

**ВІДКРИТИЙ МІЖНАРОДНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
РОЗВИТКУ ЛЮДИНИ «УКРАЇНА»  
ІНЖЕНЕРНО – ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ**

**КАФЕДРА СУЧАСНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА НАНОТЕХНОЛОГІЙ**

**ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ  
ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ  
Частина 1**

**Київ 2022**

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1. Класифікація основних процесів хімічної технології.....	4
1.1. Основні типи процесів.....	4
1.2. Кінетичні закономірності.....	4
2. Гідравліка .....	6
2.1. Гідростатика.....	6
2.1.1. Диференціальні рівняння Ейлера.....	6
2.1.2. Основне рівняння гідростатики.....	7
2.1.3. Деякі застосування основного рівняння гідростатики.....	8
2.2. Гідродинаміка.....	8
2.2.1. Основні характеристики руху рідин.....	9
2.2.2. Розподіл швидкостей і витрата рідини при ламінарному русі.....	10
2.2.3. Диференціальні рівняння руху Ейлера. Рівняння Бернуллі.....	12
2.2.4. Гідравлічні опори.....	13
2.2.5. Розрахунок діаметру трубопроводу.....	15
2.2.6. Втрата напору.....	16
2.3. Переміщення рідин (насоси).....	16
2.3.1. Види насосів.....	16
2.3.2. Основні параметри насосів.....	17
2.3.3. Області використання насосів різних типів.....	18
2.4. Переміщення і стиск газів. Компресорні машини.....	19
3. ГІДРОМЕХАНІЧНІ ПРОЦЕСИ.....	19
3.1. Класифікація неоднорідних систем і гідромеханічних процесів.....	19
3.1.1. Види неоднорідних систем.....	19
3.1.2. Види гідромеханічних процесів.....	20
3.2. Осадження.....	21
3.2.1. Кінетика осадження.....	21
Подібність процесів. Критерії подібності. Критеріальні рівняння.....	22
3.2.2. Процеси осадження.....	25
а) Відстоювання.....	25
б) Осадження під дією відцентрової сили.....	27
в) Осадження під дією електричного поля.....	31
4. ФІЛЬТРУВАННЯ.....	32
4.1. Фільтрування під дією перепаду тисків з відкладенням осаду.....	32
4.1.1. Кінетика фільтрування.....	32
4.1.2. Розрахункові формули для процесу фільтрування.....	34
4.2. Відцентрове фільтрування (з відкладенням осаду).....	36
4.3. Фільтрування із забиванням пор фільтру.....	37
4.4. Фільтрувальна апаратура.....	37
5. ПЕРЕМІШУВАННЯ В РІДКОМУ СЕРЕДОВИЩІ.....	43
5.1. Інтенсивність і ефективність перемішування.....	43
5.2. Способи перемішування.....	43

5.3. Будова механічних перемішуючих пристроїв.....	44
5.4. Критерії гідродинамічної подібності для процесу перемішування.....	45
5.5. Критеріальні рівняння.....	46
6. ТЕЧІЯ ГАЗУ, ПАРИ АБО РІДИНИ КРІЗЬ ШАР ТВЕРДОГО ЗЕРНИСТОГО МАТЕРІАЛУ.....	46
6.1. Нерухомий щільний шар.....	46
6.1.1. Порізність шару $\epsilon$ .....	46
6.1.2. Опір шару.....	47
6.2. Псевдозріджений шар.....	48
7. ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ.....	49
7.1. Теплопередача.....	49
7.1.1. Загальна характеристика теплових процесів.....	49
7.1.2. Теплопровідність.....	50
7.1.2.1. Основний закон теплопровідності.....	50
7.1.2.2. Диференціальне рівняння теплопровідності.....	51
7.1.2.3. Теплопровідність плоскої одношарової стінки.....	52
7.1.2.4. Теплопровідність плоскої багатошарової стінки.....	53
7.1.2.5. Теплопровідність циліндричної стінки (труби).....	53
7.1.3. Теплове випромінювання і променевий теплообмін.....	54
7.1.4. Конвективний теплообмін (тепловіддача).....	55
7.1.4.1. Основний закон тепловіддачі.....	55
7.1.4.2. Диференціальне рівняння конвективного перенесення тепла.....	56
7.1.4.3. Критеріальне рівняння тепловіддачі.....	57
7.1.4.4. Тепловіддача при зміні агрегатного стану.....	59
7.1.5. Складний теплообмін.....	60
7.1.6. Теплопередача.....	60
7.1.7. Рушійна сила теплових процесів.....	61
7.2. Нагрівання, охолодження, конденсація.....	62
7.2.1. Нагрівання водяною парою.....	62
7.2.2. Нагрівання топковими, або димовими, газами.....	63
7.2.3. Нагрівання електричним струмом.....	64
7.2.4. Охолодження до звичайних температур.....	64
7.2.5. Конденсація.....	64
8. ТЕПЛООБМІННІ АПАРАТИ.....	65
8.1. Рекуперативні апарати.....	65
8.2. Регенеративні теплообмінні апарати.....	70
8.3. Змішувальні теплообмінні апарати.....	71
ЛІТЕРАТУРА.....	74

## ВСТУП

Запропонований конспект лекцій з дисципліни “Процеси і апарати хімічних виробництв” призначений для вивчення курсу студентами–хіміками і студентами–механіками зі спеціальності “Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів”.

Курс “Процеси і апарати хімічних виробництв” традиційно включає лекції, практичні заняття, лабораторні роботи і виконання курсового проекту, які органічно пов’язані між собою.

Наведений у конспекті матеріал є найнеобхіднішим мінімумом теоретичних знань. Засвоєння курсу планується шляхом вивчення цього конспекту з подальшим слуханням окремих розділів або питань, які потребують розширення і поглиблення уявлень про процеси та обладнання, що використовується для їхнього проведення.

# 1. Класифікація основних процесів хімічної технології

## 1.1. Основні типи процесів

а) Гідромеханічні процеси, швидкість яких залежить тільки від законів гідродинаміки. До них відносяться: осадження зважених частинок, фільтрування рідин або газів, перемішування, псевдозрідження твердого зернистого матеріалу;

б) теплові процеси, швидкість яких визначається законами теплопередачі (нагрівання, охолодження, випарювання, конденсація);

в) масообмінні процеси; їхня швидкість визначається законами масопередачі (абсорбція, адсорбція, екстракція, сушіння);

г) хімічні процеси, пов'язані з перетворенням речовин; їхня швидкість визначається законами хімічної кінетики. У зв'язку зі специфічністю хімічних реакцій традиційно ці процеси та обладнання для їхнього проведення вивчаються в курсі “Загальна хімічна технологія” або у спеціальних дисциплінах, призначених для ознайомлення студентів з технологією та обладнанням конкретних хімічних виробництв. В деяких вищих навчальних закладах читається спеціальний курс “Хімічні реактори”;

д) механічні процеси (подрібнення твердих матеріалів, класифікація).

## 1.2. Кінетичні закономірності

Кінетика усіх процесів підкоряється закону:

*Швидкість процесу прямопропорційна рушійній силі і обернено - опору даному процесу.* Величину, обернену опору  $R$ , називають константою швидкості  $K$ .

Кінетичні рівняння мають вигляд:

а) для гідромеханічних процесів

$$\frac{dV}{dF_1 d\tau} = \frac{\Delta p}{R_1} = K_1 \Delta p \quad (1.1)$$

де  $V$  – об'єм рідини;

$F_1$  – площа перерізу апарату;

$R_1$  – гідравлічний опір;

$\Delta p$  – перепад тиску (рушійна сила);

$\tau$  – час.

(1.1), вирішене відносно  $dV$ , дає *основне рівняння гідромеханічних процесів*:

$$dV = K_1 \Delta p dF d\tau \quad (1.1a)$$

б) для теплових процесів

$$\frac{dQ}{dF_2 d\tau} = \frac{\Delta t}{R_2} = K_2 \Delta t \quad (1.2)$$

де  $Q$  – кількість тепла, що передається у процесі;

$F_2$  – площа поверхні теплообміну;

$\Delta t$  – різниця температур (рушійна сила);

$R_2$  – термічний опір;

$K_2$  – коефіцієнт теплопередачі.

(1.2), вирішене відносно  $dQ$ , дає *основне рівняння процесу теплопередачі*:

$$dQ = K_2 \Delta t dF d\tau \quad (1.2a)$$

в) для масообмінних процесів

$$\frac{dM}{dF_3 d\tau} = \frac{\Delta C}{R_3} = K_3 \Delta C \quad (1.3)$$

де  $M$  – кількість речовини, що переходить з однієї фази в іншу;

$F_3$  – поверхня контакту фаз;

$K_3$  – коефіцієнт масопередачі;

$\Delta C$  – різниця концентрацій.

(1.3), вирішене відносно  $dM$ , дає *основне рівняння процесів масообміну*:

$$dM = K_3 \Delta C dF d\tau \quad (1.3a)$$

$K_1, K_2, K_3$ , - коефіцієнти швидкості різних процесів - в значній мірі залежать від умов руху потоку, тому виведення усіх кінетичних закономірностей базується на законах руху матеріальних потоків; ці закони вивчаються гідравлікою.

## 2. Гідравліка

Гідравліка складається з двох основних розділів: гідростатики і гідродинаміки.

### 2.1. Гідростатика

В цьому розділі вивчається рівновага рідини, яка знаходиться у стані абсолютного або відносного спокою. Відносним спокоєм називається стан, при якому у рідині, що рухається, її частинки не переміщуються одна відносно одної (вода в цистерні, яка рухається). При виведенні закономірностей гідростатики рідину вважають ідеальною (відсутні сили внутрішнього тертя).

#### 2.1.1. Диференціальні рівняння Ейлера

В об'ємі рідини виділяємо паралелепіпед масою  $dm$  з ребрами  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  (рис. 1) і розглядаємо сили, які діють на нього.

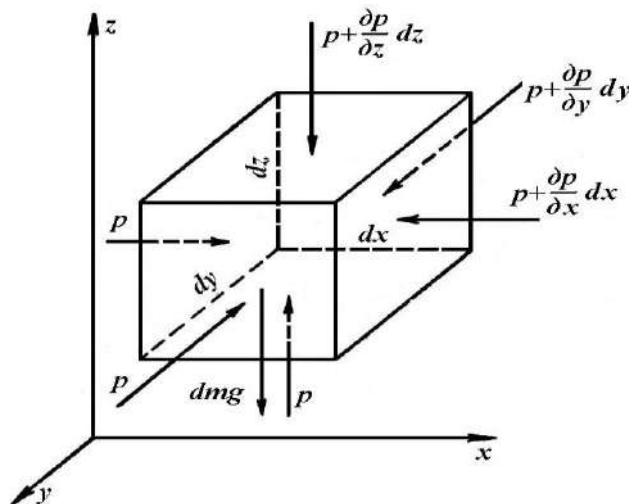


Рис. 1. До виведення диференціальних рівнянь Ейлера.

Це **сила тяжіння**  $gdm = g\rho dV = \rho g dx dy dz$  і **сила гідростатичного тиску** ( $P$ ), яка дорівнює добутку гідростатичного тиску ( $p$ ) на площу грані:

на нижню грань  $p dx dy$

на верхню грань:  $\left( p + \frac{\partial p}{\partial z} dz \right) dx dy$

Згідно з основним законом статички **сума проєкцій на осі координат усіх сил, які діють на елементарний об'єм, дорівнює 0.**

Сума проєкцій сил:

на вісь  $z$ :

$$-\rho g dx dy dz + \rho dx dy - \rho dx dy - \frac{\partial p}{\partial z} dx dy dz = 0$$

$$\begin{array}{l} \text{на вісь } x: \\ \text{на вісь } y: \end{array} \quad \begin{array}{l} -\rho g - \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \\ -\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \\ -\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \end{array} \quad \begin{array}{l} (2.1) \\ (2.2) \\ (2.3) \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} (2.1) \\ (2.2) \\ (2.3) \end{array}} \right\} (2.4)$$

(2.1) - (2.3) утворюються систему (2.4) – диференціальні рівняння Ейлера.

### 2.1.2. Основне рівняння гідростатики

виводиться з (2.4). Оскільки часткові похідні  $\frac{\partial p}{\partial x}$  і  $\frac{\partial p}{\partial y}$  дорівнюють нулю, то часткову похідну  $\frac{\partial p}{\partial z}$  замінюють на повну  $\frac{dp}{dz}$ .

Тоді рівняння (2.1) можна записати:  $dz + \frac{dp}{\rho g} = 0$ , а вважаючи, що

$$\rho = \text{const}: d\left(z + \frac{p}{\rho g}\right) = 0$$

Після інтегрування маємо: 
$$z + \frac{p}{\rho g} = \text{const} \quad (2.5)$$

або 
$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \quad (2.6)$$

(2.6), записане у вигляді

$$p_2 = p_1 + \rho g (z_2 - z_1) \quad (2.7)$$

відоме як закон Паскаля:

*Тиск, який утворюється у будь-якій точці рідини, що покоїться, передається однаково усім точкам її об'єму, або: при будь-якій зміні тиску  $p_1$  тиск  $p_2$  у будь-якій іншій точці рідини змінюється на стільки ж.*



### 2.1.3. Деякі застосування основного рівняння гідростатики

1) Принцип посудин, що сполучаються

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (2.8)$$

(модифікована (2.8) використовується для розрахунку висот відвідних патрубків при поділу рідин – дивись розділи “Поділ неоднорідних систем”, “Екстракція”).

2) Пневматичний вимір рівню рідини в резервуарах (рис. 2).

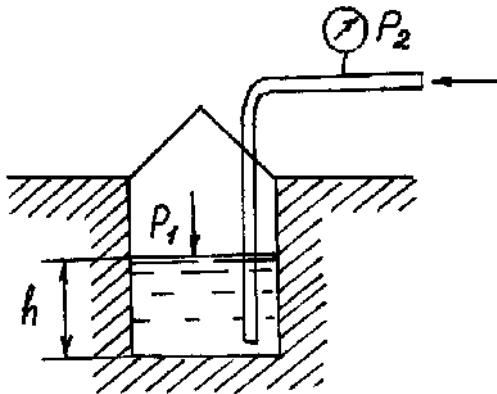


Рис. 2. Пневматичний вимір рівню рідини в резервуарах.

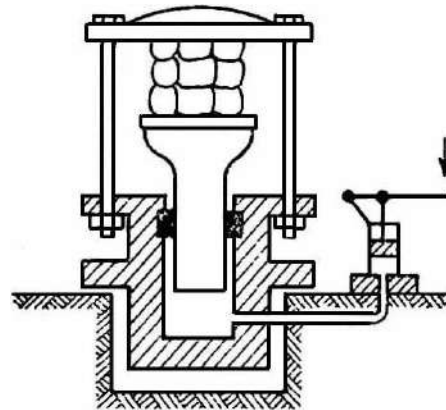


Рис. 3. Гідравлічний прес.

По трубі подають повітря, збільшуючи його тиск. Коли повітря подолає опір стовпчика рідини і почне барботувати крізь рідину, тиск  $p_2$ , який фіксується манометром, перестає зростати.

$$h = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} \quad (2.9)$$

3) Гідростатичні машини, які використовуються для пресування різних матеріалів (рис. 3). Робота таких машин основана на тому, що, згідно з законом Паскаля, тиск (Па) у будь-якій точці системи буде однаковий, але сила тиску (Н) зростає із збільшенням площі, на яку вона діє.

## 2.2. Гідродинаміка

Рухомою силою при русі рідин та газів є різниця тисків, котра створюється за допомогою насосів та компресорів або внаслідок різних рівнів або питомих мас рідини.

### 2.2.1. Основні характеристики руху рідин

Розглядається рух рідини по трубі постійного перерізу.

#### а) Швидкість і витрата рідини

Витрата – кількість рідини, яка протікає крізь переріз потоку за одиницю часу. Бувають: об'ємна витрата ( $V$ , м<sup>3</sup>/с) і масова ( $M$ , кг/с). В різних точках живого перерізу труби швидкість частинок рідини неоднакова. Біля осі труби вона максимальна, а біля стінок мінімальна, тому користуються не дійсною, а середньою (фіктивною) швидкістю:

$$\omega = \frac{V}{F} \quad (2.10)$$

де  $F$  - площа перерізу;

$V$  - об'ємна витрата

або 
$$V = \omega F \quad (2.11)$$

Масова витрата

$$M = \rho \cdot \omega \cdot F \quad (2.12)$$

Масова швидкість

$$W = \rho \cdot \omega \quad (2.13)$$

**б) Гідравлічний радіус і еквівалентний діаметр** - це основні розрахункові розміри.

**Гідравлічний радіус** – це відношення площі затопленого перерізу каналу до змоченого периметру:

$$r_r = \frac{F}{\Pi} \quad (2.14)$$

Для труби круглого перерізу

$$r_r = \frac{\pi d^2}{4\pi d} = \frac{d}{4} \quad (2.15)$$

Діаметр, виражений через гідравлічний радіус, називається **еквівалентним діаметром**

$$d_e = 4 r_r \quad (2.16)$$

$$d_e = \frac{4F}{\Pi} \quad (2.17)$$

### **в) Сталі й несталі потоки.**

◆ Потік, який встановився (сталій) – це потік, у будь-якій точці простору якого швидкість не змінюється з часом. Такий потік характерний для безперервних процесів.

◆ Потік, який не встановився (несталий), характерний для періодів зупинки, пуску, зміни режиму роботи.

Для характеристики зміни будь-якого параметру в часі при переміщенні в просторі використовують субстанціональні похідні (дивись далі).

**г) Режими руху рідини.** Їх можна дослідити, якщо вводити у потік підфарбовану струминку рідини. Якщо струминка не змішується з основною масою рідини, то режим *ламінарний*. Якщо змішується, то режим *турбулентний*.

Для кількісної характеристики режиму руху використовують критерій Рейнольдса.

$$\text{Re} = \frac{\omega \cdot d_e \cdot \rho}{\mu} = \frac{\omega \cdot d_e}{\nu} \quad (2.18)$$

де  $\mu$  - динамічний коефіцієнт в'язкості, Па·с;

$\nu$  - кінематичний коефіцієнт в'язкості, м<sup>2</sup>/с.

Критерій Рейнольдса – це безрозмірний критерій гідродинамічної подібності потоків. Є мірою відношення сил інерції і в'язкості (або внутрішнього тертя) в потоці.

Для потоків рідин, що протікають по прямих трубах і каналах, Re має такі значення:

ламінарний потік	$\text{Re} < 2300$
перехідний	$2300 < \text{Re} < 10000$
турбулентний	$\text{Re} > 10000$

Для потоків, що проходять по вигнутих трубах, критичні значення Re більші, й залежать від співвідношення  $d/D$ , де  $d$  – діаметр труби зміювика, а  $D$  – діаметр витків.

### **2.2.2. Розподіл швидкостей і витрата рідини при ламинарному русі**

У потоці виділяємо циліндр радіусом  $R$ , а в ньому - циліндричний шар товщиною  $dr$  і внутрішнім радіусом  $r$  (рис. 4). Рух шару відбувається під дією різниці сил тисків  $P_1$  і  $P_2$  з обох торцевих боків циліндру.

$$\Delta P = P_1 - P_2 = (p_1 - p_2) \cdot \pi r^2 \quad (2.19)$$

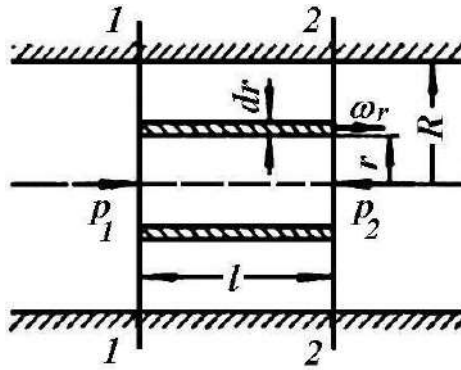


Рис. 4. До розрахунку розподілу швидкостей рідини по перерізу труби.

Рухові складає опір сила внутрішнього тертя

$$T = -\mu F \frac{d\omega_r}{dr} \quad (2.20)$$

де  $F$  – площа бокової поверхні;  $F = 2\pi r l$  (для циліндру).

Сума проекцій всіх сил на осьову лінію

$$(p_1 - p_2)\pi r^2 - \left(-\mu F \frac{d\omega_r}{dr}\right) = 0 \quad (2.21)$$

$$(p_1 - p_2)\pi r^2 = -\mu 2\pi r l \frac{d\omega_r}{dr} \quad (2.22)$$

Після поділу перемінних і скорочення отримуємо:

$$\frac{p_1 - p_2}{2\mu l} r dr = -d\omega_r \quad (2.23)$$

$$\int_r^R \frac{p_1 - p_2}{2\mu l} r dr = -\int_{\omega_r}^0 d\omega_r \quad (2.24)$$

$$\frac{p_1 - p_2}{2\mu l} \left( \frac{R^2}{2} - \frac{r^2}{2} \right) = \omega_r \quad (2.25)$$

$$\omega_r = \frac{p_1 - p_2}{4\mu l} (R^2 - r^2) \quad (2.26)$$

Біля осі труби ( $r = 0$ ) швидкість максимальна

$$\omega_{\max} = \frac{p_1 - p_2}{4\mu l} R^2 \quad (2.27)$$

Порівнюючи (2.26) з (2.27), отримуємо формулу закону Стокса

$$\omega_r = \omega_{\max} \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (2.28)$$

Він характеризує параболічний характер розподілу швидкостей по перерізу трубопроводу при ламінарному русі. При даному режимі ( $\omega_{\text{сер}} = 0,5 \omega_{\text{макс}}$ ).



Рис. 5. Епюри розподілу швидкостей при ламінарному і турбулентному русі:  
а - ламінарний рух; б - турбулентний рух.

Для турбулентного потоку у зв'язку зі складним характером руху неможливо отримати теоретично профіль розподілу швидкостей. Тут  $\omega_{\text{сер}} \approx f(\text{Re})$ . Так, при  $\text{Re} = 10^4$   $\omega_{\text{сер}} \approx 0,8 \omega_{\text{макс}}$ .

З (2.11) і (2.26) виводять формулу Пуазейля для витрати рідини при ламінарному русі по круглій трубі:

$$V = \frac{\pi d^4 \Delta p}{128 \mu l} \quad (2.29)$$

### 2.2.3. Диференціальні рівняння руху Ейлера. Рівняння Бернуллі

Диференціальні рівняння руху Ейлера виводять аналогічно рівнянням рівноваги, але беруть до уваги рух рідини за допомогою складових швидкостей уздовж осей -  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$ , а також враховують принцип динаміки, згідно з яким сума проєкцій сил, які діють на елементарний об'єм рідини, яка рухається, дорівнює добутку маси рідини на її прискорення.

