

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



ЛУЦЬКИЙ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ  
ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

## **ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ**

Конспект лекцій

для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
освітніх програм «Харчові технології», «Експертиза харчових продуктів»  
галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво  
спеціальності G13 Харчові технології  
денної та заочної форм навчання

Луцьк 2026

УДК 664(075.8)  
П 161

Голова вченої ради факультету митної справи,  
матеріалів та технологій ЛНТУ \_\_\_\_\_ В. В. Ткачук

Затверджено вченою радою факультету митної справи, матеріалів та  
технологій ЛНТУ, протокол № \_\_\_ від \_\_\_\_\_ 2026 року

Електронна копія друкованого видання передана для внесення  
в репозиторій ЛНТУ  
Директор бібліотеки \_\_\_\_\_ Н. П. Поліщук

Рекомендовано до видання на засіданні кафедри харчових технологій та хімії  
ЛНТУ, протокол № \_\_\_ від \_\_\_\_\_ 2026 року

Завідувач кафедри ХТХ \_\_\_\_\_ І. М. Дударєв

Укладач:  
\_\_\_\_\_ С. Г. Панасюк, кандидат технічних наук, доцент, доцент  
кафедри харчових технологій та хімії ЛНТУ

Рецензент: \_\_\_\_\_ В. А. Сай, кандидат технічних наук, доцент, доцент  
кафедри харчових технологій та хімії ЛНТУ

Відповідальний за випуск: \_\_\_\_\_ І. М. Дударєв, доктор технічних наук,  
професор, завідувач кафедри харчових технологій та хімії ЛНТУ

**П 161 Процеси і апарати харчових виробництв** [Текст]: конспект лекцій  
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
освітніх програм «Харчові технології» та «Експертиза харчових  
продуктів та продовольчої сировини» галузі знань 6 Інженерія,  
виробництво та будівництво спеціальності 613 Харчові технології  
денної та заочної форм навчання / уклад. С. Г. Панасюк. Луцьк :  
ЛНТУ, 2026. 136 с.

Методичне видання складене для надання методичної допомоги  
здобувачам вищої освіти при вивченні дисципліни.

© С.Г. Панасюк, 2026

## ПЕРЕДМОВА

Дисципліна «Процеси і апарати харчових виробництв» є базовою теоретичною та практичною основою для підготовки інженерів-технологів харчової промисловості. Саме вона дає відповіді на запитання: як перетворити сировину на готовий продукт, використовуючи закони фізики, хімії та термодинаміки.

Даний конспект лекцій розроблений для допомоги студентам у систематизації знань та швидкому засвоєнні великого обсягу технічної інформації.

Головна мета навчання полягає у формуванні «інженерного мислення». Вивчивши цей матеріал, ви зможете:

- розраховувати основні параметри обладнання;
- обирати оптимальні режими роботи апаратів для збереження якості продукції;

- знижувати енергозатрати та підвищувати ефективність виробництва.

Курс розбитий на 15 лекцій, які логічно охоплюють основні групи процесів, що зустрічаються на будь-якому харчовому підприємстві:

- механічні процеси: подрібнення, сортування сировини та її оброблення тиском;

- гідромеханічні процеси: відстоювання рідин, фільтрування, сепарування та центрифугування;

- теплові процеси: нагрівання, охолодження, випарювання та конденсація;

- масообмінні (дифузійні) процеси: екстрагування, абсорбція, ректифікація та сушіння – найскладніші етапи очищення та виділення компонентів.

Кожна лекція містить теоретичний виклад, ключові розрахункові формули та принципові схеми апаратів.

Отримані знання стануть тим міцним фундаментом, на якому базуватиметься ваша подальша робота з проектування та експлуатації сучасного технологічного обладнання. Будьте уважними до деталей, адже саме з них складається професіоналізм справжнього інженера.

## Тема 1. ЗМІСТ ТА ЗАВДАННЯ КУРСУ “ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ”. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТА АПАРАТІВ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ

1. Класифікація основних процесів харчової технології.
2. Основні закономірності перебігу процесів та положення науки про процеси і апарати.
3. Поняття про подібність фізичних явищ. Теорема подібності.
4. Моделювання процесів та апаратів.  
(матеріал укладено на основі джерел [2, 8])

1. В курсі «Процеси і апарати харчових виробництв» вивчаються теорія основних процесів, принципи будови і методи розрахунку апаратів та машин, які використовуються для проведення цих процесів.

Основні терміни, які використовуються у курсі «Процеси та апарати харчових виробництв»:

**Система** – сукупність тіл, що взаємодіють між собою.

**Процес** – зміна стану будь-якої системи, її безперервний рух і розвиток, що проходить в природі, лабораторії, суспільстві. У курсі «Процеси та апарати харчових виробництв» вивчаються процеси, що штучно створюються з певною технологічною метою.

**Технологія** – наука про практичне застосування законів фізики, хімії, біології та інших наук для проведення технологічних процесів. Виникла наприкінці XVIII ст. як самостійна галузь знань в зв'язку з ростом машинного виробництва.

**Механічна технологія** вивчає такі процеси, при яких змінюються тільки фізичні властивості або форма матеріалів, що переробляються.

**Хімічна технологія** вивчає процеси, при яких матеріали піддаються хімічним перетворенням під дією різних видів енергії.

**Харчова технологія** – одна з гілок хімічної технології, яка вивчає процеси перероблення сировини рослинного і тваринного походження.

**Технологічний апарат** (від лат. *apparatus* - обладнання) – це пристрій, обладнання, що призначене для проведення технологічних процесів (теплових, масообмінних, біохімічних тощо), в результаті чого відбувається зміна фізичних, фізико-хімічних параметрів або агрегатного стану матеріалу, що обробляється.

**Машина** – пристрій, у якому відбувається механічний вплив на сировину, що переробляється, в результаті чого може змінюватися форма, розміри або інші фізичні властивості матеріалу, що обробляється. Як правило, машини обладнують рухомими робочими органами, що взаємодіють із матеріалом.

В курсі “Процеси та апарати харчових виробництв” вивчаються процеси, які можна класифікувати за певними ознаками:

– за способом організації процесу або структурою робочого циклу: періодичні, неперервні, комбіновані (рис. 1.1);

– за зміною параметрів процесу в часі: стаціонарні, нестаціонарні (рис. 1.2);

– за основними закономірностями перебігу за рушійною силою: механічні, гідродинамічні, теплові, масообмінні, хімічні та біохімічні, мікробіологічні (рис. 1.3).

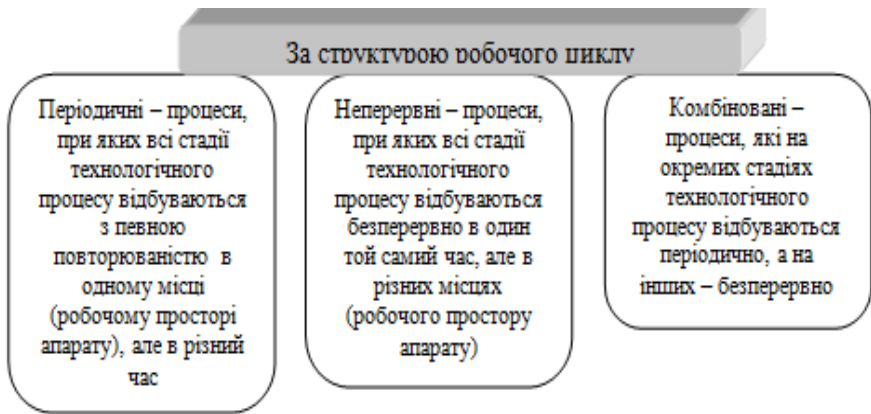


Рисунок 1.1 – Класифікація процесів за структурою робочого циклу

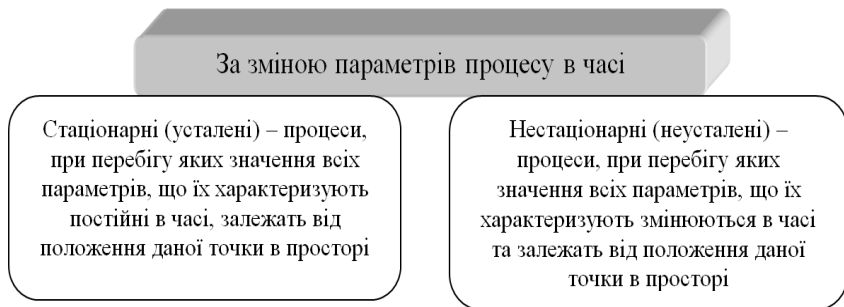


Рисунок 1.2 – Класифікація процесів за параметрів процесів в часі



Рисунок 1.3 – Класифікація процесів за основними закономірностями перебігу

2. Перебіг технологічних процесів харчових виробництв проходить згідно із загальними фізичними, хімічними і фізико-хімічними законами, на основі яких формується теорія процесу.

При розгляді процесів харчової технології можна виділити такі основні закони і принципи, на яких ґрунтуються закономірності перебігу процесів:

- закони збереження маси і енергії;
- закони рівноваги систем;
- закони перенесення маси і енергії і принцип рушійної сили;
- принцип оптимізації проведення процесу;
- принцип масштабного переходу і моделювання.

**Закон збереження маси** (відкритий незалежно М.В.Ломоносовим та А.Лавуазьє) встановлює, що маса системи залишається незмінною в часі. В науці про процеси закон виражається матеріальним балансом системи.



Рисунок 1.4 – Схема до складання матеріального балансу системи

Рівняння матеріального балансу запишемо у вигляді:

$$m_A + m_B + m_C = m_D + m_E, \quad (1.1)$$

де  $m_A$ ;  $m_B$ ;  $m_C$ ;  $m_D$ ;  $m_E$  – маси компонентів А, В, С, D, і Е.

Для систем, що знаходяться в русі, закон збереження маси виражається рівнянням нерозривності потоку:

$$F_1 \varpi_1 = F_2 \varpi_2, \quad (1.2)$$

де  $F_1$ ,  $F_2$  – площа поперечного перерізу труб,  $m^2$ ;

$\varpi_1$ ,  $\varpi_2$  – швидкість руху рідини,  $m/c$ .

**Закон збереження енергії** встановлює, що енергія не виникає з нічого і не зникає нікуди, а лише перетворюється з однієї форми на іншу. В науці про процеси закон виражається енергетичним, зокрема, тепловим балансом системи.

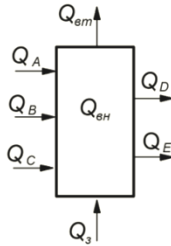


Рисунок 1.5 – Схема до складання теплового балансу системи

Кожна речовина, що входить в апарат, вносить певну кількість тепла. Крім того, може бути підведена тепла енергія  $Q_з$  зовні. Частина тепла  $Q_{вт}$  через стінки апарату надходить в навколишній простір. На основі закону збереження енергії можна записати рівняння теплового балансу:

$$Q_A + Q_B + Q_C + Q_{вн} + Q_{п} = Q_D + Q_E + Q_{вт}, \quad (1.3)$$

де  $Q_{вн}$  – теплота, що виділяється при протіканні процесу в апараті;

$Q_{вт}$  – втрати тепла в навколишній простір.

Рівняння матеріального і теплового балансу лежать в основі вивчення будь-якого технологічного процесу.

### **Закони рівноваги системи**

Системи, що знаходяться в рівновазі, не змінюють свого стану в часі і ніяких процесів в таких системах не буде відбуватися. Якщо вивести таку систему із стану рівноваги шляхом впливу на неї механічної або теплової дії, то розпочнеться перебіг технологічного процесу.

Для визначення які параметри потрібно змінити, щоб викликати необхідні для виробництва зміни в стані системи застосовують принцип ла Шательє.

Стан системи визначається сукупністю її інтенсивних властивостей – параметрів, якими можуть бути тиск, температура, концентрація, питомий об'єм.

### **Закони перенесення маси і енергії і принцип рушійної сили**

Основною метою при виробництві харчових продуктів є забезпечення перебігу технологічних процесів з якомога більшою швидкістю. Її можна визначити з кінетичних рівнянь, які для гідродинамічних, теплообмінних і масообмінних мають аналогічний вигляд:

Для теплових процесів:

$$\frac{dQ}{F d\tau} = K \Delta t = \frac{1}{R} \Delta t, \quad (1.4)$$

де  $Q$  – кількість тепла, що переноситься в ході перебігу процесу, Дж;

$F$  – площа поверхні теплообміну,  $m^2$ ;

$\tau$  – час перебігу процесу теплообміну, с;  
 $K$  – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  
 $\Delta t$  – різниця температур (рушійна сила процесу);  
 $R=1/K$  – опір переносу тепла.  
 Для масообмінних процесів:

$$\frac{dm}{F d\tau} = K' \Delta C = \frac{1}{R'} \Delta C, \quad (1.5)$$

де  $dm$  – маса речовини, що переходить з однієї фази в іншу за час  $d\tau$ , кг;  
 $F$  – площа поверхні теплообміну, м<sup>2</sup>;  
 $K'$  – коефіцієнт, що характеризує інтенсивність передачі маси (коефіцієнт провідності), кг/(м<sup>2</sup> · с);

$\Delta C$  – рушійна сила процесу масопередачі, що виражена різницею концентрацій, кг/м<sup>3</sup>;

$R' = 1/K'$  – опір масопередачі.

