

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 1

ЗАТВЕРДЖЕНО

науково-методичною радою
Державного університету
«Житомирська політехніка»
протокол від 4 вересня 2025 р.
№ 5

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ з навчальної дисципліни

«ВИРОБНИЧІ ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ ОБ'ЄКТІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ»

для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «бакалавр»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
освітня програма «Комп'ютеризоване управління енергетичними системами»
факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
кафедра робототехніки, електроенергетики та автоматизації
ім. проф. Б.Б. Самотокіна

Рекомендовано на засіданні
кафедри робототехніки,
електроенергетики та
автоматизації
ім. проф. Б.Б. Самотокіна
25 серпня 2025 р., протокол № 7

Розробник: старший викладач кафедри робототехніки, електроенергетики та
автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна **БОГДАНОВСЬКИЙ Мартін**

Житомир
2025

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 2

Вступ

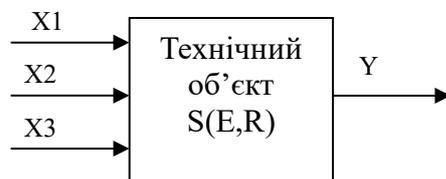
Сучасна промисловість характеризується швидким розвитком технологій і технічних засобів виробництва. Технологічні машини стають більш швидкодіючими та продуктивними, мають кращий коефіцієнт корисної дії, вищу надійність та простоту в обслуговуванні та управлінні з боку оператора, обладнання стає енергозощадливим, а технології більш ефективними та досконалими із дотриманням світових трендів, спрямованих на декорбонізацію виробництва. 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 експериментального дослідження.

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 входні 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).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 3

В подальшому ми будемо розглядати технологічні об'єкти, 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).

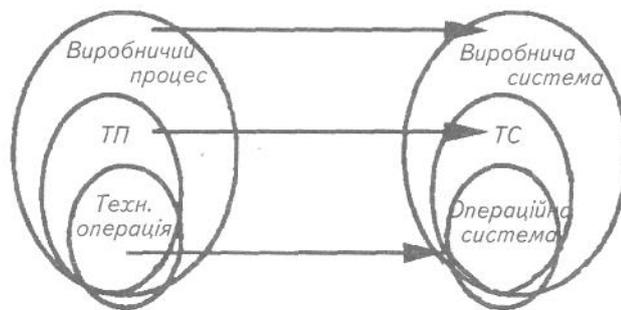


Рис 1.1. Співвідношення понять видів процесів та систем, що їх реалізують.

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

Контроль

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:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 93 / 4</i>

Питання на самостійний розгляд:

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.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 5

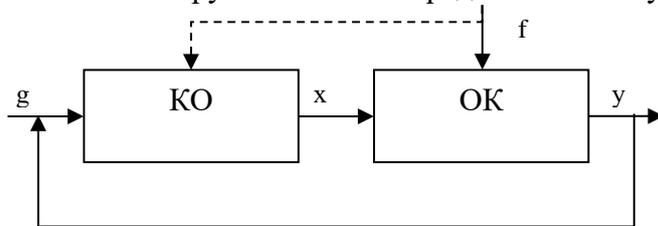
Лекція №2

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.

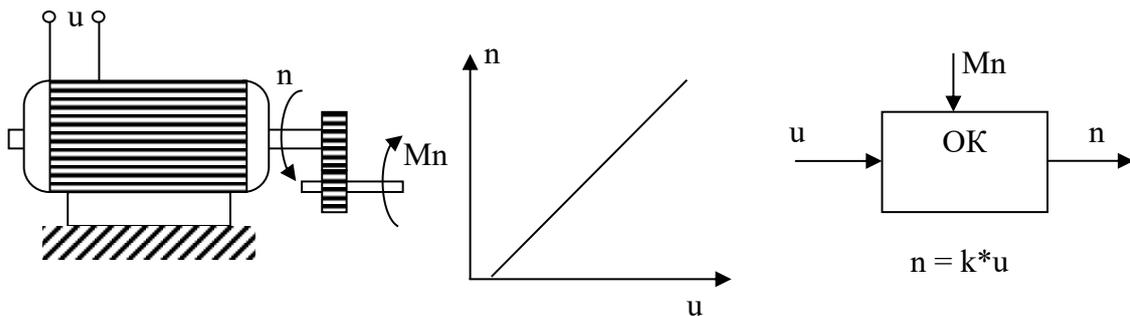
Для можливості забезпечення автоматизованого або автоматичного управління використовуються технічні системи, які формують певні впливи та технологічний об'єкт в такий спосіб, що цього або в повній або в частковій мірі достатньо, щоб цей об'єкт виконував покладену на нього функцію. Тут розглянемо такі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

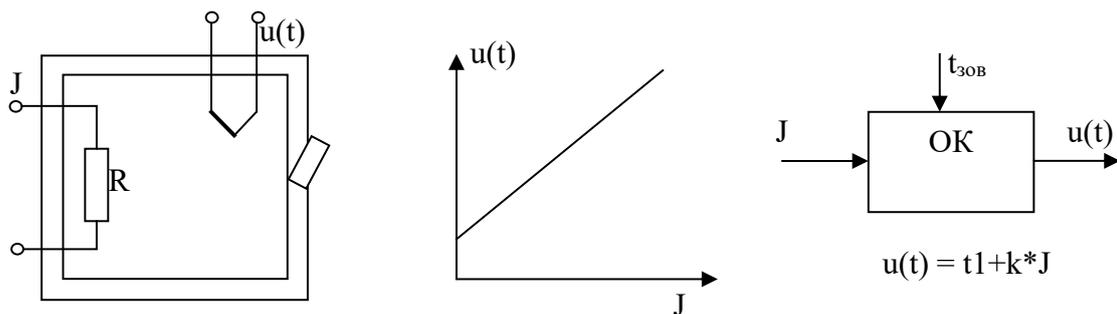


Тут КО – керуючий об'єкт, ОК – об'єкт керування, що є технічним об'єктом за лекцією 1, g – задавальна дія, f – збурювальна дія ($X3$ та/ $X2$), x – керуюча дія ($X1$), y – вихідна дія. В залежності від наявності зворотного зв'язку розрізняють розімкнені та замкнені САК.

Розглянемо деякі типові технологічні системи як ОК.

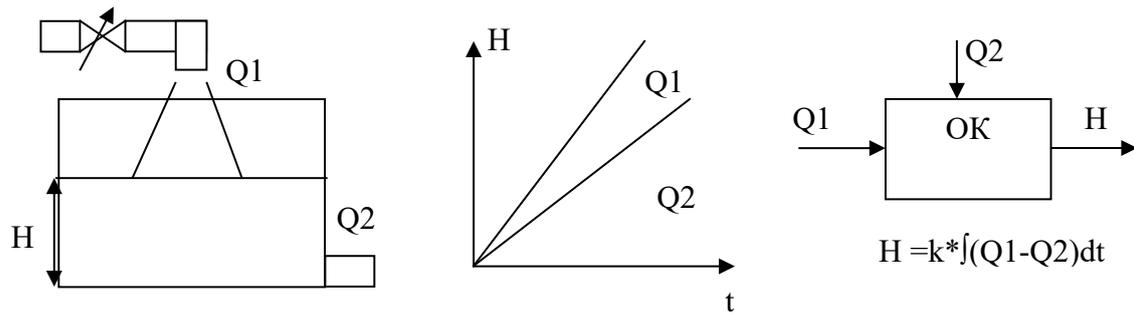


Двигун постійного струму



Електропіч

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 6



Протипожежний резервуар

Ємність ОК.

Загальною властивістю ОК є його здатність накопичувати ту чи нішу 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 м³ для зміни рівня води в резервуарі на 1м, об'єм газу в м³ для підвищення температури в топці на 1 градус.

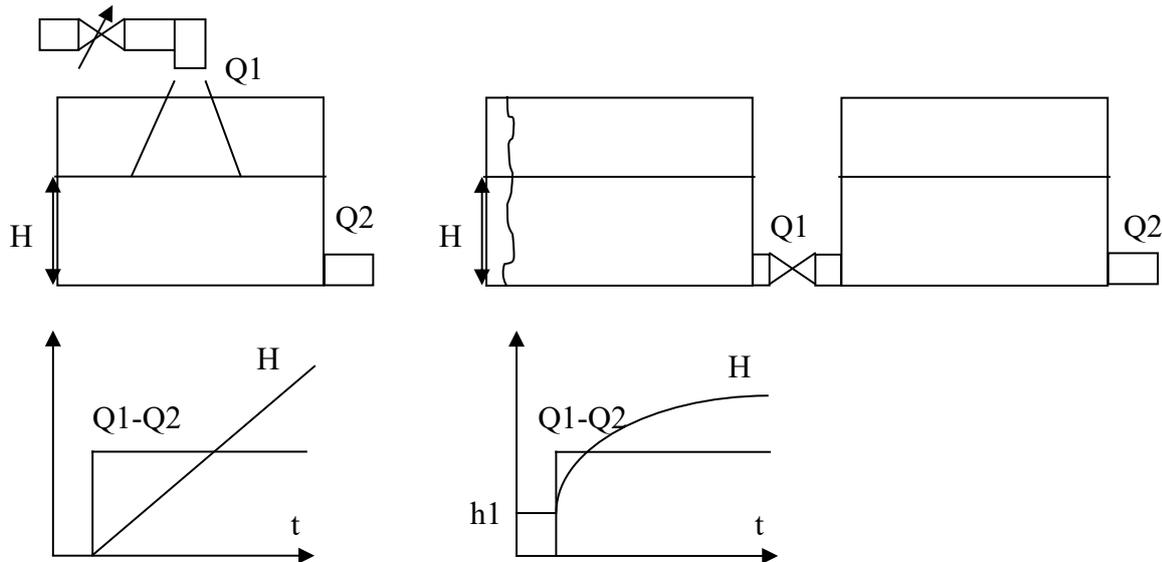
Коефіцієнт ємності не обов'язково є константою (виражає лінійну залежність від вимірюваних вхідних величин ОК). Наприклад, якщо стінки резервуара мають конусоподібну форму. Коефіцієнт ємності виражає інерційність технологічного об'єкту. Чим він менше, тим швидше об'єкт реагує на зміну вхідних матеріальних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

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 7



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 – відносні витрати,

h – відносне відхилення вихідного параметру ОК.

Із поняттям ступеню самовирівнювання пов'язаний коефіцієнт навантаження ОК

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

де ρ – коефіцієнт самовирівнювання при номінальному режимі роботи ОК,

ρ_{\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 (витратою) – $\Delta x > 0$, $\Delta y > 0$, ($\Delta y < 0$), $\rho > 0$, ($\rho < 0$); ОК: без самовирівнювання: резервуар із сталою витратою – $\Delta x < \infty$, $\Delta y = \infty$, $\rho = 0$.(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:

1. Поняття моделі та моделювання. Основні вимоги, що висуваються до моделей;
2. Зміст створення моделей при невідомій структурі технічного об'єкта;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 93 / 8</i>

3. Принцип створення моделі об'єкта на основі моделей простих явищ. Приклад конструювання складних моделей.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 9

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, y, 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.

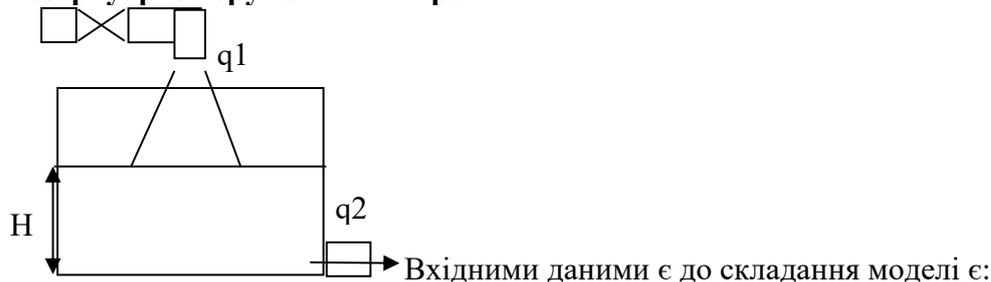
Математичний апарат та моделі при дослідженні ТС.

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 витрати.



q_1 – керовані витрати рідини в резервуар;

q_2 – витрати рідини;

h – керований рівень рідини;

S – площа перерізу резервуару;

q_{10}, q_{20} – значення расходів, що встановились;

$q_{10} = q_{20}$ – умова рівноваги ОК – $\Delta h = 0$.

Зобразимо структурну схему ОК:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 10



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

$$(q_{10} + \Delta q_1) - (q_{20} + \Delta q_2) = \Delta q$$

$$\Delta q = \Delta q_1 - \Delta q_2$$

Та обернено пропорційній площі перерізу резервуару

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

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

$$q_2 = f(h)$$

При малій зміні рівня, наближено можна вважати

$$\Delta q_2 = a \cdot \Delta h$$

Де a залежить від Δh , але при малих змінах останнього його можна вважати константою.

Тоді:

$$S \frac{d\Delta h}{dt} + a\Delta h = \Delta q_1$$

Поділимо вираз на a

$$S \frac{d\Delta h}{a \cdot dt} + \Delta h = \Delta q_1 / a$$

Та зробимо заміну

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

тоді:

$$T \frac{d\Delta h}{dt} + \Delta h = K \cdot \Delta q_1$$

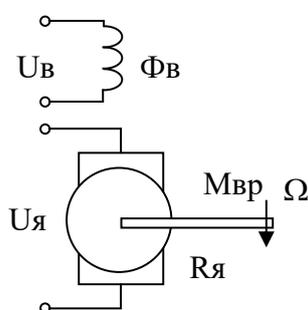
Якщо ОК розглядається в статичному режимі ($\frac{d\Delta h}{dt} = 0$) отримаємо рівняння статички

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

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 якірнього кола;

R_b – опір якірнього кола;

Ω – кутова швидкість обертання валу;

$M_{вр}$ – обертаючий момент двигуна;

C_e – електромеханічна 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 Ω - постійна $M_{вр} = M_n$ (момент навантаження):

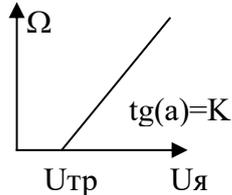
Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 11

$$\Omega_{уст} = \frac{U_{я}}{C_e} - \frac{M_n}{C_m \cdot C_e} R_{я}.$$

Прийнявши $\frac{M_n}{C_m} R_{я} = U_{мп}$ та $\frac{1}{C_m} = K$ отримаємо кінцеве рівняння статичного режиму роботи двигуна:

$$\Omega_{уст} = K(U_{я} - U_{мп}).$$

Статична характеристика ТО виглядає наступним чином:



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

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

З рівняння рівноваги у статичному режимі отримаємо:

$$\frac{C_m \cdot U_{я} - C_m \cdot C_e \cdot \Omega}{R_{я}} = M_n + J \frac{d\Omega}{dt},$$

або, переписавши:

$$\frac{J \cdot R_{я}}{C_m \cdot C_e} \frac{d\Omega}{dt} + \Omega = \frac{1}{C_e} (U_{я} - U_{мп}).$$

Роблячи заміну: $\frac{J \cdot R_{я}}{C_m \cdot C_e} = T$ та $\frac{1}{C_e} = K$ кінцево отримаємо:

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

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 витратою.
6. Рівняння статички на динаміки двигуна постійного струму з незалежним збудженням.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 12

Самостійна робота:

Питання на самостійний розгляд:

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

Типові механічних процеси та їх апаратна реалізація

Метою механічних процесів у виробництві є зміна предмету праці під дією механічної енергії підведеної ззовні. Через велике різноманіття, надалі нами будуть розглянуті лише деякі технологічні процеси механічної обробки, типові для багатьох виробництв.

Технологічні процеси подрібнення матеріалу.

Подрібнювання — це зруйнування матеріалу під дією зовнішніх сил, що переборюють сили зчеплення між частинками. Процес подрібнення може бути проміжним для виконання подальших операцій або остаточним, в результаті якого отримується кінцева продукція.

Перерахуємо основні класифікаційні ознаки процесу:

1. за циклічністю: а) відритий, б) замкнений;
2. за ступенем подрібнення: а) грубе, б) тонке;
3. за технологічним методом: роздавлюванням (а), розбивання (б), стиранням (в), розколюванням (г), підрив (д) чи поєднавши ці способи.

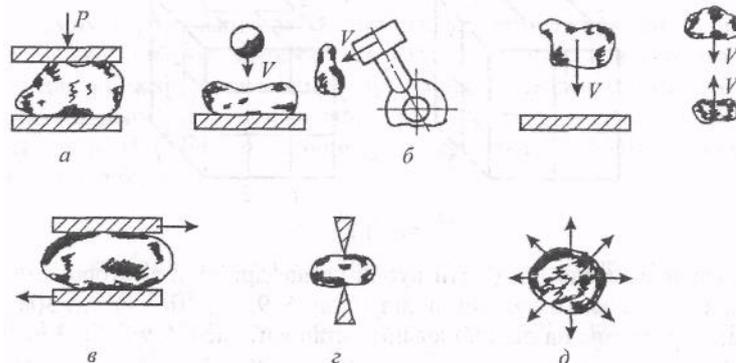
У відкритому циклі матеріал проходить один раз через подрібнювальну машину. У замкненому циклі подрібнений один раз матеріал після сортування знову подрібнюють

Ступенем подрібнення називають відношення розміру поперечника шматка матеріалу до подрібнювання до розміру поперечника шматка (чи частинки) після подрібнювання.