Диференціальні рівняння руху ідеальної рідини, записані для векторів швидкостей на відповідні координатні осі, мають вигляд (2.30)

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{d\omega_x}{d\tau} &= -\frac{\partial \rho}{\partial x} \\ \rho \frac{d\omega_y}{d\tau} &= -\frac{\partial \rho}{\partial y} \\ \rho \frac{d\omega_z}{d\tau} &= -\rho g - \frac{\partial \rho}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (2.30)$$

звідки виводять рівняння Бернуллі для руху ідеальної рідини:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\omega_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\omega_2^2}{2g} \quad (2.31)$$

для неідеальної (реальної) рідини:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\omega_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\omega_2^2}{2g} + h_{\text{втр}} \quad (2.32)$$

де  $h_{\text{втр}}$  – втрати тиску внаслідок наявності внутрішнього тертя між шарами рідини (в'язкості).

Для горизонтального трубопроводу  $z_1 = z_2$  і

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{\omega_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\omega_2^2}{2g} \quad (2.33)$$

Рівняння Бернуллі використовують для визначення швидкостей, витрат, часу витоку рідини з резервуарів, а також при розрахунку насосів.

#### 2.2.4. Гідравлічні опори

Гідравлічні опори вимірюються величиною різниці тисків ( $\Delta p$ ). Повний тиск, що необхідний для подолання усіх гідравлічних опорів мережі, включаючи трубопровід і апаратуру, при ізотермічній течії потоку

$$\Delta p = \Delta p_{\text{шв}} + \Delta p_{\text{тер}} + \Delta p_{\text{шід}} + \Delta p_{\text{м.о}} + \Delta p_{\text{ап}} + \Delta p_{\text{дод}} \quad (2.34)$$

1            2            3            4            5            6

1) тиск, необхідний для створення швидкості потоку на виході з трубопроводу

$$\Delta p_{\text{шв}} = \frac{\rho \omega^2}{2} \quad (2.35)$$

2) тиск, необхідний для подолання тертя в прямій трубі довжиною  $L$  і діаметром  $d_e$

$$\Delta p_{\text{тер}} = \lambda \frac{L}{d_e} \cdot \frac{\rho \omega^2}{2} \quad (2.36)$$

3) тиск, який витрачається на подолання місцевих опорів (місцеві опори – коліна, засувки, відводи)

$$\Delta p_{\text{м.о}} = \sum \zeta_{\text{м.о.}} \frac{\rho \omega^2}{2} \quad (2.37)$$

Місцеві опори можна додавати лише у разі розділення їх прямолінійними ділянками труб довжиною  $> 5d$ . При безпосередньому з'єднанні загальна втрата напору буде більшою за суму окремих втрат.

3) тиск, необхідний для підйому рідини або для подолання гідростатичного тиску

$$\Delta p_{\text{під}} = \rho g H \quad (2.38)$$

4) тиск, необхідний для подолання гідравлічного опору апарату, розраховується для кожного виду апаратів окремо;

5) додатковий тиск в кінці трубопроводу, необхідний для подачі рідини в апарат, тиск в якому перевищує атмосферний, для розпилення рідини в апараті.

*Коефіцієнт тертя* для прямих труб при ламінарному русі

$$\lambda = \frac{A}{\text{Re}} \quad (2.39)$$

Коефіцієнт  $A$  залежить від форми перерізу; для круглого перерізу  $A = 64$ , для квадратного  $A = 57$ .

Характеристиками шорстких труб є абсолютна геометрична шорсткість ( $e$ ) і відносна шорсткість ( $\varepsilon$ ).

$e$  – середня висота виступів на стінках труби (мм);  $\varepsilon = e/d_e$ .

Для розрахунку коефіцієнту тертя в шорстких трубах використовують різні формули (див. літературу). Можна для будь-яких режимів і будь-яких труб користуватися залежністю

$$\lambda = f\left(\text{Re}, \frac{d_e}{e}\right) \quad (2.40)$$

Наведені вище формули придатні для ізотермічного потоку.

Для неізотермічного потоку, коли рідина, яка протікає по трубі, нагрівається або охолоджується, праві частини формул для розрахунку  $\lambda$  помножаються на безрозмірні поправочні коефіцієнти ( $x$ ):

для ламінарного руху

$$x = \left(\frac{\text{Pr}_{cm}}{\text{Pr}_p}\right)^{1/3} \left[1 + 22 \left(\frac{\text{Gr}_p \text{Pr}_p}{\text{Re}_p}\right)^{0,15}\right] \quad (2.41)$$

$cm$  – стінка;

$p$  – рідина;

$\text{Pr}_{cm}$  – критерій Прандтля для рідини при температурі стінки;

$\text{Gr}$  – критерій Грасгофа.

Для турбулентного режиму в технічно гладких сталевих трубах

$$x = \left(\frac{\text{Pr}_{cm}}{\text{Pr}_p}\right)^{1/3} \quad (2.42)$$

### 2.2.5. Розрахунок діаметру трубопроводу

З рівняння витрати (2.11) для круглого перерізу, де

$$V = \omega \frac{\pi d^2}{4} \quad (2.43)$$

можна розрахувати діаметр трубопроводу:

$$d = \sqrt{\frac{4V}{\pi\omega}} \quad (2.44)$$

Як бачимо з (2.44), зі збільшенням швидкості потоку зменшується діаметр трубопроводу і необхідна кількість матеріалів для його виготовлення. Але при цьому, як це видно з (2-35) - (2-37), зростають гідравлічні опори, внаслідок чого збільшуються витрати енергії на переміщення рідини. Тому визначають оптимальні швидкості руху:



малов'язкі рідини – не більш як 3 м/с;  
 в'язкі рідини  $\approx 1$  м/с;  
 пари і гази 8 – 15 м/с;  
 гази під тиском 15-25 м/с;  
 насичена водяна пара 20 – 30 м/с;  
 перегріта водяна пара 30 – 50 м/с.

### 2.2.6. Втрати напору

Внаслідок того, що трубопроводи й апарати чинять опір потокам, відбувається втрата напору  $\Delta h$  ( $H$ ). Її визначають за допомогою (2.38). Формулам (2-35) - (2-37) відповідають втрати напору:

$$\Delta h_{\text{тер}} = \lambda \frac{L}{d_e} \frac{\omega^2}{2g} \quad (2.45)$$

$$\Delta h_{\text{м.о.}} = \sum \zeta_{\text{м.о.}} \frac{\omega^2}{2g} \quad (2.46)$$

$$\Delta h = \Delta h_{\text{тер}} + \Delta h_{\text{м.о.}} = \left( \lambda \frac{L}{d_e} + \sum \zeta \right) \frac{\omega^2}{2g} \quad (2.47)$$

## 2.3. Переміщення рідин (насоси)

### 2.3.1. Види насосів

Насоси – це гідравлічні машини, які перетворюють механічну енергію двигуна в енергію рідини, що переміщується, підвищуючи її тиск.

Різниця тисків рідини в насосі й у трубопроводі обумовлює її переміщення. Існують два типи насосів:

1. **Динамічні** – рідина переміщується при дії сил на незамкнений об'єм рідини, який безперервно сполучається зі входом і виходом з насосу.

2. **Об'ємні** – рідина переміщується, або витісняється, при періодичній зміні замкненого об'єму рідини, який періодично сполучається із входом в насос і виходом з нього.

**Динамічні насоси** за видом сил, які діють на рідину, діляться на:

- лопатеві
- насоси тертя

В лопатевих енергія передається рідині при обтіканні лопаток робочого колеса насоса, що обертається.

*Лопатеві насоси* діляться на:

- відцентрові
- осьові.

У відцентрових насосах рідина рухається через робоче колесо від центру до периферії. В осьових - у напрямку осі колеса.

*Насоси тертя* – динамічні насоси, в яких рідина переміщається під дією сили тертя (вихрові, струминні).

Група **об'ємних** насосів охоплює насоси, в яких рідина витісняється з замкненого простору тілом, яке рухається зворотно – поступально (поршневі, плунжерні) або ті, що мають обертальний рух (шестеренні, пластинчасті, гвинтові).

### 2.3.2. Основні параметри насосів

**Продуктивність** ( $Q$ , м<sup>3</sup>/с) - це об'єм рідини, який подається насосом в нагнітальний трубопровід в одиницю часу.

**Напір** ( $H$ , м) – характеризує питому енергію, котра надається насосом одиниці ваги рідини, що перекачується. Визначається за допомогою рівняння Бернуллі. Напір можна уявити як висоту, на яку можна підняти 1 кг рідини за рахунок енергії, яку надає їй насос.

**Потужність.**

Корисна потужність ( $N_k$ ) витрачається на надання рідині енергії

$$N_k = \gamma Q H = \rho g Q H = \Delta p Q \quad (2.48)$$

де  $\Delta p$  – втрата напору в трубопроводі [див. (2-35) – (2-37)].

Потужність на валу  $N_v$  більша за корисну у зв'язку зі втратами в насосі, які враховуються за допомогою коефіцієнту корисної дії ( $\eta_n$ ):

$$N_v = \frac{N_k}{\eta_n} \quad (2.49)$$

$$\eta_n = \eta_Q \eta_z \eta_{\text{мех}} \quad (2.50)$$

$$\eta_Q = \frac{Q_{\text{прак}}}{Q_{\text{теор}}} ; \quad \eta_z = \frac{H_{\text{прак}}}{H_{\text{теор}}} \quad (2.51)$$

$\eta_Q$  і  $\eta_z$  – витратний і гідравлічний к.к.д. відповідно;  $\eta_{\text{мех}}$  враховує втрати потужності на тертя в колесі.

К.к.д. ( $\eta$ ) складають: 0,8÷0,9 - для поршневих насосів; 0,6÷0,7 - для відцентрових насосів; 0,93÷0,95 - для відцентрових великої потужності.

Потужність, яка споживається двигуном

$$N_{\text{дв}} = \frac{N_{\text{в}}}{\eta_{\text{пер}} \eta_{\text{двиг}}} = \frac{N}{\eta_{\text{пер}} \eta_{\text{в}} \eta_{\text{к}}} \quad (2.52)$$

Установочна потужність двигуна  $N_{\text{уст}}$  розраховується за величиною потужності двигуна ( $N_{\text{дв}}$ ) з урахуванням можливих перевантажень в момент пуску насосу, які виникають у зв'язку з необхідністю подолання інерції маси рідини, що покоїться

$$N_{\text{уст}} = N_{\text{дв}} \cdot \beta \quad (2.53)$$

$N_{\text{уст}}$ , кВт	<1	1 – 5	5 – 50	>50
$\beta$	2 – 1,5	1,5 – 1,2	1,2 – 1,15	1,1

### 2.3.3. Области використання насосів різних типів

Вибір типу насосу визначається технологічними потребами – продуктивністю установки, її будовою, яка впливає на величину гідравлічного опору мережі, та видом середовища, яке потрібно перекачувати.

Найбільше розповсюдження у хімічній промисловості мають відцентрові насоси завдяки їхнім перевагам перед іншими типами насосів:

- 1) висока продуктивність і рівномірна подача;
- 2) компактність та швидкохідність (можливість безпосереднього приєднання до двигуна);
- 3) простота будови, що дозволяє виготовляти їх з хімічно стійких матеріалів, які важко піддаються механічній обробці (наприклад, ферросиліду, кераміки і т.д.);
- 4) можливість перекачування рідин, які містять зважені частинки, завдяки великим зазорам між лопатками і відсутності клапанів;
- 5) можливість встановлювати на легких фундаментах.

До недоліків відцентрових насосів слід віднести відносно низькі напори, а також зменшення продуктивності при збільшенні опору мережі й різке зниження к.к.д. при зменшенні продуктивності.

Поршневі насоси доцільно використовувати лише при порівняно невеликих подачах і високих тисках (50–1000 ат) для перекачування високов'язких, вогне- і вибухонебезпечних рідин (парові насоси), а також при дозування рідких середовищ.

Для перекачування високов'язких рідин, палив, нафтопродуктів використовують гвинтові насоси. Якщо рідина не містить твердих частинок, то можна використовувати шестеренні насоси.

## 2.4. Переміщення і стиск газів. Компресорні машини

Переміщення використовують для подачі й відведення газів. Стиск – для підвищення швидкості реакції і зменшення реакційного об'єму апарату, для перемішування або розпилювання рідини.

Інтервал тиску, що використовується в хімічній промисловості -  $10^{-3}$ - $10^8$  Па. Машини, які призначенні для переміщення і стиску газів, називаються **компресорні машини**.

Відношення кінцевого тиску  $p_2$ , який створює компресор, до початкового тиску  $p_1$ , при якому відбувається всмоктування газів, називається *ступенем стиску*.

В залежності від ступеню стиску компресорні машини підрозділяються на:

**вентилятори** ( $p_2/p_1 < 1,1$ ) використовують для переміщення великих кількостей газів;

**газодувки** ( $1,1 < p_2/p_1 < 3$ ) - для переміщення газів при відносно високому опорі мережі;

**компресори** ( $p_2/p_1 > 3$ ) - для створення високого тиску;

**вакуум-насоси** - для всмоктування газу при тиску, який менший за атмосферний.

За принципом дії компресорні машини розподіляються на:

1) поршневі; 2) ротаційні; 3) відцентрові; 4) осьові.

Ці типи компресорних машин розглядаються самостійно, у тому числі при виконанні курсових проектів.

## 3. ГІДРОМЕХАНІЧНІ ПРОЦЕСИ

### 3.1. Класифікація неоднорідних систем і гідромеханічних процесів

#### 3.1.1. Види неоднорідних систем

Неоднорідна система складається щонайменше з 2-х фаз:

*внутрішньої*, (*дисперсна фаза*), яка знаходиться у тонко-подрібненому стані;

*зовнішньої* (*дисперсійне середовище*), яка оточує частинки внутрішньої фази.

Бувають такі неоднорідні системи:

**Пил** – система, що складається з газу (Г) і твердих частинок (Т) розміром  $5 \div 50$  мкм ( $1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$ ); утворюється при подрібненні і транспортуванні твердих матеріалів.

**Дим** – система, яка складається з Г і Т розміром  $0,3\div 5$  мкм; утворюється при конденсації та твердінні рідких речовин.

**Туман** – газ із краплинами рідини (Р) розміром  $0,3\div 3$  мкм; утворюється при конденсації.

**Суспензії** – системи, що складаються з рідини і твердих частинок. У залежності від розмірів частинок суспензії підрозділяються на

- грубі ( $>100$  мкм)
- тонкі ( $100-0,1$  мкм)
- колоїдні розчини ( $<0,1$  мкм).

**Емульсія** – система, що складається з  $P_1$  і краплин другої рідини ( $P_2$ ), що не змішується з першою.

**Піна** – складається з рідини і пухирців газу.

У більшості випадків розміри частинок дисперсної фази неоднакові – системи полідисперсні.

Дисперсна фаза характеризується фракційним, або дисперсним, складом, або процентним вмістом частинок різного розміру.

### ***3.1.2. Види гідромеханічних процесів***

**Осадження** – це процес поділу рідких або газоподібних неоднорідних систем шляхом виділення з газової фази твердих або рідких частинок. Цей поділ здійснюється під дією сил тяжіння, відцентрової сили або сили електричного поля.

Розрізняють:

- відстоювання;
- циклонний процес;
- відстійне центрифугування;
- електроочищення.

**Фільтрування** – процес поділу рідких або газових неоднорідних систем шляхом пропускання їх через пористу перегородку. Рушійною силою може бути або різниця тисків, або відцентрова сила, тому процеси називаються або фільтруванням або відцентровим фільтруванням.

**Змішування** – це одержання однорідних і неоднорідних систем.

**Псевдозрідження** використовується при роботі з твердим зернистим матеріалом і являє собою приведення його в такий стан, при якому властивості маси твердого матеріалу наближаються до властивостей рідин (набуває текучості). Такого стану досягають в результаті пропускання крізь шар зернистого матеріалу знизу наверх потоку газу або рідини (псевдозріджуючий агент).

## 3.2. Осадження

### 3.2.1. Кінетика осадження

Для отримання диференціального рівняння процесу осадження частинки під дією сили тяжіння розглядаємо сили, які діють на неї.

При осажденні під дією сили тяжіння на частинку діють: сила тяжіння  $G$ , сила тертя  $T$  і архімедова (підйомна) сила  $A$  (рис. 6).

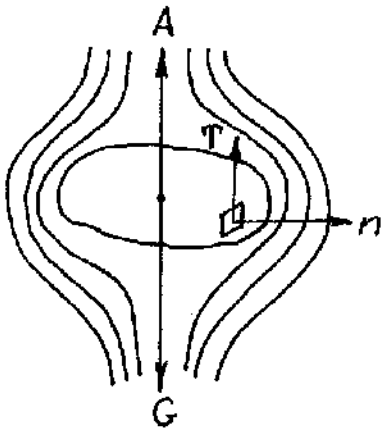


Рис. 6. До виведення диференціального рівняння осадження частинки під дією сили тяжіння.

Об'єм частинки пропорційний кубу її лінійного розміру ( $l$ ):

$$V = C_1 \cdot l^3 \quad (3.1)$$

Площа поверхні частинки пропорційна квадрату її лінійного розміру:

$$S = C_2 \cdot l^2 \quad (3.2)$$

$C_1, C_2$  – коефіцієнти, які залежать від форми частинки.

Питома вага частинки –  $\gamma$ ; рідини –  $\gamma_c$  (середовище).

$$G = C_1 l^3 \gamma \quad (3.3)$$

$$A = C_1 l^3 \gamma_c \quad (3.4)$$

$$T = C_2 l^2 \mu \frac{\partial \omega}{\partial n} \quad (3.5)$$

Згідно основному закону динаміки сума проєкцій сил дорівнює добутку маси на прискорення

$$C_1 l^3 (\gamma - \gamma_c) - C_2 l^2 \mu \frac{\partial \omega}{\partial n} = C_1 l^3 \frac{\gamma_c}{g} \frac{d\omega}{d\tau} \quad (3.6)$$

(3.6) – диференціальне рівняння осадження частинки під дією сили тяжіння.

Це рівняння, як і інші диференціальні рівняння, не може бути вирішене у загальному вигляді. Тому для визначення швидкості осадження  $\omega$  потрібні експериментальні дані, які подаються у вигляді критеріальних рівнянь.

Як диференціальні рівняння перетворюються на критеріальні, розглядається наукою, яка називається "**Теорія подібності**". Зараз ми на прикладі процесу осадження розглянемо елементи теорії подібності.

### Подібність процесів. Критерії подібності. Критеріальні рівняння

#### Подібність процесів

Головною метою розрахунків хімічної апаратури є визначення її розмірів. Теорія постановки дослідів і обробки їхніх результатів вивчається теорією подібності. Вона відповідає на питання: як треба організувати дослід і обробити отримані дані, щоб їх можна було б обґрунтовано розповсюджувати на процеси, які протікають в умовах, що відрізняються від умов дослідів.

Уяви про теорію подібності дозволяють:

- 1) встановити умови експериментальних робіт, при яких кількість дослідів буде найменшою;
- 2) визначити найменшу кількість величин, які треба виміряти при проведенні дослідів;
- 3) встановити області, на які можна розповсюджувати дані, що отримані при досліді.

Висновки теорії подібності будуються на базі особливих форм дослідження диференціальних рівнянь, які описують перебіг процесу, що досліджується.

При складанні диференціальних рівнянь відволікаються від часткових особливостей процесу і тому вони описують цілий клас процесів, у межах яких діють певні фізичні закони.

Для описання одиничного процесу диференціальне рівняння доповнюється даними, які характеризують цей процес. Ці додаткові дані називають *умовами однозначності*. До умов однозначності відносяться:

- 1) геометричні умови, які характеризують розміри і форму об'єкту, в якому протікає процес;
- 2) властивості середовища (тиск, густина);
- 3) граничні умови, які характеризують взаємодію середовища з тілами, що обмежують об'єм, в якому протікає процес;
- 4) початковий стан системи.

Подібність умов однозначності включає:

- 1) геометричну подібність,
- 2) часову,
- 3) фізичних величин,
- 4) граничних та початкових умов.

1. *Геометрична подібність* - коли відношення всіх лінійних розмірів двох апаратів є сталою величиною

$$l_1''/l_1' = l_2''/l_2' = \dots K_1, \quad \text{або} \quad l_1'' = K_1 l_1'$$

2. *Часова* – відношення між інтервалами часу зберігає постійне значення

$$\tau_1''/\tau_1' = \tau_2''/\tau_2' = K_\tau, \quad \text{або} \quad \tau_1'' = K_\tau \tau_1'$$

### Критерії подібності

Їх можна отримати, якщо диференціальне рівняння, яке описує процес, перетворити таким чином:

1) поділити рівняння на ліву або праву частину. При цьому отримують безрозмірний комплекс;

2) замінити напрямлені параметри ( $x, y, z, n, \omega_x$ ) на ненаправлені;

3) відкинути символи диференціалу або прирощення.

Критерії, які являють собою відношення двох однойменних величин, називаються параметричними критеріями, або симплексами подібності.

Лінійний розмір, який входить у критерії подібності і який є найбільш характерним для даної системи, називається визначальним.

Критерії бувають:

- визначальні,
- невизначальні.

*Визначальні* – складаються тільки з фізичних величин, які входять в умови однозначності.

*Невизначальні* – у склад яких входять хоча б одна фізична величина, яка не входить в умови однозначності.

Функціональна залежність, котра розповсюджується на всю групу процесів і являє собою залежність невизначальних критеріїв від визначальних, називається *критеріальним рівнянням*.

Отримаємо критеріальне рівняння осадження частинки під дією сили тяжіння. Рівняння (3.6) ділимо на праву частину

$$g \frac{\partial \tau}{\partial \omega} \frac{\gamma - \gamma_c}{\gamma} - \frac{C_2}{C_1} \frac{g}{\gamma} \frac{\mu}{l} \frac{\partial \omega}{\partial \pi} \frac{d\tau}{d\omega} - 1 = 0 \quad (3.7)$$

домножимо на  $\frac{\gamma}{\gamma_c}$  (для того, щоб у знаменнику були властивості середовища – газу або рідини) :

$$g \frac{\partial \tau}{\partial \omega} \frac{\gamma - \gamma_c}{\gamma_c} - \frac{C_2}{C_1} \frac{g}{\gamma_c} \frac{\mu}{l} \frac{\partial \omega}{\partial \pi} \frac{d\tau}{d\omega} - \frac{\gamma}{\lambda_c} = 0 \quad (3.8)$$

Виконуємо операції п.п. 1)-3) для 2 складової (3.8):

$$\frac{C_2}{C_1} \frac{g}{\gamma_c} \frac{\mu}{l} \frac{\omega}{l} \frac{\tau}{\omega} \rightarrow \frac{C_2}{C_1} \frac{\mu}{\rho_c \cdot l \cdot \omega} \rightarrow \psi \frac{1}{\text{Re}} \quad (3.9)$$

$$\text{Коефіцієнт форми} \quad \psi = \frac{C_2}{C_1} \quad (3.10)$$

Для 1 складової:



$$\frac{g \cdot \tau}{\omega} \frac{\gamma - \gamma_c}{\gamma_c} \cdot \frac{l}{l} \rightarrow \frac{g \cdot l}{\omega^2} \frac{\gamma - \gamma_c}{\gamma_c}$$

домножимо на  $Re^2$  і отримаємо критерій Архімеда

$$Ar = \frac{gl^3}{\nu^2} \left( \frac{\rho - \rho_c}{\rho_c} \right) = \frac{l^3 (\rho - \rho_c) \rho_c g}{\mu_c^2} \quad (3.11)$$

Критерій Архімеда характеризує відношення різниці сил тяжіння і підйомної сили до підйомної.