Для гідродинамічних, наприклад, для фільтрування, кінетичне рівняння має вигляд:

$$\frac{dV}{F d\tau} = \frac{1}{R_r} \Delta p = K_r \Delta p, \quad (1.6)$$

де  $V$  – об'єм фільтрату, м<sup>3</sup>;

$F$  – площа поверхні фільтра, м<sup>2</sup>;

$R_r$  – гідравлічний опір фільтра;

$K_r = 1/R_r$  – коефіцієнт провідності фільтруючого середовища;

$\Delta p$  – рушійна сила процесу (різниця тисків), Па.

Таким чином, всі кінетичні рівняння можуть бути приведені до виду:

$$I = IX,$$

де  $I$  – швидкість протікання процесу;

$X$  – рушійна сила процесу (різниця тиску, температури, концентрації);

$I$  – коефіцієнт провідності, величина, обернена опору.

**Принцип оптимізації проведення процесу.** При проведенні будь-якого процесу виникає декілька варіантів вирішення. Один з них буде найбільш доцільним. Вибір найдоцільнішого варіанта одержав назву оптимізації.

Як критерій оптимізації найчастіше вибирають мінімум часу і затрат на виробництво продукції. Цей критерій зв'язаний з вартістю енергії, робочої сили, матеріалів. Мінімум вартості досягається вибором доцільного проведення процесу і його апаратного оформлення.

Є деякі загальні, універсальні рішення, які можуть бути застосовані для оцінки оптимальності процесу:

- безперервність процесу;
- протитечійність;
- оновлення поверхні фаз;
- використання вторинного тепла.

В безперервному потоці можливі такі напрямки потоків, що взаємодіють між собою:

- протитечія;
- прямотечія;
- перехресні потоки.

З точки зору тепло- і масообміну найбільш доцільна протитечія. При здійсненні обмінних процесів в безперервному потоці оптимальним є процес, що здійснюється в протитечії.

Найбільш оптимальним є варіант, що передбачає турбулентний режим і забезпечує максимальний контакт середовищ при безперервному оновленні поверхні контакту.

Водяна пара як найбільш розповсюджений тепловий агент має властивість постійного тепловмісту при зміні тиску. Отже можна використати вторинну пару, яка утворюється при проведенні деяких процесів, для виробництва. Це дає значну економію енергії.

**Закони масштабного переходу і моделювання.** Велике значення має положення про вплив розмірів апарата на процес, що в ньому проходить. Для переносу результатів досліджень на малих апаратах до апаратів промислових використовується теорія моделювання.

**3. Подібність фізичних явищ** має багато спільного з геометричною подібністю. В геометрії подібними називаються фігури однакової форми, у яких подібні кути рівні, а подібні сторони пропорційні (рис.1.6).

У подібних фігур відношення подібних сторін і висот запишемо у вигляді:

$$\frac{l_1}{l_1'} = \frac{l_2}{l_2'} = \frac{l_3}{l_3'} = \frac{h}{h'} = c_{11}, \quad (1.7)$$

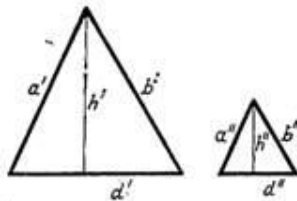


Рисунок 1.6 – Геометрично подібні трикутники

де  $c_{11}$  – константа подібності або коефіцієнт подібного перетворення.

З допомогою константи подібності можна порівнювати між собою лише дві подібні фігури:

$$\frac{l_1''}{l_1''} = \frac{l_2''}{l_2''} = \frac{l_3''}{l_3''} = \frac{h''}{h''} = c_{12}; \quad c_{11} \neq c_{12} \quad (1.8)$$

Якщо ж за масштаб виміру взяти один з лінійних розмірів трикутника (подібну сторону або висоту), то для всіх подібних трикутників:

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{l_2'}{l_1'} = \frac{l_2''}{l_1''} = i_1; \quad \frac{l_1}{h_1} = \frac{l_1'}{h_1'} = \frac{l_1''}{h_1''} = i_2, \quad (1.9)$$

де  $i$  – безрозмірна величина, яка називається інваріантом подібності, з допомогою якого можна порівняти будь-яку кількість подібних між собою фігур.

Поняття подібності поширюється на фізичні явища. Передумовою подібності полів фізичних явищ повинна бути геометрична подібність, тобто фізичні поля подібні, якщо в подібних точках геометрично подібних систем відношення фізичних величин виражене сталими значеннями відповідних констант подібності:

$$\rho' / \rho = c_\rho; \quad \mu' / \mu = c_\mu; \quad \lambda' / \lambda = c_\lambda; \quad c' / c = c_c.$$

Прикладом кінематичної подібності може бути подібність руху рідини. Вона також вимагає наявності геометричної подібності, тобто якщо необхідно вивчити розподіл швидкостей потоку рідини в круглій трубі, то подібний потік повинен бути здійснений також в трубі круглого січення. При цьому порівнюються між собою швидкості в точках, які відповідають геометричній подібності. При цьому повинно бути забезпечена подібність фізичних полів:  $\rho / \rho' = c_\rho, \quad \mu / \mu' = c_\mu, \dots$

Тоді можна отримати  $\varpi / \varpi' = c_\varpi$ .

Для того, щоб сформулювати, що саме розуміють під подібністю фізичних явищ необхідно розглянути наступні терміни:

**однойменні величини** – величини, що мають один і той самий зміст і однакову розмірність;

**подібні точки системи** – точки, які відповідають геометричній подібності;

**подібні моменти часу** – моменти, які наступають після закінчення періодів часу, які мали загальний початок відліку і зв'язані з константою часової подібності  $\tau / \tau' = c_\tau$ .

Таким чином, **подібними** називаються фізичні явища, які проходять в геометрично подібних системах, якщо у них у всіх подібних точках в подібні

моменти часу відношення однойменних величин виражені відповідними константами подібності.

**Теореми подібності.**

Перша теорема подібності, сформульована І.Ньютоном: **подібні між собою явища мають чисельно рівні критерії подібності.**

Критерії подібності – це безрозмірні параметри, які діляться на критерії-комплекси, що складаються з різних фізичних і геометричних величин та критерії-симплекси, що складаються з однойменних величин.

Прикладом критерія-комплекса може бути число Рейнольдса  $Re = \frac{\varpi l \rho}{\mu}$ ,

критерія-симплекса число  $M = \varpi / \varpi_0$ .

Кожний критерій має певний фізичний зміст і виражає міру співвідношення між ефектами, важливими для цього процесу.

Якщо критерій Рейнольдса записати у вигляді:

$$Re = \frac{\rho \varpi^2}{\mu(\varpi/l)}, \tag{1.10}$$

то очевидно, що він виражає співвідношення між силами інерції і силами молекулярного тертя в потоці рідини. З іншого боку, якщо для двох подібних потоків рідини критерії чисельно рівні, то

$$\frac{\rho' \varpi' l'}{\mu'} = \frac{\rho'' \varpi'' l''}{\mu''}, \text{ звідки } \left[ \left( \frac{\rho'}{\rho''} \right) \left( \frac{\varpi'}{\varpi''} \right) \left( \frac{l'}{l''} \right) \right] \Big/ \left( \frac{\mu'}{\mu''} \right) = 1$$

$$\text{Оскільки } \frac{\rho'}{\rho''} = c_\rho; \quad \frac{\varpi'}{\varpi''} = c_\varpi; \quad \frac{l'}{l''} = c_l; \quad \frac{\mu'}{\mu''} = c_\mu, \quad ,$$

$$\text{тоді} \quad \frac{c_\rho c_\varpi c_l}{c_\mu} = 1 \tag{1.11}.$$

Складений таким чином параметр із констант подібності є **індикатором** подібності.

Друга теорема подібності була сформульована Федерманом і Букінгемом: **будь-яка залежність між змінними, які характеризують будь-яке явище, може бути представлена у вигляді залежності між відповідними критеріями в формі рівняння подібності (критеріального рівняння).**

Результати дослідів прийнято представляти у вигляді степеневі функції, яка виражає залежність критерію  $K_1$ , що визначається і містить шукану величину від визначальних критеріїв  $K_2, K_3, \dots, K_n$ , які відображають різні сторони процесу:

$$K_1 = CK_2^m K_3^n K_4^r \dots \tag{1.12}$$

Кількість і вид критеріїв, необхідних для опису процесу, можуть бути в багатьох випадках знайдені аналітичним шляхом загального вигляду системи диференційних рівнянь даного процесу або на основі теорії розмірностей.

Коефіцієнти  $C$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $r$ , які входять в рівняння подібності, визначаються дослідним шляхом.

Необхідність і достатність умов такої подібності формулюється третьою теоремою подібності ( теоремою М.В.Кірпічова і А.А.Гухмана): **подібні ті явища, які описуються однією і тією ж системою диференційних рівнянь і мають подібні умови однозначності.**

Умови однозначності включають наступні необхідні дані:

а) відомості про геометричні властивості системи (конфігурація і розміри робочого об'єму апарата);

б) дані про фізичні властивості продуктів і матеріалів, які складають систему, що досліджується (теплопровідність, теплоємність стінок апарата, в'язкість, густина робочих середовищ та ін.);

в) дані про стан системи на її границях (граничні або просторові крайові умови) і про взаємодію з навколишнім середовищем (інтенсивність тепловіддачі чи масовіддачі, розподіл температур чи концентрацій на поверхні та ін.);

г) дані про стан системи в початковий і кінцевий моменти часу процесу ( часові умови).

Результатом подібності умов однозначності буде однаковий вид функцій і співпадання числових значень шуканого критерію  $K_1$  для двох чи більше подібних процесів.

**4. Моделюванням** називається метод вивчення існуючого об'єкта чи об'єкта, що створюється, при якому замість об'єкта (оригіналу) вивчається модель, а результати кількісно поширюються на оригінал. Основним результатом моделювання є передбачення поведінки оригіналу в робочих умовах виробництва на основі розрахунку необхідних параметрів оригіналу за вимірними параметрами моделі.

До моделювання ставляться дві основні вимоги:

а) експеримент на моделі повинен бути простішим, швидшим, тобто економічнішим, або безпечнішим, ніж експеримент на оригіналі;

б) має бути відомо правило, за яким проводиться розрахунок параметрів оригіналу на основі випробування моделі.

Будь-яка матеріальна модель будується на основі уявної. Уявна модель – це схема об'єкта (явища), відображає його суттєві сторони, яка виникає у свідомості людини в процесі його пізнання.

Існує два найважливіших варіанти уявних моделей: фізична та математична.

Фізична модель – сукупність наочно-фізичних понять.

Математична модель – сукупність математичних структур: рівнянь, нерівностей, таблиць, графіків і ін У залежності від виду моделі моделювання буває фізичним і математичним.

Математичне моделювання є методом опису процесів з кількісної та якісної сторони за допомогою так званих математичних моделей.

При побудові математичної моделі реальне явище спрощується, схематизується, і отримана схема описується залежно від складності явища за допомогою того чи іншого математичного апарату.

У моделі повинні бути враховані всі найбільш істотні фактори, що впливають на процес, але вона не повинна бути містити безлічі дрібних, другорядних факторів, із врахуванням яких тільки ускладниться математичний аналіз.

Математичний опис, що становить структуру моделі, залежно від процесу представляється у вигляді системи кінцевих або диференціальних рівнянь, що відображають взаємний вплив різних параметрів.

Методи математичного моделювання в поєднанні з сучасними комп'ютерними програмами дозволяють при відносно невеликих матеріальних витратах досліджувати різні варіанти апаратного оформлення процесу, вивчити його основні особливості та розкрити резерви удосконалення. Математичне моделювання доповнює фізичне моделювання, при якому вивчення даного явища відбувається при його відтворенні в різних масштабах і аналізі впливу фізичних особливостей і лінійних розмірів. Експеримент проводять безпосередньо на досліджуваному фізичному процесі. Дослідні дані обробляють поданням їх у формі залежностей безрозмірних критеріїв, складених комбінацією різних фізичних величин і лінійних розмірів. Ця безрозмірна форма дозволяє поширити знайдені залежності на групу подібних між собою явищ, що характеризуються сталістю і визначають значення критеріїв подібності. В основі фізичного моделювання лежить теорія подібності.

#### ***Питання для самоконтролю:***

1. За якими ознаками класифікують процеси харчових виробництв?
2. Як поділяють процеси за основними закономірностями перебігу за рушійною силою?
3. Які основні закони і принципи покладені в основу закономірностей перебігу процесів?
4. Як визначається рушійна сила основних процесів харчових виробництв?
5. Сформулюйте теореми подібності.
6. Що таке критерій подібності?
7. В чому полягає моделювання процесів та апаратів харчових виробництв?