Номинальний та середній ступінь подрібнення визначаються відповідно.

$$i_{ном} = D_{max} / d_{max} \quad i_{cp} = D_{cp} / d_{cp}$$

Де D та d максимальні та середньозважені початкові і кінцеві діаметри часток матеріалу.

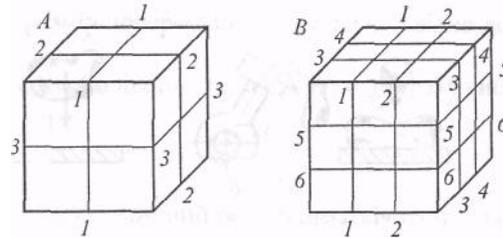


Технологічні методи подрібнення

Вибір методу залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу і потрібного ступеня подрібнення. Для твердих матеріалів ефективні роздавлювання й розбивання, для крихких — розколювання; для вологих в'язких матеріалів — стирання в сполученні з роздавлюванням. Критерієм вибору ефективного методу є кількість енергії, необхідної для подрібнення матеріалу. Відповідної до поверхневої теорії процесу, робота, затрачувана на подрібнювання тіла, прямо пропорційна площі новоутворених поверхонь.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 13

Нехай на поділ кубика з ребром, що дорівнює одиничному розміру, по одній площині витрачають роботу A . Для поділу такого самого кубика на дрібніші зі стороною в $1/2$ потрібно розділити його по трьох площинах. При цьому витрачена робота дорівнює $3A$.



Отже, відношення робіт, витрачених на поділ матеріалу у формі куба на кубики зі сторонами $1/n$, $1/m$, таке:

$$\frac{A_n}{A_m} = \frac{(n-1) \cdot 3A}{(m-1) \cdot 3A} = \frac{n-1}{m-1} \approx \frac{n}{m}$$

Об'ємна теорія оснований на тому, що на подрібнюваний шматок матеріалу діють зовнішні сили, які зумовлюють у матеріалі напругу, що дорівнює межі міцності під час стискання, а робота витрачається на деформацію матеріалу. Робота деформації під час стискання

$$A = \frac{\sigma^2 V}{2E}$$

де σ — межа міцності під час стискання; V — об'єм подрібнюваного матеріалу; E — модуль пружності. Відношення робіт, затрачуваних на подрібнювання геометрично подібних тіл того самого складу, дорівнює відношенню об'ємів цих тіл:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

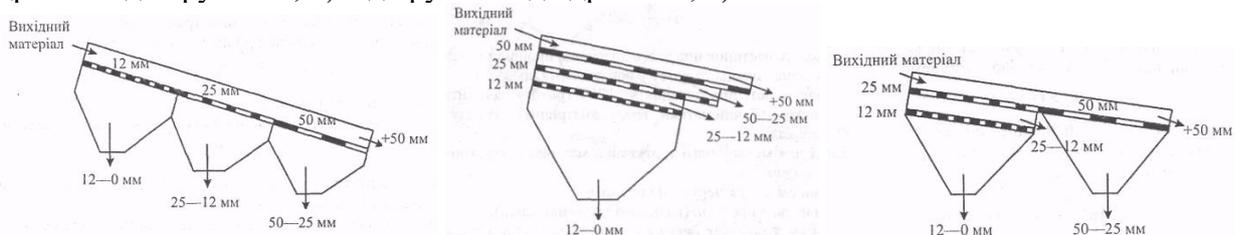
Потужність процесу подрібнювання можна визначити наступним чином:

$$N = \frac{\sigma^2 \Pi_V}{2,4E} (i-1)$$

де σ — межа міцності, МН/м²; Π_V — об'ємна продуктивність технологічної лінії, м³/год; E — модуль пружності матеріалу, МН/м².

Розділення сипучих матеріалів.

Механічне сортування (просіювання) – процес відокремлення різних фракцій матеріалу за використанням решіт за допомогою машин з пристроями для просіювання. При застосуванні n решіт отримується $(n + 1)$ сортів матеріалу. Просіювання може бути самостійним (кінцевим), проміжним, допоміжним (відсіювання небажаних компонентів). В залежності від схеми розміщення решіт розрізняють послідовності просіювання: а) від дрібного до крупного, б) від крупного до дрібного, в) комбінована.



Сортуюча частина може бути стаціонарною або приводиться у періодичний рух виконавчими механізмами. Показником ефективності процесу є якість просіювання:

$$\eta = \frac{A1}{A} \cdot 100\%$$

де $A1$ – кількість часток нижнього класу, A – початкова кількість нижнього класу.

Пристрої для сортування називаються грохотами (самостійно)

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 14

Повітряне сортування – процес відокремлення дрібних фракцій (до 100 мкн) матеріалу за використанням гравітаційного та відцентрового ефектів.

При гравітаційному методі сортування відбувається у рухомому чи нерухомому середовищі. Під час осадження в нерухомому середовищі на дуже дрібні частинки діє середовище із силою згідно із законом Стокса:

$$F = 3\pi dV_0\mu,$$

де d – еквівалентний діаметр частинки, м; V_0 – швидкість осадження частинок, м/с; μ – в'язкість середовища, Па • с.

Силу осадження кулястої частинки можна визначити так:

$$\sigma = \frac{\pi d^3}{6}(\rho_1 - \rho_2)g$$

де ρ_1 – об'ємна маса частинки; ρ_2 – об'ємна маса середовища. Для випадку, коли $G = F$, швидкість осадження

$$V_0 = \frac{d^2(\rho_1 - \rho_2)g}{18\mu}$$

Для більш крупних частинок сила опору середовища за законом Ньютона дорівнює

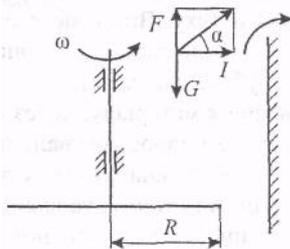
$$F = \psi\rho_2 S \frac{V_0^2}{2}$$

де ψ – коефіцієнт опору середовища; S – площа проекції частинки на поверхню осадження; V_0 – швидкість осадження. Якщо $F = \sigma$, швидкість осадження визначають так:

$$V_0 = \frac{4gd(\rho_1 - \rho_2)}{3\psi\rho_2}$$

За цих умов одні частинки осідають ($G > F$), інші перебувають у зваженому стані ($G = F$), треті зносяться середовищем ($G < F$).

При відцентровому методі на частинку діє відцентрова сила інерції $I = mV^2/R$, сила опору середовища (визначають за законом Ньютона) і сила тяжіння, якою можна знехтувати.



Сумарна сила являє собою діагональ прямокутника. Чи винесеться частинка за межі стінки апарата чи залишиться, можна судити за значенням кута α :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F}{I} = \frac{3\psi\rho_2 V_0^2}{d\rho_1 R 4\omega^2}$$

де ω – кутова швидкість потоку.

Кування та штампування.

Існує 2 основних способи кування – вільне кування та штампування. Вільне кування виконується на пароповітряних пневмо-молотах та гідравлічних пресах, робочими органами яких є наковальня та боек. Рушійною силою процесу є ударне навантаження періодичної дії, що призводить до формування бажаних розмірів деталі – паковки. Перед операцією кування деталь нагрівають в одно- або багатоканерних печах до критичної температури до 1200 градусів (сталь).

Штампування деталей відбувається в той же спосіб та на схожому обладнанні, але розміри штамповки визначаються формовочною плитою або штампом. Різновидом штампувальних машин є горизонтально-кувальні машини для гарячої штамповки деталей з прутів. Штамповка машин складається з матриці – зазвичай двох металевих напівкіл, що рухаючись горизонтально охоплюють прут та пуансона, що рухаючись по осі деталі пробиває отвір та відрізає її (виготовлення кілець для підшипників).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 15

Виділяють також холодне штампування (всадка) – придання форми без попереднього нагрівання деталі (поширений спосіб виготовлення роз’ємних різьбових елементів з’єднань та деталей з пластмас).

Обробка різанням.

До процесів обробки різанням відносять такі, в яких спосіб формування бажаної форми деталі виконується зняттям поверхневого шару матеріалу. Наведемо стислу класифікацію операції обробки різанням:

1. за ступенем доробки: а) чорнові, б) чистові (фінішні);
2. за способом різання (головний рух – створюється ефект різання, рух подачі – спрямовується ефект різання).
 - а. різання та рубка – розділення (розкрій) металу на частини за використанням обертового чи поступального головного руху.
 - б. точіння;
 - і. токарні (обточування) – заготовці надається обертальний рух – головний, а інструментам (різцям) поступальний – рух подачі.;
 - іі. шліфувальні – головний рух завжди обертальний, що виконується інструментом (шліфувальний круг);
 - с. стругання
 - і. стругальні. При струганні на повздошно-стругальних верстатах головний рух надається заготовці а рух подачі - інструменту (різцю). При струганні на поперечно - стругальних верстатах і обробці заготовель на довбальних верстатах головний рух повідомляється інструменту (різцю), а рух подачі - заготовці або різцю.;
 - іі. фрезерувальні – головний рух надається інструменту (фрезі), а рух подачі - заготовці.;
 - ііі. свердловальні (розточувальні) – головний рух, як і рух подачі звичайно надаються інструменту, однак у спеціальних верстатах це може не виконуватись.;
3. за складом головного руху деталь-різець;
 - а. вертикальні;
 - б. горизонтальні, тощо.

Технологічні операції виконуються зазвичай на обладнанні у назві якого фігурує однойменний технологічний метод.

Контроль

Питання за лекцією:

1. Означення та класифікація процесу подрібнення.
2. Ступінь подрібнення матеріалу. Критерій вибору ефективного методу подрібнення.
3. Суть та математична представлення поверхневої та об’ємної теорії подрібнення. Визначення потужності процесу.
4. Означення та основні види механічного сортування (просіювання). Типові схеми розміщення решіт. Оцінка ефективності процесу.
5. Означення та основні види повітряного сортування матеріалу. Математичне формулювання закону Стокса, сили та швидкості гравітаційного осадження.
6. Суть методу відцентрового повітряного сортування, його математична ілюстрація.
7. Технологічні процеси кування та штампування. Рушійні сили та принцип дії обладнання. Спорідненості та відмінності процесів.
8. Сутність процесів обробки різанням. Класифікація та стисла характеристика технологічних операцій.

Самостійна робота:

Питання на самостійний розгляд:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 16

1. Щелепні дробарки. Класифікація, принцип дії, фізичні умови функціонування. Продуктивність.
2. Конусні дробарки. Класифікація, принцип дії, фізичні умови функціонування і основні параметри, що характеризують їх роботу. Продуктивність.
3. Валкові дробарки. Види, принцип дії та фізичні умови функціонування і основні параметри, що характеризують їх роботу. Продуктивність.
4. Бігуни ---
5. Кульові млини ---
6. Граційні, вібраційні та барабанні грохоти. Призначення. Принцип дії і рушійні сили, що зумовлюють процес. Переваги та недоліки.
7. Прохідні та відцентрові сепаратори. Призначення. Принцип дії і рушійні сили, що зумовлюють процес. Основні параметри їх роботи.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 17

Лекція №5 Технологічні процеси металообробки.

Технологічні процеси металообробки

Мартін Богдановський

Маршрутна карта

◆ Узагальнена маршрутна карта металообробки (автопром)

№ операції	Назва операції	Короткий зміст	Обладнання / засоби	Контроль
0	Заготівельна	Отримання заготовки (лиття, кування, штампування)	Ливарна форма, прес, штамп	Візуальний контроль, УЗД дефектоскопія
1	Чорнова токарна / фрезерна обробка	Зняття припусків, формування базових поверхонь	Верстат з ЧПК (токарний/ фрезерний центр)	Контроль розмірів штангенінструментом
2	Свердління та розточування	Виконання отворів, каналів для мастила, різьб	Свердлильні та розточувальні ЧПК верстати	Шаблони, 3D-координатні вимірювачі
3	Чистове фрезерування	Обробка площин, базових поверхонь	Фрезерний центр (3–5 осей)	Контроль шорсткості та точності
4	Шліфування	Досягнення високої точності й чистоти	Круглошліфувальні, плоскошліфувальні верстати	Контроль Ra, мікрометри

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 18

Маршрутна карта

5	Протягування / зубонарізання	Формування профільних отворів, зубців, шліців	Протяжні верстати, зубофрезерні	Контроль профілемірами, калібрами
6	Термообробка	Гартування, відпуск, цементація для зміцнення	Печі термічні, індукційні установки	Твердість (HRC), металографія
7	Фінішна мех. обробка	Доводка після термообробки (шліфування, хонінгування)	Хонінгувальні, доводочні верстати	Контроль геометрії СММ
8	Поверхнєве покриття	Захист від корозії, зміцнення (гальваніка, напилення)	Гальванічні лінії, плазмові установки	Адгезія, товщина шару
9	Фінальний контроль	Геометричний, візуальний, неруйнівний	КООРДИНАТНО-вимірвальні машини (СММ), УЗД	Протоколи, маршрутна карта

Операційна карта (колінчастий вал)

№	Операція	Вид обробки	Обладнання	Контроль / Примітки
1	Заготівка колінчастого валу (лиття/ковання)	Формування	Лиття / Ковальський прес	Візуальний контроль, перевірка розмірів
2	Термічна обробка (відпал, загартування)	Термічна	Піч, печі загартування	Перевірка структури металу, твердості
3	Механічна обробка поверхні (шліфування, фрезерування)	Обробка різанням	Токарний верстат, фрезерний верстат	Контроль діаметра шийок, точності профілю
4	Точіння шийок та опорних площин	Обробка різанням	Токарний верстат	Вимірювання мікрометром / калібром
5	Свердління / проточка масляних каналів	Обробка різанням	Свердильний верстат	Перевірка прохідності каналів

Операційна карта (колінчастий вал)

6	Шліфування робочих поверхонь	Шліфування	Циліндрово-шліфувальний верстат	Контроль шорсткості та розмірів
7	Балансування валу	Обробка безконтактна / корекція	Балансувальний станок	Контроль статичного та динамічного дисбалансу
8	Контроль геометрії	Контроль	Креслярські інструменти, 3D сканери	Перевірка точності положення шийок і вікон
9	Очистка та підготовка до складання	Механічна / хімічна	Мийні установки	Візуальна перевірка, видалення стружки і шлаку
10	Маркування та упаковка	Операція маркування	Прес-маркувальник / лазер	Нанесення серійного номеру, упаковка для транспортування

Основні технологічні операції обробки тиском

1. Штампування (листова штамповка)

- **Призначення:** формування кузовних панелей (двері, крила, дах, капот).
- **Методи:** холодне штампування, гаряче штампування.
- **Переваги:** висока продуктивність, повторюваність форми, мінімальні відходи.
- **Обладнання:** гідравлічні та механічні преси, штампи.
-  Приклад: виробництво кузовних елементів на пресових лініях.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 20

Основні технологічні операції обробки тиском

2. Пресування (екструзія)

- **Призначення:** виготовлення алюмінієвих профілів (рамні елементи, підсилювачі кузова, деталі ходової частини).
- **Особливості:** метал видавлюється через матрицю, отримуючи профіль потрібного перерізу.
- **Матеріали:** алюміній, магній, мідь та їх сплави.

<https://youtu.be/U6LrzT4k4qI?si=iOsKgZLhCD4eI9eS>

Основні технологічні операції обробки тиском

3. Кування

- **Призначення:** отримання високонавантажених деталей із підвищеною міцністю (колінчасті вали, шатуни, зубчасті колеса, маточини коліс).
- **Методи:**
 - Вільне кування (великі заготовки).
 - Штампове кування (серійне виробництво точних деталей).
- **Переваги:** щільна структура металу, підвищена втомна міцність.

<https://youtu.be/jVukyLrYSOU?si=HmnbEA9xTJvdcB6K>

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 21

Основні технологічні операції обробки тиском

4. Волочіння

- **Призначення:** виготовлення дроту, тросів, елементів підвіски, кабельних конструкцій.
- **Особливості:** зменшення перерізу заготовки шляхом протягування крізь калібровані отвори (фільтери).

<https://youtu.be/o4vQJnPwgiA?si=CZh6pQs3OyZFbcJq>

Основні технологічні операції обробки тиском

5. Прокатка

- **Призначення:** отримання листового прокату для кузовних деталей, профілів для підрамників і балок.
- **Види:**
 - Гаряча прокатка (товсті листи, балки).
 - Холодна прокатка (тонкі листи високої точності, наприклад для кузовних панелей).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 22

Основні технологічні операції обробки тиском

6. Гідроформування (сучасна технологія)

- **Призначення:** виготовлення складних порожнистих профілів (наприклад, елементи каркасу кузова, вихлопні системи).
- **Суть:** використання високого тиску рідини для формування труби або профілю в замкнутому штампі.
- **Переваги:** легші та жорсткіші конструкції → зменшення маси автомобіля.

Основні технологічні операції обробки тиском

◆ **Значення для автопрому** 🚗

- Забезпечення **масового виробництва** деталей з високою точністю.
- Зменшення **собівартості** виробів завдяки штампуванню.
- Отримання деталей з **оптимальними механічними властивостями**.
- Використання легких сплавів (Al, Mg) для зниження ваги автомобіля.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 23



Основні технологічні операції обробки різанням

1. Токарна обробка

- **Призначення:** виготовлення та обробка тіл обертання (вали, маточини, гальмівні диски, шківни).
- **Види:** чорнова, чистова, різьбонарізання.
- **Обладнання:** верстати з ЧПК, токарно-фрезерні центри.