Складова 3 - параметричний критерій, він не враховується в критеріальному рівнянні окремо, оскільки входить в Ar.

Як бачимо з рівнянь (3.9) - (3.11), процес осадження визначається критеріями Re і Ar, тобто

$$Re = a (\psi Ar)^n \quad (3.12)$$

(3.12) - критеріальне рівняння осадження під дією сили тяжіння. У залежності від характеру процесу воно набуває конкретних форм:

*Ламінарний процес (Re < 0,2)*

$$Re = \frac{1}{18} \psi Ar \quad (3.13)$$

*Перехідний процес*

$$Re = 0,152 (\psi Ar)^{0,715} \quad (3.14)$$

*Турбулентний процес (Re > 500)*

$$Re = 1,74 (\psi Ar)^{0,5} \quad (3.15)$$

Порівнюючи (2.18) з (3.13), отримують рівняння для швидкості осадження частинок сферичної форми під дією сили тяжіння:

$$\omega_o = \frac{1}{18} \cdot \frac{d^2 (\gamma - \gamma_c)}{\mu} = \frac{1}{18} \cdot \frac{d^2 (\rho - \rho_c)}{\mu} g \quad (3.16)$$

(3.16) – формула закону Стокса: *При ламінарному русі швидкість осадження сферичних частинок пропорційна квадрату їхнього діаметру, різниці густин частинок і середовища і обернено пропорційна в'язкості середовища.*

Швидкість осадження частинки неправильної форми менша.

Більш зручною формою критеріальною залежністю вважають:

$$Ly = f(Ar) \quad (3.17)$$

## Критерій Лященко

$$Ly = \frac{Re^3}{Ar} = \frac{\omega_o^3 \rho_c^2}{\mu_c (\rho - \rho_c) g} \quad (3.18)$$

За критерієм Лященко знаходять швидкість осадження:

$$\omega_o = \sqrt[3]{\frac{Ly \mu_c (\rho - \rho_c) g}{\rho_c^2}} \quad (3.19)$$

Провівши експерименти по визначенню  $Re$ ,  $Ar$ ,  $Ly$ , побудували залежність між ними. По цій залежності визначають критерій Лященко, а по ньому – швидкість осадження.

### 3.2.2. Процеси осадження

**а) Відстоювання** – відбувається під дією сил тяжіння; використовується для поділу пилу, суспензій, емульсій. Цей процес не забезпечує витягання тонкодисперсних частинок і характеризується невеликою швидкістю, тому використовують його для часткового, або попереднього, поділу.

Переваги:

- простота обладнання,
- невеликі енергетичні затрати.

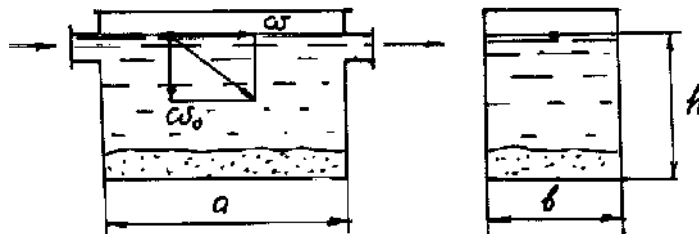


Рис. 7. Будова найпростішого відстійника.

При відстоюванні повинні дотримуватися дві основні умови:

1) час перебування елемента потоку в апараті повинен дорівнювати або бути більшим за час осадження;

2) лінійна швидкість ( $\omega$ ) повинна бути меншою за  $\omega_o$ , щоб вихрові потоки не підіймали частинок.

Швидкість осадження частинок у відстійній камері пов'язана з продуктивністю співвідношенням

$$V_{сек} = \omega_o \cdot F \quad (3.20)$$

$\omega_0'$  – дійсна швидкість осадження,  $\omega_0' \approx 0,5\omega_0$ ;  $\omega_0$  – теоретична швидкість осадження, розраховується за (3.16);

$$F = a \cdot b.$$

**Апарати для відстоювання** – відстійники. Вони бувають для пилів, суспензій, емульсій.

**Відстійники для пилів** – це безперервно або напівбезперервно працюючі апарати. Термін “напівбезперервно” означає, що газовий потік рухається безперервно, а тверді частинки вивантажуються періодично.

Найпростішим апаратом для поділу пилів є відстійний газохід (рис. 8).

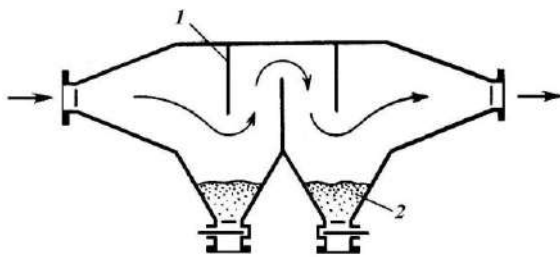


Рис. 8. Відстійний газохід:  
1 – перегородка; 2 – збірник пилу.

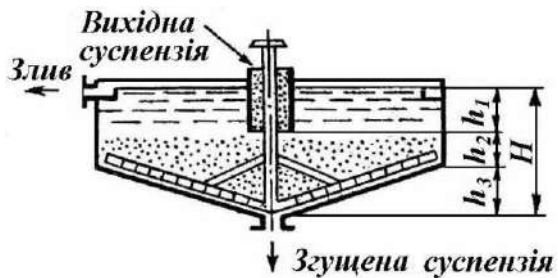


Рис. 10. Відстійник для суспензій.

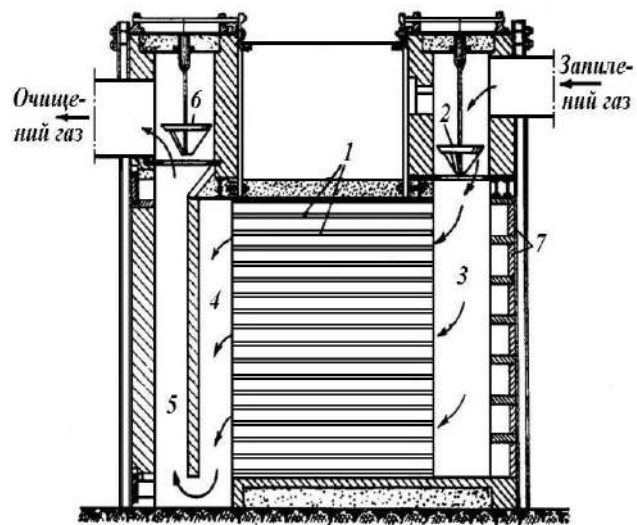


Рис. 9. Пилова камера:  
1 – полиці; 2 – регульовальний шибєр;  
3 – розподільчий канал; 4, 5 – збірні канали;  
6 – засувка; 7 – дверцята.

Крім відстійного газохіду, для поділу пилів широко використовуються пилові камери (рис. 9).

**Відстійники для суспензій.** Типовий відстійник для суспензій наведений на рис. 10. Він являє собою циліндричну ємність із гребками, призначеними для вивантаження осаду.

При розрахунках відстійників визначають критичний розмір частинок, які осідають у відстійниках, з (3.11).

Згідно з (3.20) інтенсифікація процесу відстоювання досягається збільшенням  $F$ . При розрахунках відстійників задаються ступенем очищення. Виходячи зі ступеня очищення і фракційного складу частинок, знаходять мінімальний розмір частинок, які повинні осісти у відстійнику. Цей розмір береться за вихідний при обчисленні швидкості осадження.

**Відстійники для емульсій.** Як приклад такого апарату можна розглянути відстійник, що використовується при поділі рідинних систем у процесі екстракції (див. розділ “Екстрагування”, с. 116).

**б) Осадження під дією відцентрової сили.**

Для створення поля відцентрової сили використовуються два способи:

1) створюють обертання потоку, що рухається в нерухомому апараті – циклонний процес;

2) потік направляють в апарат, що обертається; таким чином, потік обертається разом з апаратом – відстійне центрифугування.

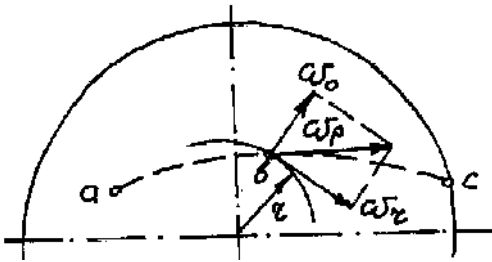


Рис. 11. До питання про сили, що діють при відцентровому осадженні:

$\omega_r$  – окружна (лінійна) швидкість, м/с;

$\omega_r$  – результуюча швидкість, м/с.

На частинку діють сили: відцентрова ( $G_{вц}$ ) і сила тертя, яка мала у порівнянні з  $G_{вц}$ .

$$G_{вц} = \frac{m\omega_r^2}{r} = mW^2 r \quad (3.21)$$

$\omega_r = Wr$ ;  $W$  – кутова швидкість, рад/с = с<sup>-1</sup>;

$\frac{\omega_r^2}{r} = W^2 r$  – відцентрове прискорення.

Порівнюємо  $G_{вц}$  з силою тяжіння ( $G_T$ ):

$$G_T = mg \rightarrow m = G_T / g \quad \text{підставляємо в (3.21)}$$

$$G_{вц} = G_T \cdot \frac{\omega_r^2}{g \cdot r} \quad (3.22)$$

З (3.22): Відцентрова сила більша за силу тяжіння у  $\omega_r^2/rg$  разів. У виробничих апаратах співвідношення між  $\omega_r$  і  $r$  таке, що відцентрова сила не менш як на 2 порядки перевищує силу тяжіння.

Швидкість осадження частинок у полі відцентрових сил:

$$\omega_o = \frac{dr}{d\tau_o} \quad (3.23)$$

$$d\tau_o = \omega_o dr \quad (3.24)$$

$$\tau_0 = \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{\omega_0} \quad (3.25)$$

Інтеграл знаходять графічним способом як площу під кривою, зображеною на рис. 12.

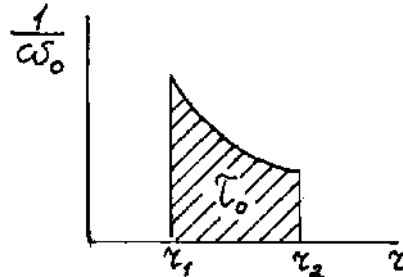


Рис. 12. До розрахунку часу осадження.

$\omega_0$  знаходять з (3.16), замінивши прискорення сили тяжіння  $g$  на відцентрове прискорення  $W^2 r$ :

$$\omega_0 = \frac{1}{18} \cdot d^2 \frac{(\rho - \rho_c)}{\mu} W^2 r \quad (3.26)$$

**Циклонний процес** використовують для поділу газових і рідинних (гідроциклони) систем. Потік, який несе тверді частинки, вводять в апарат тангенціально крізь вхідну трубу зі швидкістю:

для газів 10 – 40 м/с, для рідин 5-25 м/с.

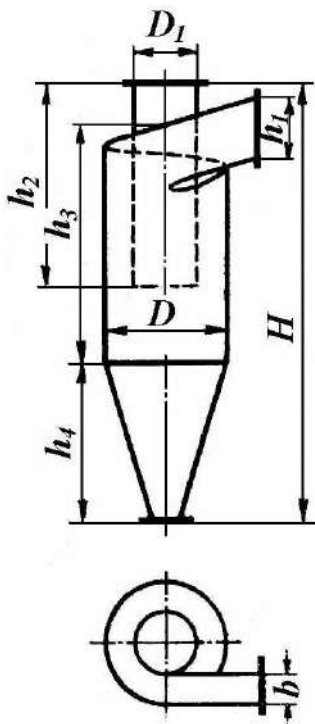


Рис. 13. Будова циклону типу НДІОГаз.

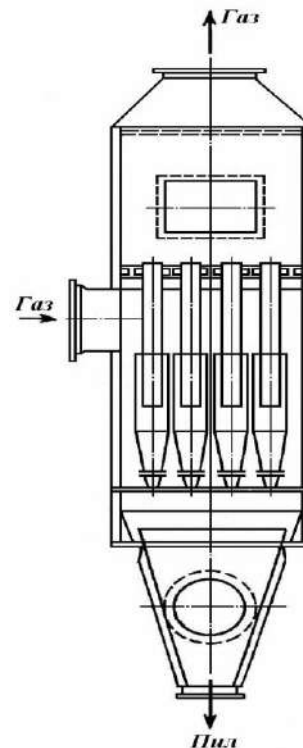


Рис. 14. Батарейний циклон.

Мінімальний діаметр частинок, які осідають в циклоні

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{\mu R}{2\pi r \omega_r}} \quad (3.27)$$

$n$  – кількість обертів газового потоку навколо центральної труби циклону ( $n = 1,5$ ).

**Відстійне центрифугування** – це відстоювання під дією відцентрових сил. Напруженість відцентрового поля, що створюється у центрифугі, характеризується чинником поділу  $\Phi$ , який показує, у скільки разів прискорення відцентрових сил перевищує прискорення сили тяжіння.

$$\Phi = \frac{W^2 r}{g} \quad (3.28)$$

де  $r$  - радіус барабану.

Існують номограми для визначення  $\Phi$  і  $\omega_r$ .

У залежності від  $\Phi$  центрифуги підрозділяються:

- на нормальні ( $\Phi < 3500$ )
- надшвидкісні, або ультрацентрифуги ( $\Phi > 3500$ ).

Ротори нормальних центрифуг мають відносно великі розміри, і часто вони використовуються як фільтрувальні. У цьому разі ротори повинні бути сітчасті.

Надцентрифуги мають суцільні ротори невеликих розмірів і використовуються як відстійні.

Центрифуги поділяються

- 1) за принципом дії (на періодичні і безперервні);
- 2) за способом вивантаження матеріалу (з ручним і механічним);
- 3) за розташуванням валу (вертикальні, горизонтальні, нахилені).

Як приклад, розглядаємо роботу безперервнодіючої горизонтальної центрифуги з механізованим вивантаженням осаду (рис. 15). Вихідна суспензія уводиться по трубі усередину шнеку і під дією відцентрової сили відкидається крізь вікна 3 у внутрішню порожнину барабану 1. В барабані відбувається відстоювання суспензії. Освітлена рідина під дією відцентрової сили переміщається до вікон 5, перетікає в кожух 4 і видаляється через нижній патрубок. Осад безперервно переміщається у барабані наліво за допомогою шнеку, який обертається зі швидкістю, дещо меншою, ніж швидкість

барабану. Через вікна 3 осад викидається в кожух і відводиться через розташований внизу патрубок.

При проектуванні або при оцінці ефективності роботи центрифуги визначають час осадження  $\tau_0$  і найменші розміри частинок  $d_{\min}$ , що можуть осідати у даній центрифугі.

Для визначення  $\tau_0$  користуємося (3.24) і (3.26)

$$d\tau_0 = \frac{18\mu}{(\rho - \rho_c)d^2W^2} \cdot \frac{dr}{r} \quad (3.29)$$

$$\tau_0 = \frac{18\mu}{(\rho - \rho_c)d^2W^2} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (3.30)$$

Мінімальний діаметр частинок, які осідають у відстійній центрифугі:

$$d_{\min} = 3 \sqrt{\frac{2\mu}{W^2(\rho - \rho_c)} \cdot \frac{V}{L} \cdot \frac{\ln(r_2/r_1)}{\pi(r_2^2 - r_1^2)}} \quad (3.31)$$

Позначення до рівнянь показані на рис. 16.

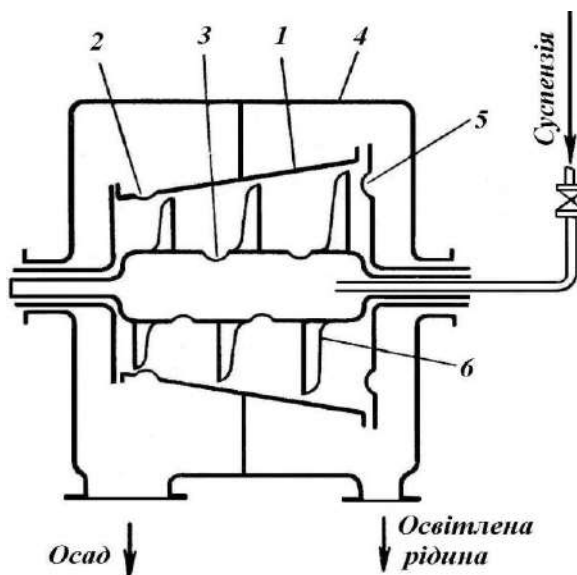


Рис. 15. Схема безперервної горизонтальної відстійної центрифуги з механічним вивантаженням осаду:  
1 – ротор; 2, 3, 5 – отвори (вікна); 4 – кожух;  
6 – розвантажувальний шнек.

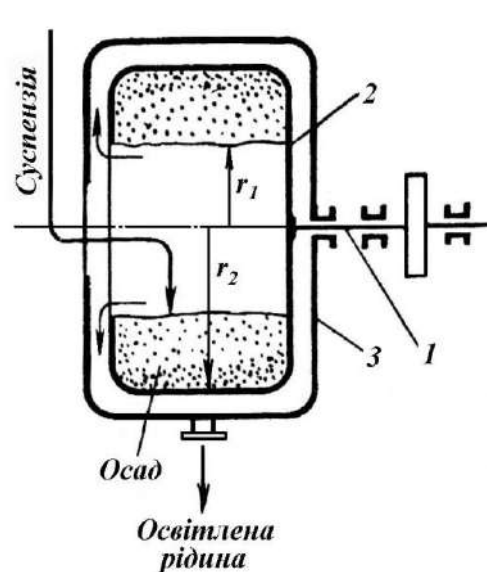


Рис. 16. Схема відстійної центрифуги періодичної дії з ручним вивантаженням осаду:  
1 – вал; 2 – барабан; 3 – кожух.

### в) Осадження під дією електричного поля

Цей метод дозволяє осаджувати дуже малі частинки. Газовий потік, який містить тверді частинки, попередньо іонізується,

внаслідок чого частинки набувають заряду. При проходженні іонізованого газового потоку в електричному полі між двома електродами заряджені частинки переміщуються до протилежно зарядженого електроду.

Іонізація здійснюється двома способами:

1. *самостійно* – при достатньо великій різниці потенціалів на електродах;
2. *не самостійно* – при дії випромінювання рентгенівських променів і т. ін.

Частіше використовується самостійна іонізація. Зовнішньою ознакою іонізації є світіння електродів. Електрод, який світиться, називається коронуючим.

Форми електродів бувають пластинчасті та трубчасті (рис. 17).

При різниці потенціалів  $\Delta E = (4 \div 6)$  кВ/м і щільності електричного струму  $i = (0,005 \div 0,5)$  мА/м спостерігається повне звільнення газів від твердих частинок. Швидкість осадження визначають приблизно. Вона залежить від щільності струму, рухливості іонів, радіусу коронуючого електроду, густини повітря тощо.

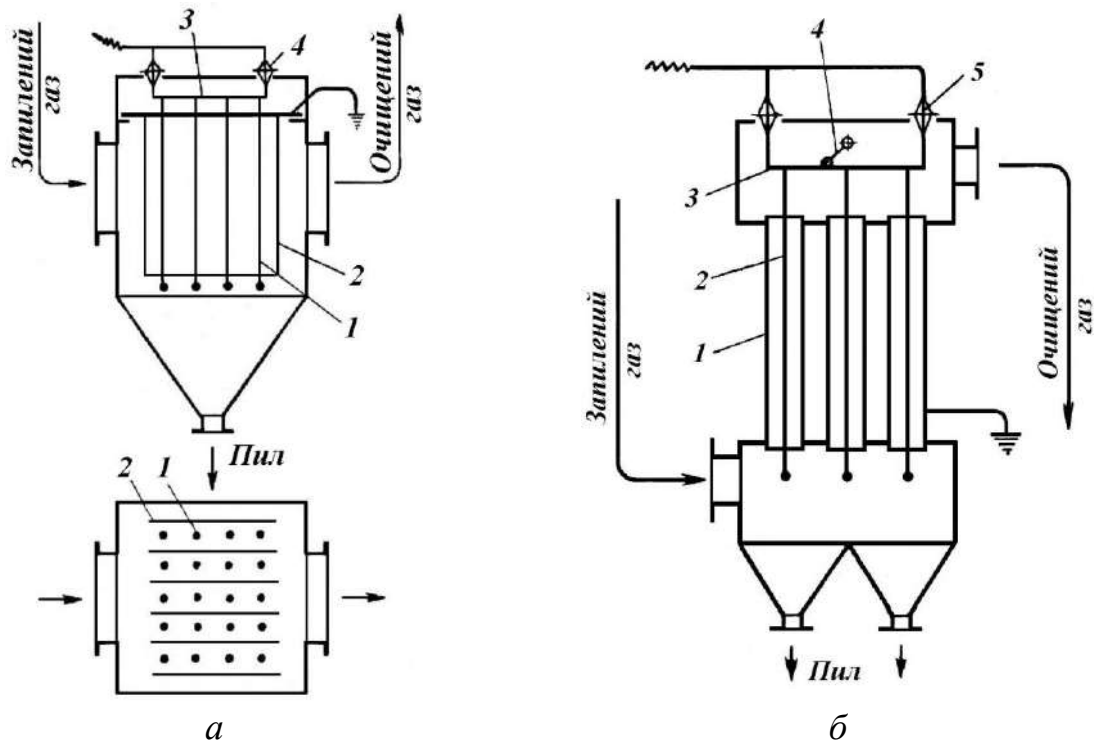


Рис. 17. Форми електродів: а – пластинчастий; б – трубчастий.

Апарати, в яких проводиться осадження під дією електричного поля, мають назву електрофільтри.



## 4. ФІЛЬТРУВАННЯ

На відміну від осадження фільтрування забезпечує майже повне звільнення рідин або газів від зважених частинок.

Розрізняють фільтрування з відкладенням осаду і з забиванням пор фільтру.

Рушійною силою процесу фільтрування є різниця тисків ( $p$  або  $\Delta p$ ) перед і після фільтру або відцентрова сила. У зв'язку з цим розрізняють: фільтрування під дією перепаду тисків і відцентрове фільтрування.