## Тема 2. ПРОЦЕС ПОДРІБНЕННЯ

1. Дроблення. Фізико-механічні основи дроблення.
2. Будова і робота основних типів дробарок.
3. Різання. Теорія різання.
4. Основні типи різальних машин.

(матеріал укладено на основі джерел [2, 3, 5-9, 13, 14, 17])

1. Подрібнення – це процес руйнування і зменшення розмірів шматків матеріалу під дією зовнішніх механічних, теплових, електричних сил, направлених на подолання внутрішніх сил зчеплення, що зв'язують між собою частинки твердого тіла.

Залежно від фізико-механічних властивостей і розмірів шматків матеріалу, який подрібнюється, вибирають спосіб дії на матеріал. Дроблення твердих матеріалів (рис 2.1) здійснюється роздушуванням (а), розколюванням (б), розтиранням (в), ударом (г). На практиці ці способи часто комбінуються.

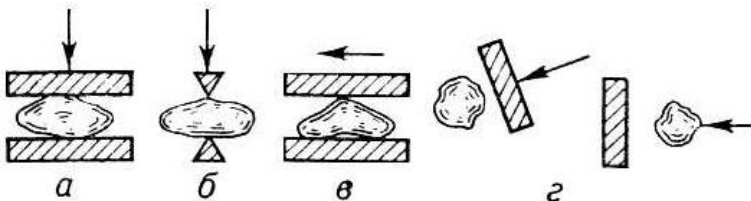


Рисунок 2.1 – Способи дроблення

Результат подрібнення характеризують величиною, яку називають степінь подрібнення  $i$ . Цю величину визначають як відношення середнього характерного розміру  $D$  куска до подрібнення до середнього характерного розміру  $d$  куска після подрібнення :

$$i = \frac{D}{d} \quad (2.1)$$

Характерним розміром куска кулястої форми є його діаметр, куска кубічної форми – довжина ребра. Характерний лінійний розмір куска неправильної форми визначають як середнє геометричне:

$$D(d) = \sqrt[3]{lbh} \quad (2.2)$$

де  $l$  – довжина шматка, м;

$b$  – ширина шматка, м;

$h$  – висота шматка, м.

Залежно від розміру шматків вихідного матеріалу й кінцевого продукту розрізняють два типи подрібнювання: дроблення та розмілювання. Їх класифікація приведена в таблиці 5.1.

При подрібненні тверді тіла спочатку піддаються об'ємній деформації, а потім по утворених макро- і мікро- тріщинах відбувається руйнування матеріалу із утворенням нових поверхонь. При чому чим вища степінь подрібнення, тим більші витрати енергії потрібні на подрібнення матеріалу.

Робота, яка затрачається на дроблення, включає в себе роботу на об'ємну деформацію шматків, які руйнуються, і роботу на утворення нових поверхонь.

Корисна робота зовнішніх сил при дробленні виражається рівнянням П.А. Ребіндера:

$$A = A_1 + A_2 = k\Delta V + \sigma_s \Delta S, \quad (2.3)$$

де  $A_1$  – робота, яка затрачається на деформацію шматка;

$A_2$  – робота, необхідна для створення нової поверхні;

$k$  – коефіцієнт пропорційності, який характеризує структурно-механічні і фізико-хімічні властивості матеріалу;

$\Delta V$  – зменшення об'єму шматків матеріалу в результаті їх деформації перед руйнуванням;

$\sigma_s$  – коефіцієнт пропорційності, який рівний роботі, що затрачається на утворення одиниці нової поверхні твердого тіла;

$\Delta S$  – приріст площі поверхні.

Виходячи з закону Гука:

$$A_1 = \frac{\sigma^2 \cdot \Delta V}{2E}, \quad (2.4)$$

де  $\sigma$  – напруження, МПа;

$E$  – модуль пружності матеріалу, Па.

Якщо припустити, що рівняння (2.4) справедливе для руйнування і

$$k = \frac{\sigma^2}{2E},$$

тоді

$$A = \frac{\sigma^2 \cdot \Delta V}{2E} + \sigma_s \cdot \Delta S, \quad (2.5)$$

При грубому дробленні величина заново утвореної поверхні невелика, тому роботою, яка затрачається на утворення нових поверхонь, можна знехтувати і отримати вираз для визначення корисної роботи (рівняння Кірпичова-Кіка):

$$A = A_1 = k\Delta V \quad (2.6)$$

При тонкому помелі можна знехтувати роботою, що витрачається на деформацію шматка, оскільки вона відносно мала в порівнянні з роботою

утворення нових поверхонь, і отримати вираз для визначення корисної роботи (рівняння Ріттенгера):

$$A=A_2=\sigma_s \Delta S \quad (2.7)$$

2. Будова і робота основних типів дробарок. Машини, які використовуються для проведення процесу подрібнення, називаються подрібнюючими машинами, їх ділять на дробарки і млини.

За конструкцією розрізняють: шокові, конусні, валкові, молоткові дробарки, дезінтегратори, дисмембратори, кульові, стержневі, колоїдні млини.

Шокові дробарки призначені для механічного руйнування шматків твердого матеріалу шляхом роздушування між двома плоскими поверхнями з метою доведення їх розмірів до необхідної крупності. Застосовуються для подрібнення вапнякового каменю у цукровому виробництві.

В шоковій дробарці матеріал подрібнюється роздушуванням разом з розколюванням і згином між нерухомою і рухомою щочками. Рухома щочка наближається (робочий хід) або відходить (холостий хід) від нерухомої щочки при обертанні ексцентрикового вала. Під час робочого ходу проходить дроблення матеріалу, а під час холостого – вивантаження подрібненого матеріалу під дією власної ваги. Переваги: простота і надійність конструкції, широка область застосування (для дроблення великошматкових матеріалів великої твердості), компактність і легкість обслуговування.

Недоліки: періодичний характер дії подрібнюючого зусилля; неповна врівноваженість рухомих мас викликає шум і вібрацію при дробленні, забивання робочого простору матеріалом при нерівномірній його подачі.

Валкова дробарка (рис.2.2) застосовується для дроблення і помелу зерна, солоду, плодів. Подрібнення матеріалу відбувається шляхом його роздушування між валками, які обертаються назустріч один одному.

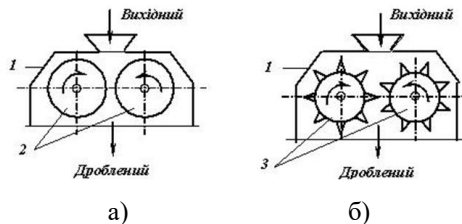


Рисунок 2.2 – Схема валкової дробарки: а) з гладкими валками; б) з зубчатыми валками; 1 – корпус; 2, 3 – валки

Молоткові дробарки (рис.2.3) добре подрібнюють крихкі матеріали (сухе зерно, крейду, лід, сіль, цукор).

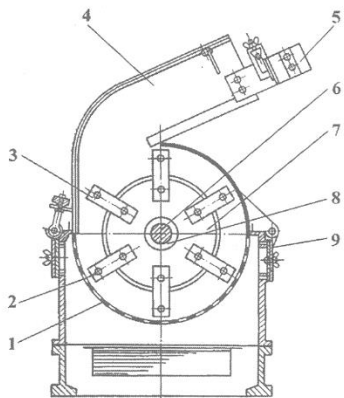


Рисунок 2.3 – Схема молоткової дробарки:  
 1 – сито; 2 – молоток; 3 – палець; 4 – завантажувальна горловина;  
 5 – дозатор; 6 – вал; 7 – диск; 8 – втулка; 9 – станина

У молоткових дробарках вихідний матеріал через живильник 1 надходить у робочий простір, обмежений корпусом 2, який є захищеним броньовими плитами. Усередині робочого простору на горизонтальному валу обертається ротор з молотками 3, закріпленими шарнірно. Молотки вдаряють по зерну або частинках матеріалу і з силою відкидають їх до стінок корпуса на плити, де частинки додатково подрібнюються.

До дробарок ударної дії відносять дезінтегратори, робочим органом яких є два ротори, які обертаються в різні сторони. Застосовуються для отримання надтонкого помелу.

Дезінтегратор (рис.2.4) складається з двох роторів, що являють собою диски 1 та 2, які насаджені на окремі вали 3 та 7, що обертаються у протилежні сторони.

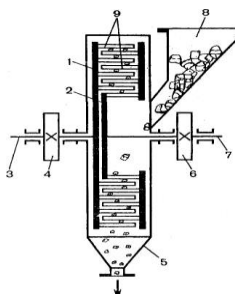


Рисунок 2.4 – Схема дезінтегратора:  
 1, 2 – диски; 3, 7 – вали; 4, 6 – шків; 5 – розвантажувальна горловина;  
 8 – завантажувальна горловина; 9 – штифти-пальці

Кожен диск має по два ряди концентрично розташованих штифтів-пальців 9. Ротори входять один в один таким чином, що концентричні кола з штифтами-пальцями одного ротора розташовуються усередині концентричних кіл з штифтами-пальцями іншого ротора. Вільні кінці пальців для жорсткості зв'язані кільцями. На вільних кінцях роторних валів насажені приводні шківни 4, 6. Обертальний рух від електродвигунів передається валам роторів через шківни і клинопасову передачу.

Вихідний матеріал через завантажувальну горловину 8, закріплену на корпусі, подається у центральну частину ротора дезінтегратора. При просуванні униз матеріал потрапляє під удар внутрішнього ряду штифтів-пальців 9 подрібнюється і відкидається на наступний ряд штифтів-пальців 9, які обертаються у протилежний бік. Під ударами другого ряду штифтів-пальців відбувається подальше подрібнення і відкидання подрібненого зерна на третій ряд тощо. Подрібнений продукт розвантажується через розвантажувальну горловину 5. У дезінтеграторах одночасно з подрібненням відбувається й перемішування компонентів вихідного матеріалу.

Дисмембратор за конструкцією аналогічний дезінтегратору, але на відміну від дезінтегратора у дисмембраторі обертається тільки один диск, другий диск – нерухомий. Завдяки вентилятору подрібнений продукт виноситься потоком повітря або газу у розвантажувальну камеру, яка розташована зверху.

Кульові млини (рис. 2.5) конструктивно являють собою циліндр, що обертається (барабан), завантажений подрібнювальними тілами. Торці барабана закриті кришками (завантажувальною і розвантажувальною). При обертанні подрібнювальні тіла під впливом відцентрової сили, а також тертя між собою і футеровкою (внутрішнє покриття) барабана підіймаються на певну висоту, падають, розбиваючи і стираючи матеріал, що знаходиться в барабанних млинах.

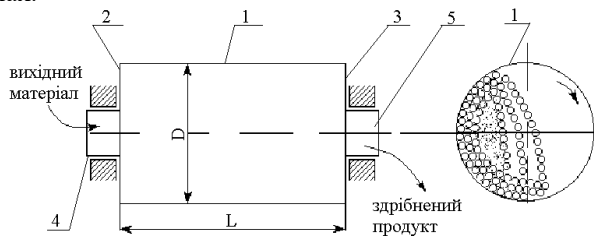


Рисунок 2.5 – Схема кульового млина:

1 – корпус; 2, 3 – завантажувальна і розвантажувальна кришки;  
4, 5 – цапфи

3. **Різання** – це процес оброблення матеріалу шляхом його

розділення з метою надання йому заданої форми, розмірів і якості поверхні.

Різання може бути з ковзанням і рубаюче. При рубаючому різанні коефіцієнт різання  $K_c=0$ , при різанні з ковзанням  $K_c>0$ . Із збільшенням коефіцієнта  $K_c$  опір різанню зменшується.

Енергія, яка затрачається на різання за  $1c$ , визначається за формулою:

$$A = v_n \cdot b(W_n + K_c \cdot W_t), \quad (2.8)$$

де  $v_n$  – швидкість подачі;

$b$  – довжина ріжучого краю ножа;

$W_n, W_t$  – нормальна і тангенціальна складові опору різанню, залежать від температури, швидкості різання, товщини ножа і кута його заточування, розташування волокон матеріалу відносно леза ножа.

Питома робота різання:

$$a = \frac{A}{F} = W_n + K_c \cdot W_t, \quad (2.9)$$

де  $F=v_n \cdot b$  – площа розрізу за секунду.

Питома витрата енергії на різання залежить від суми питомих опорів.

Витрата енергії на різання можна визначити за законом Ребіндера:

$$dA = dA_1 + dA_2 + dA_3, \quad (2.10)$$

$dA_1$  – енергія, яка витрачається на подолання молекулярних сил;

$dA_2$  – енергія, яка витрачається на пластичну деформацію,

$dA_3$  – енергія, яка витрачається на зовнішнє тертя ріжучого інструмента.