Основні технологічні операції обробки різанням

2. Фрезерування

- **Призначення:** обробка площин, пазів, зубчастих коліс, корпусних деталей.
- **Види:** торцеве, кінцеве, копіювальне, 5-осьове.
- **Приклад:** виготовлення головки блоку циліндрів, коробки передач.

<https://youtu.be/mEsuTX6Empc?si=sFlxtSClcsia7uAs>

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 24

Основні технологічні операції обробки різанням

3. Свердління, розточування, зенкування, розгортання

- **Призначення:** виконання отворів у деталях двигуна, коробки передач, елементах ходової частини.
- **Приклад:** обробка отворів під клапани, канали для мастила, посадочні місця під підшипники.

<https://youtu.be/DGsV6RhBnbM?si=vLQRcjf3nFQNNTN>

Основні технологічні операції обробки різанням

4. Шліфування

- **Призначення:** отримання високої точності та чистоти поверхні ($Ra \leq 0,2$ мкм).
- **Приклад:** шліфування колінчастих і розподільних валів, сідел клапанів, підшипникових шийок.
- **Різновиди:** круглошліфування, плоске шліфування, безцентрове.

<https://youtu.be/3J3uvVcTLa4?si=ELpYt0WXFdxXNgyZ>

<https://youtu.be/b0ZpjdB0Ac?si=ATyc3p2WNG-8-OCF>

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 25



Основні технологічні операції обробки різанням

5. Протягування (брошування)

- **Призначення:** обробка шліцьових, багатогранних і спеціальних профільних отворів.
- **Приклад:** зубчасті отвори в маточинах, втулках, деталях трансмісії.



Основні технологічні операції обробки різанням

6. Різання високоточними методами

- **Лазерне різання:** розкрюювання листових заготовок для кузова.
- **Водоструминне різання:** для композитів і алюмінієвих деталей (рідше).
- **Плазмове різання:** для товстих металевих листів (нестандартні кузовні деталі, ремонт).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 26

Лазерна різка металу

◆ Суть процесу

Лазерний промінь високої потужності (від сотень Вт до десятків кВт) фокусується на невелику ділянку поверхні металу. У зоні контакту матеріал швидко нагрівається, плавиться й випаровується, а допоміжний газ (кисень, азот або повітря) видуває продукти плавлення.

Лазерна різка металу

◆ Основні параметри

- **Джерело випромінювання:** CO₂-лазери, волоконні лазери (fiber laser).
- **Потужність:** 500 Вт – 20 кВт (залежно від товщини металу).
- **Товщина обробки:**
 - Сталь — до 25–40 мм
 - Алюміній — до 20–25 мм
 - Нержавіюча сталь — до 30 мм
- **Швидкість різання:** до 10–20 м/хв (для тонких листів).
- **Якість кромки:** чиста, без задирок, з мінімальним термічним впливом.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 27

Лазерна різка металу

◆ Основні параметри

- **Джерело випромінювання:** CO₂-лазери, волоконні лазери (fiber laser).
- **Потужність:** 500 Вт – 20 кВт (залежно від товщини металу).
- **Товщина обробки:**
 - Сталь — до 25–40 мм
 - Алюміній — до 20–25 мм
 - Нержавіюча сталь — до 30 мм
- **Швидкість різання:** до 10–20 м/хв (для тонких листів).
- **Якість кромки:** чиста, без задирок, з мінімальним термічним впливом.

Лазерна різка металу

◆ Переваги

- ✓ Висока точність (похибка ±0,05 мм)
- ✓ Вузька зона термічного впливу → мінімальні деформації
- ✓ Відсутність механічного зносу інструмента
- ✓ Можливість обробки складних контурів і дрібних деталей
- ✓ Автоматизація й інтеграція у виробничі лінії (роботи, ЧПК)

◆ Недоліки

- ⚠ Висока вартість обладнання та обслуговування
- ⚠ Обмеження по товщині матеріалу (для дуже товстих заготовок ефективніші інші методи)
- ⚠ Вимоги до енергопостачання та вентиляції (при використанні допоміжних газів)

<https://www.youtube.com/watch?v=PX8eXR-eSiY>

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 28

Лазерна різка металу

◆ Застосування в автопромі 🚗

- Вирізання елементів кузова (двері, крила, дах) із сталевого листа.
- Виготовлення дрібних кронштейнів, кріплень та декоративних елементів.
- Підготовка заготовок для подальшої зварки.
- Виробництво прототипів і малих серій деталей.

Обробка різанням

◆ Значення для автопрому 🚗

- Забезпечення **високої точності** і чистоти поверхонь.
- Можливість виготовлення **складних геометричних форм**.
- Фінальна підготовка деталей до складання.
- Зменшення браку та підвищення ресурсу вузлів.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 29

Лекція №6 Типові гідромеханічні процеси та їх апаратна реалізація.

Розділення неоднорідних систем

Неоднорідна система – це суміш, фізичні властивості якої є неоднаковими у доволіно розглянутому об'ємі суміші. До таких систем відносять, класифікуючи за агрегатним станом перебування речовини, наступні:

1. Рідина-газ;
2. Рідина-тверда речовина;
3. Рідина-рідина;
4. Газ-тверда речовина.

Речовини с складі суміші поділяють на основне середовище, та домішки (за масовою часткою).

Термінологічно від складу суміші виділяють наступні їх види:

1. Суспензія (рідина - тверда речовина);
2. Емульсія (рідина - рідина);
3. Піна (рідина - газ);
4. Пил, дим (газ - тверда речовина);
5. Туман (газ - рідина).

Суспензії поділяють на грубі(>100 мкн), тонкі(1-100 мкн), муті(0,1-1 мкн), та колоїди(<0,1).

Очищення повітря від газів та пилу.

Промислове очищення газів від завислих у них твердих чи рідких частинок проводять для зменшення забруднення повітря, видалення шкідливих домішок чи уловлювання з газу коштовних продуктів.

У промислових умовах пил може утворитися в результаті механічного подрібнювання твердих тіл (під час дроблення, стирання, розламування, транспортування тощо), під час горіння палива (зольний залишок), під час конденсації пари, а також у результаті хімічної взаємодії газів, що супроводжується утворенням твердого продукту. Одержуваний у таких процесах пил складається з твердих частинок розмірами 3...70мкм. Суспензії, які утворюються в результаті конденсації пари (нафтові дими, тумани смол, сірчаної кислоти й ін.), найчастіше складаються з дуже дрібних частинок розмірами від 0,001 до 1 мкм.

Ступінь очищення газу (ККД обладнання) визначають так:

$$\eta = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \cdot 100 \% = \frac{V_1 X_1 - V_2 X_2}{V_1 X_1} \cdot 100 \%,$$

де G_1 і G_2 . — кількість завислих частинок відповідно у вихідному (забрудненому) і очищеному газі, кг/г; V_1 і V_2 — об'ємні витрати вихідного й очищеного газу, зведеного до нормальних умов, м³/г; X_1 і X_2 — концентрація завислих частинок у запиленому газі, зведеному до нормальних умов, кг/м³.

Основними методами очищення повітря є:

1. Гравітаційне очищення;
 2. Відцентрове очищення;
 3. Фільтрування;
 4. Гідравлічне очищення;
 5. Електричне очищення.
- (розглянути самостійно)

Розділення суспензій та емульсій

Фільтрування – процес розділення неоднорідних рідких і газових систем за допомогою пористих проникних перегородок, що затримують тверду і пропускають рідку фазу. Рушійною

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 30

силою процесу є різниця тисків середовища з боків фільтруючого агента. В якості агента використовується тверда пориста речовина, нейтральна за хімічними властивостями до суміші. Агенти розрізняються за формою, активною площею, формою та розміром поперечного перерізу, хвилястістю каналів пор та активної поверхні, тощо. Основними групами факторів, що впливають на процес фільтрування є наступні:

1. Макрофактори:
 - а. Структура та геометрія фільтруючого агента та кількість осаду
 - б. Різниця тиску з боків агенту;
2. Мікрофактори:
 - а. Розміри та форма пор;
 - б. Фракційний склад суміші;
 - с. Фізико-хімічний стан суміші (іноді).

Розрізняють наступні види фільтрування:

1. З утворенням осаду (екзофільтрація);
2. Із закупоренням агенту (ендофільтрація);
3. Змішана;
4. З поступовим закупорюванням;
5. З повним закупорюванням.

(Фільтри, призначення та класифікація - самостійно)

Центрифугування – процес розділення неоднорідних рідких і газових систем за використанням відцентрових сил. Машина для центрифугування – центрифуги, за принципом дії поділяються на відстійні та фільтруючі. Принцип дії перших базується на явищі зміни сумарної сили взаємодії домішок та середовища (див лекцію 3), а других на зміні ступеню фільтрування в залежності від значення відцентрових сил.

(Види центрифуг, та їх особливості застосування - самостійно)

Змішування матеріалів

Змішування – це процес усереднення матеріалу за вологістю і гранулометричним складом та створення сталої в об'ємі і часі температури хімічної реакції.

Змішування можна виконувати механічним, пневматичним, мішаним (комбінованим) способами. Механізми для змішування називають мішалками або змішувачами. Мішалки застосовують для змішування рідин, сипучих матеріалів, пластичних мас.

В залежності від призначення мішалки поділяють:

1. Для змішування рідин: лопатеві, пропелерні, турбінні, пневматичні, планетарні та інші мішалки.
2. Для змішування сипучих матеріалів: лопатеві змішувачі, z-подібні, гвинтові, барабанні мішалки.
3. Для змішування пластичних мас використовують гвинтові, дискові, черв'ячні, комбіновані змішувачі.

(Призначення, принцип дії та сфери застосування, основні показники та параметри роботи мішалок самостійно)

Зберігання та дозування матеріалів

Зберіганням називається технологічна операція чи процес часового (транспортного) утримання матеріалу без зміни фізико-хімічних параметрів його стану. Промислові установки, що виконують зазначений процес називаються бункерними установками до складу яких входять:

1. Бункери;
2. Напівбункери;
3. Пересипні лійки;
4. Силоси.

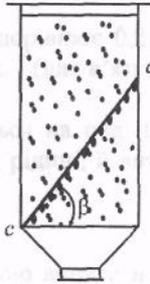
Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 31

Бункерні установки містять наступні основні частини:

1. Завантажувальні пристрої;
2. Спускні лотки та труби;
3. Контрольно-вимірвальні пристрої;
4. Несучі будівельні конструкції.

Пересипні лійки відрізняються від бункерів розмірами і зазвичай не мають затворів.

Півбункери відрізняються від бункерів малою глибиною порівняно з розмірами в плані;



Силосами називають резервуари з вертикальними стінками, які застосовують для довгострокового зберігання насипних вантажів. Силоси відрізняються від бункерів більшою висотою порівняно з розмірами в плані (малюнок).

Конструктивне виконання бункерних установок залежить від:

1. Гранулометричного складу речовини:
 - a. крупнокускові (ат > 160);
 - b. середньокускові (ат = 60 - 120);
 - c. дрібнокускові (ат = 10 - 60);
 - d. Крупнозернисті (ат = 2 - 10);
 - e. Дрібнозернисті (ат = 0,5 - 2);
 - f. Порошкоподібні (ат = 0,05 - 0,5);
 - g. Пилоподібні (ат < 0,05).
2. Вологості
 - a. Хімічно-зв'язана волога;
 - b. Гігроскопічна волога (з оточуючого середовища);
 - c. Зовнішня плівкова та гравітаційна волога.
3. Об'ємної (маса одиниці об'єму) та питомої маси речовини
 - a. Легкі (0,6 т/куб.м.)
 - b. Середні (0,6 - 1,1 т/куб.м.)
 - c. Важкі (1,1 - 2 т/куб.м.)
 - d. Надважкі (більше ніж 2 т/куб.м.)
4. Рухливості та зв'язаності часток тощо.

(Види, принцип дії та основні параметри роботи бункерів та живильників самостійно)

Контроль

Література: Основні процеси машини та апарати хімічних виробництв

Питання за лекцією:

1. Означення неоднорідної системи. Класифікація та визначення основних їх видів.
2. Очищення повітря від газів та пилу. Призначення. Джерела утворення забруднення. Визначення ступеню очищення.
3. Основні методи очищення повітря. Коротка характеристика.
4. Означення процесу фільтрування. Властивості фільтруючих агентів. Основні групи факторів, що впливають на процес фільтрування. Види фільтрування.
5. Означення процесу змішування та апарати для його реалізації. Класифікація апаратів за призначенням.
6. Означення процесу зберігання та апарати для його реалізації. Основні елементи бункерних установок.
7. Види бункерних установок. Основні фактори, від яких залежить їх виконання.

Самостійна робота:

Основні процеси машини та апарати хімічних виробництв (стр. 50-106)

1. Гравітаційне та відцентрове очищення. Принцип дії обладнання і рушійні сили процесу. Основні параметри роботи обладнання.
2. Гідравлічне очищення. Основні способи очищення та обладнання.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 93 / 32</i>

3. Електроочищення. Принцип дії та обладнання, що використовується. Основні конструктивні елементи електрофільтрів. Переваги методу очищення.
4. Призначення та класифікація фільтрів для розділення суспензій та емульсій.
5. Види центрифуг, та їх особливості застосування.
6. Призначення, принцип дії та сфери застосування мішалок, основні показники та параметри їх роботи.
Види, принцип дії та основні параметри роботи бункерів та живильників.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 33

Лекція №7 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:

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

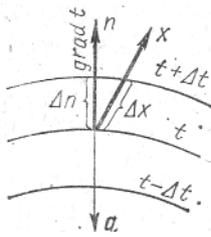


Рис.4.1. Температурне поле

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 тепломісткість 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:

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

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) Φ 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 Φ 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:

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

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 34

Коефіцієнт пропорційності λ 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 λ , тим кращим провідником теплоти є речовина. Матеріали, теплопровідність яких менша за 0,2 Вт/(м • К), називають *теплоізоляційними*.

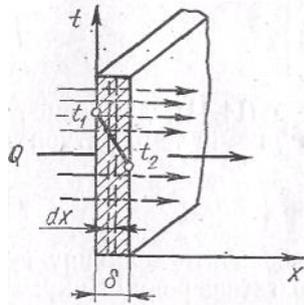
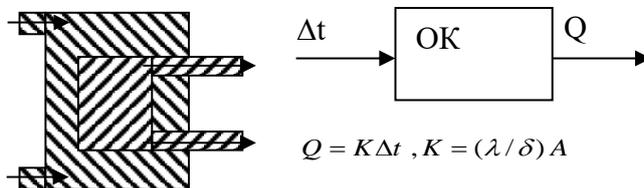


Рис.4.2. Тонка одношарова стінка

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 δ - товщина стінки, λ/δ - теплова провідність стінки, A – площа поверхні передачі, Δt – різниця температур поверхонь, τ - 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 Φ , що проходить через поверхню твердого тіла, що омивається конвекційним потоком, визначається наступним чином:

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

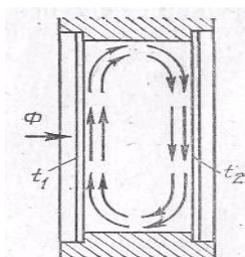


Рис.4.3. Теплообмін конвекцією

де A поверхня, яка бере участь у теплообміні, $t_{ст}$ — температура поверхні стінки, а t_p — температура середовища, що омиває поверхню стінки. Коефіцієнт пропорційності α , 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.

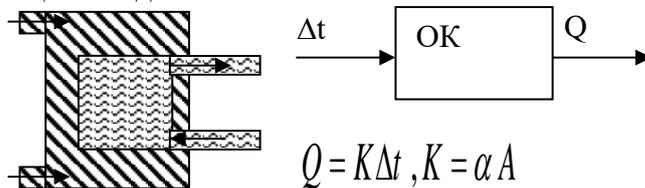
За причиною виникнення рух рідини буває вільним і вимушеним.

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

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 35

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 Φ 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 Φ .

З усього потоку випромінювання Φ , що падає на поверхню тіла, частина Φ_a поглинається тілом, частина Φ_r відбивається від нього, а частина Φ_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 $C_0 = 5,68 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$, ξ – ступінь чорноти тіла (сталь – 0.82, алюміній – 0.11).

Кількість енергії, що випромінюється в одиницю часу у менш нагрітий 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;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 93 / 36</i>

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.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 37

Лекція №8

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 теплоносіє, а повітря, що розносить теплоту по приміщенню, — нагрівний.

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

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.

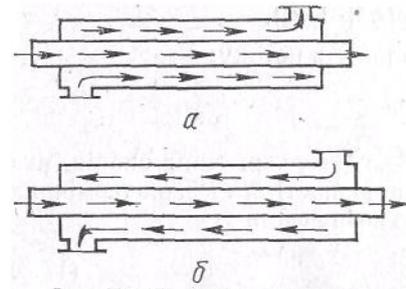


Рис.5.1. а) прямоточні, б) протитечійні теплообмінники

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 Δt_{cp} тобто середня різниця температур гріючої і нагрівної рідини. У протитечійній схемі майже завжди, Δt_{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 теплоносіє — 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 теплоносіє (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.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 38

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 стінку

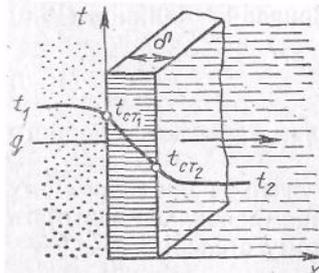


Рис.5.2. Теплообмін двох середовищ через стінку.