*Фільтрувальні матеріали:* пісок, гравій, тканини, сітки, пориста кераміка.

### 4.1. Фільтрування під дією перепаду тисків з відкладенням осаду

#### 4.1.1. Кінетика фільтрування

Для отримання диференціального рівняння руху в'язкої рідини виділяють в потоці рідини, що рухається по каналу (пора фільтру), плоский елементарний паралелепіпед і розглядають його одновимірний рух. На паралелепіпед діють сили:

тяжіння 
$$G_T = \rho g dx dy dz \quad (4.1)$$

тиску [розраховується по різниці між силою тиску на верхню грань  $p dy dz$  і на нижню  $(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx) dy dz$ ]:

$$G_{\text{тис}} = -\frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz \quad (4.2)$$

тертя: 
$$T = \mu \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial y^2} dx dy dz \quad (4.3)$$

Використовуємо другий закон механіки для одновимірного руху і маємо:

$$\rho g - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial y^2} = \rho \frac{\partial \omega_x}{\partial \tau} \quad (4.4)$$

(4.4) - рівняння Нав'є – Стокса.

З (4.4) отримуємо критеріальне рівняння. Для цього (4.4) ділимо на праву частину.

$$\frac{\rho g \partial \tau}{\rho \partial \omega_x} - \frac{\partial p \partial \tau}{\partial x \rho \partial \omega_x} + \frac{\mu \partial \tau \partial^2 \omega_x}{\rho \partial \omega_x \partial y^2} = 1$$

1                      2                      3

1 складова: 
$$\frac{g \partial \tau}{\partial \omega_x} \rightarrow \frac{g \tau}{\omega} \cdot \frac{l}{l} \rightarrow \frac{gl}{\omega^2} = Fr \quad (4.5)$$

$Fr$  - критерій Фруда; характеризує відношення сил тяжіння до сил інерції.

2 складова: 
$$\frac{\partial p \partial \tau}{\partial x \rho \partial \omega_x} \rightarrow \frac{p \tau}{l \rho \omega} \rightarrow \frac{p}{\rho \omega^2} = Eu \quad (4.6)$$

$Eu$  - критерій Ейлера; характеризує відношення сил тиску до сил інерції.

3 складова 
$$\frac{\mu \partial \tau \partial^2 \omega_x}{\rho \partial \omega_x \partial y^2} \rightarrow \frac{\mu \tau \omega}{\rho \omega l} \rightarrow \frac{\mu}{\rho \omega l} = \frac{1}{Re}$$

В критеріальне рівняння  $Fr$  не вводять, оскільки при фільтруванні сили тяжіння малі у порівнянні з силами тиску і тертя, але вводять параметричний критерій  $l/d_e$ , який характеризує геометричні особливості системи.

Критеріальне рівняння:

$$Eu = C Re^n \left( \frac{l}{d_e} \right)^m \quad (4.7)$$

Для ламінарного руху ( $Re \leq 35$ )

$$Eu = \frac{110}{Re} \cdot \frac{l}{d_e} \quad (4.8)$$

$d_e$  - еквівалентний діаметр шару зернистого матеріалу.

$$d_e = 4\varepsilon/\sigma \quad (4.9)$$

де  $\varepsilon$  – частка порожнин у шарі;

$\sigma$  – питома поверхня зерен (поверхня в одиниці об'єму).

$d_e$  – можна виразити через  $d_z$  частинок (зерен).

Для сферичної форми

$$d_e = \frac{2}{3} \cdot \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} d_z \quad (4.10)$$

Для неправильної форми

$$d_e = \Phi \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} d_s \quad (4.11)$$

$\Phi$  – коефіцієнт форми.

#### 4.1.2. Розрахункові формули для процесу фільтрування

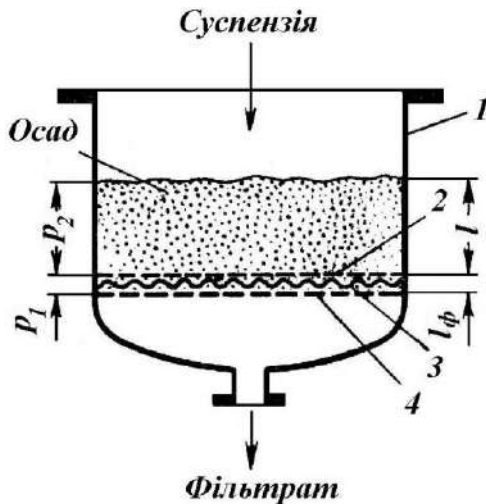


Рис. 18. Схема фільтру:

- 1 – ємність;
- 2 - фільтрувальний матеріал;
- 3 - опорна решітка;
- 4 - дренажна сітка.

Основне рівняння гідромеханічних процесів:

$$\frac{dV}{Fd\tau} = \frac{p}{R} \quad (4.12)$$

Тут загальний перепад тиску складається з перепаду тиску на осаді і на фільтрувальній перегородці:  $p = p_1 + p_2$ , а загальний опір – з опору шару осаду і опору фільтрувальної перегородки:

$$R = R_\phi + R_{\text{осаду}} \quad (4.13)$$

Опір шару осаду визначається як добуток питомого опору осаду  $r$ , який залежить від природи матеріалу осаду, на товщину шару  $l$ :

$$R_{\text{осаду}} = l \cdot r \quad (4.14)$$

З урахуванням (4.13) і (4.14) рівняння (4.12) набуває вигляду:

$$\frac{dV}{Fd\tau} = \frac{p}{R_\phi + lr} \quad (4.15)$$

Якщо з  $1 \text{ м}^3$  рідини, що пройшла крізь фільтр (фільтрату), відкладається  $x \text{ м}^3$  осаду, то висота шару осаду

$$l = \frac{Vx}{F} \quad (4.16)$$

(4.16) підставляємо у (4.15):

$$\frac{dV}{Fd\tau} = \frac{p}{R_{\phi} + \frac{V \cdot r \cdot x}{F}} \quad \text{або} \quad \frac{xr}{F} VdV + R_{\phi} dV = pFd\tau \quad (4.17)$$

Фільтрування проводять:

- 1) при постійному перепаду тисків,
- 2) при постійній швидкості

1)  $p = \text{const.}$  (4.17) інтегруємо у межах  $0-V$  і  $0-\tau$ .

Отримуємо:

$$V^2 xr + 2R_{\phi} VF = 2pF^2 \tau \quad (4.18)$$

$\tau$  - час фільтрування,  $F$  – поверхня фільтру.

(4.18) записують у вигляді:

$$V^2 + 2VC = K\tau \quad (4.19)$$

$C$  - константа фільтрування, яка характеризує гідравлічний опір фільтрувальної перегородки ( $\text{м}^3/\text{м}^2$ ),

$K$  – константа фільтрування, яка враховує режим процесу і фізико-хімічні властивості осаду і рідини ( $\text{м}^2/\text{с}$ ).

$V$  – об'єм фільтру, отриманий з одного  $\text{м}^2$  поверхні фільтру за час  $\tau$ .

Швидкість фільтрування можна розрахувати через константи фільтрування:

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{K}{2(V + C)}, \quad \text{м}^3/\text{м}^2\text{с} \quad (4.20)$$

$$K = \frac{2\Delta p}{\mu \cdot c \cdot r} \quad (4.21)$$

$c$  – маса сухої твердої речовини, яка відкладається на фільтрі при проходженні крізь його поверхню  $1 \text{ м}^3$  фільтрату [ $\text{кг}/\text{м}^3$ ];

$$c = \frac{\rho x}{1 - mx} \quad (4.22)$$

$m$  – маса вологого осаду в розрахунку на  $1 \text{ кг}$  сухої речовини, що міститься в ньому,  $\text{кг}/\text{кг}$ ;

$\rho$  - густина фільтрату,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$x$  – масова концентрація твердої фази в суспензії,  $\text{кг}/\text{кг}$ .

$$C = \frac{r_{mk}}{cr} \quad (4.23)$$

або з урахуванням (4.22)

$$C = \frac{r_{mk}(1 - mx)}{rx\rho} \quad (4.24)$$

$$2) \frac{dV}{Fd\tau} = \frac{V}{F\tau} = \text{const} \Rightarrow \quad (4.17) \text{ буде мати вигляд:}$$

$$V^2rx + R_\phi VF = pF^2\tau \quad (4.25)$$

При промивці осаду вважають, що швидкість промивки дорівнює швидкості фільтрування у кінці процесу.

#### 4.2. Відцентрове фільтрування (з відкладенням осаду)

Барабанні фільтрувальні центрифуги мають сітчасті стінки, які обкладаються пористими матеріалами. Швидкість фільтрування залежить від часу. На кривій залежності швидкості фільтрування від часу можна виділити 3 періоди:

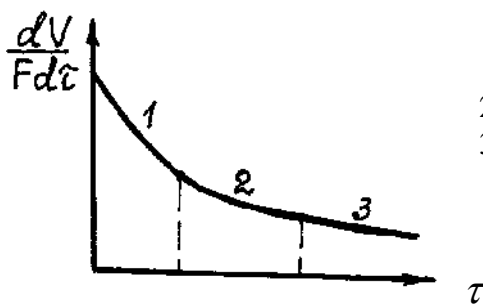


Рис. 15. Зміна швидкості фільтрування у часі:

- 1 - утворення осаду;
- 2 - ущільнення осаду;
- 3 - механічне "сушіння".

Період 1: Використовуються розглянуті вище закономірності кінетики фільтрування.

В шарі осаду виділяємо елементарне кільце, яке має об'єм

$$dV = 2\pi rHdr \quad (4.26)$$

Відцентрова сила

$$dG_{\text{вц}} = \frac{dm \cdot \omega^2}{r} = dmW^2r \quad (4.27)$$

$$dm = \rho dV = \rho Fdr \quad (4.28)$$

Тиск на шарі, що прилягає до кільця:

$$dp_{\text{вц}} = \frac{dG_{\text{вц}}}{F} = \frac{F\rho drW^2r}{F} = \rho W^2rdr \quad (4.29)$$

Після інтегрування (4.29) у межах  $r_1 - r_2$  отримаємо:

$$p_{вц} = \frac{W^2 \rho}{2} (r_2^2 - r_1^2) \quad (4.30)$$

Знаючи  $p_{вц}$ , з (4.18), (4.19) знаходять  $\tau$ .

Для 2 і 3 ділянок тривалість процесу визначається приблизно за формулою:

$$\tau = a \ln \frac{X_{поч} - b}{X_{кін} - b} \quad (4.31)$$

$X$  – вологість осаду

$a, b$  – константи, визначені експериментально.

### 4.3. Фільтрування із забиванням пор фільтру

Це складний і мало досліджений процес. Залежність для опору фільтру від об'єму фільтрату:

$$r_{\phi} = aV^b \quad (4.32)$$

\*\*\*

Більшість процесів фільтрування проводиться при постійному перепаду тисків.

Для визначення продуктивності  $V$  використовують рівняння:

$$\frac{V}{F\tau} = \frac{P}{r_{\phi}} \quad (4.33)$$

### 4.4. Фільтрувальна апаратура

Фільтрувальна апаратура підрозділяється на:

- газові фільтри,
- рідинні фільтри,
- фільтрувальні центрифуги.

**Газові фільтри** відносяться до безперервно діючих апаратів, однак через деякі (досить великі) проміжки часу їхня робота переривається для очищення або заміни фільтрувального матеріалу.

Підрозділяються на

1. фільтри з плоскою фільтрувальною перегородкою (рис. 19);
2. батарейні фільтри (рукавний – рис. 20) та ін.

Є фільтри з твердими фільтрувальними матеріалами (патронний фільтр – рис. 21).

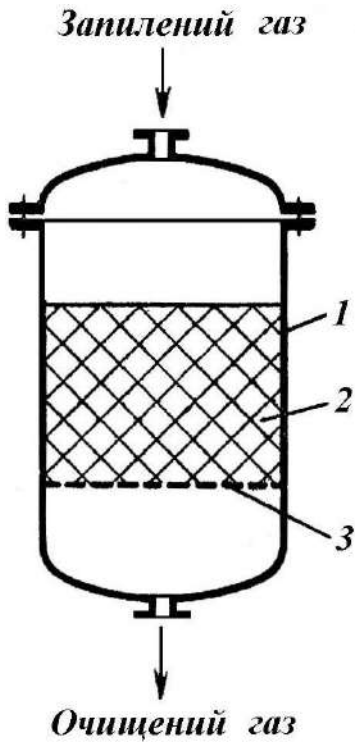


Рис. 19. Фільтри з плоскою фільтрувальною перегородкою:  
1 – корпус; 2 – фільтрувальний матеріал; 3 – опорна решітка.

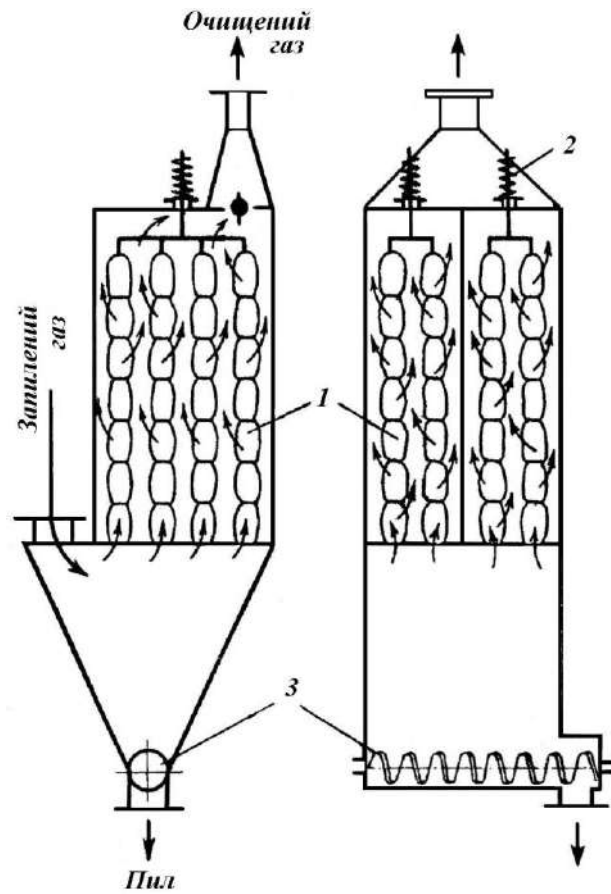


Рис. 20. Рукавний фільтр:  
1 – рукави з фільтрувального матеріалу;  
2 – струшуючий пристрій;  
3 – шнек для вивантаження твердих частинок.

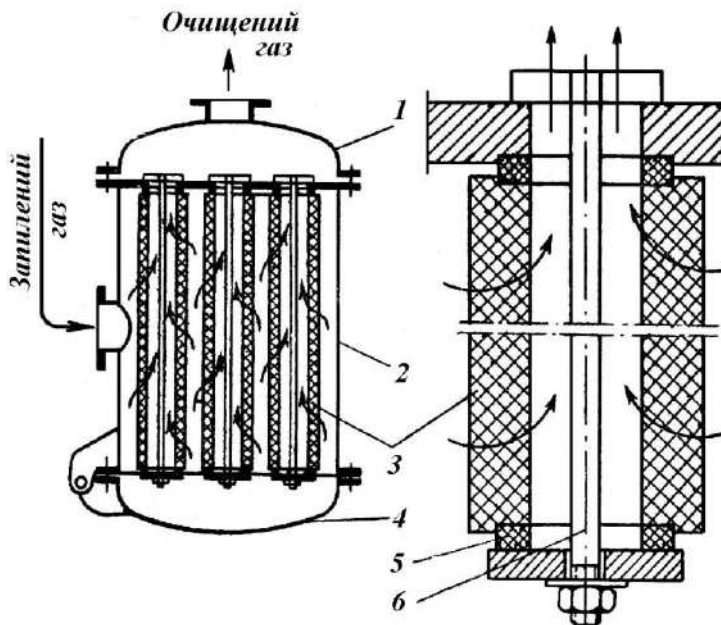


Рис. 21. Патронний фільтр:  
1 – кришка; 2 – корпус; 3 – керамічний патрон; 4 – відкидна кришка; 5 – прокладка;  
6 – стягуючий болт.

### Розрахунки газових фільтрів.

Розраховують:

1) Фільтрувальну поверхню:

$$F = \frac{V_{сек} \cdot r_{\phi}}{p} \quad (4.34)$$

$V_{сек}$  - об'ємна витрата газу, м<sup>3</sup>/с,  $r_{\phi}$  - максимальний опір фільтру, Н/м<sup>3</sup>,  
 $p$  - перепад тисків, Па.

2) Час роботи фільтру між чистками

$$\tau = V_{\phi} / V_{сек} \quad (4.35)$$

$V_{\phi}$  - об'єм газу, при проходженні якого крізь фільтр опір фільтрувальної перегородки сягає максимально припустимого значення.

**Рідинні фільтри** працюють під тиском і під вакуумом.

Фільтри, які мають плоску фільтруючу перегородку і працюють під вакуумом, називаються *нутч-фільтрами* (рис. 22).

Для вивантаження осаду фільтри мають мішалки, що підіймаються.

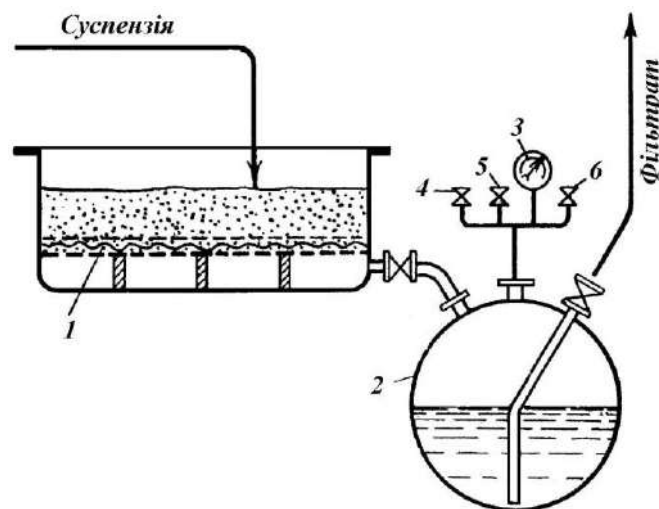


Рис. 22. Схема нутч-фільтру:

1 - фільтрувальна перегородка; 2 - збірник фільтрату; 3 - мановакууметр;  
 4 - 6 патрубки: 4 - вакуум; 5 - атмосфера; 6 - підвищений тиск; 7 - кран.

**Розрахунок рідинних фільтрів періодичної дії.** Визначають продуктивність одного фільтру з заданою поверхнею, або кількість фільтрів, що забезпечує продуктивність усієї установки. Загальна тривалість процесу фільтрування складається з тривалості власне фільтрування  $\tau$  і тривалості допоміжних операцій (промивка, продувка осаду) -  $\tau_{д}$ .



На практиці час фільтрування  $\tau$ , як правило, визначається необхідністю отримання заданої раціональної товщини шару осаду:

- для фільтрів з плоскою горизонтальною перегородкою - 50-250 мм,
- для наливних батарейних фільтрів – 10-40 мм,
- для багатокамерних – 20-80 мм.

Тривалість допоміжних операцій  $\tau_d$  визначається за виробничими даними.

Час, потрібний для утворення осаду товщиною  $l$  (час фільтрування), визначають за (4.17) і (4.18). Час, потрібний для проведення допоміжних операцій, визначають за виробничими даними.  $\tau_{\text{заг.}} = \tau + \tau_d$ .

Кількість фільтрату  $V$ , що утворився за цей час, визначають з (4.16), а середня продуктивність фільтру дорівнює

$$V_{\tau \text{ сеп}} = \frac{V_{\tau a}}{Fl} \quad (4.36)$$

За заданою продуктивність фільтрувального агрегату  $V_{\tau a}$  знаходять по таблицях (нормах) фільтрувальну поверхню одного фільтру і товщину шару осаду. Далі розраховують кількість циклів фільтрування, котрі треба здійснити за добу:

$$a = \frac{V_{\tau a} x}{Fl} \quad (4.37)$$

Кількість циклів фільтрування, які можна провести на одному фільтрі за добу:

$$b = \frac{24}{\tau + \tau_d} \quad (4.38)$$

а необхідна кількість фільтрів

$$n = \frac{a}{b} \quad (4.39)$$

## Схеми безперервнотіючих рідинних фільтрів

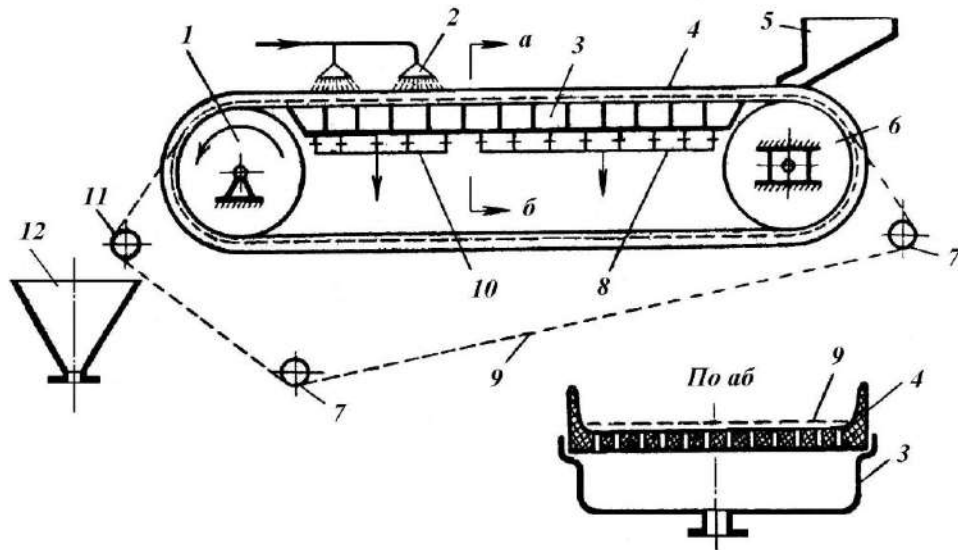


Рис. 23. Схема стрічкового вакуум – фільтру:

1 - привідний барабан; 2 - форсунки; 3 – вакуум - камери; 4 - фільтрувальна тканина; 5 - бункер для суспензії; 6 – натяжний барабан; 7 – натяжні ролики; 8 – валик для знімання осаду; 9 – бункер для осаду; 10 – колектори промивної води.