У всіх ножів ріжуча сторона (лезо) має форму одностороннього або двохстороннього клину (рис. 2.6). Грань Б леза, що співпадає з площиною руху леза, називається опорною. Грань А леза, що розміщена під кутом до площини руху ножа, називається робочою, або лицьовою.

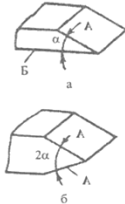


Рисунок 2.6 – Двогранний клин:

$a$  – односторонній;

$b$  – двохсторонній

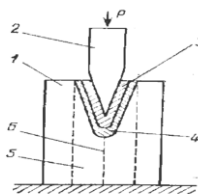


Рисунок 2.8 – Схема різання матеріалу:

1 – матеріал, що руйнується; 2 – ріжучий інструмент; 3 – зона пластичної деформації; 4 – зона пружної деформації; 5 – гранична зона; 6 – лінія руйнування.

Ця грань виконує деформування, наприклад, відгинання продукту і витіснення його з простору, що займає потім ніж. Лінія перетину опорної та робочої граней має назву ріжучого краю леза.

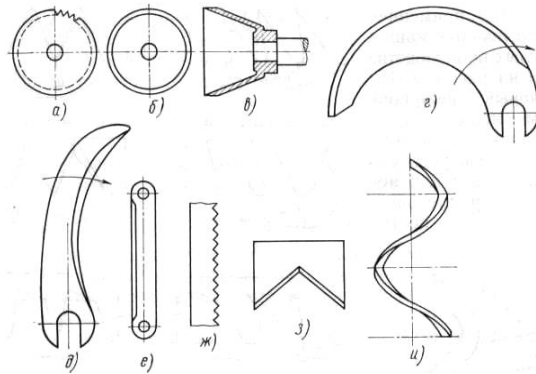


Рисунок 2.8 – Ножі і пилкові полотна:

- а) зубчастий дисковий ніж; б) дисковий ніж з гладким лезом;  
 в) конічний (сферичний) ніж; г) і д) – серпоподібні ножі; е) пластинчатий ніж; ж) стрічкова пилка; з) трикутний ніж; и) гвинтовий ніж.

4. Для проведення процесу різання харчових продуктів застосовуються різальні машини. До них ставляться такі спеціальні вимоги:

- конструкція ножів повинна забезпечувати зміну товщини шматків, які відокремлюються або ширини смуг, на які розрізається продукція, без заміни ножів;
- ножі повинні відділяти шматки продукції шляхом різання, а не відривання їх, без помітної деформації вихідної продукції і виділення з неї соку;
- леза ножів повинні зношуватись рівномірно по всій його довжині і легко загострюватись;
- подача продукції на подрібнення і відведення її з під ножів повинні забезпечувати збереження вихідних якостей продукції.

Залежно від конструкції ріжучих пристроїв різальні машини діляться на відцентрові з нерухомими ріжучими пристроями; дискові та барабанні з рухомими ріжучими пристроями; комбіновані. Розглянемо конструкції дискових різок (рис.2.9).

Дискова м'ясорізка (рис.2.9, а) складається із завантажувального бункера 1, дискових ножів 2, встановлених на валу 3 та скребків для очистки поверхні ножів. Шматки м'яса подаються через завантажувальний бункер всередину корпусу назустріч дисковим ножем, що обертаються. При

взаємодії шматків м'яса із ріжучим краєм ножів відбувається їх розрізання на смуги певної ширини, яка регулюється відстанню між ножами.

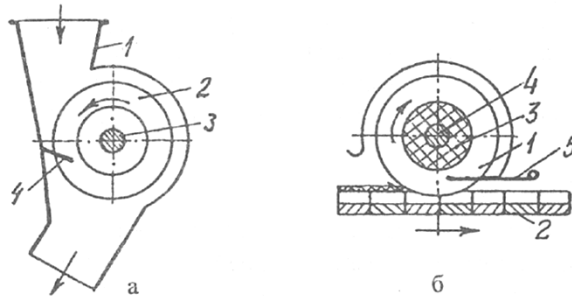


Рисунок 2.9 – Схеми дискових різок:

а) для розрізання шматків м'яса; б) для нарізання цукеркових мас

Нарізані смуги м'яса відводяться із різки через вивантажувальну горловину. Різка для нарізання цукеркових мас (рис. 2.9, б) складається з дискових ножів 1, транспортера 2, проміжних втулок 3, якими регулюють ширину смуг цукеркових мас, вала 4 та скребок 5.

Колова швидкість барабана відповідає швидкості подачі ножів та швидкості ковзання леза  $v_i$ :  $v_i/v_n=3..5$ .

Відцентрова бурякорізка (рис.2.10) призначена для нарізання коренів цукрових буряків у стружку.

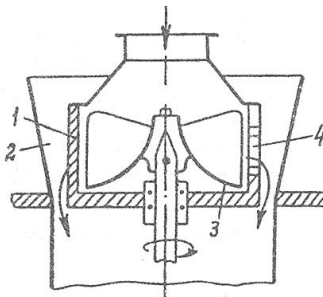


Рисунок 2.10 – Схема відцентрової бурякорізки:

1 – нерухома рама; 2 – корпус; 3 – трьохлопатевий завиток; 4 – ножова рама

Буряк завантажують у бурякорізку через завантажувальний бункер. В корпусі 2 вона захоплюється і обертається трьохлопатевим завитком 3 і під дією відцентрової сили притискається до ріжучого краю ножів, встановлених у ножових рамах 4. Ковзаючи по них, буряк поступово нарізується в бурякову стружку.

Бурякова стружка через прорізи ножових рам 4 потрапляє в простір між корпусом бурякорізки 2 та нерухомою рамою 1 і потім через нижній отвір надходить на подальшу переробку.

Механізми для дрібного і тонкого подрібнення застосовують, коли необхідно дрібне подрібнення продукції без дотримання форми шматків. До таких механізмів відносять робочі органи вовчків та кутерів. В якості ножів використовують ножі серпоподібні, дискові або парні плоскі з одним нерухомим та другим рухомих ножем, а також з ножами, які обертаються, нерухомими і обертовими решітками.

Вовчки (рис.2.11) складаються з корпусу, всередині якого розташований шнек для подачі і ущільнення матеріалу, та різальної головки.

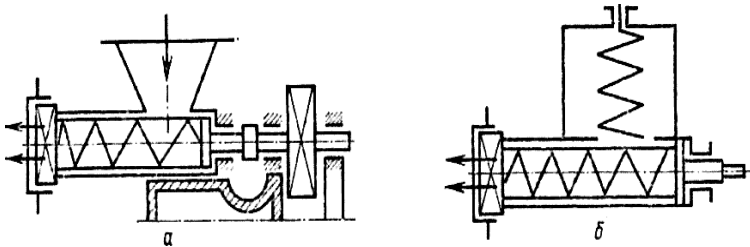


Рисунок 2.11 – Схеми вовчків:

а) без вимушеної подачі матеріалу; б) з вимушеною подачею

Різальний механізм кутера утворений набором серпоподібних ножів (від 2 до 12 шт.), що закріплюються на валу за допомогою різальної головки. Ножовий вал обертається з великою частотою (до  $6000 \text{ хв}^{-1}$ ). Принцип подрібнення полягає у розсіканні шматків м'яса, що знаходиться в чаші, ковзним різанням.

*Питання для самоконтролю:*

1. Назвіть основні способи дроблення твердих матеріалів?
2. Як визначити роботу, що затрачається на дроблення твердих матеріалів?
3. Будова та принцип роботи дробарок роздушувальної та роздушувально-розтиральної дії.
4. Будова та принцип роботи дробарок ударної дії.
5. Характеристика процесу різання. Як визначити роботу, що затрачається на різання матеріалів?
6. Будова та принцип роботи дискових різальних машин.
7. Будова та принцип роботи відцентрової бурякорізки.

### Тема 3. ПРОЦЕС СОРТУВАННЯ

1. Розділення сипкої суміші за розмірами частинок.
2. Розділення сипкої суміші за формою частинок.
3. Розділення сипкої суміші за швидкістю осадження та густиною.
4. Класифікація сипких продуктів за магнітними властивостями.  
(матеріал укладено на основі джерел [2, 3, 5-11, 13, 14, 17]).

1. Процес, при якому відбувається розділення сипкої суміші на окремі фракції називається сортуванням або класифікацією.

Залежно від властивостей компонентів, що розділяються розрізняють такі методи розділення:

- за розмірами частинок з використанням ситових машин;
- за формою частинок за допомогою трієрних машин;
- за швидкістю осадження та густиною частинок в рідкому і газовому середовищі;
- за електромагнітними властивостями з використанням сепараторів з електромагнітами.

Розділення за розмірами частинок називають просіюванням. Воно полягає в тому, що сипку суміш подають на сита, отвори яких пропускають частину суміші (її називають проходом), а іншу частину (залишок) затримують.

Сита класифікують за матеріалом та способом виготовлення:

- а) пробивні із тонкої листової сталі із штампованими отворами;
- б) плетені з круглого металевого дроту;
- в) ткани з шовкових, капронових і нейлонових ниток.

Розмір отвору сита визначається мінімальною відстанню між краями отворів на його поверхні. Для круглих отворів розміром отвору є діаметр, для квадратних – сторона квадрата, для прямокутних – менша сторона прямокутника, для щілинних – ширина щілини.

Основною характеристикою сит є величина  $\varphi$ , яка називається живим перерізом сита. Живий переріз сита визначають за формулою:

$$\varphi = \frac{F_0}{F} \cdot 100\% , \quad (3.1)$$

де  $F_0$  – площа отворів сита, м<sup>2</sup>;

$F$  – загальна площа сита, м<sup>2</sup>;

Основною умовою можливості просіювання продукту через плоске сито є його ковзання по ситі. На частинку, яка розміщена на ситі (рис. 3.1), що нахилене під кутом  $\alpha$  до горизонталі, діють три сили: сила тяжіння  $G$ ,

нормальна реакція поверхні сита  $R$  і сила тертя  $F$ . Трикутник вказаних сил згідно умови рівноваги має бути замкненим. Отже

$$F = R \cdot \operatorname{tg} \alpha = R \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (3.2)$$

де  $\varphi$  – кут тертя.

При нерівномірному русі сита, для якого кут нахилу до горизонталі  $\alpha=0$  з прискоренням  $a$ , направленим вправо сила інерції  $P_i=ma$  направлена вліво. Якщо  $P_i > fG$  зчеплення частинки з ситом порушується, а при  $P_i \leq fG$  – частинка буде нерухомою.

Якщо замінити  $P_i$  на рівне йому за абсолютним значенням  $ma$ , то отримаємо:

$$m \cdot a = f \cdot G \text{ або } a = g \cdot f \quad (3.3)$$

Граничне прискорення, при якому сила інерції стане рівною силі тертя називають критичним прискоренням і визначають за формулами:

Для плоских частинок  $a_{кр} = f \cdot g;$  (3.4)

для круглих частинок  $a_{кр} = \frac{k}{r} \cdot g.$  (3.5)

де  $k$  – коефіцієнт тертя кочення;  
 $r$  – радіус частинки, м.

Залежно від розташування сит машини для просіювання ділять на дві групи:

- з плоскими ситами;
- з циліндричними або призматичними ситами.

Для приведення в рух сипкої суміші, що просіюється плоскі сита здійснюють зворотньо-поступальний, круговий поступальний або вібраційний рух, циліндричні та призматичні сита – обертаються навколо осі.

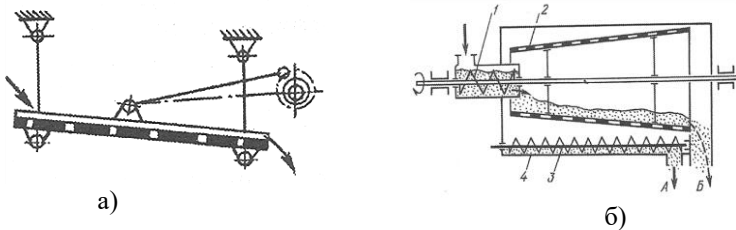


Рисунок 3.1 – Схеми просіюювальних машин:

а – із зворотньо-поступальним рухом сита; б – з барабанним ситом: 1 – живильник, 2 – сито, 3 – відповідний шнек, 4 – циліндричний корпус.

2. Для розділення сипких сумішей на фракції, які відрізняються формою частинок застосовують машини, які називаються трієрами. Робочим органом трієра є металевий циліндр або диск.