(рис. 5.2), товщина якої дорівнює δ . Теплопровідність матеріалу стінки дорівнює λ . 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 $t_{ct1} > t_{ct2}$. 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:

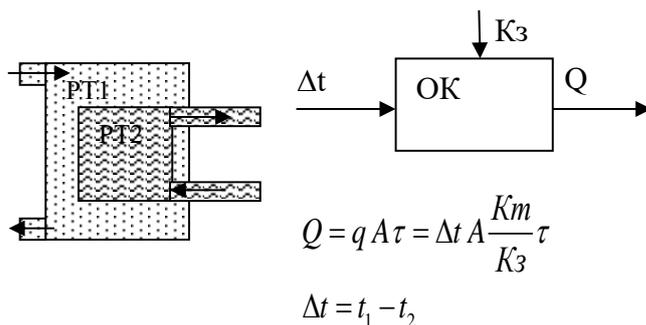
$$q = (t_1 - t_2) / (1/\alpha_1 + \sigma/\lambda + 1/\alpha_2)$$

Знаменник останнього виразу представляє собою коефіцієнт теплопередачі K_t .

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

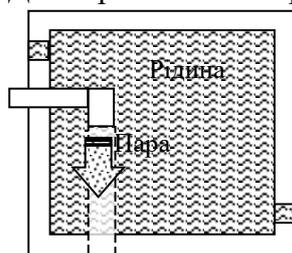
$$Q = q A \tau = \Delta t A \frac{K_m}{K_3} \tau$$

$$\Delta t = t_1 - t_2$$



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.



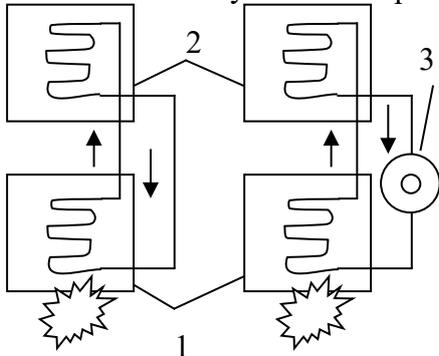
Нагрівання паром. Водяна пара є одним з найпоширеніших теплоносіїв з температурою 150-170гр. Перевагами використання пари є велика теплоємність та тепловіддача, зручність транспортування та легкість у регулюванні температурного режиму. Використовують насичену пару (6-10ат.) та відпрацьовану (2-3ат.).

Нагрів паром може виконуватись у рекуперативних (регенеративних) теплообмінниках – глуха пара, та змішувальних – гостра пара. Для отримання температури >170 гр

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 39

використовують пару високо киплячих рідин та ртуті (t до 500гр.). Важливим контрольованим параметром парової ТС є тиск з ростом якого пара перегрівається та може бути вибухонебезпечною.

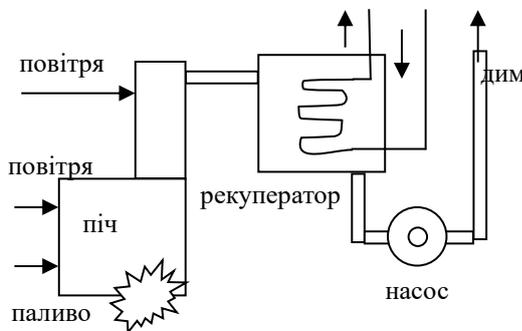
Нагрівання гарячою рідиною. Нагрівання, як правило виконується в рекуператорах із вільним або вимушеним обертанням теплоносія.



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

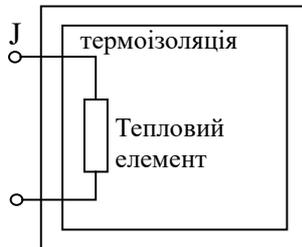
В якості рідини використовують зазвичай воду при тиску до 225ат з температурою до 350гр або розплавлені легкоплавкі метали і сплави (олово, свинець вісмут) з температурою до 1000гр.

Нагрівання гарячими газами.

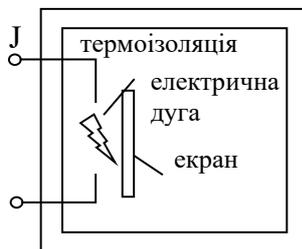


Гарячими газами виступають топкові гази високої температури, що змішуються з повітрям та пропускаються через теплообмінники. Відпрацьований газ виводиться в повітря у вигляді диму. При даному способі нагрівання можливе отримання температури теплоносія до 1000гр. Недоліками є низька теплосмність, не транспортабельність топкових газів, забруднення оточуючого середовища.

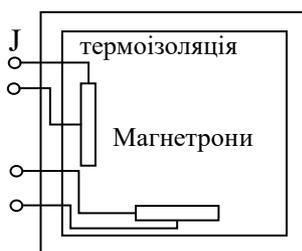
Нагрів електричним струмом. Розрізняють наступні типи нагріву даного виду: нагрів за рахунок електроопору, електричною дугою та діелектричний нагрів.



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 керуваність процесу, можливість нагрівання матеріалів з низькою теплопровідністю.

швидкість та легка керуваність процесу, можливість нагрівання матеріалів з низькою теплопровідністю.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 40

Контроль

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 парою, гарячою рідиною та газами. Принцип та спрощене функціональне представлення апаратів;
8. Нагрівання електричним струмом. Способи нагрівання. Принцип та спрощене функціональне представлення апаратів.

Самостійна робота:

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.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 41

Лекція №9 Типові теплові процеси у виробництві

Типові теплові процеси у виробництві

Мартін Богдановський

Мета презентації

- Ознайомити з основними видами теплових процесів, що застосовуються у промисловості.
- Розглянути класифікацію, характеристики та фізичну суть процесів.
- Показати сучасні технології автоматизації теплових процесів у машинобудуванні, харчовій, авто промисловій та хімічній галузях.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 42

Поняття теплового процесу

Тепловий процес — це сукупність фізико-хімічних перетворень, під час яких відбувається передача, перетворення або використання теплоти.

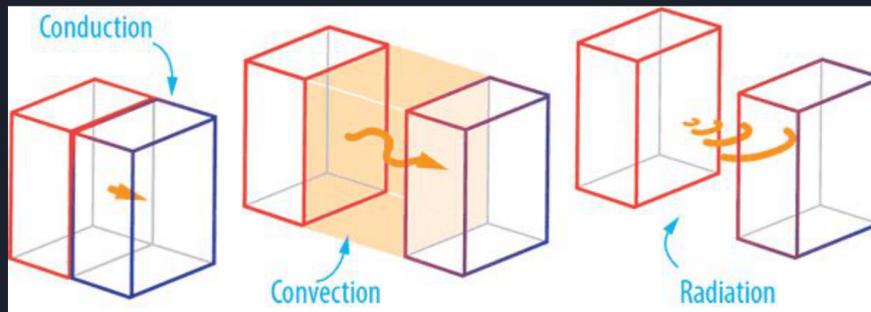


Класифікація теплових процесів

- 🔥 Нагрівання ❄️ Охолодження
- 💧 Конденсація
- ☁️ Пароутворення
- ❄️ Заморожування/розморожування
- 🧊 Плавлення/сублімація

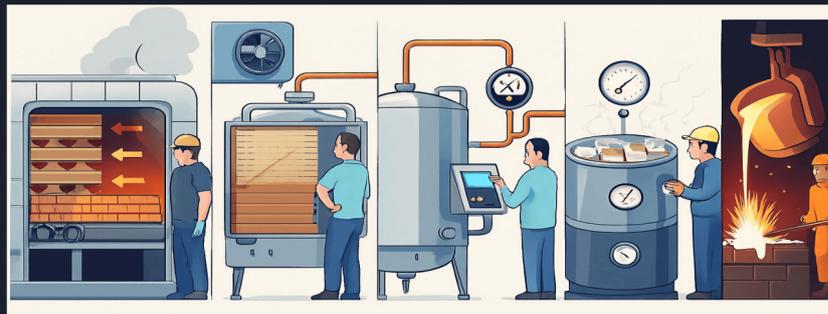
Фізичні механізми передачі теплоти

- **Теплопровідність** – передача теплоти через тверді тіла.
- **Конвекція** – перенос теплоти потоком рідини або газу.
- **Теплове випромінювання** – передача енергії електромагнітними хвилями.



Приклади теплових процесів у виробництві

- Випалювання цегли
- Сушка деревини
- Пастеризація молока
- Варіння консервів
- Плавлення металів



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 44

Застосування теплообмінного обладнання у промисловості:

- **Нафтогазова промисловість:** Теплообмінники використовуються для охолодження та кондиціювання газів та рідин у процесах видобутку, транспортування та переробки нафти та газу. Вони можуть застосовуватися для обігріву сировини або середовища в різних етапах виробництва.
- **Хімічна промисловість:** У хімічній промисловості теплообмінники використовуються для охолодження та нагрівання хімічних реакцій, дистиляції, конденсації пар та ін. Вони можуть бути виготовлені з різних матеріалів, щоб бути сумісними з агресивними хімічними середовищами.

Застосування теплообмінного обладнання у промисловості:

- **Енергетика:** Теплообмінники застосовуються в енергетичних установках для охолодження робочих середовищ у парогенераторах, конденсаторах, а також для нагрівання води в котлах та інших системах.
- **Харчова промисловість:** У харчовій промисловості теплообмінне обладнання використовується для охолодження, нагріву, пастеризації, стерилізації та охолодження різних продуктів, наприклад, молока, соку, пива, олії тощо.

Застосування теплообмінного обладнання у промисловості:

- Автомобільна промисловість: У виробництві автомобілів теплообмінники використовуються для охолодження двигунів, передач, гідравлічних систем, а також для кондиціювання салону та охолодження радіаторів.
- Металургія: Теплообмінники застосовуються в металургійних процесах для охолодження розплавлених металів, охолодження та нагрівання обладнання та середовищ у різних етапах виробництва металів.

Огляд типів теплообмінного обладнання



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 46

Огляд типів теплообмінного обладнання

- Нагрівачі: Це пристрої, які використовуються для нагрівання рідин або газів до певної температури. Вони можуть бути електричними, паровими, газовими або використовувати інші джерела тепла.
- Пастеризатори: Пастеризатори застосовуються в харчовій промисловості для знезараження продуктів шляхом нагрівання до певної температури та утримання на цій температурі протягом певного часу.



Огляд типів теплообмінного обладнання

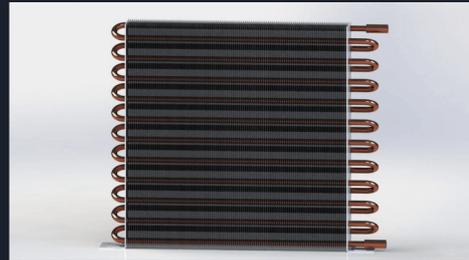
- Економайзери: Це пристрої, які використовують відхідний тепловий потік для попереднього нагріву холодного засобу, що підводиться. Це допомагає зменшити витрати енергії.
- Калорифери: Це пристрої, що забезпечують нагрівання повітря у приміщеннях. Вони можуть бути електричними, паровими чи газовими.



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 47

Огляд типів теплообмінного обладнання

- Ребойлери: Ребойлери використовуються для нагрівання рідин або газів до високих температур шляхом перегріву їх усередині обладнання.
- Конденсатори: Конденсатори застосовуються для конденсації пари в рідину шляхом видалення з них тепла. Вони широко використовуються в хімічній, нафтопереробній та енергетичній промисловості.



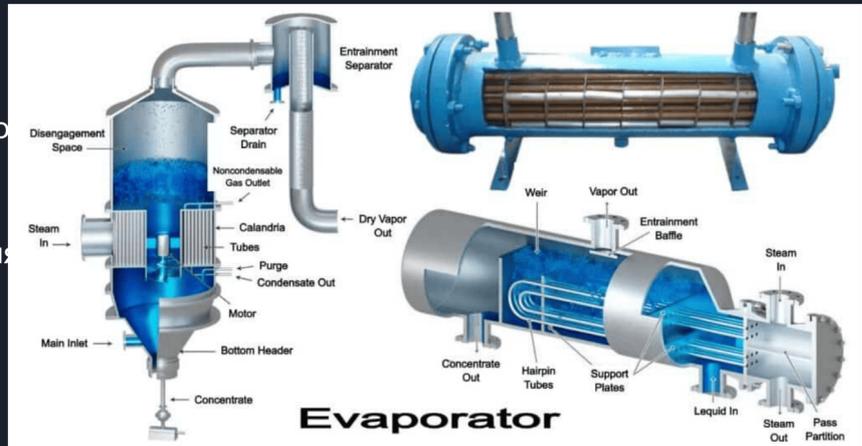
Огляд типів теплообмінного обладнання

- Охолоджувачі: Охолоджувачі використовуються для зниження температури рідини або газу шляхом видалення з них тепла. Вони можуть бути повітряними або рідинними та застосовуються в різних галузях, включаючи харчову, хімічну та автомобільну промисловість.



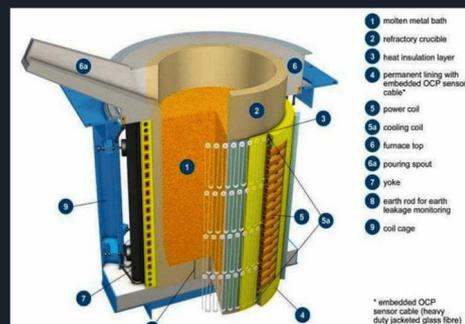
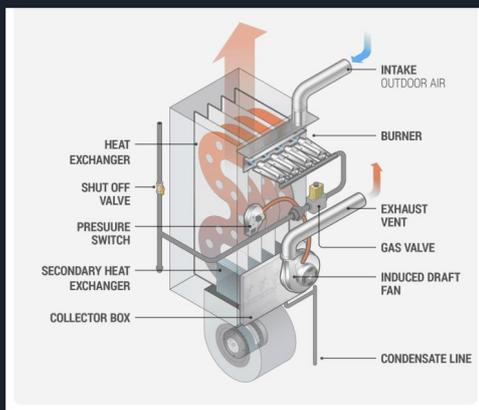
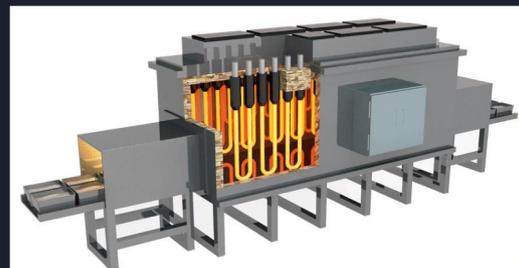
Огляд типів теплообмінного обладнання

- **Випарники:** Випарники застосовуються для випаровування рідин шляхом нагрівання їх до кипіння. Вони часто використовуються в системах кондиціонування повітря, холодильних установках, а також у виробництві хімічних продуктів та нафтопереробці.