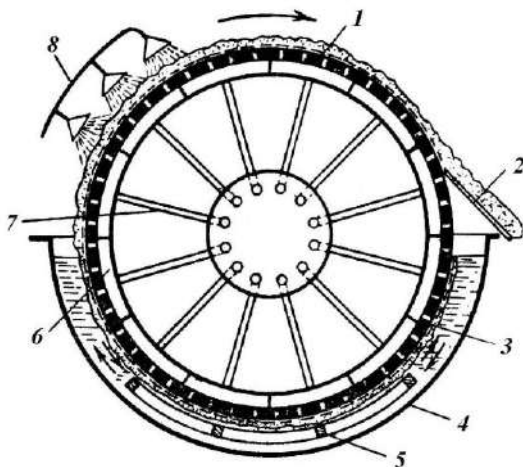


Рис. 23. Схема барабанного вакуум-фільтру:

1 – фільтрувальний матеріал;  
2 – ніж для знімання осаду;  
3 – осад;  
4 – корито;  
5 – мішалка;  
6 – камера (комірка);  
7 – трубки для з'єднання камер з розподільчою голівкою;  
8 – форсунки.

**Розрахунок фільтрів безперервної дії.** За заданою продуктивністю визначають довжину і площу фільтрувальної поверхні, швидкість її руху. А у випадку установки кількох фільтрів розраховують їхню кількість.

Вводимо позначення:

$L$  – загальна робоча довжина стрічки,

$L_{\text{ф}}$ ,  $L_{\text{пр}}$ ,  $L_{\text{д}}$  – довжини ділянок фільтрування, промивки, допоміжних операцій,

$F_{\text{ф}}$ ,  $F_{\text{пр}}$ ,  $F_{\text{д}}$  – площі цих ділянок,

$b$  – ширина стрічки.

Експериментально визначають товщину шару осаду. Кількість осаду за одиницю часу:

$$V_x = B l w \quad (4.40)$$

Час фільтрування визначається з (4.18)

Довжина ділянки фільтру

$$L_\phi = \omega \tau \quad (4.41)$$

Її площа

$$F_\phi = \omega \tau v \quad (4.42)$$

Для ділянки промивки

$$F_{\text{пр}} = \frac{V_{\text{тип}} \cdot R_{\text{заг}}}{\Delta p} \quad (4.43)$$

$$L_{\text{пр}} = L_\phi \frac{F_{\text{пр}}}{F_\phi} \quad (4.44)$$

$\tau_d$  визначається експериментально

$$L_d = \omega \cdot \tau_d \quad (4.45)$$

$$L = L_\phi + L_{\text{пр}} + L_d \quad (4.46)$$

Зі співвідношення

$$\frac{\pi D_n \cdot n}{60} = \omega \quad (4.47)$$

визначають діаметр привідного барабану  $D_n$  за заданим числом його обертів, або число обертів барабану за його заданим діаметром:

$$n = \frac{60\omega}{\pi D} \quad (4.48)$$

### Фільтрувальні центрифуги

За своєю будовою вони подібні осадним, але, як уже відмічалось раніше, як фільтрувальні використовуються нормальні центрифуги, ротори яких мають достатньо великі розміри і виготовляються з перфорованих листів або сіток.

Фільтрувальні центрифуги поділяються:

1) *За режимом дії:*

- а) періодичні
- б) безперервно діючі.
- 2) *За способом вивантаження осаду:*
  - а) з ручним вивантаженням
  - б) автоматичні
  - в) гравітаційні
  - г) з пульсуючим поршнем
  - д) з відцентровим вивантаженням.

## 5. ПЕРЕМІШУВАННЯ В РІДКОМУ СЕРЕДОВИЩІ

### 5.1. Інтенсивність і ефективність перемішування

Перемішування проводиться з метою отримання розчинів, емульсій і суспензій, а також інтенсифікації теплових, дифузійних і хімічних процесів.

Основні питання, які розглядаються при вивченні цього процесу, - інтенсивність та ефективність перемішування, а також витрата енергії.

*Інтенсивність* обумовлюється характером руху рідини в апараті й характеризується  $Re$ . Зі збільшенням інтенсивності пропорційно зростають енергетичні витрати, в той час як технологічний ефект обмежений.

*Ефективність* є характеристикою якості перемішування, вона виражається по-різному у залежності від технологічного призначення. Ефективність можна характеризувати відношенням швидкостей процесу при перемішуванні і без нього. При отриманні неоднорідних систем якість перемішування характеризується рівномірністю розподілу фаз.

### 5.2. Способи перемішування

1) *Пневматичний* – шляхом пропускання газу крізь шар рідини. Стиснений газ розподіляється барботером (горизонтально розташовані біля днища перфоровані труби, які зігнуті в окружності або спіралі).

Витрати газу

- Слабке перемішування  $0,4 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ хв.}$
- Середнє  $0,8 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ хв.}$
- Інтенсивне  $1,2 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ хв.}$

2) *Циркуляційний* - проводиться багаторазовим прокачуванням рідини крізь систему апарат - циркуляційний насос – апарат.

3) *Механічний* - здійснюється за допомогою механічних перемішуючих пристроїв (мішалок).

### 5.3. Будова механічних перемішуючих пристроїв

Вони складаються з мішалки, валу і приводу (рис. 24).

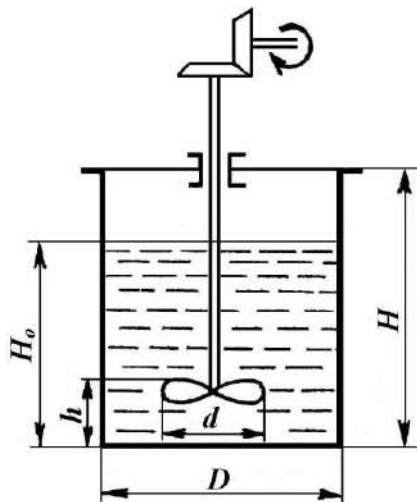


Рис. 24. Схема механічного перемішуючого пристрою.

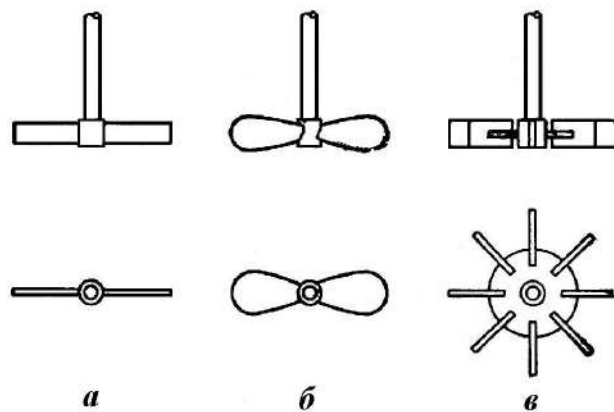


Рис. 25. Види мішалок:  
а – лопатева; б – пропелерна;  
в – турбінна відкритого типу.

Тип мішалки обирають у залежності від області використання (довідник).

Найбільш поширеними мішалками є лопатеві, пропелерні, турбінні, рамні, якірні, дискові (рис. 25, 26).

За розташуванням валу мішалки підрозділяються на вертикальні, горизонтальні та похилі.

Для багатьох типів мішалок  $D \approx 3d$ . Така мішалка називається нормалізованою.

Однією з характеристик мішалки є лінійна швидкість кінця лопатки - наприклад, для лопатевої мішалки вона складає 1-5 м/с, для пропелерної - 5-10 м/с. Всі розміри мішалки виражають через її діаметр  $d$  [див. формули (5.5) – (5.8)].

При перемішуванні виникає багато проблем, пов'язаних з необхідністю попередження осадження твердих частинок при отриманні суспензій, утворення на поверхні рідини лійки, тощо. З метою попередження осадження твердих частинок використовують лопатеві мішалки з нахиленими лопатками. При цьому виникають вихрові потоки рідини, що сприяють підйому твердих частинок з дна апарату.

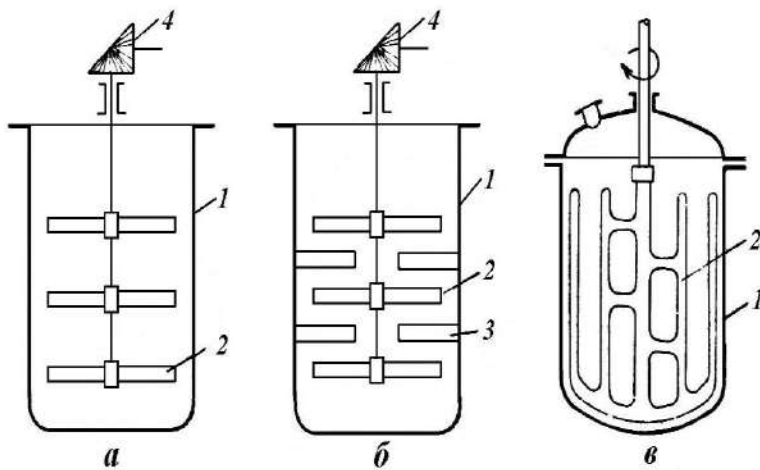


Рис. 26. Розташування мішалок у ємностях:  
*a* – лопатева мішалка; *б* – лопатева мішалка у судині з перегородками; *в* – якірна мішалка.

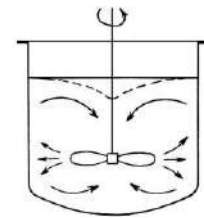


Рис. 27. Напрямок потоків у судині з мішалкою.

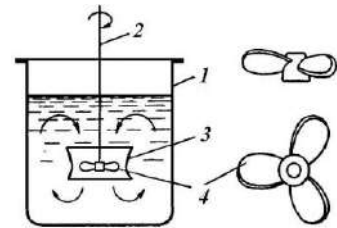


Рис. 28. Судина з мішалкою і дифузorzом:  
*1* – судина; *2* – вал;  
*3* – мішалка; *4* – дифузorz.

Для попередження утворення лійки на поверхні рідини при використанні швидкохідних перемішувачів і для того, щоб основна маса густої рідини не оберталась разом із лопатками, в ємностях встановлюють нерухомі перегородки шириною  $(0,05-0,12)D$  (рис. 26,б).

При використанні пропелерних мішалок треба мати на увазі, що один пропелер забезпечує інтенсивне перемішування рідини в зоні висотою  $D$ . Якщо робоча висота більша за  $D$ , то на вертикальному валу встановлюють кілька пропелерів.

Для створення інтенсивних вертикальних струмів рідини в ємності встановлюють дифузorz - коротку циліндричну або конічну склянку (рис. 28).

#### 5.4. Критерії гідродинамічної подібності для процесу перемішування

Для характеристики процесу перемішування використовують відцентрові критерії:

$$Re_{вц} = \frac{\rho n d^2}{\mu} \quad (5.1) \quad Fr_{вц} = \frac{n^2 d}{g} \quad (5.3)$$

$$Ar_{вц} = \frac{d^3 \rho \Delta \rho g}{\mu^2} \quad (5.2) \quad K_N = \frac{N}{\rho n^3 d^5} \quad (5.4)$$

( $\Delta \rho$  - різниця густин речовин, які перемішуються)  
і симплекси геометричної подібності (параметричні критерії):

$$\Gamma_{d_c} = d_c/d \quad (5.5) \quad \Gamma_D = D/d \quad (5.6)$$

$$\Gamma_{h_{\text{лійки}}} = h_{\text{лійки}}/d \quad (5.7) \quad \Gamma_h = h/d \quad (5.8)$$

## 5.5. Критеріальні рівняння

Їхній вигляд залежить від характеру процесу.

Наприклад, для отримання суспензії:

$$\text{Re}_{\text{вц}} = C_1 \text{Ar}_{\text{вц}} \Gamma_{d_c}^{0,5} \Gamma_D^{x_1} \quad (5.9)$$

$$n_0 = C_2 \frac{\Delta \rho^{0,5} d_c^{0,5} D^{x_1}}{\rho_c^{0,5} d^{y_1}} \quad (5.10)$$

$n_0$  – число обертів, при якому досягають практично рівномірного розподілу дисперсної фази по всьому об'єму.

Коефіцієнти і показники степені до (5.9) і (5.10) наведені в довідниках.

Для емульгування, гомогенізації легкокорухливої рідини та інших процесів використовують інші критеріальні рівняння.

## 6. ТЕЧІЯ ГАЗУ, ПАРИ АБО РІДИНИ КРІЗЬ ШАР ТВЕРДОГО ЗЕРНИСТОГО МАТЕРІАЛУ

Розглядаються такі випадки:

1. При малих швидкостях газового або рідинного потоку частинки шару нерухомі – відбувається фільтрація газу крізь шар, який залишається суцільним до деякої критичної швидкості потоку  $\omega_{\text{кр}}$ . Такий суцільний (щільний) шар може бути або нерухомим, або компактно переміщатися.

2. При швидкостях, що перевищують  $\omega_{\text{кр}}$ , тверді частинки починають переміщатись. Шар набуває текучості – це стан *псевдозрідження*. Цей стан може існувати при швидкостях потоку від  $\omega_{\text{кр}}$  до  $\omega_{\text{виносу}}$ .  $\omega_{\text{виносу}}$  – це мінімальна швидкість, при якій починається винос частинок з апарату.

3. Якщо швидкість потоку перевищує  $\omega_{\text{виносу}}$ , настає режим пневмотранспорту.

### 6.1. Нерухомий щільний шар

#### 6.1.1. Порізність шару $\varepsilon$

Порізність вільно насипаного нерухомого шару твердих частинок

$$\varepsilon = \frac{V_{нас} - V}{V_{нас}} \quad (6.1)$$

$V_{нас}$  - об'єм шару,  $V$  - об'єм, який займають частинки.  
Якщо крізь шар фільтрується рідина, то

$$\rho_{ш} = (1 - \varepsilon_0)\rho_T + \varepsilon_0\rho_c \quad (6.2)$$

$\rho_{ш}$  - середня густина шару (рідина + тверда речовина);  
 $\rho_c$  - густина середовища (рідини).  
Порізність при фільтрації рідини

$$\varepsilon = \frac{\rho_T - \rho_{ш}}{\rho_T - \rho_c} \quad (6.3)$$

Якщо фільтруються газ або пара, то  $\rho_T \gg \rho_{ш}$ , тому можна записати:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{\rho_{ш}}{\rho_T} \quad (6.4)$$

Для нерухомого шару  $\varepsilon_0 \approx 0,4$ .

При розрахунках користуються залежністю критерію Лященко від критерію Архімеда і порізності шару, яка наведена в довідниках.

### 6.1.2. Опір шару ( $\Delta p$ )

Існує кілька формул для розрахунку  $\Delta p$ . Наводимо формулу Акоюяна і Касаткіна:

$$\Delta p = \lambda_{зер} \frac{h_0}{d_{зер}} \cdot \frac{\omega_\phi^2 \rho_c}{2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3} \varphi, \text{ Па} \quad (6.5)$$

де  $\Delta p$  - перепад тиску в шарі;

$\lambda_{зер}$  - коефіцієнт опору шару;

$h_0$  - висота шару;

$d_{зер}$  - середній діаметр зерен;

$\omega_\phi$  - фіктивна швидкість (віднесена до вільного перерізу апарату);

$\varphi$  - коефіцієнт форми зерен.

Для  $\lambda_{зер}$  дослідним шляхом визначені залежності:

$$\text{При } Re < 35 \text{ (ламінальний рух)} \quad \lambda_{зер} = \frac{220}{Re_{зер}} \quad (6.6)$$

При  $70 < Re < 7000$



$$\lambda_{зep} = \frac{11,6}{\sqrt[4]{Re_{зep}}} \quad (6.7)$$

При  $Re > 7000$  (турбулентний режим)

$$\lambda = \text{const} \approx 1,26 \quad (6.8)$$

В умовах псевдозрідження  $Re_{зep}$  не перевищує 600-700.

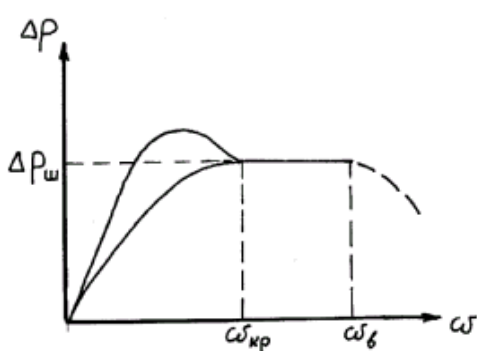
$$Re = \frac{\omega_{\phi} d_e \rho_c}{\mu_c}; \quad d_e = \phi d_{кулі}$$

де  $d_e$  – еквівалентний діаметр зерна, тобто діаметр кулі з таким само об'ємом, як і частинки, що досліджуються;

$\phi$  – коефіцієнт форми.

## 6.2. Псевдозріджений шар

В момент початку псевдозрідження вага зернистого матеріалу, яка припадає на одиницю площі перерізу апарату, врівноважується силою гідравлічного опору шару:



$$\Delta p_{шару} = \frac{G_{шару}}{F} \quad (6.9)$$

З урахуванням Архімедової сили

$$\Delta p_{шару} = (\gamma_m - \gamma_c)(1 - \varepsilon_0)h_0 \quad \text{або}$$

$$\Delta p_{шару} = (\rho_m - \rho_c)(1 - \varepsilon_0)gh_0 \quad (6.10)$$

Рис. 29. Вплив швидкості потоку на гідравлічний опір шару твердого матеріалу.

Для першого псевдозрідження спостерігається петля, яка відсутня при повторних дослідах.

Висота псевдозрідженого шару:

$$h = \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon} h_0 \quad (6.11)$$

Існує велика кількість формул для розрахунку критичної швидкості псевдозрідження монодисперсних шарів. Для полідисперсних  $\omega_{кр}$  визначається дослідним шляхом. Наприклад,

критична швидкість для шару сферичних частинок розраховується з  $Re$ , а сам  $Re$  визначається з критеріального рівняння:

$$Re_{кр} = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}} \quad (6.12)$$

$$Re_{кр} = \frac{\omega_{кр} d_{зер}}{v_c} \quad (6.13)$$

Верхня межа псевдозрідженого стану відповідає швидкості витання поодиноких частинок ( $\varepsilon \approx 1$ ).

$$Re_{вит} = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}} \quad (6.14)$$

$$Re_{вит} = \frac{\omega_g d_z}{v_c} \quad (6.15)$$

В режимі псевдозрідження провадиться багато процесів: сушіння, низка хімічних процесів (випалювання) та ін.

## 7. ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ

### 7.1. Теплопередача

#### 7.1.1. Загальна характеристика теплових процесів

В теплових процесах беруть участь не менш як два середовища з різними температурами. Середовище з більш високою температурою, яке віддає при теплообміні тепло, називається теплоносієм, середовище з більш низькою температурою – холодильним агентом (холодоагентом).

Основною характеристикою будь-якого теплового процесу є кількість теплоти, що передається; від цієї величини залежать розміри теплообмінної апаратури. Основним розміром є поверхня теплообміну. Зв'язок між кількістю тепла, що передається в апараті, і поверхнею теплообміну  $F$  визначається основним кінетичним рівнянням (1.2).

Основне рівняння теплопередачі:

$$dQ = K \cdot \Delta t \cdot dF \cdot d\tau \quad (7.1)$$

Для сталого процесу в одиницю часу:

$$Q = K \cdot \Delta t_{сер} \cdot F \quad (7.2)$$

$Q$  – кількість теплоти, яка передається через всю поверхню теплообміну;

$K$  – коефіцієнт теплопередачі між середовищами, середній для всієї поверхні теплообміну;

$\Delta t_{сер}$  – середня різниця температур.

З (7.2) визначають  $F$ , але для цього ще треба знайти величини  $Q$ ,  $K$  і  $\Delta t_{сер}$ .

Найбільш складною задачею є визначення  $K$  і  $\Delta t_{сер}$ . Цією задачею займається наука теплопередача.

Основними способами розповсюдження тепла є теплопровідність, конвекція і теплове випромінювання.

*Теплопровідністю* називається процес розповсюдження тепла між частинками тіла, які знаходяться у безпосередньому контакті. Спостерігається в твердих тілах і в тонких шарах рідин або газів.

*Конвекція* – процес перенесення тепла внаслідок руху й перемішування макроскопічних об'ємів газів або рідин.

*Теплове випромінювання* – процес розповсюдження тепла у вигляді електромагнітних коливань.

На практиці, як правило, доводиться мати справу зі складним теплообміном.

## 7.1.2. Теплопровідність

### 7.1.2.1. Основний закон теплопровідності

Закон Фур'є:

Кількість тепла  $dQ$ , що передана теплопровідністю, пропорційна градієнту температури  $\frac{\partial t}{\partial n}$ , часу  $d\tau$  і площі перерізу  $dF$ , перпендикулярній напрямку теплового потоку, тобто:

$$dQ = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF d\tau \quad (7.3)$$

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності,  $\frac{\text{кДж}}{\text{м} \cdot \text{год} \cdot \text{К}}$ , або  $\frac{\text{кВт(Вт)}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ .

$\lambda$  показує, яка кількість теплоти проходить внаслідок теплопровідності через 1 м<sup>2</sup> поверхні теплообміну за одиницю часу при різниці температур в 1 градус, що припадає на 1 м довжини нормалі до ізотермічної поверхні.

$\lambda$  залежить від природи й агрегатного стану речовини, а також від умов. Так, для газів і твердих речовин з підвищенням температури  $\lambda$ , як правило, зростає, а для рідин – зменшується (виняток складають вода і гліцерин). Тиск, коли його значення не дуже великі, на коефіцієнт теплопровідності впливає мало.

### 7.1.2.2. Диференціальне рівняння теплопровідності

Це рівняння виводять на основі закону збереження енергії, при цьому припускаються, що тепло розповсюджується в тілі (середовищі), яке має густину  $\rho$ , теплоємність  $c$ , теплопровідність  $\lambda$ . Причому, ці параметри сталі за напрямками й у часі.

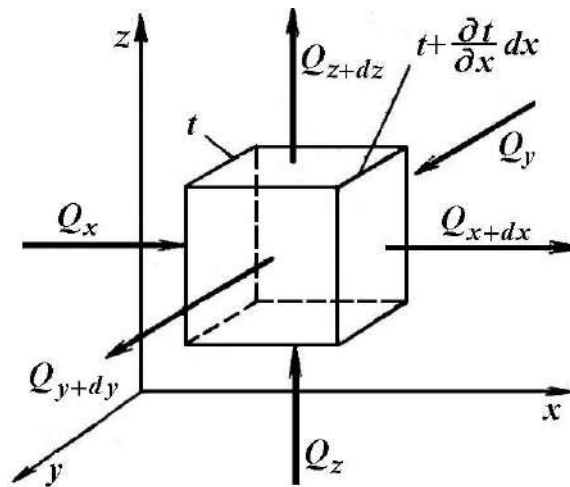


Рис. 30. До виведення диференціального рівняння теплопровідності.