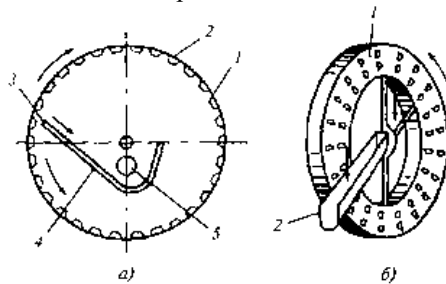


Рисунок 3.2 – Схеми трієрів:  
*a* – циліндричного; *б* – дискового

Циліндричний трієр складається з сталюого циліндричного корпусу 1, на внутрішній поверхні якого є штамповані комірочки 2, шнека 5, розташованого в жолобі 4. При обертанні циліндричного корпусу 1 в комірочки 2 потрапляють окремі зерна, які при повороті разом з циліндричним корпусом 1 на деякий кут, випадають. Спочатку випадають довгі зерна, які під напором зернової маси, що подається у трієр, переміщуються до протилежного краю корпусу та виводяться з трієра. Короткі зерна вкладаються в комірочки глибше, ніж довгі, і випадають пізніше, потрапляючи у лоток 4, і вивантажуються із трієра шнеком 5. Залежно від розмірів домішок регулюють положення верхнього краю лотка 3

3. У випадку переміщення суміші частинок, що відрізняються величиною, формою чи густиною рідким або газовим потоком буде відбуватися її розділення на фракції. Частинок, які мають більшу швидкість осадження, випадають раніше і утворюють першу фракцію, а частинки, які мають меншу швидкість – пізніше.

В повітряних сепараторах, які працюють на замкнутому чи відкритому циклах з млинами, класифікація твердого матеріалу проходить внаслідок різних швидкостей осадження частинок різного розміру в газовому середовищі в полі дії відцентрових сил і сил тяжіння.

До повітряних машин відносяться віялки (рис. 3.3). Повітря, яке продувається через віялку, несе із собою частинки, що поступово осаджуються. Спочатку осідають найбільш важкі, потім більш легкі і, нарешті, найлегші можуть бути винесені з апарата зовсім. Для розділення сипкої суміші за швидкістю осадження в повітряних сепараторах необхідно знати величину сил, які діють в повітряному потоці: сили тяжіння і сили опору середовища.

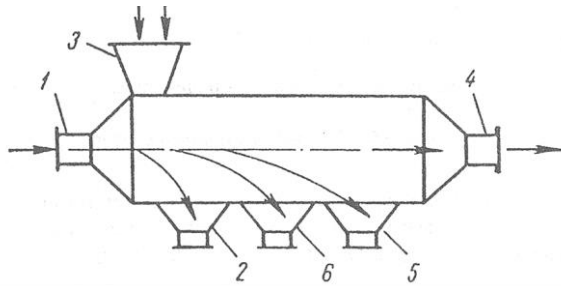


Рисунок 3.3 – Схема віялки:

1 – патрубок для подачі повітря; 2 – бункер важких частинок;  
3 – завантажувальний бункер; 4 – патрубок для відведення повітря та легких домішок; 5, 6 – бункери для осідання легших фракцій.

Сила опору середовища визначається за формулою:

$$R = k \cdot \rho \cdot F_m \cdot (v - u)^2, \quad (3.6)$$

де  $\rho$  – густина повітря,  $\text{кг/м}^3$ ;

$F_m$  – площа міделевого січення (площа проекції частинки на площину, перпендикулярну вектору відносної швидкості  $(v-u)$  повітряного потоку),  $\text{м}^2$ ;

$v$  – швидкість руху повітряного потоку,  $\text{м/с}$ ;

$u$  – швидкість руху частинки матеріалу,  $\text{м/с}$ ;

$k$  – коефіцієнт аеродинамічного опору, який залежить від форми і стану поверхні частинки і режиму повітряного потоку, що обтікає частинку (визначається експериментально).

Ще однією характеристикою розділення сипкої суміші є швидкість витання – швидкість потоку повітря, при якій тіло утримується в потоці в зваженому стані.

Серед відцентрованих сепараторів найчастіше використовують дискові (рис. 3.4). Матеріал, який необхідно розділити, через завантажувальний бункер, потрапляє на диск, що швидко обертається, завдяки чому частки набувають відцентрову силу і під її дією злітають з нього. Залежно від щільності і розмірів частинок відцентрова, що впливає на них, різна. Тому частинки, що мають велику щільність або великий розмір, летять далі часток з меншими щільністю і розміром.

Гідравлічну класифікацію застосовують в спиртовому, крохмально-паточному виробництвах для виділення піску, каменів та інших домішок з картоплі, буряка, кукурудзяних зерен, в консервному виробництві – для сортування зеленого горошку та зерен кукурудзи, які залежно від ступеня зрілості мають різну густину.

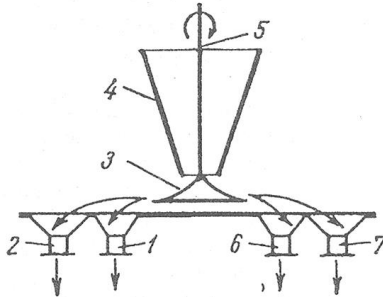


Рисунок 3.4 – Схема дискового сепаратора :

*1, 6 – збірники частинок меншої густини; 2, 7 – збірники частинок більшої густини; 3 – швидкообертотвий диск; 4 – завантажувальний бункер; 5 – приводний вал*

Гідравлічна класифікація здійснюється в горизонтальних потоках води і потоках води, що піднімаються і обертаються. Вода рухається із такою швидкістю, що зерна менші визначеного розміру, не встигаючи осідати, виносяться водою в злив, а зерна більшого розміру осідають в класифікаторі.

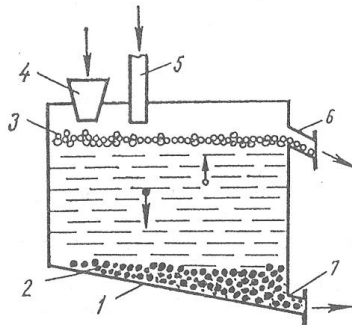


Рисунок 3.5 – Схема гідравлічного сепаратора:

*1 – сміть; 2 – перезрілий горішок; 3 – горішок молочної (консервної зрілості); 4 – завантажувальний бункер; 5 – патрубок для подачі розчину; 6 – патрубок для вивантаження легкої фракції; 7 – патрубок для вивантаження важкої фракції*

4. В сипких матеріалах, що переробляються на харчових виробництвах можуть траплятися металеві домішки, які при потраплянні в машину можуть викликати передчасне зношування деталей, а іноді і серйозні поломки. Для видалення металевих домішок використовують магнітні сепаратори, принцип дії яких полягає в тому, що матеріал пропускається в безпосередній близькості до сильного магніту, що притягує ці домішки.

Магнітні сепаратори, які застосовуються на харчових виробництвах, ділять на дві групи: з постійними магнітами та з електромагнітами.

В сепараторах з постійними магнітами використовують підковоподібні магніти. Їх підйомну силу можна визначити за наближеною формулою:

$$P = B^2 F \cdot 3,98 \cdot 10^5, \quad (3.7)$$

де  $B$  – магнітна індукція, Т;

$F$  – площа поперечного січення магніту, м<sup>2</sup>.

Сепаратори з постійними магнітами прості за будовою, але мають суттєвий недолік їх підйомна сила невелика та слабшає з часом.

В сепараторах з електромагнітами (рис. 3.6) встановлюються електромагніти, які живляться постійним струмом. Сепаратори з електромагнітами надійніші в роботі та мають значно більшу підйомну силу в порівнянні з постійними магнітами.

Апарат є нерухомою системою, навколо якої на осі обертається латунний барабан 4. Сипкий матеріал поступає до барабана через завантажувальний бункер 1 по транспортеру 2. Всередині барабана 4 розташований електромагніт 6. Матеріал, який не має магнітних властивостей, рухаючись по барабану 4, просипається у збірник. Феромагнітні домішки утримуються на поверхні барабана 4. При обертанні барабана утримані домішки виходять з поля дії магнітів і потрапляють в збірник, який відділений від збірника матеріалу з немагнітними властивостями перегородкою 5.

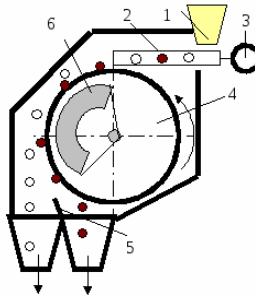


Рисунок 3.6 – Схема електромагнітного сепаратора з барабаном, який обертається:

1 – завантажувальний бункер; 2 – транспортер; 3 – механізм приводу;  
4 – барабан; 5 – відбійник; 6 – електромагніт

### **Питання для самоконтролю:**

1. Що називається просіюванням сипкої суміші?

2. Як класифікують сита?
3. Будова та принцип роботи ситових машин.
4. Як проводять розділення сипкої суміші за формою частинок?
5. Що покладено в основу роботи повітряних сепараторів?
6. Як проводять гідравлічну класифікацію сипких сумішей?
7. Будова та принцип роботи електромагнітного сепаратора.

#### **Тема 4. ПРЕСУВАННЯ І ГРАНУЛЮВАННЯ**

1. Суть процесу пресування. Відтискання рідини. Преси, які використовуються для відтискання рідини.

2. Формування пластичних матеріалів.
3. Ущільнення сипких матеріалів (брикетування).  
(матеріал укладено на основі джерел [2, 3, 5-11, 13, 14, 17]).

1. Пресуванням називають механічний процес, який полягає у тому, що матеріал піддається зовнішньому тиску за допомогою спеціальних механічних пристроїв.

Пресування проводять для досягнення таких цілей:

- відділення рідини від твердого тіла (відтискання);
- надання пластичним тілам певної геометричної форми (формування і штампуння);
- зв'язування частинок зернистого сипкого матеріалу за допомогою зв'язуючої рідини і відповідного тиску (брикетування, гранулювання).

Відтискання рідини за допомогою пресування використовують в таких випадках:

- коли рідина є набагато ціннішою, ніж твердий залишок;
- коли твердий залишок є цінним продуктом, а рідина, що у ньому присутня, погіршує умови зберігання, транспортування і подальшого використання.

Відтискання рідини пресуванням застосовують у виноробстві та консервному виробництві для виділення соків з винограду, плодів і ягід; в оліє-жировому виробництві – рослинної олії з насіння, у бурякоцукровому виробництві – води з бурякового жому, при виробництві жиру його відділяють від шкварок, при виробництві сиру сироватку виділяють із сирної маси.

Відтискання інколи використовують для попереднього виділення вологи з матеріалів, які подають потім на сушіння, оскільки механічне відділення вологи завжди дешевше, ніж теплове.

Основною величиною, що характеризується процес відтискання пресуванням, є вихід рідини, що залежить від величини робочого тиску, характеру зв'язку рідкої фази з клітинною структурою, вмісту рідкої фази у

вихідному матеріалі та залишку, температури процесу, товщини шару і тривалості процесу.

Фізична сутність відтискання рідини пресуванням полягає в наступному. При зближенні частинок матеріалу, всередині і на поверхні яких рідина утримується силами молекулярного зчеплення, спочатку починається рух рідини по каналах між частинками, а потім у процесі пресування рідина рухається в шарі пористого матеріалу по капілярах змінного перетину і кривизни, тобто процес подібний до фільтрування. У зв'язку з цим кількість рідини  $V$ , що протікає через капіляр за одиницю часу, можна визначити з рівняння Пуазейля.

$$V = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta p}{8\mu l}, \quad (4.1)$$

де  $\Delta p$  - перепад тиску в капілярі, Па;

$r$  – радіус капіляра, м;

$\mu$  – в'язкість рідини, Па·с;

$l$  - довжина капіляра, м.

Кількість рідини, що виділяється при пресуванні, відповідно до рівняння (4.1) прямо пропорційна перепаду тисків та радіусу капіляра і обернено пропорційна в'язкості рідини і довжині капіляра. Отже, при збільшенні тиску з одного боку, зростатиме кількість виділеної рідини, але з іншого боку надмірне збільшення тиску зменшуватиме січення капілярів, що викликатиме зниження продуктивності преса. Тому оптимальний робочий тиск при пресуванні встановлюють дослідним шляхом з урахуванням структурно-механічних властивостей матеріалу, кількості і якості одержуваної рідини. Для забезпечення найбільш повного виділення рідини при пресуванні вихідний матеріал часто подрібнюють і піддають попередній обробці, частіше термічній, іноді електричній. При нагріванні матеріалу зменшується динамічна в'язкість рідин; допустима температура нагрівання встановлюється технологічними умовами.

**Машини для відтискання рідини (преси).** За принципом дії розрізняють преси періодичної і безперервної дії, за способом створення робочого тиску - преси механічні, гідравлічні та пневматичні. Широко застосовуються в промисловості шнекові та валкові преси безперервної дії, а також пневматичні і кошикові преси періодичної дії.

Гідравлічний прес (рис. 4.1) відноситься до пресів періодичної дії і застосовується для відтискання олії з рослинної сировини та жиру від шквари. Гідравлічний прес може мати дві або три платформи, одна з яких знаходиться під тиском, а інші – на розвантаженні вичавок та завантаженні мезги. Прес приводиться в рух рідиною, яка нагнітається під тиском насосом 7 у робочий циліндр 6.