Промислові печі

- Електричні
- Газові
- Індукційні



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 49

Теплообмінні апарати у виробництві. Загальні принципи роботи



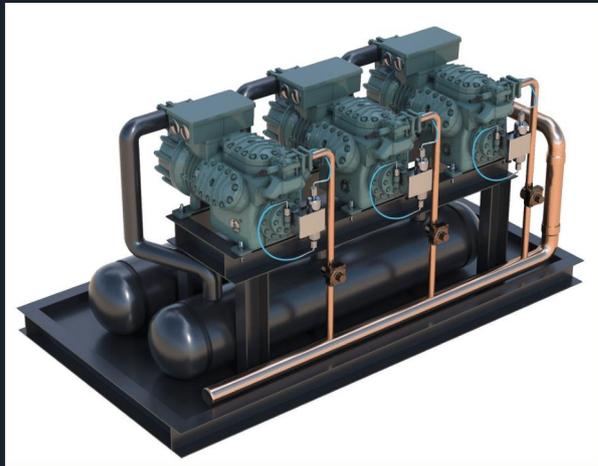
Парогенератори

- Водотрубні
- Жаротрубні

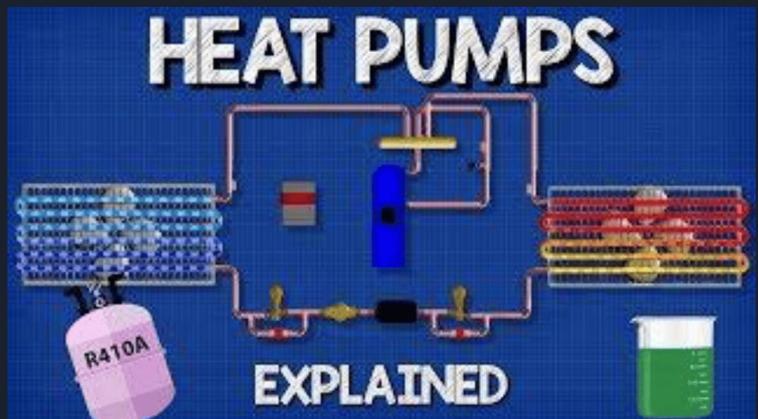
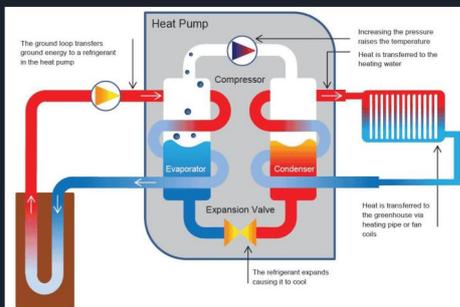


Холодильні установки

- Компресійні
- Абсорбційні



Теплові насоси



Сушильні апарати

- Конвективні сушарки
- ІЧ-сушарки



Пастеризатори

- Тунельні
- Пластинчасті



ПИВО



СІК

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 52

Автоклави

- Стерилізація консервів або медичних виробів



Виробництво електричної енергії тепловими електростанціями



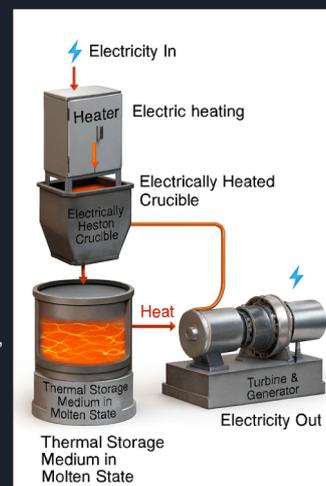
Акумулятори великої потужності

- Накопичення енергії відбувається шляхом нагрівання та плавлення шихти (суміші матеріалів, зазвичай оксидів або солей) у спеціальній термореактивній камері.
- Під час плавлення шихта поглинає велику кількість теплової енергії (латентна теплота плавлення), що дозволяє зберігати енергію у вигляді тепла.
- При охолодженні та кристалізації шихти ця тепла енергія вивільняється й використовується для генерації електроенергії (наприклад,

- **Висока енергоємність:** фазові переходи забезпечують щільне зберігання енергії.
- **Масштабованість:** підходить для великих енергосистем та промислових об'єктів.
- **Стійкість до деградації:** матеріали шихти можуть витримувати багато циклів плавлення/кристалізації.
- **Сумісність з ВДЕ:** ефективне використання надлишкової енергії з сонячних та вітрових електростанцій.

Приклади матеріалів для шихти

- **Кремній (Si):** температура плавлення ~1414 °С, висока теплота плавлення (~1800 кДж/кг).
- **Оксиди металів:** стабільні при високих температурах, дешеві та доступні.
- **Солі (наприклад, NaNO_3 , KNO_3):** використовуються в менш енергоємних, але дешевших системах.

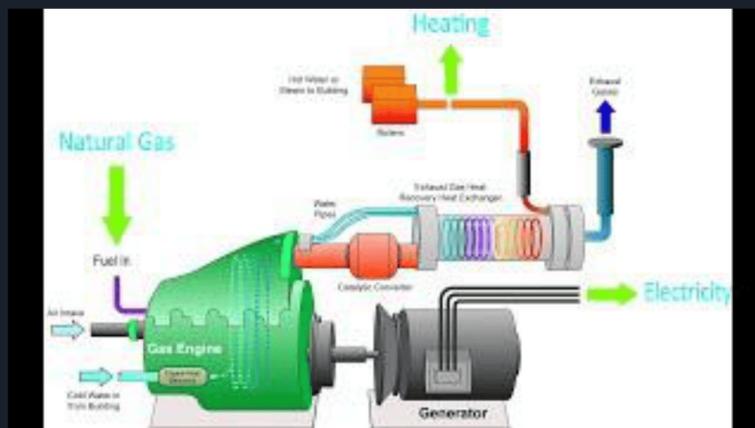


Автоматизація, Енергоефективність

- Датчики температури
- PLC-контролери
- Рекуперація тепла
- Когенерація

Перспективи

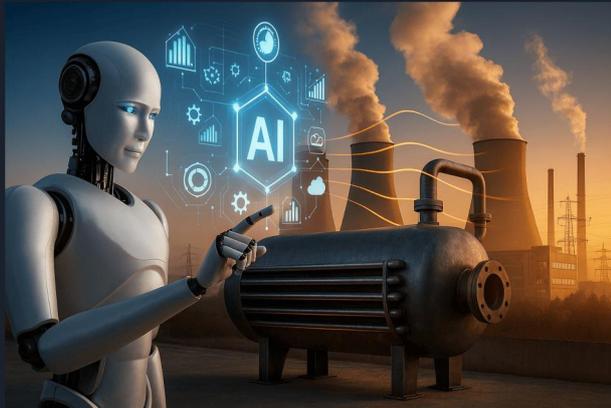
- Нові типи теплових насосів
- Інтелектуальні системи керування
- Зелена енергетика



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 54

Висновки

- Теплові процеси — основа виробництва
- Важливість енергозаощадження
- Автоматизація — шлях до ефективності



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 55

Лекція №10

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 малоєфективний 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*.

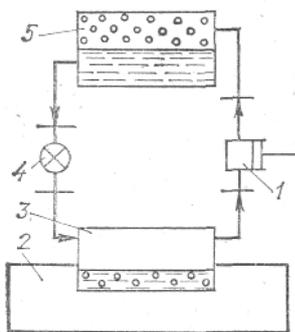


Рис.8.1. Схема холодильної компресійної установки

Принцип роботи компресійної установки. На рис. 8.1 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 використання 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)

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 56

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. 8.2): абсорбер 1, насос 2 і кип'ятильник 3.

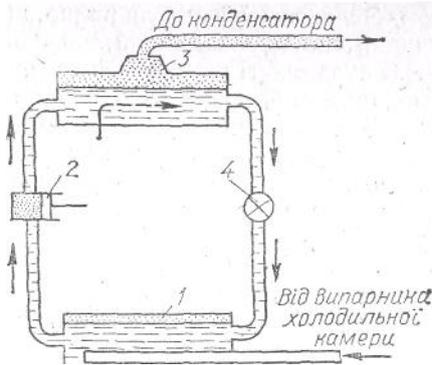


Рис.8.2. Схема холодильної абсорбційної установки.

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.

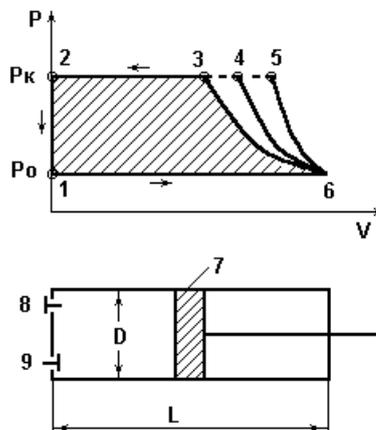
Добутий в абсорбері концентрований розчин аміаку подається насосом 2 до кип'ятильника 3, де він підігрівається теплою із зовні та виварується. Пара аміаку спрямовується до конденсатора, а потім через дросельний вентиль до випарника холодильної камери. Слабкий водно-аміачний розчин, що залишився в кип'ятильнику, 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 8.3. переставлена схема та індикаторна діаграма роботи одноступеневого компресора.



8.3. Функціональна схема та індикаторна діаграма одноступеневого компресора

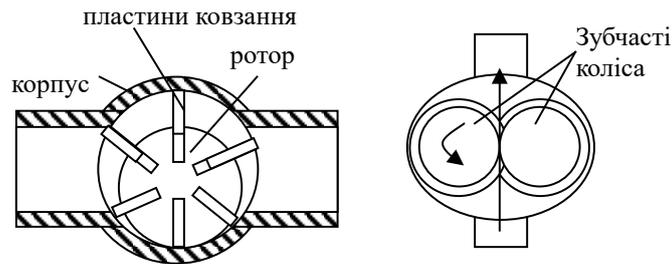
Для охолодження нагрітого при стисненні газу використовують холодильні агрегати. Вважаючи процес стиснення газу близьким до ізотермічним його ілюструють за допомогою індикаторної діаграми. Рівень тиску газу у вихідній магістралі складає до 5 атм. Для більшого його значення використовують багаступеневі поршневі компресори. Поршневі насоси

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 57

мають практично аналогічну будову Перевагами поршневих насосів є незалежність продуктивності від расходу рідини та напору у вихідній магістралі. Мають верикий ккд.

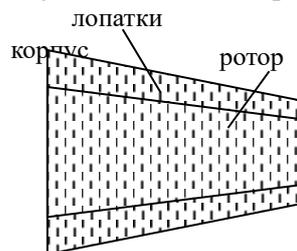
Ротаційні (шиберні) компресори мають інше конструктивне виконання, приведене на наступному малюнку.

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

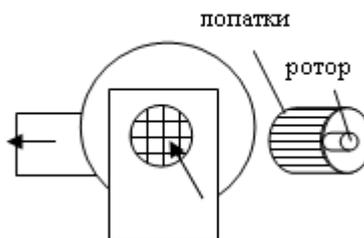


Перевагами ротаційних насосів як і компресорів є порівняно велика продуктивність та простота передатних механізмів від приводів.

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.



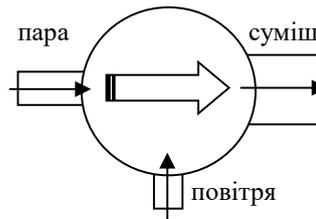
Таке конструктивне виконання рідко використовується для насосів, переважно для мініатюрних із невисокими вимогами до продуктивності та режиму течії рідини, близького до ламінарного.



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.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 58



Контроль

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:

Питання на самостійний розгляд:

1. Етапи робочого циклу Карно для компресійної установки за $p-v$ -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.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 59

Лекція №11

Типові холодильні процеси виробництва та промислове обладнання.

Типові холодильні процеси виробництва та промислове обладнання

Мартін Богдановський

Основні поняття холодильних процесів

- Передача тепла між середовищами
- Використання циклів з робочими речовинами (фреони, аміак, CO₂)
- Основні етапи: стиснення, конденсація, дроселювання, випаровування



Класифікація холодильних процесів

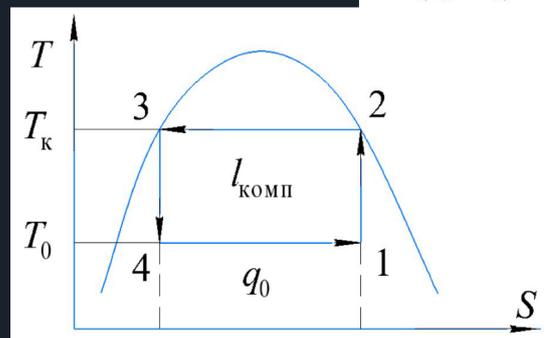
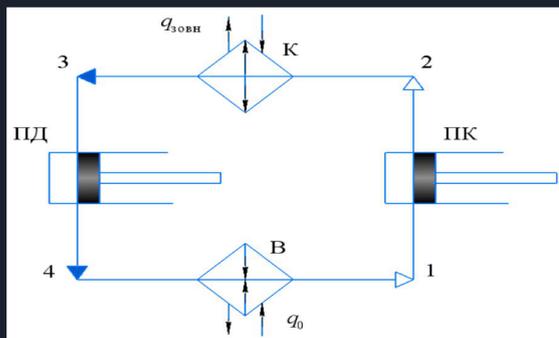
1. Парокомпресійні системи
2. Абсорбційні установки
3. Адсорбційні системи
4. Кріогенні установки
5. Повітряні та водяні охолоджувачі



Парокомпресійний цикл (VCRS)

- Основні компоненти: компресор, конденсатор, дросель, випаровувач
- Використовується в промислових холодильниках і чилерах
- Холодильний коефіцієнт не залежить від типу холодоагенту, а залежить лише від температури кипіння та конденсації. 2) Холодопродуктивність, робота та холодильний коефіцієнт циклу Карно не залежать від конструкції холодильної машини.

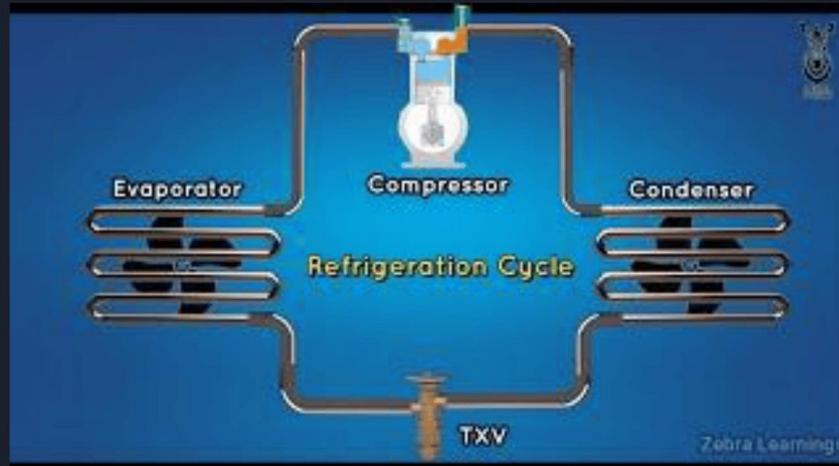
$$\epsilon_k = \frac{T_0 \cdot \Delta s}{(T_k - T_0) \cdot \Delta s}$$



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 61

Типовий парокомпресійний контур

- Схема: компресор → конденсатор → дросель → випаровувач → компресор



Абсорбційні системи

- Робочі пари: $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, $\text{H}_2\text{O-LiBr}$
- Використання теплової енергії замість електричної
- Підходить для утилізації відхідного тепла

Холодоагенти

- Природні: аміак, CO_2 , пропан
- Синтетичні: HFC, HCFC
- Перехід на холодоагенти з низьким GWP та ODP (R1233zd та R1234ze)

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 62

Компоненти промислових холодильних систем

- Компресорні блоки
- Конденсатори (повітряні, водяні)
- Градирні, ресивери, теплообмінники

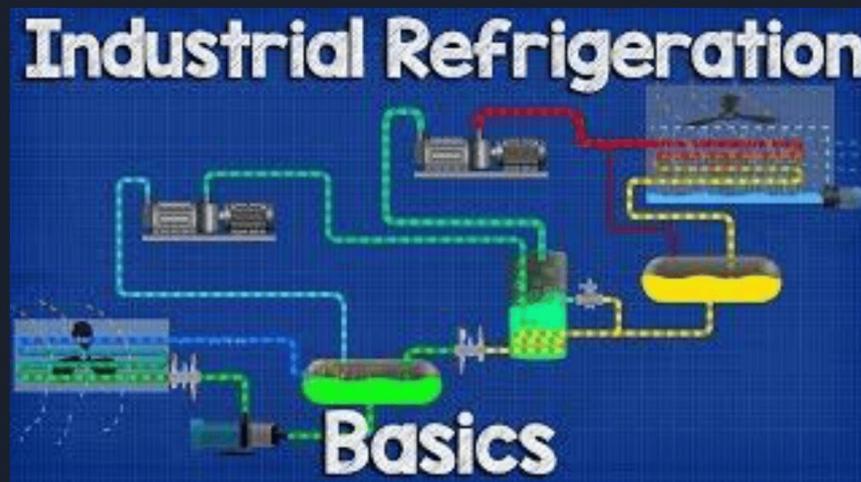
Чилери: типи та застосування

- Повітряні та водяні чилери
- Центробіжні, гвинтові, спіральні
- Використання у харчовій, фармацевтичній та хімічній промисловості



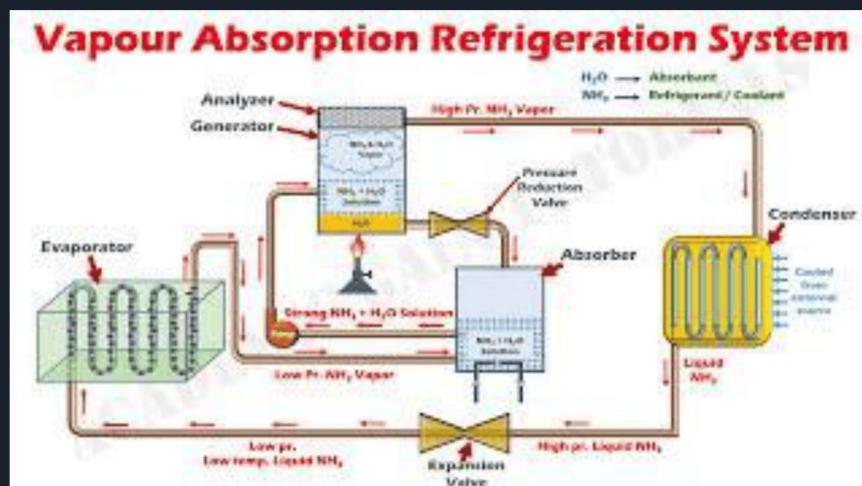
Аміачна промислова установка NH₃

- Схема розташування: компресорний цех, ресивери, конденсатори, випаровувачі



Абсорбційна холодильна установка

- Компоненти: генератор, конденсатор, випаровувач, абсорбер



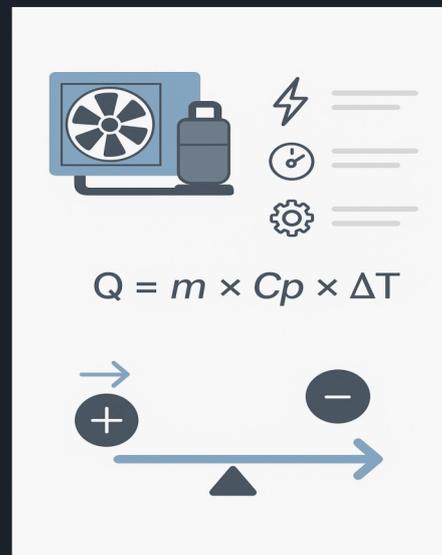
Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 64

Вторинні системи охолодження

- Використання розсолів і гліколевих розчинів
- Переваги: зменшення кількості холодоагенту
- Застосування у великих холодильних комплексах

Підбір обладнання

- Потужність, COP/EER, матеріали, безпека
- Приклад: $Q = m \times C_p \times \Delta T$
- Баланс енергії для систем



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 65

Системи керування

- PLC/SCADA для автоматизації
- Датчики температури, тиску, рівня
- Частотні приводи для економії енергії



Енергетична ефективність

- Використання рекуперації тепла
- Теплообмінники для повторного використання енергії
- Енергоаудит систем



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 66

Безпека

Безпека та експлуатація обслуговування холодильних установок

Обслуговування холодильних установок пов'язане зі значними ризиками для безпеки, насамперед через **небезпеку електричного струму, хімічний вплив, екстремальні температури та потенційне удушення** в замкнутих просторах.