Для виведення диференціального рівняння теплопровідності у середовищі виділяємо паралелепіпед з ребрами довжиною  $dx$ ,  $dy$  і  $dz$ . В паралелепіпед входить тепла уздовж осі  $x$   $Q_x$ , виходить –  $Q_{x+dx}$

Різниця між кількістю тепла, що входить в паралелепіпед, і виходить з нього (тепло, яке залишається в об'ємі):

$$dQ = (Q_x - Q_{x+dx}) + (Q_y - Q_{y+dy}) + (Q_z - Q_{z+dz})$$

Згідно із законом Фур'є

$$Q_x = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} dy dz d\tau \quad \text{і}$$

$$Q_{x+dx} = -\lambda \frac{\partial \left( t + \frac{\partial t}{\partial x} dx \right)}{\partial x} dy dz d\tau = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} dy dz d\tau - \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx dy dz d\tau$$

Аналогічно

$$Q_y - Q_{y+dy} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} dx dy dz d\tau \quad \text{і} \quad Q_z - Q_{z+dz} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} dx dy dz$$

Складаємо ліві і праві частини:

$$dQ = \lambda \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) dx dy dz d\tau \quad (7.4)$$

На основі закону збереження енергії кількість тепла, котра йде на зміну ентальпії паралелепіпеду за час  $\tau$

$$dQ = c\rho dx dy dz \frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau \quad (7.5)$$

Зіставляючи (7.4) і (7.5), отримуємо диференціальне рівняння теплопровідності Фур'є:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (7.6)$$

$\nabla^2 t$  – оператор Лапласа

$$\frac{\lambda}{c\rho} = a \quad (7.7)$$

$a$  – коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с.

Таким чином, (7.6) можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t \quad (7.8)$$

### 7.1.2.3. Теплопровідність плоскої одношарової стінки

Розглядається плоска стінка товщиною  $\delta$  з однорідного матеріалу, який має коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$ . Температура на протилежних зовнішніх поверхнях стінки  $t_{\omega 1}$  і  $t_{\omega 2}$  ( $t_{\omega 1} > t_{\omega 2}$ ).

Для виведення рівняння теплопровідності плоскої стінки використовується диференціальне рівняння Фур'є (7.6). При цьому отримане рівняння:

$$dQ = \lambda \frac{t_{\omega 1} - t_{\omega 2}}{\delta} dF d\tau$$

або

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{\omega 1} - t_{\omega 2}) F \tau \quad (7.9)$$

$\frac{\lambda}{\delta}$  - теплова провідність стінки,  $\frac{\delta}{\lambda}$  - термічний опір.

#### 7.1.2.4. Теплопровідність плоскої багатошарової стінки

Рівняння для теплопровідності плоскої багатошарової стінки виводиться з (7.9) і має вигляд:

$$Q = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} (t_{\omega 1} - t_{\omega 2}) F \tau \quad (7.10)$$

$n$  - кількість шарів,  $i$  – номер шару.

#### 7.1.2.5. Теплопровідність циліндричної стінки (труби)

Для циліндричної одношарової стінки середня площа теплообміну:

$$F_{\text{сер}} = \pi d_{\text{сер}} L = \frac{\pi (d_2 - d_1) L}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \quad (7.11)$$

$d_1$  і  $d_2$  – внутрішній і зовнішній діаметри.

Рівняння теплопровідності для сталого теплового потоку крізь одношарову циліндричну стінку:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} (t_r - t_x) F_{\text{сер}} = \frac{2\pi\lambda(t_r - t_x)L}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \quad (7.12)$$

де  $L$  – довжина циліндру, м.

Якщо відношення  $d_1/d_2 < 2$ , можна середню площу підрахувати за формулою:

$$F_{\text{сер}} = \frac{\pi (d_1 + d_2) L}{2} \quad (7.13)$$

Рівняння теплопровідності для сталого теплового потоку крізь багатошарову циліндричну стінку:

$$Q = \frac{2\pi L(t_r - t_x)}{\sum \frac{1}{\lambda} \ln \frac{d_3}{d_{\text{вн}}}} = \frac{2\pi L(t_r - t_x)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \dots} \quad (7.14)$$

Тут  $d_{\text{вн}}$  і  $d_3$  – внутрішній і зовнішній діаметри кожного циліндричного шару.

### 7.1.3. Теплове випромінювання і променевий теплообмін

Здатність тіла до теплового випромінювання  $E_0$  визначається за законом Стефана – Больцмана:

$$E_0 = c_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad (7.15)$$

Цей закон виведений для абсолютно чорного тіла (індекс “0”).

$c_0$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;

$$c_0 = 20,48 \text{ кДж/м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{К}^4.$$

Цей закон справедливий також для будь-якого тіла:

$$E = c \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad (7.16) \quad c = \varepsilon c_0 \quad (7.17)$$

$\varepsilon = 0 \div 1$  – відносна здатність до випромінювання, або ступінь чорноти тіла (наведена у довідниках).

Для розрахунку променевого теплообміну між двома тілами використовують рівняння:

$$Q_{1-2} = c_{1-2} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F \quad (7.18)$$

$c_{1-2}$  – приведений коефіцієнт променевипромінювання системи тіл; дорівнює для плоских тіл, які розташовані паралельно:

$$c_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_0}} \quad (7.19)$$

для випадку, коли одне тіло (площа поверхні  $F_2$ ) повністю охоплює інше тіло (площа поверхні  $F_1$ ) (приклад – піч, встановлена у приміщенні):

$$c_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_0} \right)} \quad (7.20)$$

#### 7.1.4. Конвективний теплообмін (тепловіддача)

Під конвективним теплообміном розуміють процес розповсюдження тепла у рідині (газі) від поверхні твердого тіла або до його поверхні одночасно конвекцією і теплопровідністю. Конвективний теплообмін інакше називається тепловіддачею зіткненням або просто тепловіддачею.

Тепло розповсюджується від поверхні твердого тіла до рідини крізь граничний шар за рахунок теплопровідності, а від граничного шару в масу рідини - переважно конвекцією.

На тепловіддачу суттєво впливає характер руху рідини. Вільний рух рідини, або вільна конвекція, виникає внаслідок різниці густин нагрітих і холодних частинок рідини. Примусовий рух виникає під дією насоса або вентилятора і визначається фізичними властивостями рідини, швидкістю її руху, формою й розмірами каналу. При турбулентному русі теплообмін протікає більш інтенсивно, ніж при ламінарному.

##### 7.1.4.1. Основний закон тепловіддачі

Основний закон тепловіддачі – закон Ньютона:

Кількість тепла  $dQ$ , що передається від поверхні теплообміну до оточуючого середовища, прямопропорційна поверхні теплообміну  $dF$ , різниці температур поверхні  $t_w$  і оточуючого середовища  $t_f$  та часу  $d\tau$ .

$$dQ = \alpha(t_w - t_f)dFd\tau \quad (7.21)$$

$\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі,  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{К}}$  або  $\frac{\text{Вт(кВт)}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ .

При сталому процесі за одиницю часу:

$$Q = \alpha(t_w - t_f)F \quad (7.22)$$

Основною задачею при розрахунках процесу тепловіддачі є визначення  $\alpha$ . Це досить складна задача, оскільки  $\alpha$  залежить від багатьох чинників – режиму і швидкості руху рідини, її фізичних параметрів, форми й розмірів поверхні теплообміну і т. ін.



### 7.1.4.2. Диференціальне рівняння конвективного перенесення тепла

За рахунок теплопровідності відбувається зміна температури нерухомого елемента [дивись (7.6) – (7.7)].

При конвективному теплообміні температура елемента змінюється як у часі, так і у просторі. У таких випадках зміну величини виражають за допомогою субстаціональної похідної. Позначивши проекції вектору швидкості на відповідні осі  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$ , запишемо рівняння для субстаціональної похідної:

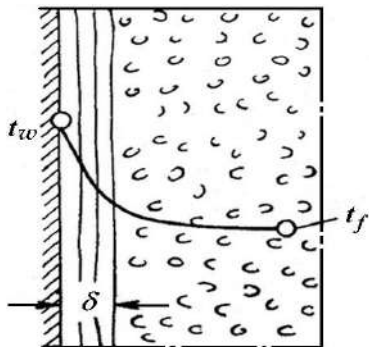


Рис. 31. Будова шару рідини, що примикає до поверхні стінки.

$$\frac{Dt}{\partial \tau} = \underbrace{\frac{\partial t}{\partial \tau}}_I + \underbrace{\left( \frac{\partial t}{\partial x} \omega_x + \frac{\partial t}{\partial y} \omega_y + \frac{\partial t}{\partial z} \omega_z \right)}_II \quad (7.23)$$

I – локальна зміна температури; II – конвективна зміна температури.

Якщо в рівнянні теплопровідності (7.6) замінити локальну зміну температури на повну, то отримаємо диференціальне рівняння конвективного перенесення тепла Фур'є-Кірхгофа:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{\partial t}{\partial x} \omega_x + \frac{\partial t}{\partial y} \omega_y + \frac{\partial t}{\partial z} \omega_z = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (7.24)$$

(7.24) – математичне описання процесу розповсюдження тепла в середовищі, яке рухається, одночасно теплопровідністю й конвекцією. Для повного математичного описання конвективного теплообміну це рівняння повинне бути доповнене рівнянням, яке характеризує умови на границі поділу фаз середовища, що рухається, і твердим тілом.

Біля поверхні твердого тіла завжди є граничний шар товщиною  $\delta$ , крізь який тепло розповсюджується теплопровідністю. Ця кількість тепла визначається законом Фур'є:

$$dQ = -\lambda \frac{dt}{dn} dF d\tau$$

Цю ж кількість тепла можна знайти за законом Ньютона:

$$dQ = \alpha(t_w - t_f) dF d\tau$$

Тобто, 
$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = \alpha(t_w - t_f) \quad (7.25)$$

(7.24) і (7.25) повністю описують конвективний теплообмін.

### 7.1.4.3. Критеріальне рівняння тепловіддачі

Для отримання критеріїв подібності (7.25) ділимо на ліву частину і отримуємо безрозмірний комплекс:

$$\frac{\alpha(t_w - t_f) dn}{\lambda dt} = \frac{\alpha \Delta t dn}{\lambda d\tau} \quad (7.26)$$

Викреслюємо символи диференціювання, різниці, замінюємо напрямлений параметр  $n$  на ненапрявлений  $l$ , і провівши скорочення, отримуємо критерій Нуссельта:

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (7.27)$$

В (7.24) ділимо всі складові на  $a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$  і отримуємо безрозмірні комплекси:

$$\frac{\partial t \partial x^2}{\partial \tau a \partial^2 t} \quad \text{і} \quad \frac{\partial t \omega_x \partial x^2}{\partial x a \partial^2 t}$$

Провівши вказані вищезгадані операції, отримаємо:

критерій Фур'є:

$$Fo = \frac{a \tau}{l^2} \quad (7.28)$$

критерій Пекле:

$$Pe = \frac{\omega l}{a} \quad (7.29)$$

$Nu$ ,  $Fo$ ,  $Pe$  – критерії теплової подібності. Характеризують:  $Nu$  – інтенсивність теплообміну на границі поділу фаз;  $Fo$  – зв'язок між швидкістю зміни температурного поля, розмірами та фізичними характеристиками середовища в нестационарних теплових процесах;  $Pe$  – відношення кількостей тепла, які розповсюджуються в потоці рідини конвекцією і теплопровідністю.

$$Pe = \frac{\omega l}{a} = \frac{\omega l}{\nu} \cdot \frac{\nu}{a} = Re \cdot Pr \quad (7.30)$$

$Pr$  – критерій Прандтля – характеризує поле теплофізичних величин потоку рідини

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu}{a\rho} = \frac{\mu g}{a\gamma} = \frac{\mu c}{\lambda} \quad (7.31)$$

У випадках, коли теплообмін відбувається в результаті природної конвекції, яка обумовлена різницею густин рідини в різних точках системи, процес характеризується значенням критерію Архімеда:

$$Ar = \frac{gl^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} \quad (7.32)$$

де  $\rho_1$  і  $\rho_2$  – густини холодної і нагрітої рідини.

В теплових процесах різниця густин у різних точках обумовлена різницею температур нагрітої і холодної рідини, тому відношення  $\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1}$  в критерії Архімеда замінюють добутком  $\beta\Delta t$  і отримують критерій Грасгоффа:

$$Gr = \beta \frac{gl^3}{\nu^2} \Delta t = \beta\Delta t Ga \quad (7.33)$$

де  $\beta$  - температурний коефіцієнт об'ємного розширення рідини;

$Ga$  – критерій Галілея.

$Gr$  характеризує гідродинамічний режим потоку рідини в умовах природної конвекції, яка відбувається під впливом різниці густин нагрітої і холодної поверхонь.

Отримані критерії подібності дозволяють знайти критеріальне рівняння конвективного перенесення тепла:

$$Nu = f(Re, Gr, Pr, Fo) \quad (7.34)$$

Це рівняння спрощується, якщо розглядається процес в конкретних умовах – при стаціонарних процесах виключається  $Fo$ , при примусовому русі -  $Gr$ , при вільному русі -  $Re$ . Наприклад, для стаціонарного примусового руху критеріальне рівняння можна записати у вигляді:

$$Nu = A Re^m Pr^n \quad (7.35)$$

За критерієм Нуссельта розраховують коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ , користуючись рівнянням (7.27).

Рівняння типу (7.35) з коефіцієнтами і показниками ступенів для кожного конкретного випадку теплообміну наведені у довідниках.

#### 7.1.4.4. Тепловіддача при зміні агрегатного стану

В процесі теплообміну може відбуватись випаровування, конденсація, плавлення, кристалізація та ін. Особливості таких процесів теплообміну полягають у тому, що тепло підводиться до матеріалів або відводиться від них при постійній температурі й розповсюджується не в одній, а у двох фазах. Ці особливості враховуються введенням в критеріальне рівняння додаткового критерію, який враховує теплоту зміни агрегатного стану  $K$ .

Розглянемо процес теплообміну при конденсації пари.  $dF$  – елементарна площадка на поверхні розділу Р-П; лінійна швидкість рідини, яка утворюється при конденсації, –  $\omega$ ; теплота пароутворення –  $r$ .

Для випадку конденсації нерухомої пари Нусельтом запропонована схема плівкової конденсації при відсутності крапельної конденсації. Критеріальне рівняння цього процесу:

$$Nu = C(Pr \cdot K \cdot Ga)^{0,25} \quad (7.36)$$

В критеріальне рівняння входить  $K$  – критерій теплової подібності при зміні агрегатного стану.

$$K = \frac{r}{c\Delta t} \quad (7.37)$$

де  $\Delta t$  – різниця між температурою фазового перетворення і температурою однієї з фаз.

За  $Nu$  і (7.27) знаходять  $\alpha$

$$\alpha = C_4 \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 g \rho^2 r}{H \Delta t \mu}} \quad (7.38)$$

$C$  – коефіцієнт, який дорівнює 0,94 для вертикальної стінки і 0,72 – для горизонтальної труби;  $\alpha$ ,  $\rho$ ,  $\mu$  – для конденсату при середній температурі плівки  $t = 0,5(t_s + t_\omega)$ ;  $t_s$  – температура насиченої пари;  $t_\omega$  – температура стінки;  $\Delta t = t_s - t_\omega$ ;  $H$  – визначальний розмір (висота стінки, діаметр труби і т. ін.).

На коефіцієнт тепловіддачі впливає режим руху потоку, характер поверхні стінки (гладка чи шорстка) та вміст газів (1% повітря в парі знижує  $\alpha$  на 60%).

### 7.1.5. Складний теплообмін

Одним з найважливіших випадків є процес розповсюдження тепла одночасно конвекцією і тепловим випромінюванням. Кількість тепла, що передається за рахунок конвективного теплообміну, визначається з (7.22), за рахунок теплового випромінювання – (7.18). Поєднавши ці рівняння, отримують загальну кількість теплоти, яку віддає стінка за одиницю часу:

$$Q = Q_{\text{конв}} + Q_{\text{випр}} = (\alpha + \alpha_{\text{випр}})(t_{\omega} - t_f)F \quad (7.39)$$

або

$$Q = \alpha^*(t_{\omega} - t_f)F \quad (7.40)$$

де  $\alpha^*$  - приведений коефіцієнт тепловіддачі.

$$\alpha^* = 9,74 + 0,07 \Delta t \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}} \right) \quad (7.41)$$

### 7.1.6. Теплопередача

В теплових процесах здійснюється теплопередача від одного теплоносія до іншого, причому, теплоносії розділені перегородкою.

Коефіцієнт теплопередачі в рівнянні (7.1) або (7.2) є сумарним; він враховує перехід тепла від ядра першого потоку до стінки (теповіддача), через стінку (теплопровідність) і від стінки до ядра другого потоку (теповіддача). При сталому процесі кількість тепла, що передається в одиницю часу через площадку  $F$  від ядра першого потоку, дорівнює кількості тепла, яке передається через стінку і від стінки до ядра другого теплоносія.

Тепловіддача: 
$$Q = \alpha_1(t_{f1} - t_{\omega1})F$$

теплопровідність: 
$$Q = \frac{\lambda}{\delta}(t_{\omega1} - t_{\omega2})F$$

теповіддача: 
$$Q = \alpha_2(t_{\omega2} - t_{f2})F$$

Прирівнявши між собою ці рівняння і (7.2), отримують коефіцієнт теплопередачі

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (7.42)$$

або термічний опір теплопередачі

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (7.43)$$

Для багат шарової стінки

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (7.44)$$

### 7.1.7. Рушійна сила теплових процесів

Рушійною силою теплових процесів є різниця температур між теплоносіями. Вона в процесі теплообміну не зберігає сталих значень, тому користуються середньою різницею температур  $\Delta t_{сер}$ , яка розраховується за рівнянням:

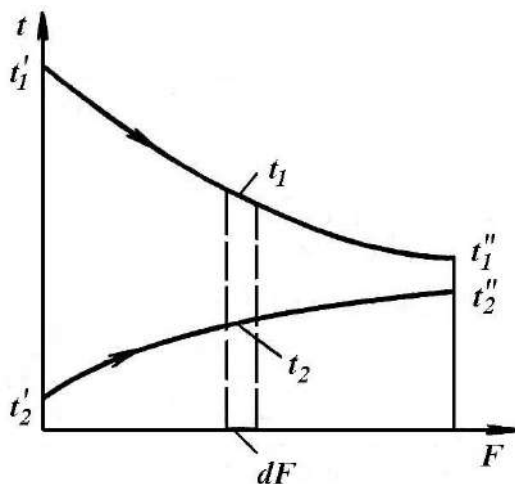


Рис. 32. Зміна температури теплоносіїв уздовж поверхні теплообміну при прямотечії.

$$\Delta t_{сер} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\mu}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\mu}}} \quad (7.45)$$

Треба відмітити, що (7.45) вважають приблизним рівнянням і щодо його точності є сумніви.

При невеликих змінах температур, коли  $\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\mu}} \leq 2$ , беруть середнє арифметичне.

Наведені формули придатні для одноходових теплообмінників. Для багатходових розрахунок середньої різниці температур ускладнюється.

Так, у багатходових теплообмінниках з простою змішаною течією (один хід в міжтрубному просторі и парна кількість ходів у трубному) середню різницю температур можна розрахувати за формулою:

$$\Delta t_{сер.} = \frac{A}{\ln \frac{\Delta t_{\delta} + \Delta t_{м} + A}{\Delta t_{\delta} + \Delta t_{м} - A}} \quad (7-46)$$

де  $\Delta t_{\delta}$  і  $\Delta t_{м}$  – більша і менша різниці температур на кінцях теплообмінника при протитечії з тими ж початковими і кінцевими температурами теплоносіїв:

$$A = \sqrt{\delta T^2 + \delta t^2}$$

$\delta T = T_{ноч.} - T_{кін.}$  – зміна температури гарячого теплоносія;

$\delta t = t_{ноч.} - t_{кін.}$  – зміна температури холодного теплоносія.

## 7.2. Нагрівання, охолодження, конденсація

Найчастіше як теплоносії використовуються водяна пара, димові гази та електричний струм.

### 7.2.1. Нагрівання водяною парою

Використовують насичену водяну пару з тиском 10 – 12 ат. При цьому можна досягти температури нагрівання 180<sup>0</sup>С. При нагріванні пара конденсується, виділяючи тепло, яке дорівнює теплоті випаровування рідини.

Переваги цього теплоносія:

1. Велика кількість тепла, що виділяється при конденсації ( $\approx 2000$  кДж на 1 кг пари).
2. Високий коефіцієнт тепловіддачі від пари, що конденсується, до стінки ( $\alpha = 20000 - 40000$  кДж/м<sup>2</sup>год.К).
3. Рівномірність нагріву, оскільки конденсація пари здійснюється при постійній температурі.

Нагрівання можна проводити “гострою” і “глухою” парою.

“Гострою” називають пару, яка поступає в рідину, що нагрівається, через отвори в трубі або стінці судини (барботер) і барботує крізь товщу рідини.

“Глуха” пара обігріває середовище крізь стінку судини (труби), в якій вона знаходиться. Гріюча пара цілком конденсується і відводиться з парового простору у вигляді конденсату, температура якого дорівнює температурі насиченої гріючої пари.

Витрата пари визначається з рівняння матеріального балансу:

$$Gct_1 + DI = Gct_2 + DI_{конд} + Q_{втр} \quad (7.47)$$

де  $G$  – маса речовини, що нагрівається, кг;

- $c$  – питома теплоємність речовини, що нагрівається;  
 $t_1$  і  $t_2$  – початкова і кінцева температури речовини;  
 $D$  – витрата пари, кг;  
 $I$  – ентальпія пари, кДж/кг;  
 $I_{\text{конд}}$  – ентальпія конденсату, кДж/кг;  
 $Q_{\text{втр}}$  – втрати тепла, кДж.
- З рівняння матеріального балансу розраховують кількість пари, потрібної для нагрівання рідини.

$$D = \frac{Gc(t_2 - t_1) + Q_{\text{втр}}}{I - I_{\text{конд}}} \quad (7.48)$$

### 7.2.2. Нагрівання топковими, або димовими, газами

При використанні топкових газів можна досягти температури 180 – 1000<sup>0</sup>С. Димовий газ утворюється при спаленні твердого, рідкого або газоподібного палива в топках або печах різних конструкцій.

Особливості процесу: значний перепад температур між теплоносіями і невеликі коефіцієнти тепловіддачі від димових газів до стінок апаратів (60-120 кДж/м<sup>2</sup>год.К); перегрівання матеріалів внаслідок нерівномірного обігріву призводить до їх окислення; процес пов'язаний з пожежною небезпекою.

При нагрівання до 420<sup>0</sup>С для виготовлення апаратури використовують звичайні вуглецеві сталі, до 420-520 – леговані сталі, до 520-1000 – спеціальні жаротривкі сталі.

Нагрівання топковими газами здійснюється в трубчастих печах, в печах для реакційних котлів або в автоклавах.