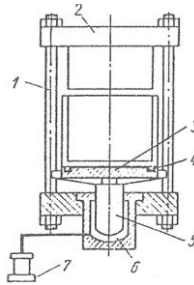


Рисунок 4.1 – Схема гідравлічного преса:  
 1 – направляюча колона; 2 – нерухома плита; 3 – плита-траверса; 4 – чашка; 5 – плунжер; 6 – робочий циліндр; 7 – насос

Плунжер 5 під дією тиску рідини починає рухатися вгору. Плита-траверса 3, з'єднана з плунжером, підіймається по направляючих колонах 1, які зверху з'єднані з нерухомою плитою 2. Робочий цикл гідравлічного преса складається з таких стадій:

- завантаження траверси пакетами;
- підйом пакетів і притиснення їх до верхньої плити та витікання рідини при порівняно невисокому тиску;
- підвищення тиску і витримування пакетів під цим тиском;
- опускання траверси;
- розвантаження.

Шнекові преси відносяться до машин безперервної дії. Пресуюче зусилля у шнековому пресі створюється одним чи декількома шнеками, які переміщують матеріал. Шнековий прес для віджимання олії із насіння соняшника представлений на рис. 4.2.

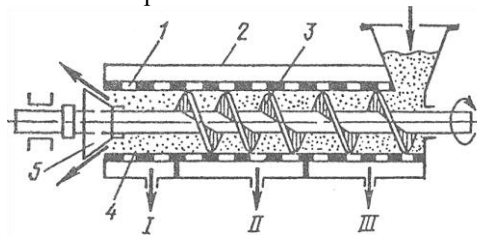


Рисунок 4.2 – Схема шнекового преса:  
 1 – перфорований циліндр; 2 – корпус; 3 – шнек; 4 – камера тиску;  
 5 – конус.

Шнековий прес складається з горизонтального корпусу 2, у якому розташований перфорований циліндр 1, всередині якого міститься шнек 3 із

змінним крок. Вихідний отвір преса закривається конусом 5, положення якого регулює ширину кільцевого проміжку, а отже, і ступінь віджимання рідини. Віджимання рідини з матеріалу у шнековому пресі відбувається в результаті поступового ущільнення маси матеріалу між витками шнека за рахунок зменшення кроку витків, механічної дії витків на матеріал в процесі обертання шнека; тertia пресованого матеріалу об поверхню витків, стінки циліндра і частинок матеріалу між собою; опору пристрою, що регулює величину вихідного отвору для ущільненого залишку.

Вихід рідини та його якість залежать від ступеня стиснення матеріалу між витками шнека. Ступінь стиснення характеризується коефіцієнтом стиснення:

$$k = V_1 / V_2 \quad (4.2)$$

де  $V_1$  – об'єм матеріалу в першому витку шнека;

$V_2$  – об'єм залишку в останньому витку шнека.

Масову продуктивність шнекових пресів можна визначити за формулою:

$$Q_M = S \cdot v_0 \cdot \rho \cdot \varphi \quad (4.3)$$

де  $S$  – площа поперечного перерізу внутрішньої порожнини камери пресування у місці розміщення першого витка шнека, що зайнята продуктом;

$\rho$  – щільність матеріалу, що пресується;

$\varphi$  – коефіцієнт заповнення порожнини камери сировиною.

Валковий прес, що застосовується для віджимання рідини з картопляної мезги при виробництві крохмалю, складається з двох порожніх перфорованих валків, що обертаються назустріч один одному. Відтиснута з мезги рідина проходить через отвори всередині валків і потім відводиться з них, а мезга продавлюється вниз.

У харчових виробництвах застосовуються також ексцентрикові, стрічкові, відцентрові та комбіновані преси безперервної дії

Принцип дії стрічкового преса ґрунтується на русі двох нескінчених стрічок з полімерного перфорованого полотна або плетеної сітки між роликками в одному напрямку. Віджимання рідини здійснюється за рахунок натягу стрічки навколо валків, товщина шару мезги між стрічками складає 40-50 мм.

2. Формування пластичних матеріалів. За допомогою формування пластичними матеріалами надають необхідну форму. Цей спосіб обробки використовують для формування хлібопекарських дріжджів, приготування з тіста хлібобулочних, макаронних, кондитерських та інших виробів.

Під час здійснення процесу формування пластичних мас необхідно враховувати їх фізико-механічні властивості, зокрема, в'язкість, пластичність, еластичність та адгезію. Оскільки найпоширенішим є формування виробів із тіста, то розглянемо характеристики тіста, які необхідно враховувати при цьому процесі. Для тіста характерними є явища релаксації та адгезії.

Релаксація – це зменшення внутрішнього напруження за постійної фіксованої деформації тіла. Релаксація відбувається протягом визначеного часу, який називається періодом релаксації ( час протягом якого внутрішнє напруження тіста зменшується в  $e$  разів , де  $e$  основа натурального логарифма). У зв'язку з цим тривалість формування чи штампування не повинна бути меншою за період релаксації. При штампуванні виробів із тіста та нанесенні на них малюнка напруження, яке необхідно створити в матеріалі визначається за формулою:

$$\sigma = \frac{\varepsilon_{\text{зал}} \cdot \mu}{\tau}, \quad (4.4)$$

де  $\varepsilon_{\text{зал}}$  – залишкова деформація;  
 $\tau$  – тривалість процесу штампування;  
 $\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості.

$$\varepsilon_{\text{зал}} = \frac{\delta}{h}, \quad (4.5)$$

де  $\delta$  – глибина малюнка, що штампується, м;  
 $h$  – початкова товщина виробу, м.

Адгезія – здатність прилипання до робочих поверхонь обладнання. Величина міцності адгезії залежить від в'язкості тіста та тиску і тривалості контакту тіста та робочої поверхні.

Преси, що застосовуються для формування матеріалів, залежно від способу дії поділяються на нагнітаючі, прокатувальні, штампуючі та екструдери.

Нагнітаючі преси широко застосовуються для формування макаронів, вермішелі, локшини, дріжджів та ін. Такі преси складаються з нагнітаючого пристрою та формуючої матриці з отворами потрібного перетину і розмірів. Шнековий прес для виготовлення макаронів, вермішелі і локшини, показаний на рис. 4.3, складається з тістоприготувальної камери 1, нагнітаючого шнека 2 і пресової головки 3, що забезпечує рівномірний тиск тіста на матрицю 4.

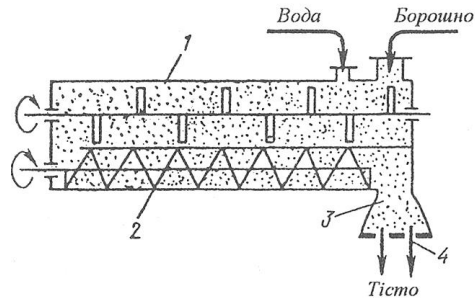


Рисунок 4.3 – Схема шнекового преса для виготовлення макаронів:  
 1 – тістоприготувальна камера; 2 – нагнітаючий шнек;  
 3 – пресова головка; 4 – матриця

У ньому нагнітаючим шнековому пресі тісто продавлюється через матрицю з отриманням продукту певного перетину і форми. Матрицю часто виготовляють з латуні або бронзи; останнім часом в неї вставляють вкладиші з фторопласту, до якого тісто не прилипає.

Прокатувальні преси застосовуються для додання тісту округлої або циліндричної форми.

Округлювання та закатування тіста здійснюється при просуванні шматка тіста між двома поверхнями, що рухаються одна відносно іншої. На округлювальних машинах тісто набуває округлої форми.

Закатування шматка тіста відбувається при його просуванні вздовж проміжку, утвореного стрічками двох транспортерів 1 та 3, які переміщуються у протилежні сторони з різною швидкістю. Шматок тіста 2 при цьому, обертаючись навколо своєї осі, рухається до виходу із проміжку, поступово набуваючи циліндричної форми.

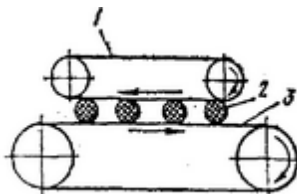


Рисунок 4.4 – Схема тістозакатувальної машини:  
 1, 3 – стрічкові транспортери; 2 – шматки тіста

Штампувальні преси широко застосовуються при виробництві печива і карамелі для нанесення малюнка на поверхню печива. Схема барабанної штампувальної представлена на рис. 4.5.

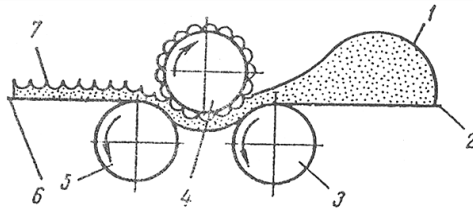


Рисунок 4.5 – Схема барабанної штампувальної машини:

1 – матеріал, що формується; 2 – лоток; 3 – приймальний барабан;  
4 – штампувальний барабан; 5 – відповідний барабан; 6 – штампований матеріал

Тісто 1 із лотка 2 підбирається приймальним барабаном 3 і направляється до штампувального барабана 4, який формує вироби необхідної форми і необхідного малюнка. Готові вироби відводяться лотком 6.

Екструзія – продушування тістоподібної маси через матрицю під тиском за високої температури. Застосовують при виробництві кукурудзяних паличок, сухих сніданків, фігурних круп'яних виробів, харчових концентратів швидкого приготування.

Розрізняють такі види екструзії:

- холодна екструзія – внаслідок повільного переміщення матеріалу під тиском в ньому відбуваються лише механічні зміни;
- тепла екструзія – здійснюється механічний та тепловий вплив на оброблюваний продукт;
- гаряча екструзія – відбувається за високих швидкостей і тисків, значному переході механічної енергії в теплову, що приводить до різних за глибиною змін у якісних показниках продукту.

Екструдери класифікують:

- за типом робочого органу: дискові, поршневі, валкові, шнекові, гвинтові, шестеренні, комбіновані;
- за частотою обертання шнека: нормальні, швидкохідні;
- за конструктивним виконанням: стаціонарні, з корпусом, що обертається, з горизонтальним розташуванням шнека, з вертикальним розташуванням шнека;
- за фізичними ознаками: з коротким шнеком (автогенні), з великим ухилом ріжучого краю матриці, з незначним ухилом ріжучого краю матриці.

На рис. 4.6 представлено схему черв'ячного (шнекового) екструдера. Принцип роботи полягає у наступному. Через завантажувальний бункер 5 вихідний продукт потрапляє всередину циліндра 4, де затягується черв'яком 2 і переміщається вздовж нього. Продукт нагрівається гарячою водою, яка

подається у канал 3. Для нагрівання поверхні циліндра 4 служать електронагрівачі 10, закріплені на його зовнішній поверхні. Нагрітий або розплавлений продукт продушується через фільтруючу сітку 9 та решітку 8 у формуючу головку 6. Із головки через формуючий канал-матрицю 7 виходить продукт, який за рахунок миттєвого перепаду тиску зазнає фізико-хімічних змін та набуває пористої структури.

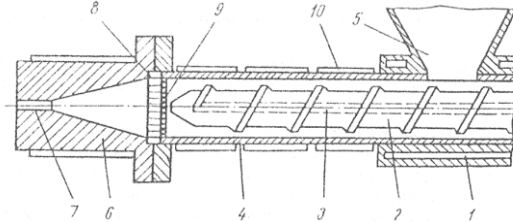


Рисунок 4.6 – Схема черв'ячного екструдера:

1 – порожнина для подачі охолоджуючої води; 2 – черв'як (шнек); 3 – канал для подачі теплоагенту; 4 – циліндр; 5 – завантажувальний бункер; 6 – формуюча головка; 7 – формуючий канал-матриця; 8 – решітка; 9 – фільтруюча сітка; 10-електричний нагрівач

3. Ущільнення сипких матеріалів шляхом його пресування в замкнутому просторі під дією зовнішнього тиску до отримання монолітного брикету з щільністю, при якій тіло не може саме руйнуватись, називається брикетуванням. Цей процес широко застосовується при виробництві цукру-рафінаду і багатьох харчових концентратів.

Щоб отримані брикети були міцними і не розсипалися, матеріал пресують у вологому стані або додають до нього зв'язуючу рідину (олія тощо).

Отриманий брикет повинен мати необхідні розміри, масу і міцність, достатні для його подальшого транспортування і зберігання. Але з метою його тривалого зберігання продукту, часто його приходиться піддавати додатковій обробці, наприклад, сушінню.

Фактори, які визначають процес пресування диспергованого продукту, можна розділити на дві групи:

І група – фактори, які характеризують фізико – механічні властивості продукту:

- модуль пресованості, який характеризує здатність продукту до ущільнення під прикладеним до нього зовнішнім тиском при відсутності втрат тиску на тертя і залежить від роду продукту, його структури і розмірів складових його частин;

- коефіцієнт бокового тиску – відношення бокового тиску з боку пресованого матеріалу до діючого вертикального тиску пресування;

- вологість, температура і гранулометричний склад продукту.

