2=(x1,x2, ...)$ .

При статистичному аналізі точності функціонування ТС вплив збурень на певний показник ефективності функціонування описується імовірнісною оцінкою. При цьому на основі статистичних даних (замірів вихідного параметру  $y$ ) оцінюються характеристики закону розподілу випадкової величини та визначаються статистичні результати (значення математичного сподівання, ймовірність появи певного значення, середньоквадратичне відхилення, тощо) (наприклад, задача аналізу кількості відмов обладнання протягом

певного часу), або перевіряється статистика отриманих даних на відповідність певному існуючому закону розподілу (наприклад, доцільність проведення ремонтних робіт).

Приклад. Проведемо статистичний аналіз точності виготовлення циліндричних валів на шліфувальному верстаті-автоматі. Вихідним даними є налагоджений діаметр обробки поверхні циліндрів –  $23,25 \pm 0,075$  мм; Для дослідження було відібрано 100 деталей ( $N = 100$ ).

*Задача 1.* Перевіримо відповідність розподілу статистичних даних, яким є реальні отримані діаметри в заготовках нормальному закону розподілу із довірчою вірогідністю такої гіпотези  $P_d = (1-a) = 95\%$ . Де  $a$  – рівень значущості статистичної гіпотези.

Нехай результати вимірювання показали, що максимальний діаметр серед оброблених деталей становив  $y_M = 23,3$  мм а мінімальний –  $y_m = 23,17$  мм. Тоді поле розсіяння параметрів становить

$$\omega = y_M - y_m = 0,13 \text{ мм}$$

Розіб'ємо поле на  $k$  інтервалів так, щоб в кожному з них було щонайменш 5 значень вимірної величини. Нехай  $k = 7$ , тоді довжина під інтервалів поля розсіяння становить

$$\Delta_i = \omega / k \approx 0,02 .$$

Кількість діаметрів, що потрапило в кожний інтервал  $n_i$  : (7,8,16,30,24,10,5).

Визначимо параметри нормального закону розподілу. Їх два ( $r = 2$ ), а саме математичне очікування та середньоквадратичне відхилення.

$$M(y) = \sum_{i=1}^k \bar{y}_i \frac{n_i}{N} \approx 23,24 \text{ мм}$$

де  $\bar{y}_i$  – середнє значення вибірки в  $i$ -тому інтервалі  $\Delta_i$ ;

$n_i$  – кількість діаметрів деталей, що потрапили в  $i$ -тий інтервалі  $\Delta_i$

$N$  – загальна кількість діаметрів в усьому інтервалі.

$$\sigma = \sqrt{(\bar{y}_i - M(y))^2 \frac{n_i}{N}} \approx 0,03 \text{ мм}$$

Знайдемо значення нормованої функції Лапласа  $\Phi(t)$  для кожного інтервалу та визначимо ймовірність потрапляння діаметрів деталей в даний інтервал  $*p_i$ .

$$*p_i = 0,5\Phi\left(\frac{y_{i\max} - M(y)}{\sigma}\right) - 0,5\Phi\left(\frac{y_{i\min} - M(y)}{\sigma}\right)$$

де  $y_{i\max}$ ,  $y_{i\min}$  – найбільше та найменше значення діаметру в  $i$ -му інтервалі відповідно

Таким чином, теоретична кількість розмірів діаметрів за нормальним законом розподілу для  $i$ -того інтервалі  $\Delta_i$  становить  $N \cdot *p_i$ . Для даної задачі  $N \cdot *p_i$  : (4,11,22,26,22,11,4)

Міру розходження реальною та теоретичною кількостей розмірів діаметрів визначає критерій Пірсона:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - Np_i)^2}{Np_i} = 5,97 .$$

Порівнюючи його значення із табличним при довірчій вірогідності 95% та числі вільності  $f = k-r-1 = 7-2-1=4$ :  $\chi^2 = 13,3$ , оскільки воно менше за табличне, робимо висновок про відповідність отриманого розподілу розмірів діаметрів нормальному закону.

*Задача 2.* Визначимо коефіцієнт точності, зміщення налагодження та загальний показник точності ТС. З умови нормального закону розподілу виборки розмірів діаметрів оброблювальних деталей поле розсіяння.

Коефіцієнт точності ТС:

$$K_T = \frac{6\sigma}{T_y} = 1,2,$$

де  $T_y$  – інтервал поля допуску на розмір (+/- 0.075).

Коефіцієнт зміщення налагодження ТС:

$$K_H = \frac{M(y) - y_0}{T_y} = 0,066,$$

де  $y_0$  – номінальний розмір діаметрів заготовок.

Комплексний показник точності ТС:

$$K_C = \max\left(\frac{3\sigma}{y_M - M(y)}, \frac{3\sigma}{M(y) - y_m}\right) = 1,38.$$

Значення коефіцієнтів точності, які перевищують 1 свідчить про можливість появи бракованих деталей.

*Задача 3.* Визначення кількості бракованих деталей у відсотках від загальної кількості із розмірами, меншими та більшими за граничнодопустимі.

$$Q = \left(0,5\Phi\left(\frac{y_0 - \Delta y - M(y)}{\sigma}\right) - 0,5\Phi\left(\frac{y_0 + \Delta y - M(y)}{\sigma}\right)\right) \cdot 100\% = 1,78\%$$

### Контроль

Література: Б.О. Пальчевський. Дослідження технологічних систем.

1. Означення експерименту. Мета та об'єкт проведення експериментальних досліджень;
2. Особливості експериментального дослідження технологічних систем;
3. Класифікація експериментальних досліджень за типами факторів;
4. Зміст статистичного аналізу точності функціонування ТС.
5. Параметри, якими характеризується нормальний закон розподілу випадкових величин. Аналітичний вираз.
6. Критерій Пірсона. Аналітичний вираз та зміст його параметрів.
7. Коефіцієнт точності, зміщення налагодження та загальний показник точності ТС. Аналітичні вирази та зміст їх параметрів.
6. Визначення кількості бракованих виробів. Аналітичний вираз та зміст його параметрів.

### Самостійна робота:

Література: Б.О. Пальчевський. Дослідження технологічних систем. (с. 98-142)

Питання на самостійний розгляд:

1. Види зв'язків між вхідною та вихідною змінними ТС. Поняття рівня фактора, паралельного досліду та регресії;
2. Способи визначення зв'язку  $y = f(x)$ . Поліноміальний зв'язок та властивості поліномів;
3. Апроксимація статистичних даних за методом найменших квадратів. Суть методу.
4. Поняття щільності зв'язку  $y = f(x)$  і кореляційного поля. Кореляційний момент та коефіцієнту кореляції. Аналітичний вира та означення;

<b>Житомирська політехніка</b>	<b>Міністерство освіти і науки України</b> <b>Державний університет «Житомирська Політехніка»</b>
------------------------------------	--

5. Поняття та критерій відтворюваності дослідів при однофакторному експерименті;
6. Планування експерименту, основні види планів та умови їх застосування.
7. Оцінка ступеню впливу досліджуваного фактора. Критерії оцінки.
8. Пасивний багатофакторний експеримент. Суть та порядок проведення.
9. Активний багатофакторний експеримент. Суть та порядок проведення.

Затверджено на засіданні кафедри А та КІТ

Протокол № \_\_\_ від „\_\_\_” \_\_\_\_\_ 201\_\_ року

Зав. кафедрою

к.т.н. А.Г. Ткачук

Розробник

ст.викл. М.В. Богдановський