Також можуть виникати проблеми з роботою працівників, часто пов'язані з поганими умовами праці та неналежним навчанням з техніки безпеки.

Безпека

Небезпека	Опис	Запобіжні заходи
Вплив холодоагенту	Токсичність, займистість, удушення (через витіснення кисню), хімічні опіки та обмороження від контакту з рідким холодоагентом.	Використовуйте відповідні засоби індивідуального захисту (ЗІЗ), включаючи захисні окуляри, ізольовані рукавички та захисний одяг. Забезпечте відмінну вентиляцію в робочих зонах і використовуйте автономні дихальні апарати при високих концентраціях газу.
Електрична небезпека	Ризик ураження електричним струмом від струмопровідних компонентів або несправної проводки.	Перед будь-яким обслуговуванням або ремонтом відключіть і використовуйте процедуру "блокування/маркування" для всіх джерел електроживлення. Усі електромонтажні роботи повинні виконуватися кваліфікованими електриками.

Безпека

Небезпека	Опис	Запобіжні заходи
Пожежа та вибух	Багато холодоагентів є легкозаймистими або можуть утворювати токсичні та корозійні продукти розкладу (наприклад, соляну кислоту, фтороводень) під впливом джерел високої температури, таких як зварювання або гарячі поверхні.	Тримайте робочі зони подалі від відкритого вогню та джерел займання. Перед виконанням "гарячих робіт" (зварювання, паяння) продуйте лінії інертним газом.
Небезпека тиску	Холодоагенти зберігаються під тиском, що створює ризик вибуху тиску або витоків у разі неправильного поводження.	Обережно поводьтеся з балонами зі стисненим газом, зберігайте їх у вертикальному положенні та закріпленими, а також уникайте їх впливу температури вище 45°C (113°F).
Фізична небезпека	Послизання, падіння, втрата слуху через шум та травми від рухомого обладнання.	Підтримуйте чистоту та сухість робочої зони, використовуйте захисне взуття та дотримуйтесь загальних процедур безпеки на робочому місці.

Обслуговування систем

Обслуговування промислових холодильних систем передбачає комплекс планових, профілактичних та ремонтних заходів, спрямованих на забезпечення їхньої ефективної, безпечної та довготривалої роботи. Ці роботи мають виконувати лише кваліфіковані фахівці.



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 68

Обслуговування систем

Основні заходи обслуговування включають:

Регулярні перевірки та діагностика

- **Перевірка загального технічного стану** та працездатності всього обладнання системи.
- **Діагностика робочих параметрів:** контроль тиску, температури, напруги та інших ключових показників роботи.
- **Перевірка герметичності з'єднань і арматури** для запобігання витокам холодоагенту.
- **Огляд та перевірка систем автоматики та захисту**, включаючи запобіжні клапани, реле тиску та інші елементи безпеки.
- **Перевірка рівня та якості холодоагенту, масла або холодоносія** в системі, за потреби – їхнє поповнення або заміна.

Обслуговування систем

Профілактичні та очисні роботи

- **Очищення конденсаторів та випарників** від бруду, пилу, інею чи "снігової шуби", що забезпечує ефективний теплообмін та запобігає перегріву.
- **Змащування рухомих частин**, зокрема підшипників компресорів, для зменшення зносу та шуму.
- **Прочищення вентиляційних каналів** та перевірка роботи вентиляторів.
- **Санітарна обробка** обладнання, якщо це необхідно для конкретного типу виробництва (наприклад, харчова промисловість).

Ремонт та заміна компонентів

- **Усунення виявлених несправностей** та пошкоджень.
- **Ремонт або заміна зношених чи пошкоджених деталей**, таких як ущільнювачі, фільтри, клапани, датчики тощо.
- **Ліквідація витоків фреону** (або іншого холодоагенту) та його подальша заправка.
- **Калібрування** контрольно-вимірювальних приладів.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 69

Обслуговування систем

- Перевірка тиску та витоків
- Очищення конденсаторів
- Заміна фільтрів та перевірка клапанів



Приклади застосування

- Харчова промисловість — заморожування
- Фармація — холодні камери
- Хімічні процеси — контроль температури

Ресурси та стандарти

- ASHRAE Refrigeration Handbook
- Каталоги виробників (GEA, York, Frick)
- ДСТУ та ISO стандарти

Висновки

- Вибір системи залежить від температурних вимог, енергетики та безпеки
- Тенденції: енергоефективність і природні холодоагенти

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 70

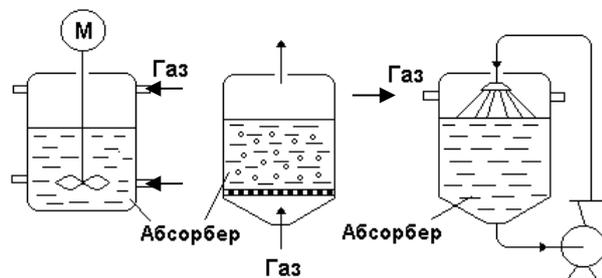
Лекція №12

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 роздязгнута 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 сірною 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 посуд 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

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 71

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 і я** засновані на різних температурах кипіння фракцій, що складають рідину. Існують два принципово відмінних види перегонки: проста (однократна) перегонка й ректифікація.

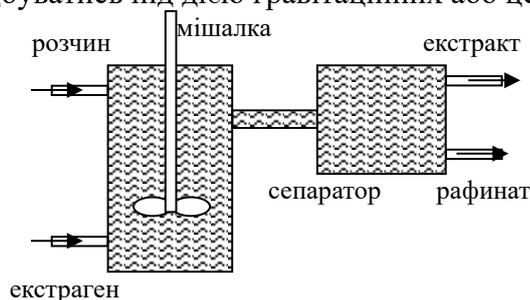
Проста перегонка - це однократний процес часткового випару низькокиплячої фракції з наступною конденсацією парів, що утворилися, а ректифікація - це процес багаторазового (або безперервного) випарювання й конденсації парів вихідної суміші. У результаті ректифікації одержують більше чисті кінцеві продукти. Рідину, отриману в результаті цього, називають дистилятом, 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 і з а ц і 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.

Е к с т р а к ц і я - 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. *Рафінад* - залишок вихідної суміші без цільового компонента. Узагальнена схема екстрагуючої установки можна представлена наступним чином. Сепарація може відбуватись під дією гравітаційних або центробіжних сил.



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 72

Сушкою 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 (нерухомий, 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 - теплоносії. 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

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 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.
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.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 73

Лекція 13.

Типові масообмінні процеси виробництва та промислове обладнання

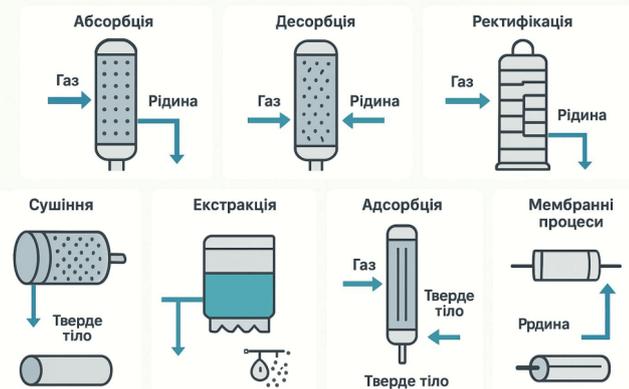
Типові масообмінні процеси виробництва та промислове обладнання

Мартін Богдановський

Основні поняття та призначення процесів

- Масообмін – процес перенесення речовини між фазами.
- Значення для промисловості (хімія, харчова, енергетика, фармацевтика).

ТИПОВІ МАСООБМІННІ ПРОЦЕСИ У ПРОМИСЛОВОСТІ



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 74

Теоретичні основи масообміну

Текст:

- Закон Фіка: потік речовини пропорційний градієнту концентрації.
- Рушійна сила — різниця концентрацій.
- Коефіцієнт масопередачі.

Ілюстрація:

- Графік розподілу концентрацій між фазами.
- Стрілки руху частинок.

Приклад: дифузія аміаку у воді.

Молекулярна дифузія. Закон Фіка

Дифузія — процес випадкового невпорядкованого переміщення частинок під впливом хаотичних сил, зумовлених тепловим рухом і взаємодією з іншими частками.

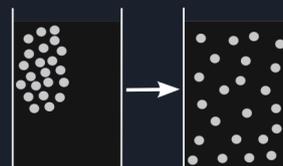
Дифузія що відбувається внаслідок теплового руху атомів, молекул, — молекулярна дифузія

Рівняння Фіка $J = -D \frac{\partial C}{\partial x}$

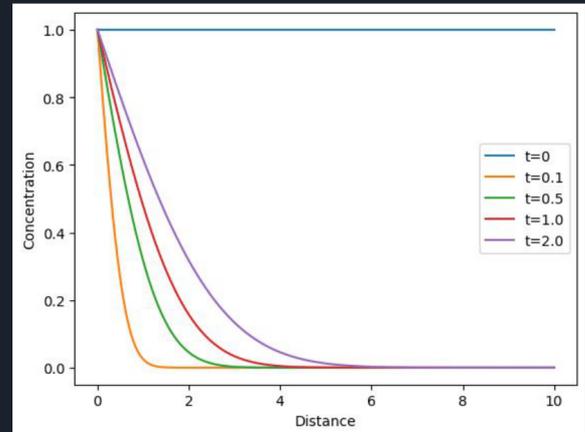
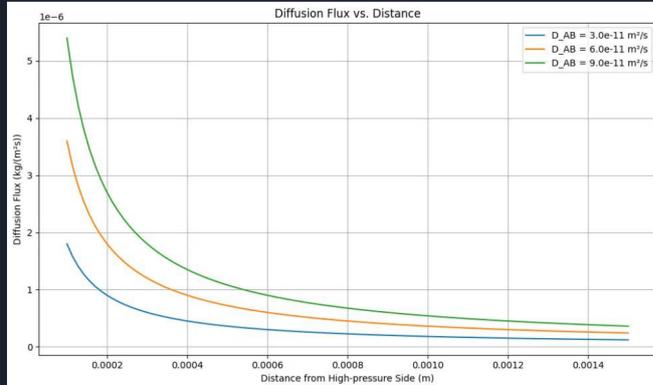
показує, що щільність потоку речовини J [$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$] Пропорційна коефіцієнту дифузії D [$\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$] і градієнту концентрації. Це рівняння виражає перший закон Фіка (Адольф Фік - німецький фізіолог, який встановив закони дифузії в 1855 р.). Другий закон Фіка пов'язує просторове і тимчасове зміни концентрації (рівняння дифузії):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Коефіцієнт дифузії D залежить від температури.

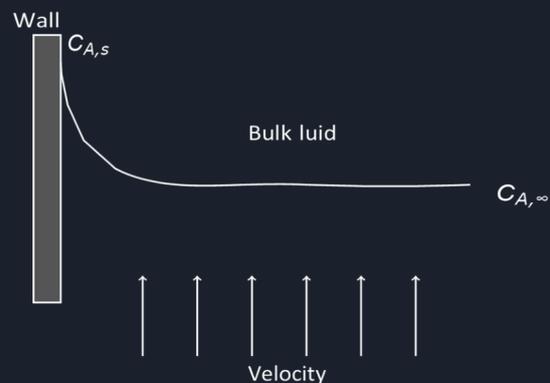


Графічні залежності інтенсивності дифузії за 1 та 2 законами Фіка



Конвективна дифузія. Закон Шукарєва

Закон конвективної дифузії (Шукарєва) описує процес переносу речовини в рухомій рідині або газі, де крім дифузії важливу роль відіграє конвекція. Він виражається формулою $J = -\alpha(c_1 - c_2)$, де J — потік речовини, α — коефіцієнт масовіддачі, c_1, c_2 — концентрації речовини на поверхні та в об'ємі відповідно. Коефіцієнт масовіддачі (α) залежить від властивостей середовища, швидкості руху рідини, а також від форми поверхні.



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 76

Порівняння видів масообміну

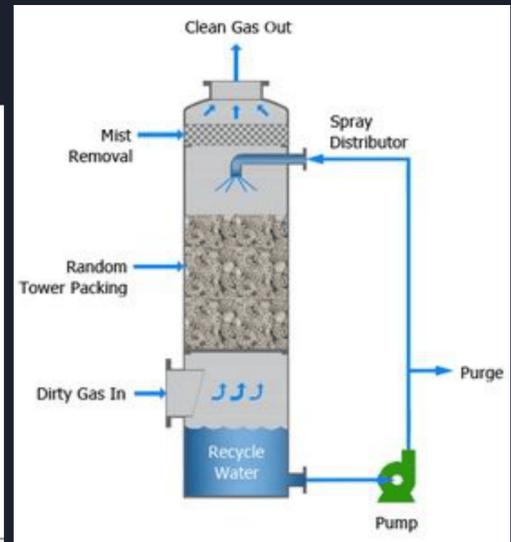
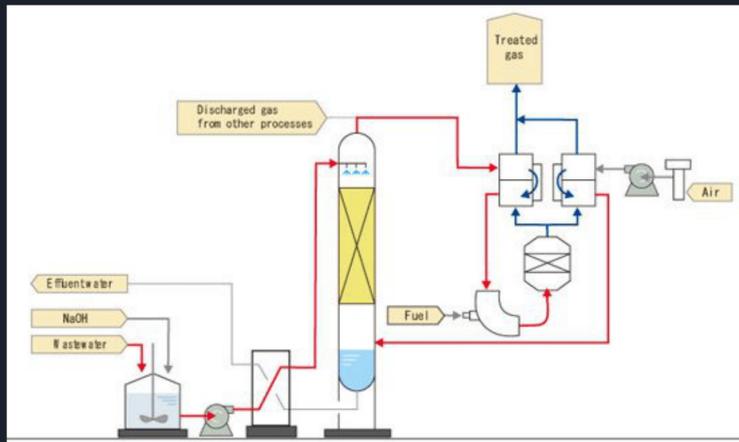
Аспект	Конвекція	Дифузія
Механізм	Об'ємний рух рідини, що зумовлений зовнішніми силами (наприклад, насосами, вентиляторами) або природними ефектами (наприклад, градієнтами температури)	Випадковий молекулярний рух, зумовлений градієнтами концентрації
Рушійна сила	Швидкість рідини та зовнішні сили	Градiєнт концентрації
Швидкість	Зазвичай швидше, залежно від швидкості потоку рідини	Зазвичай повільніше, залежно від руху молекул

Порівняння видів масообміну

Вплив температури	Значно, оскільки температура впливає на щільність та рух рідини	Менший прямий вплив, хоча температура впливає на швидкість молекул
Швидкість переказу	Вища швидкість завдяки руху та перемішуванню рідини	Нижча швидкість, залежить від коефіцієнта дифузії та градієнта концентрації
Типові застосування	Теплообмінники, системи охолодження, атмосферні процеси	Процеси розділення, дифузія через мембрани, змішування в газах або рідинах
Залежність від властивостей рідини	Залежить від властивостей рідини, таких як в'язкість і щільність	Залежить від розміру молекули та коефіцієнта дифузії середовища
Приклад	У кімнаті з обігрівачем тепле повітря піднімається вгору та циркулює по всій кімнаті, нагріваючи її.	У краплі чорнила, поміщеної у спокійну воду, чорнило повільно розтікається, поки не розподілиться рівномірно по всій волі

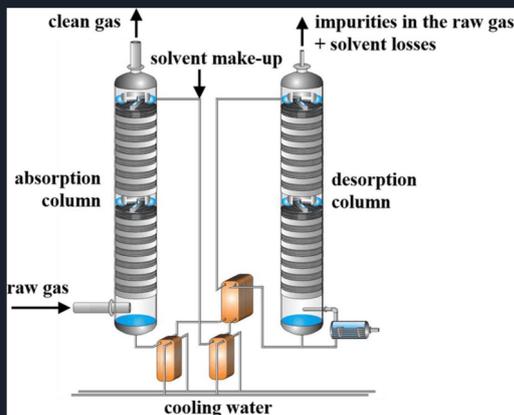
Абсорбція

- Поглинання газів рідиною.
- Використовується для очищення димових газів, уловлювання CO₂, H₂S.
- Обладнання: тарілчасті, насадкові колони.