II група – це фактори, які характеризують умови пресування:

- питомий тиск пресування;
- тертя продукту об пресінструмент, величина якого залежить від властивостей продукту і стан поверхні пресінструмента;
- форма брикету і співвідношення його розмірів;
- режим пресування.

Відношення об'єму брикету до брикетування до його об'єму після брикетування називається коефіцієнтом ущільнення:

$$\beta = \frac{V}{V_k} = \frac{h}{h_k} \quad (4.6)$$

Для брикетування рафінаду застосовується карусельний прес (рис.4.7), основною складовою частиною якого є горизонтальний диск 1 з отворами, в яких розташовані матриці 2 та пуансон 3.

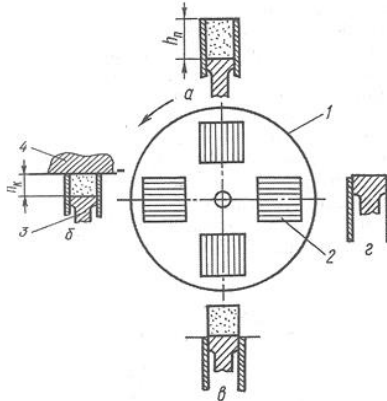


Рисунок 4.7 – Схема карусельного преса:

1- горизонтальний диск; 2 – матриця; 3 – пуансон

Горизонтальний диск обертається з частотою 6 – 8 об/хв, періодично зупиняючись. При першій зупинці пуансон опускається у нижнє положення, а матриця заповнюється рафінадною кашкою (а). При наступному повороті над матрицею розташовується плита 4 і відбувається стиснення продукту пуансоном (б). Далі пуансон виштовхує готовий брикет (в), який спеціальним пристроєм зсувається на транспортуючий пристрій. У положенні диска (г) матриця готова до заповнення наступною порцією рафінадної кашки.

#### **Питання для самоконтролю:**

1. З якою метою проводять пресування харчових продуктів?

2. Поясніть фізичну суть процесу відтискання рідини.
3. Будова та принцип роботи шнекового преса для отримання олії.
4. Будова та принцип роботи макаронного преса.
5. Як класифікують екструдери? Поясніть будову та принцип роботи черв'ячного екструдера.
6. Які фактори визначають процес пресування диспергованого продукту?
7. Поясніть проведення процесу брикетування у карусельному пресі.

## Тема 5. ПРОЦЕС ПЕРЕМІШУВАННЯ

1. Загальна характеристика процесу. Перемішування в рідкому середовищі.
2. Перемішування пластичних мас.
3. Перемішування сипких мас.  
(матеріал укладено на основі джерел [2, 3, 5-11, 12, 13, 14, 17, 20]).

1. **Перемішуванням** називається процес взаємного переміщення частинок однієї речовини в іншій з метою їх рівномірного розподілу за всім об'ємом, який переміщується. Перемішування двох і більше сипких матеріалів є механічним процесом, а перемішування рідких та пластичних середовищ – гідромеханічним. Перемішування може бути вільним або вимушеним. Вільне перемішування може здійснюватися за рахунок молекулярної дифузії, різниці густин або температур у різних шарах рідини чи під впливом цих факторів одночасно.

У харчовій промисловості перемішування матеріалів застосовується для здійснення наступних технологічних процесів:

- приготування розчинів;
- приготування емульсій та суспензій;
- інтенсифікація теплових, хімічних і біохімічних процесів;
- обробка продуктів з метою надання їм визначеної консистенції;
- проведення фізико-хімічних процесів, наприклад, сатурації, кристалізації;
- підігрівання рідкої системи у випадку подачі в неї гострої пари;

Перемішування здійснюється у спеціальних машинах, які називаються змішувачами (мішалками), або безпосередньо в апаратах, де відбуваються масообмінні, теплообмінні, хімічні, біохімічні процеси, що обладнуються пристроями для перемішування – мішалками.

Машини і апарати для перемішування рідких харчових продуктів широко застосовується в кондитерській, хлібопекарній, макаронній, виноробній, вітамінній, пивоварній та інших галузях харчової промисловості.

Рідкі харчові продукти перемішують механічним способом, в трубопроводах, циркуляцією або стиснутим повітрям.

У **інжекторних змішувачах** одна з рідин з великою швидкістю проходить через сопло 1, створюючи розрідження в навколишньому просторі. Сюди відсмоктується інша рідина через трубопровід 2, яка інтенсивно перемішується з першою. Ефективність перемішування можна покращити використанням спіральної насадки 3.

**Циркуляційне перемішування** здійснюється багаторазовим перекачуванням рідини по контуру з допомогою насоса або сопла. У якості циркуляційного насосу використовують відцентровий або струминний. Циркуляційний спосіб не завжди придатний, так як рідина, яка проходить через насос та трубопроводи охолоджується, що часто є не бажаним.

**Пневматичне перемішування** здійснюється в апаратах, які в якості перемішувачів обладнуються газорозподільними перфорованими решітками, пористими плитками або барботерами. Барботер – це труба з отворами або сіткою, встановлена біля дна посудини. У барботер під тиском подається повітря, інертний газ або водяна пара, які виходячи з отворів труби у вигляді багато чисельних струмин в різні боки, захоплюють за собою частинки рідини. Інтенсивність змішування зростає із зростання тиску повітряного потоку.

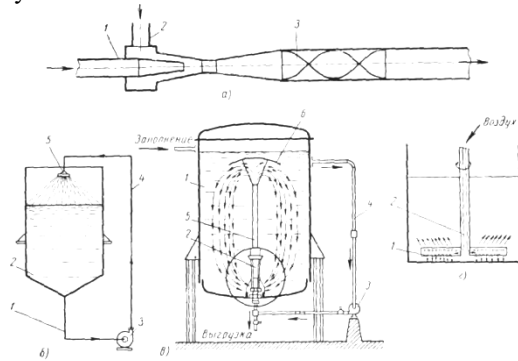


Рисунок 5.1 – Схеми перемішування рідких харчових продуктів:  
 а) інжектором із спіральною насадкою: 1 – сопло; 2 – трубопровід;  
 3 – спіральна насадка; б) схема циркуляційного перемішування з допомогою насоса: 1 – всмоктуюча труба; 2 – корпус; 3 – насос; 4 – нагнітаюча труба;  
 5 – розбризкуюча головка; в) схема циркуляційного перемішування з допомогою сопла: 1 – корпус; 2 – сопло; 3 – насос; 4 – всмоктуюча труба;  
 5 – нагнітаюча труба; 6 – відбійник; г) схема горизонтальної повітряної мішалки з лопатями: 1 – пустотіла горизонтальна лопать; 2 – вал

**Механічні мішалки**, які застосовуються в харчових виробництвах, можуть бути розділені на три основні групи: лопатеві, пропелерні і турбінні.

В залежності від характеру створеного ними потоку механічні мішалки є з тангенціальним, радіальним, осьовим і змішаним потоком рідини.

**Лопатеві мішалки** являють собою механічно перемішуючі пристрої з лопатями прямокутного січення, перпендикулярними чи нахиленими до осі обертання. Їх застосовують для перемішування рідин з помірною в'язкістю.

Переваги лопатевих мішалок: їх простота і дешевизна; недоліки: незначне осьове переміщення рідини, обумовлене характером створеного ними потоку і можливість їх застосування для рідини невеликої в'язкості.

За конструкцією лопатеві мішалки розділяють на мішалки з горизонтальними і вертикальними посудинами; листові, гребінчасті, якірні, рамні, решітчасті, комбіновані.

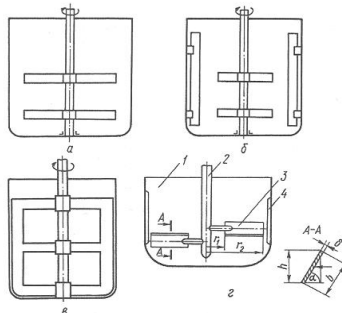


Рисунок 5.2 – Схеми апаратів з лопатевими мішалками:

- а) з парними лопатями; б) з відбивними перегородками; в) рамна;  
 г) з несиметрично розміщеними похилими лопатями та перегородками:  
 1 – посудина; 2 – вал; 3 – лопать; 4 – перегородка

**Якірними** мішалками називаються лопатеві мішалки, форма яких відповідає формі посудини, частіше всього сферичній. Вони застосовуються для перемішування середовищ, які виділяють осад. Якірна мішалка складається з циліндричної посудини, якірної лопаті на вертикальному валу і приводу.

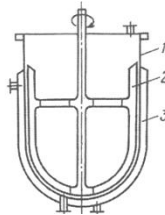


Рисунок 5.3 – Схема якірної мішалки:

- 1 – циліндрична посудина; 2 – якірна лопать; 3 – парова або водяна оболонка

Ефективне перемішування матеріалів у великих посудинах забезпечують лопатеві **планетарні мішалки**. Це лопатеві мішалки, які ексцентрично розташовані в посудині і приводяться в рух планетарним механізмом. Горизонтальні лопаті здійснюють подвійний рух: навколо вала і навколо центральної осі мішалки. Завдяки планетарному руху лопатей весь вміст посудини послідовно дотикається з лопатями.

**Пропелерні мішалки.** Особливість змішування рідин пропелерними мішалками полягає в багаторазовому переміщенні через пропелерну лопать всього об'єму рідини в посудині. Робочим органом служить гвинт (пропелер), насаджений на вертикальний або горизонтальний вал. Пропелерна лопать являє собою частину гвинтової поверхні, нахиленої до горизонту під кутом  $\alpha$ , який змінюється в напрямку від осі обертання до краю лопаті (або навпаки) від  $0$  до  $90^\circ$ .

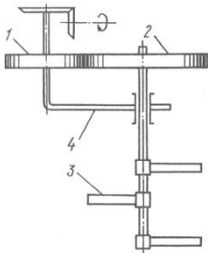


Рисунок 5.4 – Планетарна мішалка:

1 – ведуча шестерня; 2 – зубчасте колесо-сателіт; 3 – лопать; 4 – ведучий вал

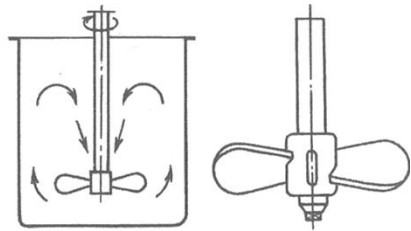


Рисунок 5.5 – Схема пропелерної мішалки

Діаметр гвинта складає від  $1/3$  до  $1/4$  діаметра посудини. Гвинти застосовують дво- і трилопатеві. Частота обертання пропелерних мішалок  $150 - 1000$  об/хв. Їх доцільно застосовувати для перемішування помірно в'язких рідин. Недоліком є складність їх розрахунку, проектування і виготовлення, а також залежність ефективності перемішування від форми посудини і розміщення мішалки в апараті.

Пропелерні мішалки рекомендується застосовувати в посудинах з випуклим дном, так як в посудинах з плоским та ввігнутих дном перемішування значно погіршується.

**Турбінні мішалки.** Вони являють собою робоче колесо водяної турбіни з лопатками, які обертаються на вертикальному валу.

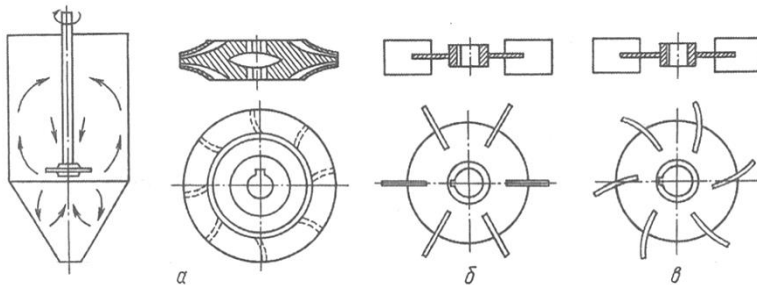


Рисунок 5.6 – Схема турбінної мішалки:

- а) закритого типу; б) відкритого типу з прямими лопатями;  
в) відкритого типу із загнутими лопатями*

Турбінні мішалки застосовують для змішування рідин різної в'язкості (до 500Пас). В харчовій промисловості турбінні мішалки застосовують для інтенсивного перемішування при приготуванні розчинів, гідрогенізації жирів, для хімічних реакцій, а також в якості емульгаторів і змішувачів при приготуванні і охолодженні пастоподібних продуктів. При розмішуванні в'язких рідин лопатки турбінок повинні бути направлені в бік, протилежний обертанню колеса.

**2. Перемішування пластичних мас.** Машина для перемішування пластичних харчових продуктів застосовується в хлібопекарній і кондитерській промисловості для замішування тіста, для перемішування і збивання кондитерських мас (кремів, вершків і т.д.), перемішування шоколадних мас та різних начинок, м'ясній та консервній промисловості – для перемішування м'ясних та овочевих фаршів і т.п.