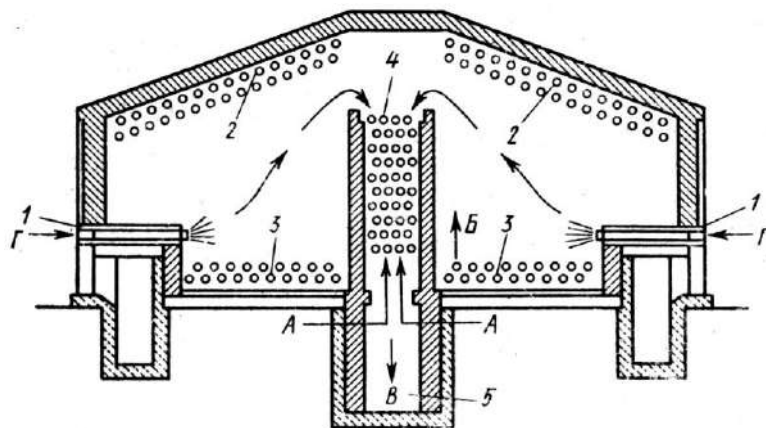


Рис. 33. Схема двокамерної печі з нахиленим склепінням:

- $1$  – форсунка для палива;  $2$  – стельові екрани (радіантні труби);  $3$  – подові екрани;  
 $4$  – конвекційна камера;  $5$  – димар.  $A$  – вхід сировини;  $B$  – продукт на вихід;  $B$  – вихід топкових газів;  $\Gamma$  – паливо.



### 7.2.3. Нагрівання електричним струмом

Для цього використовують електричні печі, які бувають печі опору, індукційні та дугові.

*Печі опору* підрозділяють на печі прямої дії і печі непрямої дії. В печах прямої дії нагрівальний елемент включається безпосередньо в електричний ланцюг. В печах непрямої дії тепло виділяється при проходженні струму по спеціальним нагрівальним елементам. Тепло передається променевипромінюванням, теплопровідністю і конвекцією. Нагрівати можна до 1000-1200<sup>0</sup>С. Нагрівальними елементами є дріт або стрічка, виготовлені з ніхрому (20% Cr, 30-80% Ni і 0,5-50% Fe) або хром-залізо-алюмінієвих сплавів.

При проектуванні електропечей розраховують кількість тепла, яке необхідне для нагріву речовини і потужність нагрівального електричного пристрою.

В *індукційних печах* нагрівання здійснюється індукційними струмами. Апарат, яких обігрівається, є сердечником соленоїда, який охоплює апарат. По соленоїду пропускають перемінний електричний струм, при цьому навколо соленоїда утворюється магнітне поле, котре викликає в стінках апарату ЕРС. Під дією вторинного струму, що виникає, стінки апарату нагріваються. Соленоїд виготовляється з мідного або алюмінієвого дроту.

В *дугових печах* відбувається нагрівання електричною дугою до температур 1300-1500<sup>0</sup>С. Використовуються для плавлення металів, отримання карбїду кальцію, фосфору.

### 7.2.4. Охолодження до звичайних температур

Для цього використовують такі холодоагенти, як вода і повітря. Охолодження ведеться в теплообмінниках різних типів, які розглядають далі.

Крім конструктивних розмірів теплообмінників, розраховують витрату води  $W$  (повітря  $L$ ) на охолодження з рівняння теплового балансу.

### 7.2.5. Конденсація

Існують два типи конденсації:

1) *Поверхнева* (просто конденсація) – пари, що конденсуються, і охолоджуючий агент поділені стінкою, і конденсація парів відбувається на внутрішній або зовнішній поверхні холодної стінки.

2) **Конденсація змішуванням** – пари, які конденсуються, безпосередньо стикаються з охолоджуючим агентом.

Як *поверхневі конденсатори* використовуються теплообмінники різних типів.

В *конденсаторах змішування* відбувається безпосередній контакт пари з охолоджуючим агентом (водою) – див. рис. 43, 44.

При розрахунках конденсаторів визначають необхідну кількість охолоджуючої води з рівняння теплового балансу.

Крім витрати води розраховують висоту барометричної труби для відведення води й конденсату, а також кількість повітря, яке відсмоктується з конденсатору.

## 8. ТЕПЛООБМІННІ АПАРАТИ

Використовують 3 типи теплообмінних апаратів:

1. **Рекуперативні**, або поверхневі, в яких тепло передається від одного теплоносія до іншого крізь стінку;

2. **Регенеративні**, в яких чергуються процеси нагрівання і охолодження насадки;

3. **Змішувальні**, в яких теплообмін здійснюється при безпосередньому зіткненні теплоносіїв.

### 8.1. Рекуперативні апарати

Основні конструкції:

- кожухотрубчасті;
- “труба в трубі”;
- пластинчасті;
- спіральні;
- теплообмінники з поверхнею, що утворена стінками апарату.

Найбільш розповсюджені **кожухотрубчасті**, які підрозділяються на типи:

- ТН - кожухотрубчасті теплообмінники з нерухомими привареними решітками, вертикальні або горизонтальні, одно- або багатоходові (рис. 34). Використовуються при невеликій різниці температур між кожухом та пучком труб;

- ТЛ – з лінзовим компенсатором з нерухомими привареними трубними решітками і з різною кількістю ходів;

- ТПв – з рухомою решіткою відкритого типу, з парною кількістю ходів.

Один теплоносій іде в міжтрубний простір, а другий – в трубний.

Теплоносій, який більше забруднює поверхню обігріву або спричиняє більшу корозію, спрямовується в трубний простір, оскільки саме цей простір більш доступний для огляду і чищення. Якщо ці властивості теплоносіїв однакові, то в трубний простір доцільніше подавати теплоносій з меншим коефіцієнтом тепловіддачі, оскільки там можна забезпечити більшу швидкість руху теплоносія.

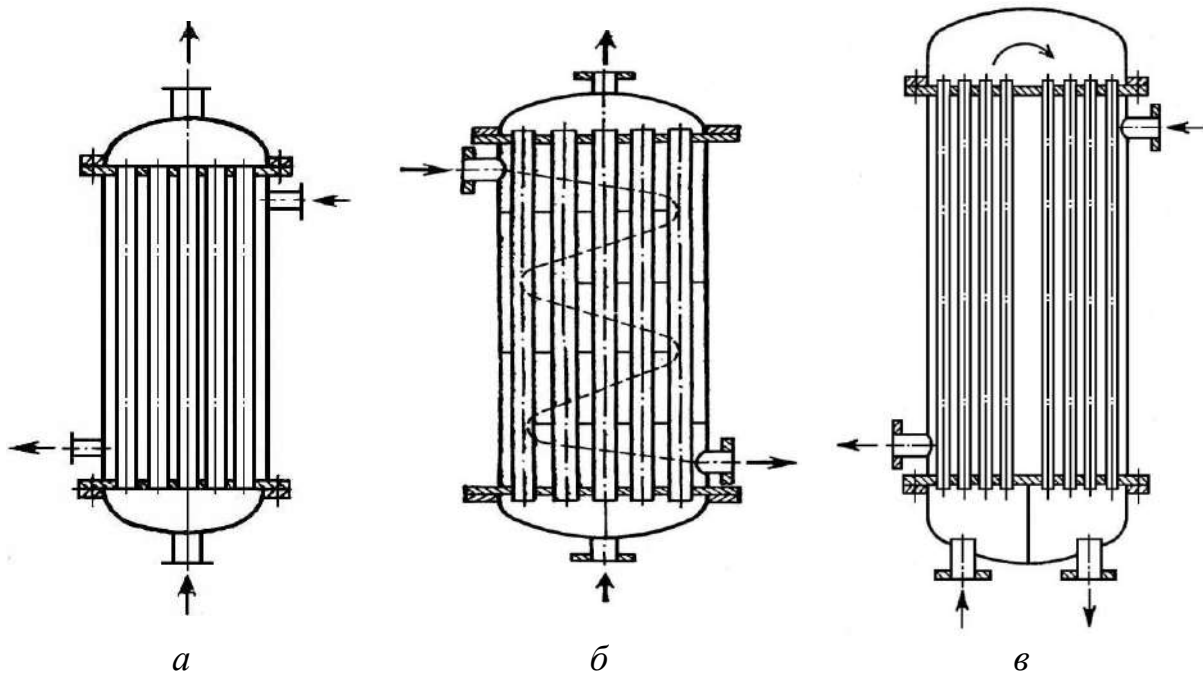


Рис. 34. Різні типи кожухотрубчастих теплообмінників:

- a* – одноходовий по трубному і по міжтрубному просторам; *б* - з сегментними поперечними перегородками (багатоходовий по міжтрубному простору);  
*в* – багатоходовий, який має один хід у міжтрубному просторі і два ходи у трубному.

Теплоносії з дуже високою або низькою температурою пропускають крізь трубний простір для зменшення втрат тепла в оточуюче середовище.

Середовища, як правило, рухаються протитечією. При цьому середовище, яке нагрівається, спрямовують знизу наверх.

Одно- і багатоходові теплообмінники можуть бути вертикальні або горизонтальні. Горизонтальні, як правило, багатоходові і працюють при великих швидкостях теплоносіїв для того, щоб звести до мінімуму розшарування рідини внаслідок різниці температур і густин, а також щоб уникнути утворення застійних зон. Теплообмінники з жорстким кріпленням труб в трубній решітці надійно працюють при різниці температур труб і кожуха  $50^{\circ}\text{C}$ ; коли  $\Delta t > 50^{\circ}$ , труби і кожух подовжується неоднаково, що призводить до порушення цілісності з'єднання труб і до руйнування конструкції.

Для зменшення температурних деформацій в теплообмінниках використовують різні методи, як це видно з рис. 35.

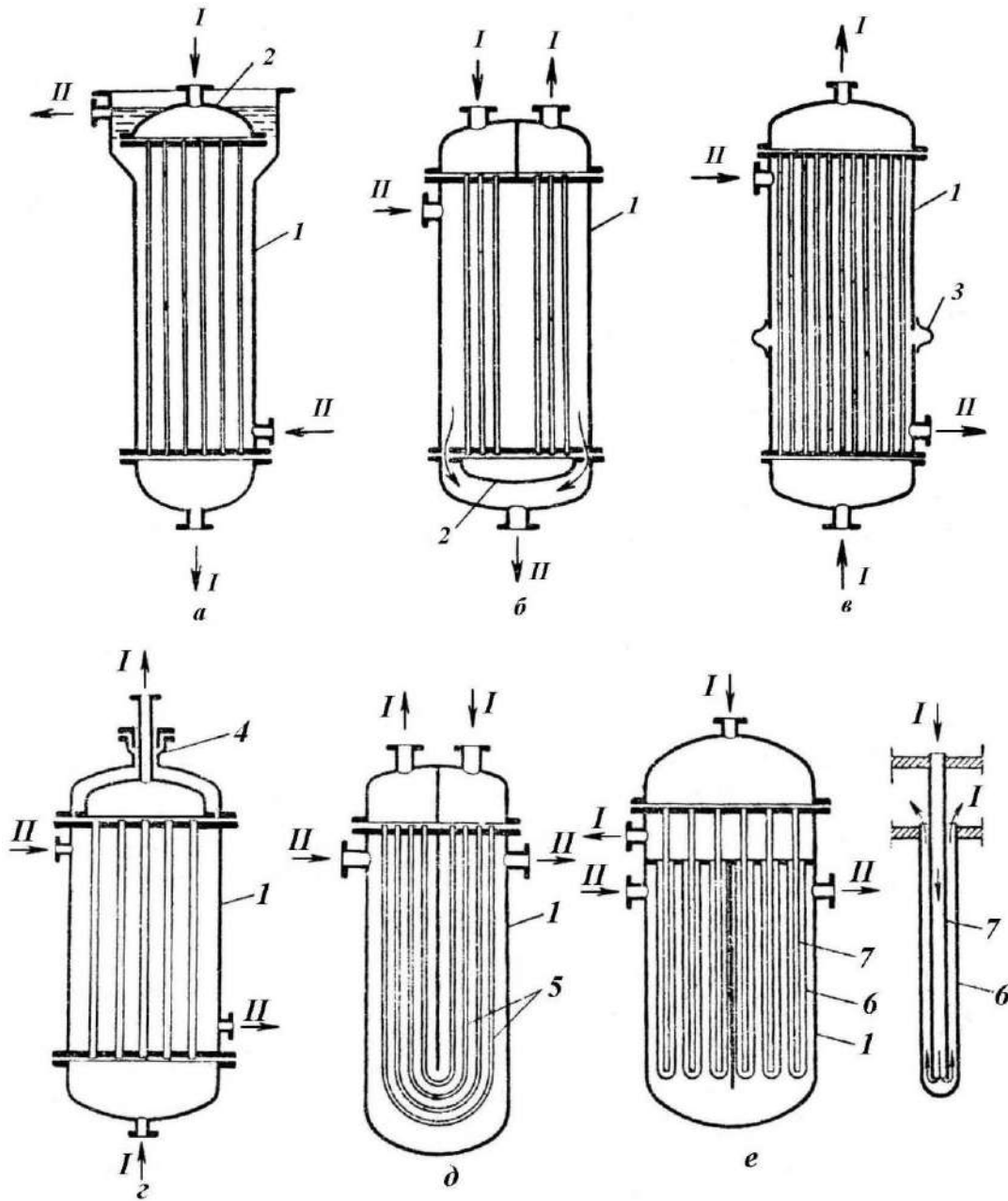


Рис. 35. Теплообмінники з компенсацією температурних подовжень:

*a* – з “плаваючою” голівкою відкритого типу; *б* – з “плаваючою” голівкою закритого типу; *в* – з лінзовим компенсатором; *г* – з сальниковим компенсатором; *д* – з U – подібними трубками; *е* – з подвійними трубками; *1* – кожух; *2* – “плаваюча” голівка; *3* – лінзовий компенсатор; *4* – сальник; *5* – U – подібні труби; *6* – зовнішня труба з відкритими кінцями. Римськими цифрами позначені теплоносії.

Оптимальні швидкості руху рідини відповідають сталому турбулентному режимові і дорівнюють для рідин: 0,1 – 2 м/с, а для газів 2 – 20 кг/м<sup>2</sup> с.

Теплообмінники типу “труба в трубі” – являють собою батареї з кількох теплообмінних елементів, розташованих один над другим

(рис. 36). В елементах зовнішні труби 2 охоплюють внутрішні труби 1, які з'єднані між собою послідовно колінами (калачами) 3. Зовнішні труби між собою з'єднані патрубками 4.

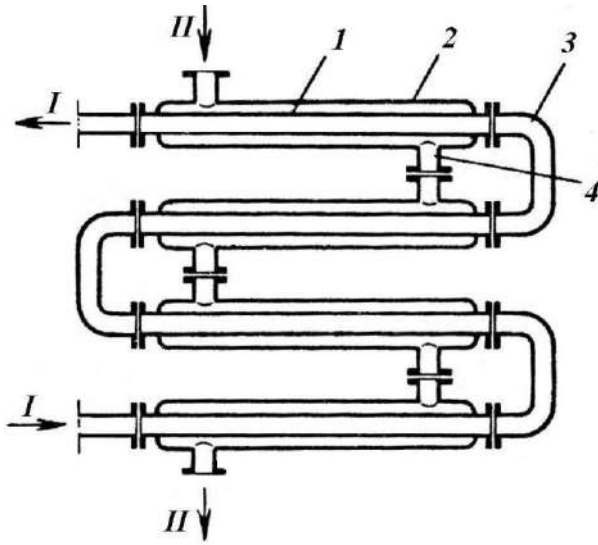


Рис. 36. Двотрубчастий теплообмінник типу “труба в трубі”:

- 1 – внутрішня труба;
- 2 – зовнішня труба;
- 3 – коліно або калач;
- 4 – з'єднуючий патрубок.

Переваги: висока швидкість руху теплоносіїв, і, як наслідок, висока інтенсивність теплообміну. Недоліки: громіздкі й металоємні.

**Змійовикові теплообмінники** відрізняються простотою будови. Теплообмінний елемент – змійовик (зігнута труба). Різні види змійовикових теплообмінників зображені на рис. 37, 38.

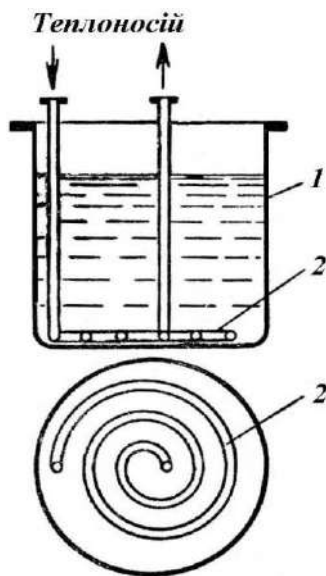


Рис. 37. Змійовикові теплообмінник з плоскою спіраллю:

- 1 – резервуар; 2 – плоский спіральний змійовик.

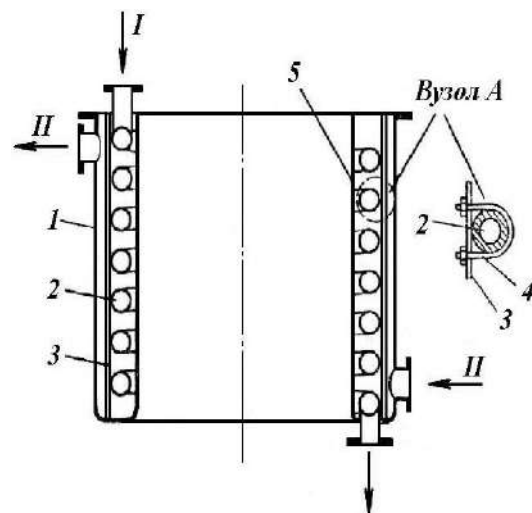


Рис. 38. Теплообмінник зі змійовиком, зігнутим по гвинтовій лінії:

- 1 – ємність; 2 – змійовик; 3 – стійка; 4 – хомут;
- 5 – витискуюча судина.

Переваги: простота будови. Недоліки: великий гідравлічний опір, важкість очищення змійовиків.

**Спіральні теплообмінники.** Їхня поверхня теплообміну утворюється двома зігнутими у вигляді спіралей металевими листами 1 і 2. Внутрішні кінці спіралей приєднані до перегородки 3. Між листами утворені канали прямокутного перерізу, по яких рухаються теплоносії I і II. З торців канали закриті плоскими кришками 4 і ущільнені прокладками 6. Кришки кріпляться болтами до фланців 5. Іноді відстань між спіралями фіксується привареною до них дистанційною смугою 7, котра, окрім того, надає спіралям твердість і міцність. Біля зовнішніх кінців спіралей і біля центру кришки приварені патрубки 8 для введення і виведення теплоносіїв.

Перевагою спіральних теплообмінників є їхня компактність і можливість роботи при високих швидкостях: для рідини до 2 м/с, для газів до 20 кг/(м<sup>2</sup>·с), а також менший у порівнянні з кожухотрубчастими теплообмінниками гідравлічний опір.

Недоліки: складність виготовлення і неможливість роботи при тиску, більшому за 10 ат.

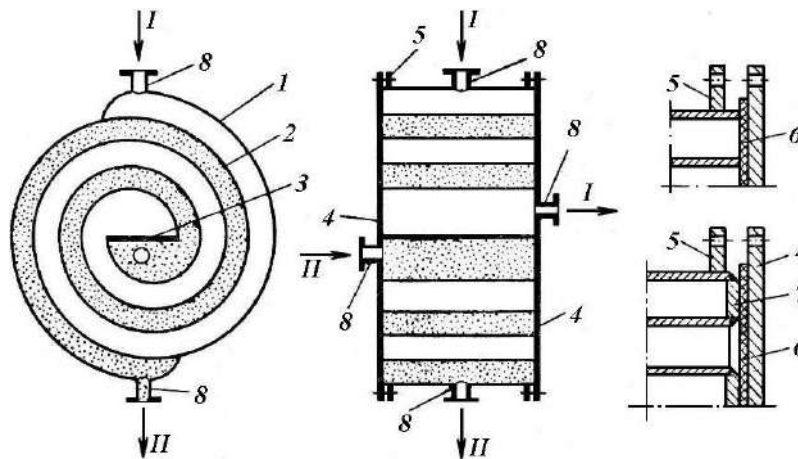


Рис. 39. Спіральний теплообмінник:

1, 2 – металеві листи; 3 – перегородка; 4 – кришка; 5 – фланець; 6 – прокладка;  
7 – дистанційна смужка; 8 – патрубок.

**Зрошувальні теплообмінники** використовують головним чином для охолодження рідин і газів або конденсації парів. Теплообмінник (рис. 40) складається з розташованих одна над одною труб 3, з'єднаних колінами 2. Зовні труби зрошуються водою. По трубах протікає теплоносій, що охолоджується. Зрошуюча вода подається на верхню трубу, з якою стікає на розташовані нижче труби. Для рівномірного зрошення верхньої труби на ній встановлений жолоб 1 з зубчастими краями. У нижній частині є корито 4 для збирання води.

Вода, яка зрошує труби, частково випаровується, що супроводжується зниженням температури, завдяки чому витрата води у зрошувальних теплообмінниках менша, ніж у теплообмінниках інших типів. При недостатньому зрошенні відбувається сильне випаровування води, тому зрошувальні теплообмінники встановлюють на відкритому повітрі.

Переваги: прості за будовою. Недоліки: громіздкі, невисокі значення коефіцієнтів тепловіддачі.

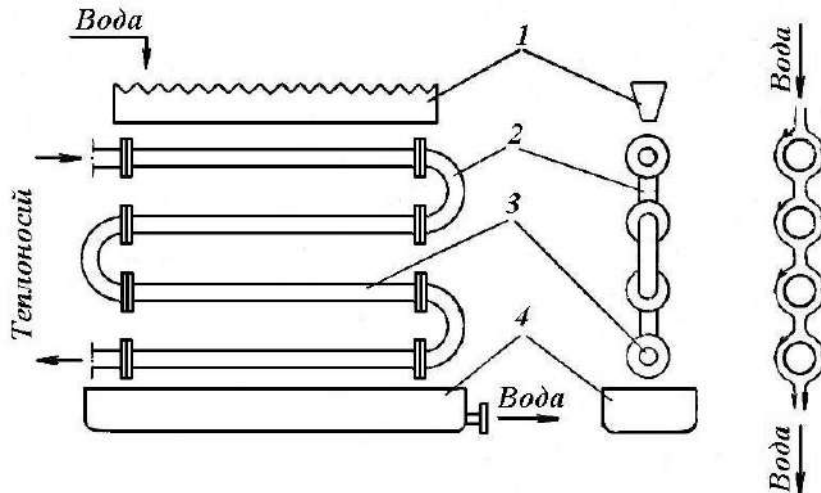


Рис. 40. Зрошувальний теплообмінник:  
1 – жолоб; 2 – з'єднувальне коліно; 3 – труба; 4 – корито.