Десорбція

- Зворотний процес абсорбції: видалення газу з рідини.
- Використання: регенерація розчинників, відгонка летких домішок.
- Обладнання: десорбційні колони, дегазатори.

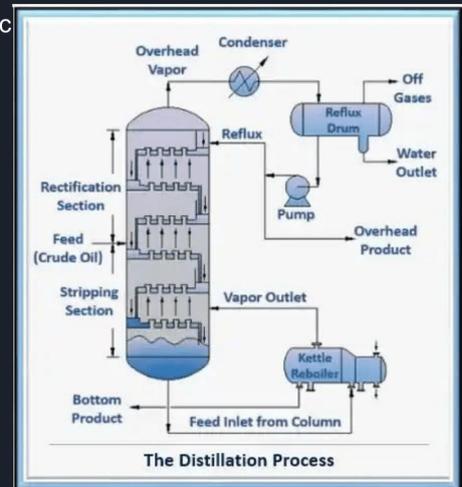
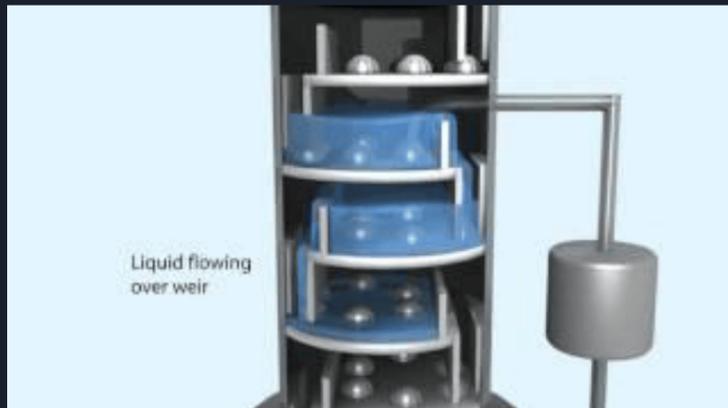


How Amine Sweetening Works

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 78

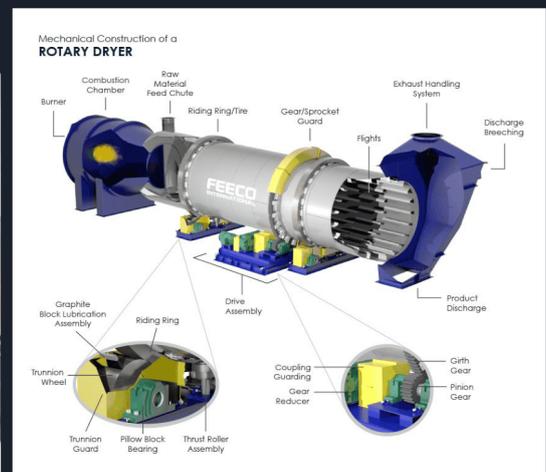
Ректифікація (Дистиляція)

- Поділ суміші на фракції шляхом багаторазового випаровування й конденсації.
- Обладнання: ректифікаційна колона, дефлегматор, конденсатор.
- Використання: виробництво спирту, нафти, бензину.



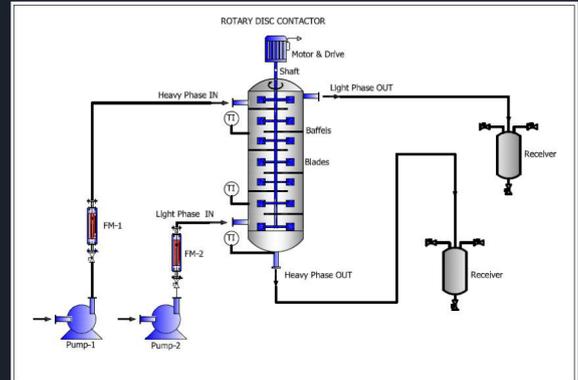
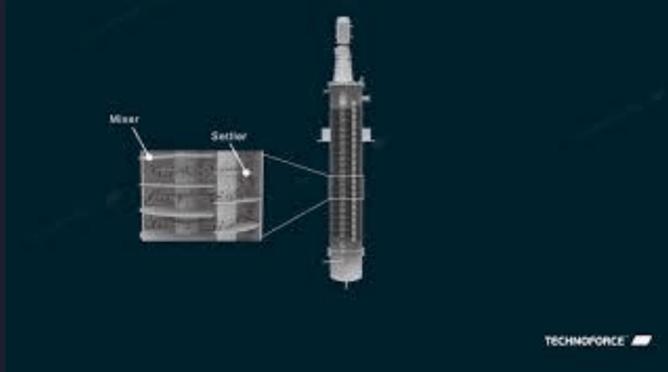
Сушіння

- Передача вологи з матеріалу в повітря.
- Типи сушарок: барабанні, стрічкові, розпилювальні.
- Використання: сушіння зерна, порошоків, деревини.



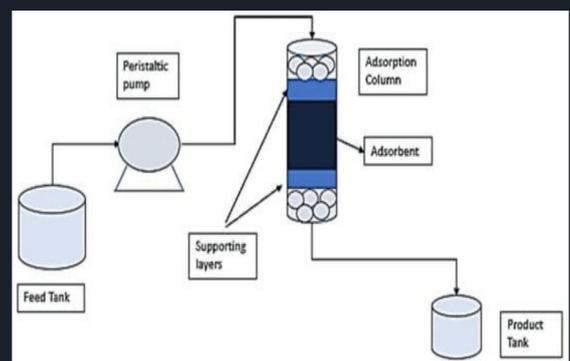
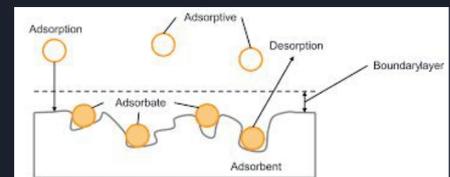
Екстракція

- Вилучення компонента з однієї рідини іншою (немішною).
- Обладнання: мішалкові або колонні екстрактори.
- Використання: виробництво олії, кофеїну, фармацевтичних екстрактів.



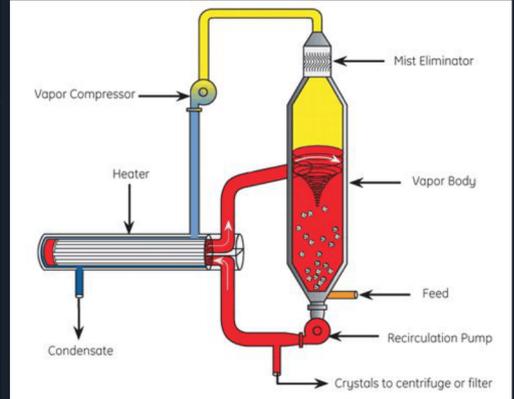
Адсорбція

- Поглинання компонентів з газу або рідини поверхнею твердого сорбенту.
- Обладнання: адсорбери, фільтри, колони з активованим вугіллям.
- Використання: очищення води, газів, холодильні цикли.

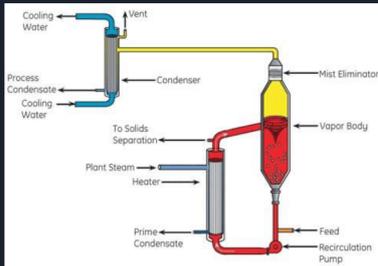


Кристалізація

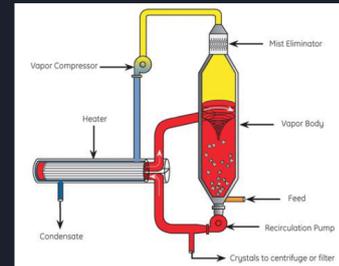
- Перехід речовини з розчину у тверду фазу.
- Обладнання: кристалізатори, випарники, центрифуги.
- Використання: виробництво солі, цукру, ліків.
- Послідовність: розчин → випарник → формування кристалів.



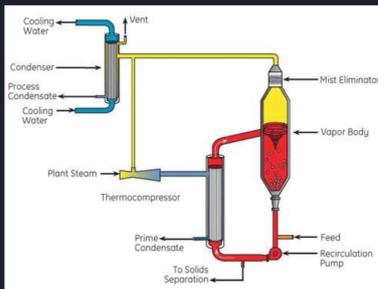
Кристалізація



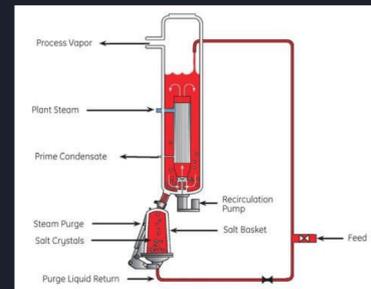
Кристалізатор з паровим приводом



Кристалізатор з випарником



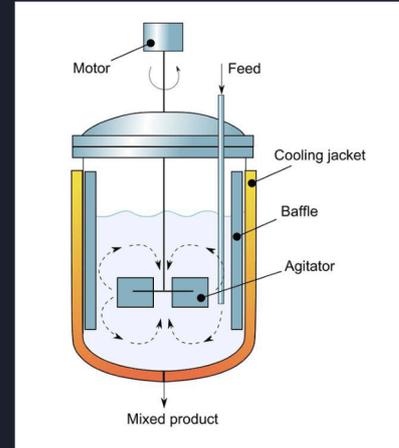
Кристалізатор з термокомпресором



Кристалізатор Calandria

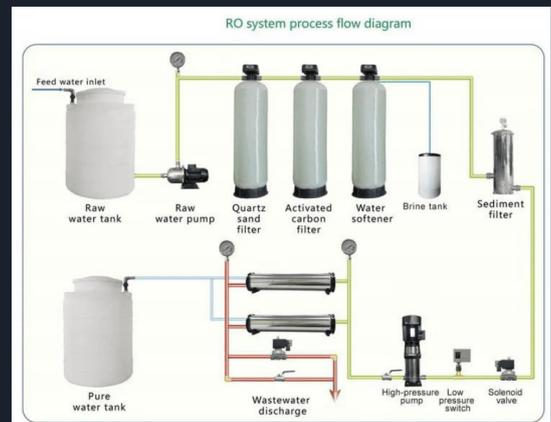
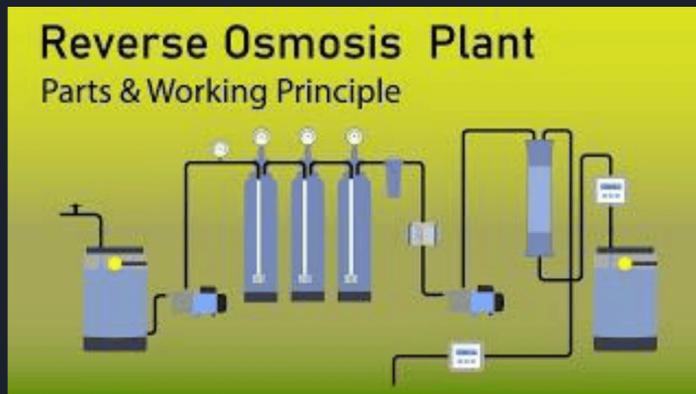
Змішування і розчинення

- Змішування двох рідин або твердих компонентів у розчині.
- Обладнання: мішалки, гомогенізатори, реактори.
- Використання: фармацевтичні, харчові, лакофарбові виробництва.



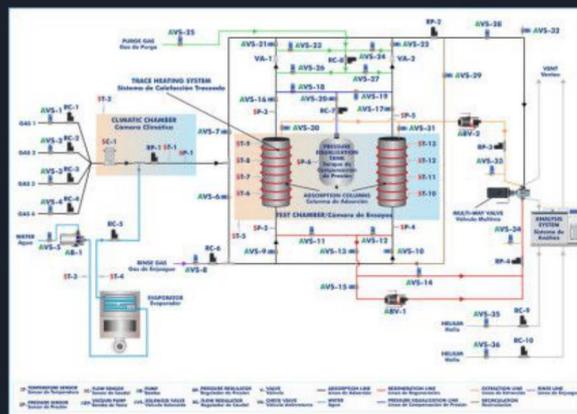
Мембранні процеси

- Розділення за допомогою напівпроникних мембран.
- Види: осмос, ультрафільтрація, нанофільтрація.
- Використання: очищення води, концентрування розчинів.
- Мембранний модуль: розчин → пермеат → концентрат.



Автоматизація масообмінних процесів

- Сенсори температури, тиску, концентрації.
- PLC, SCADA, контроль режимів.
- Ефективність і безпеність



Порівняльний аналіз ефективності методів реалізації масообмінних процесів

Процес	Типова ефективність (ступінь вилучення/розділення)	Енерговитрати	Вартість обладнання	Коли найефективніший
Абсорбція	85–99%	Середні	Середня	Коли цільовий компонент добре розчинний у рідині
Адсорбція	90–99.9%	Низькі	Висока (сорбенти)	Для домішок слідів, газоочистки, очищення розчинів
Ректифікація	90–99%	Високі (підігрів/конденсація)	Висока	Для розділення легколетких сумішей
Екстракція	70–95%	Середні	Середня	Коли компоненти мають різну розчинність у розчинниках

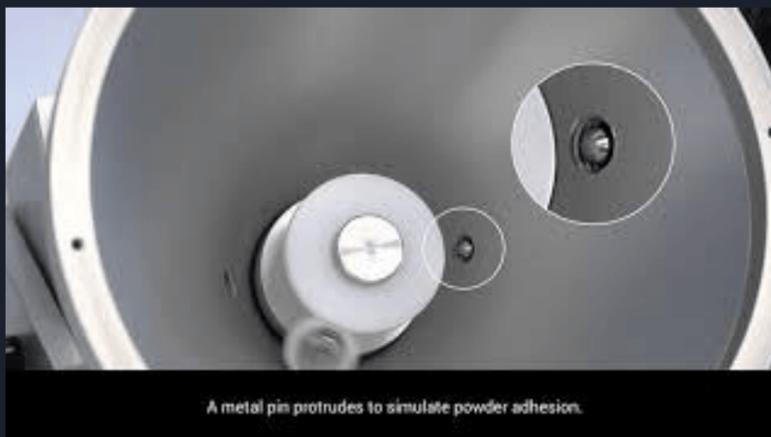
Порівняльний аналіз ефективності методів реалізації масообмінних процесів

Процес	Типова ефективність (ступінь вилучення/розділення)	Енерговитрати	Вартість обладнання	Коли найефективніший
Сушіння	— (переведення у тверду фазу)	■ Дуже високі	■ Середня	При необхідності видалення вологи з матеріалів
Мембранні процеси	80–99%	■ Низькі–середні	■ / ■ Середня–висока	Фільтрація, знесолення, біотехнології
Кристалізація	Висока чистота (до 99.9%)	■ Середні	■ Висока	Виділення продукту з розчинів

Висновки

- Масообмінні процеси — основа реалізації чисельних технологій.
- Розвиток та автоматизація роботи обладнання = зростання ефективності виробництва.

розпилююча
сушарка



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 84

Лекція №14 Кінетика теплових перетворень

Основні поняття та закономірності зміни стану

Кінетика — це розділ науки, що вивчає швидкість перебігу процесів (хімічних, фізико-хімічних, теплових) та їх залежність від зовнішніх факторів.

• **Швидкість процесу (v):** Зміна кількісного показника стану системи (концентрації C , маси m , енергії E) за одиницю часу в одиниці об'єму або площі.

$$v = \pm \frac{dC}{dt}$$

• **Динаміка стану:** Перехід системи від вихідного стану до рівноважного. Швидкість процесу завжди пропорційна відхиленню системи від стану рівноваги (рушійній силі).

Лінійне рівняння переносу

Загальний закон, що описує перенос маси, енергії або імпульсу, базується на принципі лінійної залежності.

Загальна формула рівняння наступна:

$$J = L \cdot \Delta\Phi$$

• **J (Щільність потоку):** Кількість субстанції (маси, тепла), що проходить крізь одиницю поверхні за одиницю часу.

• **L (Кінетичний коефіцієнт):** Характеризує опір середовища або провідність (коефіцієнт дифузії, теплопровідності тощо).

• **$\Delta\Phi$ (Потенціал/Градiєнт):** Рушійна сила процесу.

Тип переносу	Субстанція	Градiєнт (Потенціал)	Закон
Масоперенос	Маса	Градiєнт концентрації (∇C)	Закон Фіка
Теплоперенос	Енергія	Градiєнт температури (∇T)	Закон Фур'є
Гідродинаміка	Імпульс	Градiєнт тиску (∇P)	Закон Ньютона

Дифузія та технологічний перенос

Хоча дифузія є частиною кінетики, існують відмінності в умовах реалізації:

• **Чиста дифузія:** Перенос за рахунок хаотичного теплового руху молекул (молекулярний рівень).

• **Технологічний перенос:** Часто включає **конвекцію** (перемішування), що значно збільшує кінетичний коефіцієнт L та прискорює процес у порівнянні з чистою дифузією.

Основи кінетики перетворень та рівняння Ареніуса

Швидкість хімічних або структурних перетворень залежить від температури експоненціально.

Рівняння Ареніуса:

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

• **k:** Константа швидкості реакції.

• **A:** Пред-експоненціальний множник (частота зіткнень молекул).

• **E_a :** Енергія активації (мінімальна енергія, необхідна для початку перетворення).

• **R:** Універсальна газова стала.

• **T:** Абсолютна температура (K).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 85

Висновок: Навіть невелике підвищення температури суттєво знижує енергетичний бар'єр і прискорює технологічний процес.

Визначення лімітуючих стадій

Більшість технологічних процесів є багатостадійними (наприклад: підведення реагентів → реакція → відведення продуктів).

Типи областей перебігу процесу:

1. **Кінетична область:** Швидкість власне перетворення (реакції) менша за швидкість підведення речовин. Лімітує — реакція.
2. **Дифузійна область:** Швидкість підведення речовин менша за швидкість реакції. Лімітує — транспорт (дифузія).
3. **Перехідна область:** Швидкості транспорту та реакції сумірні.

Методи визначення ліміту:

- **Температурний метод:** Якщо при підвищенні T швидкість зростає різко (експоненціально) — це кінетична область. Якщо слабко - дифузійна.
- **Гідродинамічний метод:** Якщо зміна швидкості перемішування впливає на результат - процес знаходиться в дифузійній області.

Розрахунок тривалості та габаритів обладнання

Для проектування реакторів та апаратів в умовах **нестационарних полів** (коли температура і концентрація змінюються в часі та просторі) використовують:

1. **Матеріальний та тепловий баланси:** Прихід = Вихід + Накопичення + Перетворення.

2. **Визначення тривалості (τ):**

$$\tau = \int \frac{dC}{v(C,T)}$$

3. **Габарити обладнання:** Робочий об'єм V розраховується через продуктивність Q та час перебування τ :

$$V = Q \cdot \tau$$

Важливо відмітити що в умовах нестационарності використовують диференціальні рівняння в частинних похідних (рівняння масо- та теплопровідності), що дозволяє врахувати нерівномірність нагріву або насичення продукту по всьому об'єму апарата.

Розглянемо приклад розрахунку тривалості технологічного процесу в кінетичній області, де швидкість перетворення лімітується безпосередньо хімічною взаємодією. У такому випадку швидкість процесу часто описується рівнянням першого порядку, де зміна концентрації в часі пропорційна її поточному значенню: $-\frac{dC}{dt} = kC$. Щоб визначити час τ , необхідний для зниження концентрації від початкового рівня C_0 до кінцевого C , ми проводимо інтегрування цього виразу, що дає нам залежність $\tau = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{C_0}{C} \right)$. Тут константа швидкості k визначається за рівнянням Ареніуса $k = A \exp \left(-\frac{E_a}{RT} \right)$, що показує критичну залежність часу операції від температури. Наприклад, якщо при підвищенні температури на 10 градусів швидкість реакції подвоюється, то необхідний об'єм реактора для тієї ж продуктивності можна зменшити вдвічі.

На противагу кінетичному режиму, у дифузійній області швидкість процесу обмежена швидкістю підведення реагентів до зони реакції. Для розрахунку часу перетворення в умовах нестационарної дифузії (наприклад, при насиченні пористого каталізатора або сушінні матеріалу) використовується другий закон Фіка. У спрощеному вигляді для тіла з характерним розміром L (наприклад, товщина пластини або радіус гранули) та коефіцієнтом дифузії D , час досягнення заданого ступеня насичення пропорційний квадрату відстані:

$\tau \approx \frac{L^2}{D}$. Це фундаментальна розбіжність: якщо в кінетичній області час залежить переважно від хімічної природи та температури, то в дифузійній — від геометрії частинок та гідродинаміки потоку.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 86

Практичне застосування цих розрахунків дозволяє визначити габарити технологічного обладнання. Якщо ми знаємо необхідний час перебування речовини в апараті τ та задану виробничу потужність Q (об'ємна витрата сировини), то робочий об'єм апарата розраховується як $V = Q \cdot \tau$. В реальних умовах нестационарних полів, де температура або концентрація розподілені нерівномірно, інженери використовують методи позонного розрахунку, розбиваючи апарат на елементарні об'єми, у кожному з яких умови вважаються сталими. Це дозволяє уникнути появи «мертвих зон» та забезпечити рівномірність якості продукту. Таким чином, перехід від мікрокінетики (окремої молекули чи реакції) до макрокінетики (реального апарата) є ключовим етапом проектування будь-якого сучасного виробництва.

Контроль

Питання за лекцією:

1. Що саме вивчає кінетика як розділ науки і від яких факторів залежить швидкість процесів згідно з лекцією?
2. Як формулюється загальний закон переносу (лінійне рівняння переносу) та що означають його основні складові: щільність потоку, кінетичний коефіцієнт і градієнт?
3. Опишіть відповідність між типом переносу (масоперенос, теплоперенос, гідродинаміка) та відповідними фізичними законами (Фіка, Фур'є, Ньютона).
4. У чому полягає принципова відмінність між «чистою» дифузією та технологічним переносом у виробничих умовах?
5. Охарактеризуйте рівняння Ареніуса: які параметри воно пов'язує та чому навіть невелике підвищення температури суттєво прискорює процес?
6. Які існують три основні області перебігу процесу залежно від того, яка стадія є лімітуючою (кінетична, дифузійна, перехідна)?
7. Якими двома практичними методами (температурним та гідродинамічним) можна визначити, чи лімітується процес швидкістю реакції, чи швидкістю транспорту речовин?
8. Як розраховується робочий об'єм технологічного апарата, виходячи з продуктивності та часу перебування речовини в ньому?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 87

Лекція 15

Надійність та продуктивність технологічних систем

У сучасному автоматизованому світі надійність — це не просто відсутність поломок, це здатність системи виконувати свої функції в заданих режимах протягом певного часу. Якщо якість каже нам, чи працює система «тут і зараз», то надійність додає до цього рівняння четвертий вимір — час.

Оцінка здатності системи зберігати працездатність

Надійність технологічної системи (ТС) визначається її внутрішньою стійкістю до деградаційних процесів. Будь-яка система з моменту пуску починає «старіти»: зношуються підшипники, деградує ізоляція, накопичуються помилки в програмному забезпеченні. Оцінка цієї здатності базується на аналізі факторів впливу: зовнішніх (температура, вологість, коливання напруги) та внутрішніх (конструктивні недоліки, втомні напруження матеріалів).

Основними показниками, що кількісно описують цей процес, є:

- Імовірність безвідмовної роботи $P(t)$: функція часу, що показує ймовірність того, що в межах заданого інтервалу t відмова не виникне. Для складних систем вона часто описується експоненціальним законом: $P(t) = e^{-\lambda t}$, де λ — інтенсивність відмов.
- Середня наробка між відмовами: середнє значення часу роботи системи від одного відновлення до наступного. Це «пульс» системи: чим він рідший, тим стабільніша працює лінія.
- Коефіцієнт готовності K_g : інтегральний показник, що визначає ймовірність того, що система буде працездатною в довільний момент часу. Він розраховується як:

$$K_g = \frac{T_{cp}}{T_{cp} + T_{rem}}$$

де T_{cp} — середня наробка на відмову, а T_{rem} — середній час відновлення (ремонту). Якщо ваш K_g наближається до 0,999, вітаю — ви створили майже ідеальну систему.

Вплив відмов на продуктивність та технічне використання

Відмови в ТС поділяються на два підступні табори: стійкі відмови (зупинка через поломку вузла) та короткочасні збої (самовідновлювані відмови, які часто «лікуються» перезавантаженням).

Стійкі відмови прямо б'ють по технічній продуктивності, змушуючи лінію простоювати годинами. Короткочасні збої діють інакше: вони знижують ритмічність. Навіть якщо збій триває 5 секунд, переналадження та вихід на робочий режим після нього може зайняти 10 хвилин.

Для оцінки ефективності використання часу вводиться коефіцієнт технічного використання (K_{tu}). Він враховує не лише час на ремонт, а й час на планове обслуговування, переналадження та очікування сировини. Якщо продуктивність лінії падає, перше, що ми аналізуємо — це структуру простоїв. Часто виявляється, що дрібні, але часті збої «з'їдають» більше продуктивності, ніж одна велика аварія на місяць.

Функціональна точність та умови технологічної відмови

Технологічна система може крутитися і шуміти (бути технічно справною), але видавати брак. У такому випадку ми говоримо про технологічну відмову.

Кожен параметр продукту (наприклад, діаметр вала або товщина ізоляції) має свою межу поля допуску (верхню U та нижню L). Функціональна точність ТС — це здатність утримувати значення параметрів усередині цього поля.

Умова технологічної відмови виникає, коли:

1. Поле розсіювання значень перевищує поле допуску через миттєві фактори (вібрація).
2. Центр налаштування зміщується (дрейф) через систематичні фактори (температурне розширення різця, знос інструменту).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 88

Як тільки крива розподілу параметрів «виповзає» за межу — система вважається такою, що відмовила, навіть якщо двигуни продовжують працювати.

Моделювання процесів відновлення та стратегії обслуговування

Щоб мінімізувати простой автоматизованих комплексів, інженери використовують математичне моделювання. Найпопулярнішим є використання Марковських процесів, де система переходить з одного стану (робота) в інший (ремонт) з певною ймовірністю.

Обґрунтування стратегії технічного обслуговування (ТО) базується на виборі між двома полюсами:

- Реактивне ТО: «зламалося — лагодимо». Дешево в короткій перспективі, але катастрофічно для великих заводів.
- Проактивне (предиктивне) ТО: ми розраховуємо надійність і призначаємо сервіс за мить до того, як система вирішить піти на «спокій».

Мета моделювання — знайти ту саму точку екстремуму, де сумарні витрати на ТО та збитки від простоїв будуть мінімальними.

Методи формування прогнозних моделей (на прикладі трансформатора напруги)

Прогнозування — це спроба зазирнути в майбутнє, спираючись на дані минулого. Розглянемо це на прикладі трансформатора напруги.

Для побудови прогнозної моделі ми використовуємо методи регресійного аналізу або нейронні мережі. Ключовими параметрами (предикторами) для трансформатора є:

1. Температура масла та обмоток.
2. Вміст розчинених газів у маслі (хроматографічний аналіз).
3. Опір ізоляції.

Алгоритм прогнозування:

- Збір даних: моніторинг параметрів у реальному часі.
- Виявлення тренду: ми бачимо, що рівень водню в маслі зростає експоненціально.
- Визначення залишкового ресурсу: екстраполяція тренду до перетину з критичною межею.

Це дозволяє замінити трансформатор не тоді, коли він вибухне, а в планове вікно обслуговування, зберігаючи мільйони на відновленні мережі.

Розглянемо приклад розрахунку надійності пакувальної лінії.

1. Вихідні дані (за місяць роботи):

- Загальний календарний час (T_{total}): 720 годин (30 днів по 24 години).
- Чистий час роботи лінії (T_{work}): 600 годин.
- Кількість раптових відмов (n): 5 випадків.
- Сумарний час на аварійний ремонт ($\sum t_{rem}$): 20 годин.
- Планове технічне обслуговування та переналагодження (T_{maint}): 40 годин.
- Простої через відсутність сировини або тари (T_{ext}): 60 годин.

2. Крок 1: Розрахунок показників безвідмовності

Спочатку визначимо, як часто лінія виходить з ладу та як швидко ми її лагодимо.

- Середня наробка між відмовами (T_{cp}):

$$T_{cp} = \frac{T_{work}}{n} = \frac{600}{5} = 120 \text{ годин}$$

Це означає, що в середньому лінія працює 5 діб без жодного збою.

- Середній час відновлення (T_{rem_avg}):

$$T_{rem_avg} = \frac{\sum t_{rem}}{n} = \frac{20}{5} = 4 \text{ години}$$

В середньому ремонтній бригаді потрібно 4 години, щоб повернути лінію до життя після аварії.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 89

3. Крок 2: Розрахунок Коефіцієнта готовності (K_g)

Цей показник каже нам, яка ймовірність того, що лінія буде справною, коли вона нам знадобиться (не враховуючи планові зупинки).

$$K_g = \frac{T_{cp}}{T_{cp} + T_{rem_avg}} = \frac{120}{120 + 4} = \frac{120}{124} \approx 0,9677$$

Висновок: $K_g = 96,8\%$. Це дуже непоганий показник для механічних систем, але для критичної електроніки він мав би бути вищим за $99,9\%$.

4. Крок 3: Розрахунок Коефіцієнта технічного використання (K_{tu})

Це «жорсткий» показник, який враховує взагалі всі простої (і ремонти, і сервіс, і організаційні затримки). Він показує реальну ефективність використання обладнання.

$$K_{tu} = \frac{T_{work}}{T_{total}} = \frac{600}{720} \approx 0,833$$

Вердикт: $K_{tu} = 83,3\%$.

Тут ми бачимо розрив: хоча техніка сама по собі досить надійна ($K_g = 96,8\%$), загальна ефективність нижча через планові роботи та зовнішні фактори (відсутність тари).

Що це дає менеджеру/інженеру?

1. Якщо K_g низький — треба міняти запчастини на якісніші або модернізувати вузли, що часто ламаються.

2. Якщо K_{tu} значно нижчий за K_g — проблема не в техніці, а в логістиці (сировина) або занадто тривалому переналагодженні. Потрібно впроваджувати систему швидкого переналагодження.

Контроль

Питання за лекцією:

1. У чому полягає принципова різниця між поняттями «якість» та «надійність»? Чому систему, що працює ідеально прямо зараз, не можна автоматично назвати надійною?
2. Як інтенсивність відмов λ впливає на графік імовірності безвідмовної роботи $P(t)$? Опишіть, як змінюється цей показник на етапі «припрацювання» та етапі «старіння» обладнання.
3. Що практично означає для інженера ситуація, коли показник (наробка на відмову) високий, але K_g (коефіцієнт готовності) залишається низьким?
4. Чому короткочасні збої, які тривають лише кілька секунд, можуть бути більш збитковими для автоматизованої лінії, ніж одна серйозна відмова, що триває годину?
5. Коефіцієнт технічного використання (K_{tu}) враховує час на логістику та сервіс. Які організаційні заходи (не технічні!) можуть підвищити цей показник без втручання в конструкцію машин?
6. Поясніть механізм виникнення **технологічної відмови**. Чи може система вважатися такою, що відмовила, якщо всі її двигуни та датчики працюють справно?
7. У чому полягає економічний ризик «перестраховки» при використанні предиктивного (прогнозного) обслуговування? Чи завжди доцільно прагнути до $K_g = 1,0$?
8. На прикладі трансформатора напруги поясніть, як динаміка зміни хімічного складу масла допомагає передбачити аварію ще до її фактичного настання.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 90

Лекція №15

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. Я відмічалось 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, виробу 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 різнорідних 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. 9.1,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.

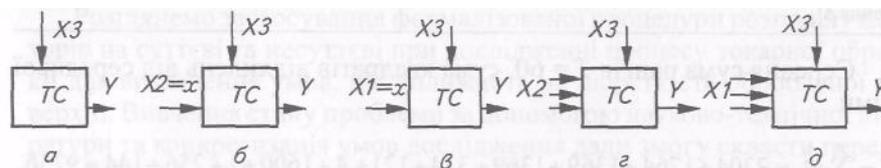


Рис. 9.1. Види експериментальних досліджень:

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. 9.1,в), якщо $X1 = (x)$, та *однофакторний пасивний експеримент* (рис. 9.1,б), коли вивчається дія лише одного фактора $X2 = (x)$;
- *багатофакторний активний експеримент* (рис.9.2,д), якщо $X1 = (x1, x2, \dots)$, та *багатофакторний пасивний експеримент* (рис. 9.2,г), якщо $X2 = (x1, x2, \dots)$.

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 у) оцінюються характеристики закону розподілу випадкової величини та визначаються статистичні результати (значення

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 91

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 Δ_i ;

n_i – кількість діаметрів деталей, що потрапили в i -тий інтервалі Δ_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 Δ_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:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 92

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

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 свідчать 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

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:

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 вираз та означення;
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.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 93 / 93

Список літератури

1. Пальчевський Б.О. Дослідження технологічних систем. Моделювання проектування оптимізація. – Львів: Світ, 2001. – 232с.
2. Остапчук. М. В. Рибак А.И. Система технологій (за видами діяльності): Навчальний посібник. – К.: ЦУЛ, 2003. – 888с.
3. Основні процеси машини та апарати хімічних виробництв: Підручник / І. В. Коваленко, В. В. Маліновський. –К.: Інрес: Воля, 2006. – 264с.: іл.
4. Основні залежності та приклади розрахунків теплообмінних апаратів друк [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів, які навчаються за напрямком „Машинобудування” спеціальність "Обладнання хімічних виробництв та підприємств будівельних матеріалів"/ НТУУ „КПІ”/ уклад. Воронін Л.Г., Ружинська Л.І – Київ : НТУУ «КПІ», 2011. - Назва з екрана <http://library.kpi.ua:8080/handle/123456789/697> від 15.02.2011 р. 68 с.
5. Конспект лекцій з курсу «Планування і обробка результатів експерименту» (для студентів денної і заочної форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / Харків. нац. унт міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : Л. А. Назаренко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 163 с
6. Сергєєв П. В. Комп'ютерне моделювання технологічних процесів переробки корисних копалин : практикум / П. В. Сергєєв, В. С. Білецький. – Маріуполь : Східний видавничий дім, 2016. – 118 с.