**Теплообмінні пристрої реакційних апаратів** (рис. 41) являють собою оболонки реакторів, які мають патрубки для подачі та відведення теплоносія. Поверхнею теплообміну тут є стінка реактору. Якщо діаметр апарату перевищує 1 м, то використовують два патрубки для введення теплоносія і один – для відведення.

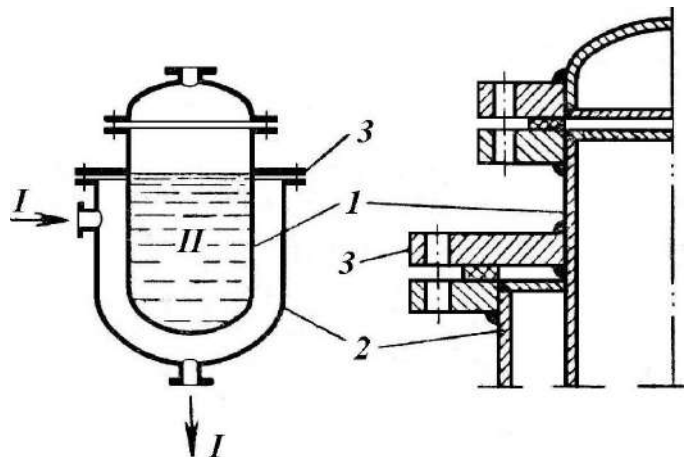


Рис. 41. Апарат з оболонкою:  
1 – корпус; 2 – оболонка; 3 – фланцеве з'єднання.

## 8.2. Регенеративні теплообмінні апарати

Характерним для них є наявність твердих тіл, які по черзі стикаються з гарячими або холодними теплоносіями. Як приклад, розглядаємо регенеративний теплообмінник періодичної дії, який працює в установках для поділу повітря на складові (рис. 42).

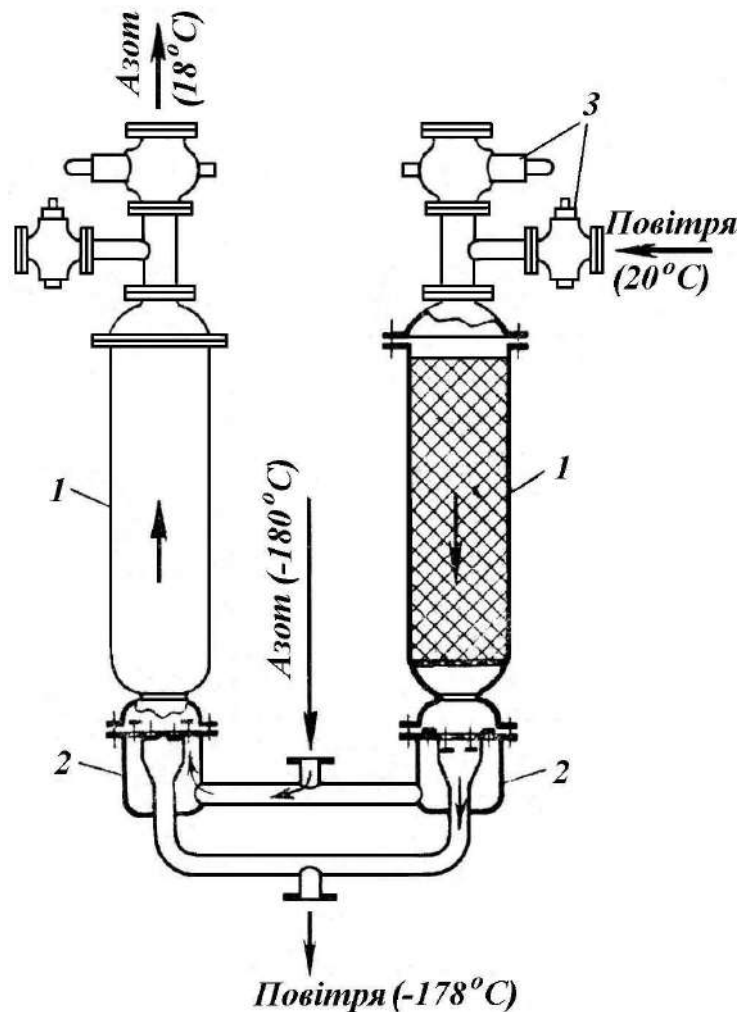


Рис. 42. Регенеративний теплообмінник періодичної дії для охолодження повітря: 1 – апарат з насадкою; 2 – клапанні коробки; 3 – засувки.

Теплообмінник складається з двох циліндричних, заповнених насадкою апаратів діаметром до 1 м і висотою робочої частини до 3 м. Елементи насадки - це диски, змотані з гофрованої алюмінієвої обмотки. В теплообміннику здійснюється охолодження азоту, який виходить з установки для поділу повітря. Теплопередача здійснюється в два періоди. В період охолодження крізь лівий апарат продувається азот, який охолоджує насадку, а сам нагрівається до  $18^{\circ}\text{C}$ . В період нагрівання крізь правий апарат пропускають повітря, яке охолоджується від  $293^{\circ}\text{K}$  до  $93^{\circ}\text{K}$ . Періоди охолодження і нагрівання складають 2 – 3 с.

### 8.3. Змішувальні теплообмінні апарати

Використовуються для конденсації парів і охолодження газів водою, а також для охолодження води, повітря.

Конденсатори змішування бувають мокрі й сухі (рис. 43, 44).



В *мокрих* охолоджуюча вода, конденсат і несконденсовані гази (повітря) відводяться разом з нижньої частини апарату за допомогою мокроповітряного насоса. В *сухих* вода і конденсат відводяться знизу, а повітря – зверху за допомогою вакуум-насосу.

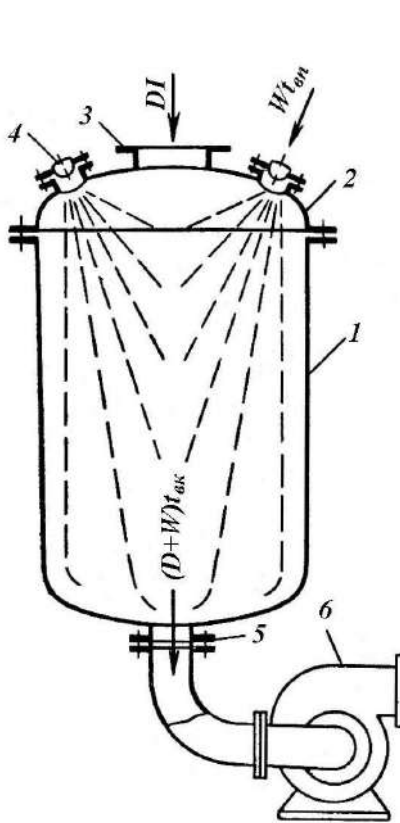


Рис. 43. Мокрий конденсатор:

- 1 – корпус;
- 2 – кришка;
- 3 – патрубок для введення пари;
- 4 – розпилююче сопло;
- 5 – патрубок для виведення води, конденсату і повітря;
- 6 – мокроповітряний насос.

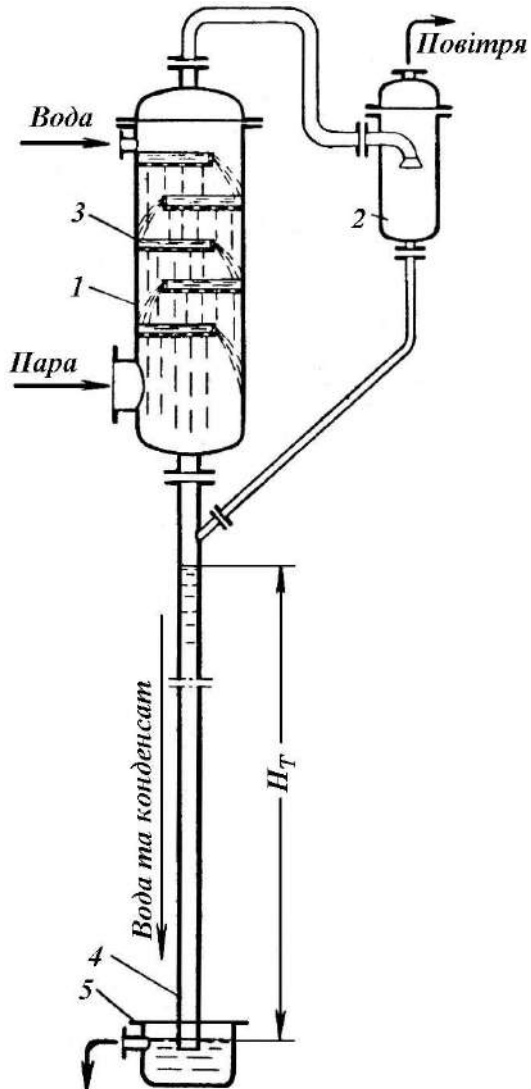


Рис. 44. Сухий конденсатор:

- 1 – корпус; 2 – бризковловлювач;
- 3 – перфорована полиця; 4 - барометрична труба; 5 – гідравлічний затвор.

За конструктивною будовою змішувальні теплообмінні апарати поділяють на поличні (рис. 44), насадкові, порожні з розприскуванням охолоджуючої рідини і струминні.

При розрахунках конденсаторів змішування визначають кількість охолоджуючої води, несконденсованих газів (повітря), а також розраховують висоту барометричної труби  $H_T$ .

## ЛІТЕРАТУРА

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии.- М.: Химия, 1974- 752 с.
3. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: Учебник: В 2 кн. /В.Г.Айнштейн, М.К.Захаров, Г.А.Носов и др.; Под ред. В.Г.Айнштейна. М.: Логос; Высшая школа, 2003. Кн. 1. 912 с. Кн. 2. 872 с.
4. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. В 2-х кн. М.: Химия, 2002.- Кн.1. 400 с. Кн. 2. 368 с.
3. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. - Л.: Химия, 1987- 576 с.
4. Плановский А.Н., Николаев П.И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии.- М.: Химия, 1972- 492 с.
5. Врагов А.П. Гідромеханічні процеси та обладнання хімічних і нафтохімічних виробництв: Навчальний посібник. – Суми: Видавництво Сумського державного університету, 2001. – 216 с.
6. Стабников В.Н., Лысянский В.М., Попов В.Д. Процессы и аппараты пищевых производств.-М.: Агропромиздат, 1985.-511 с.
7. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии.- М.: Химия, 1981.- 812 с.
8. Чесунов В.М., Захарова А.А. Основные химико-технологические процессы и аппараты в производстве легкой промышленности. Учебн. для вузов.- М.: Легпромбытиздат, 1989.- 208 с.
9. Флореа О., Смигельский О. Расчеты по процессам и аппаратам химической технологии /Под ред. С.З.Кагана /Пер. с румынского – З.М.Хаимского.- М.: Химия, 1971.- 448 с.
10. Бодров В.С. и др. Проектирование процессов и аппаратов пищевых производств /В.С.Бодров, А.Т.Богориш, П.Т.Лобода, В.М.Лысянский /Под ред. В.Н.Стабникова. – Киев: Вища школа, 1982.- 200 с.
11. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию /Под ред. Ю.И.Дытнерского.- М.: Химия, 1983.- 272 с.
12. Расчеты химико-технологических процессов /Под общей редакцией И.П.Мухленова – Л.: Химия, 1976.- 304 с.
13. Лекае В.М., Лекае А.К. Процессы и аппараты химической промышленности. М.: Высшая школа, 1984.- 289 с.
14. Справочник химика. Т. IV – Л.: Химия, 1968. – 974 с.
15. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. В 2<sup>х</sup> кн. М.: Химия, 2002.– Ч.1 – 400 с., ч. 2 – 400 с.

## ДОДАТКИ

### КОНТРОЛЬ ЗНАНЬ СТУДЕНТІВ

#### Модуль 1

#### Гідравліка і гідравлічні машини. Гідромеханічні процеси.\*

1. Гідростатика. Виведення диференціальних рівнянь Ейлера. Основне рівняння гідростатики. Закон Паскаля. Деякі застосування основного рівняння гідростатики.
2. Гідродинаміка. Основні характеристики руху рідини. Режими руху рідини. Розподіл швидкостей рідини по поздовжньому перерізу трубопроводу при ламінарному і турбулентному русі. Диференціальні рівняння руху Ейлера. Рівняння Бернуллі.
3. Гідравлічні опори. Опір тертя. Місцеві опори. Втрата напору. Розрахунок діаметру трубопроводу. Оптимальні швидкості руху матеріальних потоків.
4. Переміщення рідин. Види насосів. Основні параметри насосів.
5. Переміщення і стиск газів. Компресорні машини.
6. Осадження. Кінетика осадження. Отримання диференціального рівняння процесу осадження під дією сили тяжіння.
7. Критерії подібності в гідромеханічних процесах. Отримання критеріїв. Критеріальні рівняння. Отримання критеріального рівняння процесу осадження під дією сили тяжіння.
8. Апаратура для поділу газових систем шляхом осадження. Які основні розрахункові величини для цього процесу?
9. Осадження під дією відцентрової сили. Циклонний процес.
10. Відстійне центрифугування. Будова центрифуг. Чинник поділу.
11. Фільтрування. Види фільтрування. Фільтрування під дією перепаду тиску. Диференціальне і критеріальне рівняння процесу.
12. Розрахункові формули для процесу фільтрування. Основний розрахунковий параметр.
13. Відцентрове фільтрування. Види центрифуг, що використовуються для відцентрового фільтрування.
14. Перемішування в рідкому середовищі. Види мішалок. Критерії подібності.
15. Течія газу, пари або рідини крізь шар твердого зернистого матеріалу.
16. Задачі\*\*.

\*Варіант завдання призначає викладач.

\*\* Задачі даються по задачнику: Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. -Л.: Химия, 1987.- 576 с. При виконанні контрольного заходу в аудиторії кожен студенти отримують задачник, перекладений на українську мову.

### *Варіанти завдань*

№ вар.	Питання				№ вар.	Питання			
	1	2	3	4		1	2	3	4
1	15	7	1-1	3-2	16	10	13	1-44	3-2
2	14	8	1-11	3-3	17	11	14	1-45	3-3
3	13	9	1-12	3-4	18	12	15	1-46	3-4
4	12	1	1-13	3-6	19	13	1	1-31	3-6
5	11	2	1-15	3-13	20	14	2	1-40	3-13
6	10	3	1-2	3-14	21	15	3	1-1	3-14
7	1	4	1-16	3-15	22	9	4	1-11	3-15
8	2	5	1-17	3-16	23	8	12	1-12	3-16
9	3	6	1-19	3-17	24	7	13	1-13	3-17
10	4	7	1-7	3-18	25	6	14	1-15	3-18
11	5	8	1-25	3-33	26	5	15	1-2	3-33
12	6	9	1-26	3-39	27	4	16	1-16	3-39
13	7	10	1-3	3-41	28	3	17	1-17	3-41
14	8	11	1-27	3-42	29	2	5	1-19	3-42
15	9	12	1-28	3-45	30	1	6	1-7	3-45

### *Модуль 2*

#### **Теплові процеси. Випарювання**

1. Основне рівняння теплопередачі. Способи розповсюдження тепла. Теплопровідність. Диференціальне рівняння теплопровідності. Теплопровідність плоскої і циліндричної стінок.
2. Теплообмін шляхом теплового випромінювання.
3. Конвективний теплообмін. Основний закон тепловіддачі. Диференціальне рівняння тепловіддачі.
4. Отримання критеріального рівняння теплопередачі. Основні критерії теплової подібності.
5. Тепловіддача при зміні агрегатного стану. Особливості даного способу теплопередачі.
6. Складний теплообмін – одночасно конвекцією і тепловим випромінюванням.
7. Теплопередача. Коефіцієнт теплопередачі. Рушійна сила процесу.
8. Водяна пара як теплоносій. Области використання. Переваги перед іншими теплоносіями. Основні розрахунки.
9. Нагрівання топковими газами. Переваги і недоліки топкових газів як теплоносія.
10. Нагрівання електричним струмом.

11. Охолодження до звичайних температур і конденсація. Види і будова конденсаторів.
12. Рекуперативні теплообмінні апарати. Основні конструкції. Напрямок потоків. Способи зменшення температурних деформацій.
13. Регенеративні теплообмінні апарати. Будова. Області використання.
14. Випарювання. Матеріальний і тепловий баланси процесу. Розрахунок потрібної кількості пари.
15. Робота трикорпусної випарної установки.
16. Задачі.

### *Варіанти завдань*

№ вар.	Питання				№ вар.	Питання			
	1	2	3	4		1	2	3	4
1	1	15	4-10	5-4	16	9	2	4-32	5-22
2	2	14	4-11	5-7	17	2	10	4-33	5-23
3	3	13	4-12	5-10	18	3	11	4-34	5-24
4	4	12	4-14	5-11	19	4	12	4-35	5-26
5	5	11	4-15	5-13	20	5	13	4-38	5-27
6	6	10	4-22	5-19	21	6	14	4-42	5-4
7	7	9	4-23	5-21	22	7	15	4-45	5-7
8	8	2	4-24	5-22	23	8	1	4-10	5-10
9	9	3	4-36	5-23	24	1	12	4-11	5-11
10	10	4	4-1	5-24	25	15	3	4-12	5-13
11	11	5	4-2	5-26	26	14	4	4-14	5-19
12	12	6	4-3	5-27	27	13	5	4-15	5-21
13	13	7	4-7a	5-11	28	12	6	4-22	5-22
14	14	8	4-8	5-13	29	11	7	4-23	5-23
15	15	1	4-9	5-19	30	10	8	4-24	5-24

### *Модуль 3*

#### *Масообмінні процеси. Загальні питання. Абсорбція і перегонка*

1. Рівноважна і робоча лінії процесів масопередачі.
2. Молекулярна дифузія. Диференціальне рівняння молекулярної дифузії.
3. Масовіддача. Закон Шукарева. Диференціальне рівняння масовіддачі.
4. Критеріальне рівняння конвективної дифузії. Критерії подібності.
5. Рушійна сила масопередачі. Число одиниць переносу.
6. Абсорбція. Основні фізико-хімічні закони, яким підкоряється процес. Кінетичне рівняння процесу абсорбції.
7. Принципові схеми абсорбції.
8. Абсорбційна апаратура. Режим роботи насадкових абсорберів.
9. Абсорбційна апаратура. Тарілчасті абсорбери.
10. Абсорбційна апаратура. Порожні абсорбери.

11. Перегонка. Прийняті позначення витрат і концентрацій матеріальних потоків. Характеристика двофазових сумішей рідина – пара.  $t$ - $x$ - $y$  і  $x$ - $y$  – діаграми.
12. Проста перегонка. Схема установки. Розрахункові формули.
13. Перегонка у струмі водяної пари. Використання. Розрахунки.
14. Ректифікація. Робота ректифікаційної установки.
15. Рівноважна і робоча лінії процесу ректифікації. Флегмове число.
16. Задача.

### **Варіанти завдань**

№ вар.	Питання				№ вар.	Питання			
	1	2	3	4		1	2	3	4
1	1	8	6-17	7-1	16	8	12	6-17	7-1
2	2	9	6-15	7-3	17	9	11	6-15	7-3
3	3	10	6-20	7-7	18	10	1	6-20	7-7
4	4	12	6-21	7-8	19	11	6	6-21	7-8
5	5	13	6-23	7-9	20	12	5	6-23	7-9
6	6	3	6-25	7-11	21	13	4	6-25	7-11
7	7	2	6-14	7-13	22	14	3	6-14	7-13
8	8	12	6-17	7-15	23	15	2	6-17	7-15
9	9	11	6-24	7-9	24	1	8	6-15	7-1
10	10	1	6-15	7-11	25	2	9	6-20	7-3
11	11	6	6-20	7-13	26	3	10	6-21	7-7
12	12	5	6-21	7-15	27	4	12	6-23	7-8
13	13	4	6-23	7-1	28	5	13	6-25	7-9
14	14	3	6-25	7-3	29	6	3	6-14	7-11
15	15	2	6-14	7-7	30	7	2	6-12	7-13

### **Модуль 4**

#### **Масообмінні процеси. Екстракція. Адсорбція. Сушіння. Механічні процеси**

1. Процеси екстракції в системах Р-Р. Побудова трикутної діаграми. Лінія рівноваги процесу екстракції.
2. Матеріальний баланс і кінетичні закономірності процесу екстракції. Критеріальне рівняння процесу.
3. Будова апаратури для проведення процесу екстракції – змішувачі та відстійники. Колонні апарати для проведення екстракції. Принципові схеми екстракції.
4. Масообмінні процеси за участю твердої фази. Процеси екстракції в системах Р-Т. Способи екстракції.
5. Адсорбція. Характеристики адсорбентів. Масообмінні процеси за участю твердої фази стосовно процесу адсорбції.

6. Рівновага між фазами в процесах адсорбції. Лінія рівноваги. Теплота адсорбції.
7. Кінетика адсорбції. Принципові схеми адсорбції. Будова адсорбційних установок.
8. Матеріальний баланс процесу сушіння. Тепловий баланс процесу сушіння. Визначення кількості тепла і сушильного агента для проведення процесу.
9. Принципові схеми сушильних процесів. Будова сушарок.
10. Кінетика сушіння. Будова залежності швидкості сушіння – час. Періоди сушіння.
11. Основне рівняння масопередачі стосовно процесу сушіння. Рушійна сила процесу сушіння.
12. Механічні процеси. Види подрібнення. Ступінь подрібнення. Фізичні основи подрібнення. Теорії подрібнення.
13. Машини для подрібнення.
14. Класифікація подрібнених матеріалів. Способи багаторазового грохочення і принципова будова грохотів.
15. Гідравлічна класифікація і повітряна сепарація.
16. Задачі.

### *Варіанти завдань*

№ вар.	Питання				№ вар.	Питання			
	1	2	3	4		1	2	3	4
1	1	8	10-31б		16	1	8	9-1	10-17
2	2	9	10-32	8-1	17	2	9	9-3	10-19
3	3	10	10-33	8-3	18	3	10	9-4	10-22
4	4	11	10-34	8-4	19	4	11	9-5	10-23
5	5	12	10-27б	8-6	20	5	12	8-1	10-27а
6	6	13	10-14	8-3	21	6	13	8-3	10-30
7	7	14	10-9	8-4	22	7	14	8-4	10-31а
8	8	15	10-16	8-6	23	8	1	8-6	10-31б
9	9	1	10-17	8-1	24	9	2	8-3	10-32
10	10	2	10-19	8-3	25	10	3	8-4	10-33
11	11	2	10-22	8-4	26	11	4	8-6	10-34
12	12	4	10-23	8-6	27	12	5	8-1	10-27б
13	13	5	10-27а	9-1	28	13	6	8-3	10-14
14	14	6	10-30	9-3	29	14	7	8-4	10-9
15	15	7	10-31а	9-4	30	15	8	8-6	10-16