При перемішуванні пластичних мас вирішуються і інші завдання – розминання маси, насичення її повітрям і надання певних фізико-механічних властивостей. Якість перемішування залежить від дисперсності та однорідності продуктів, що перемішуються, їх структури та розподілення компонентів.

Машина для перемішування пластичних харчових продуктів можна розділити на дві групи: періодичної та безперервної дії.

Для періодичного змішування застосовуються змішувач з обертаючими лопатями, який являє собою корпус із дном у формі двох напівциліндрів, у якому назустріч один одному обертаються два горизонтальні вали з лопатями. Найчастіше використовують Z-подібну форму лопатей.

У шнекових лопатевих змішувачах, які використовуються для перемішування високов'язких матеріалів робочими органами є одинарні або парні вали-шнеки з T –подібними лопатями (б) , які обертаються у корпусі з

циліндричним днищем, здійснюючи одночасно перемішування та транспортування продукту.

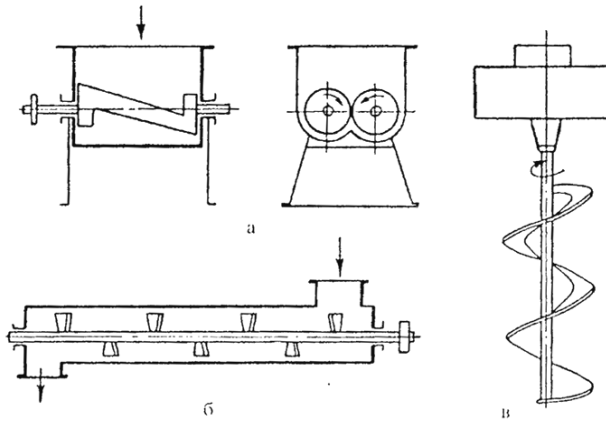


Рисунок 5.7 – Перемішувачі для перемішування пластичних мас: а) з обертаючими лопатями; б) шнековий з T-подібними лопатями; в) стрічковий

Стрічкові змішувачі (в) відрізняються лише формою лопатей, виготовлених із плоских стрічок, зігнутих по гвинтовій лінії і закріплених на валу змішувача.

Крім того змішувачі пластичних мас можна класифікувати за формою посудини, в якій проходить перемішування. За цією ознакою змішувачі діляться на:

- змішувачі з вертикальною посудиною;
- змішувачі з горизонтальною посудиною;
- змішувачі з чашею.

В змішувачах з вертикальною посудиною застосовують мішалки з горизонтальними і вертикальними лопатями.

До змішувачів з горизонтальними посудинами відносять роторні, лопатеві, шнекові, гвинтові та валкові змішувачі.

**3. Перемішування сипких мас.** Змішувачі для сипких продуктів широко застосовуються в борошномельній, комбикормовій, кондитерських, харчоконцентратній галузях.

Метою змішування сипких продуктів є отримання однорідної маси в процесі виробництва харчових продуктів.

Ефективність змішувача сипких продуктів визначається часом, який необхідний для отримання потрібної степені змішування. На процес змішування впливають:

- густина (питома вага) продуктів, які змішуються;
- величина і розподілення великих частинок компонентів суміші;
- вологість продуктів, які змішуються;
- форма частинок.

Змішувачі сипких мас за режимом роботи ділять на машини безперервної та періодичної дії. До змішувачів безперервної дії відносять відцентрові, ударні та шнекові. До змішувачів періодичної дії відносять лопатеві, барабанні та шнекові.

Основні типи барабанних змішувачів зображені на рис.5.8.

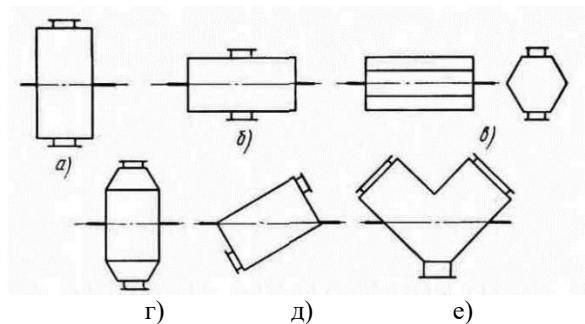


Рисунок 5.8 – Схеми барабанних змішувачів:

*а) і г) барабанні змішувачі з вертикальним барабаном, який обертається на горизонтальному валу; б) і в) з горизонтальним барабаном, який обертається на горизонтальному валу ( в – шестикутного сідлення); г) барабан з конічним дном; д) барабанний змішувач типу «п'яна бочка»; е) з подвійною посудиною V-подібної форми.*

Найпоширенішими у харчовій промисловості є шнекові змішувачі різних конструкцій, робочим органом яких є один або декілька шнеків. Шнековий змішувач періодичної дії (рис.5.8, а) має дві вертикальні труби 2 і 4, розташовані одна під іншою на деякій відстані, що розділяє змішувач на дві частини. Під час обертання шнека 3, встановленого всередині труб, сипкі продукти, завантажені у змішувач піднімаються вгору нижньою та верхньою трубою та перемішуються.

Змішувач безперервної дії (рис.5.8, б) застосовується для змішування різних сортів борошна у хлібопекарській промисловості. Він складається з металічної ємності 5, яка розділена на три секції, у нижній частині кожної секції розташований шнек. Борошно трьох сортів завантажується у секції, звідки шнеками 1, 2, 3 з різною частотою обертання направляється до збірного шнека 6, який змішує борошно та направляє на подальшу переробку.

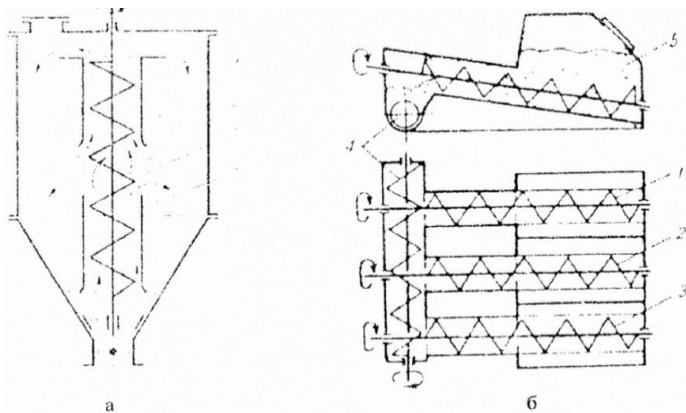


Рисунок 5.8 – Схеми шнекових змішувачів:  
 а) періодичної дії; б) безперервної дії.

**Питання для самоконтролю:**

1. Який процес називається процесом перемішування?
2. Назвіть основні способи перемішування рідких харчових продуктів.
3. Охарактеризуйте мішалки для механічного перемішування рідких харчових продуктів.
4. Які цілі забезпечуються при перемішуванні пластичних мас?
5. Будова та принцип роботи шнекових змішувальних органів для отримання пластичних мас.
6. Від чого залежить ефективність роботи змішувачів сипких продуктів?
7. Основні види змішувачів сипких продуктів.

**Тема 6. РОЗДІЛЕННЯ НЕОДНОРІДНИХ СИСТЕМ**

1. Класифікація і характеристика неоднорідних систем.
2. Загальна характеристика процесу осадження. Відстоювання. Апарати для проведення процесу відстоювання.
3. Осадження в полі дії відцентрових сил.
4. Загальна характеристика процесу фільтрування. Апаратура для проведення процесу фільтрування.  
 (матеріал укладено на основі джерел [2, 3, 5-11, 12, 13, 14, 17, 20]).

1. Неоднорідними називаються системи, які складаються з двох або декількох фаз. Будь-яка неоднорідна бінарна система складається з дисперсної (внутрішньої) фази і дисперсійного середовища або суцільної (зовнішньої) фази, в якій розподілені частинки дисперсної фази.

В залежності від фізичного стану фаз розрізняють: суспензії, емульсії, піни, пили, дими, тумани.

**Суспензії** – неоднорідні системи, які складаються з рідини і зважених в ній твердих частинок. В залежності від розмірів твердих частинок суспензії поділяють на грубі ( $> 100\mu\text{м}$ ), тонкі ( $0,5-100$ ), каламуть ( $0,1 \div 0,5$ ).

**Емульсії** – системи, які складаються з рідини і розподілених в ній крапель іншої рідини, які не змішуються з парою.

**Піни** – системи, які складаються з рідини і розподілених в ній бульбашок газу. Ці системи за своїми властивостями близькі до емульсій.

**Пили і дими** – системи, які складаються з газу і розподілених в ньому частинок твердої речовини. Пили утворюються при механічному розподілі частинок в газі (при подрібненні, змішуванні і транспортуванні твердих матеріалів). Розміри твердих частинок пилу складають  $3-70\ \mu\text{м}$ . Дими отримують в процесі конденсації парів (газів) при переході їх в рідкий або твердий стан, при цьому утворюються тверді, зважені в газі частинки розмірами  $0,3-5\ \mu\text{м}$ .

При утворенні дисперсної фази з частинок рідини приблизно таких самих розмірів, виникають системи, які називають туманами.

Процеси, в результаті яких утворюються неоднорідні системи:

*Механічні процеси:* подрібнення цукру-рафінаду, зерна на борошномельних заводах і в підготовчих цехах спиртових і пивоварних заводів утворюється цукровий, борошняний пил. При перемішуванні сипких матеріалів з рідинами утворюються суспензії: крохмальне молоко, пивні заміси. При митті коренеплодів утворюються суміші води з частками глини, та іншими складових ґрунту.

На молочних заводах шляхом розпилювання молока утворюється суміш повітря і крапель молока.

*Теплові процеси.* Мають місце у випарних апаратах для випарювання цукрових розчинів, барди, молока, а також в перегінних апаратах.

*Хімічні процеси.* На цукрових заводах для очистки дифузійного соку, його обробляють вапняним молоком, а потім вуглекислим газом. В результаті утворюється суспензія - сатураційний сік, що складається із розчину цукру і твердих частинок карбонату кальцію  $\text{CaCO}_3$  ( $\text{CaO} + \text{CO}_2$ ).

*Дифузійні процеси.* При одержанні кристалічного цукру або кристалічної глюкози при випарюванні до перенасичення сиропів утворюються суміші кристалів сахарози або глюкози з міжкристалічним розчином.

*Біологічні процеси:* молоко-емульсія, що складається з води і 3-4% жирних кульок  $1-10\mu\text{м}$ . Дріжджові клітки розміром  $\approx 7\ \mu\text{м}$  з суслом також утворюють неоднорідну систему.

На виробництві часто приходиться розділяти неоднорідні системи на складові. Методи розділення неоднорідних сумішей вибирають в залежності

від характеру складових частин системи і стану фаз і з врахуванням фізичних та хімічних властивостей середовища. Для розділення неоднорідних систем використовують осадження або відстоювання та фільтрування. Осадження можна здійснювати у полях: а) гравітаційному; б) відцентровому; в) електричному. Фільтрування здійснюють звичайно у полях: а) гравітаційному; б) відцентровому; в) поверхневих сил.

*Осадження* - це процес розділення, при якому зважені в рідині чи газі тверді або рідкі частини відділяються від суцільної фази під дією сил тяжіння, сил інерції чи електростатичних сил. Осідання, яке проходить під дією сили тяжіння називається відстоюванням. В основному відстоювання застосовується для попереднього, грубого розділення неоднорідних систем.

*Фільтрування* – процес розділення з допомогою пористої перегородки, яка здатна пропускати рідину або газ, але затримувати зважені в середовищі тверді частинки. Воно здійснюється під дією сил тиску чи відцентрових сил і застосовується для більш тонкого розділення суспензій і пилів.

Центрифугування – процес розділення неоднорідних систем під дією поля відцентрових сил. Відбувається в центрифугах, сепараторах, циклонах, його кінцевою задачею є отримання осаду з найменшим вмістом рідкої фази.

*Мокре розділення* – процес вловлювання зважених в газі частинок будь-якою рідиною. Воно проходить під дією сил тяжіння чи сил інерції і застосовується для очистки газів і розділення суспензій. При обробці суспензій мокре розділення використовують в комбінації з іншими способами розділення (промивка осадів в процесах відстоювання і фільтрування).

Ефект розділення – відношення кількості даного компонента, виділеного із дисперсійної фази, до його початкової кількості в суміші.

$$\eta = \frac{K_e}{K_n}, \quad (6.1)$$

де  $K_e$  - кількість виділеної речовини;

$K_n$  - кількість речовини в суміші до розділення.

2. При відстоюванні неоднорідних систем спостерігається поступове збільшення концентрації диспергованих частинок в апараті по напрямку зверху вниз.

Над шаром осаду утворюється зона згущеної суспензії (зона 2) в якій проходить стиснутий осад частинок, що супроводжується тертям між частинками і взаємними їх зіткненнями. При цьому дрібніші частинки гальмують рух крупніших, а частинки великих розмірів тягнуть за собою дрібні частинки, прискорюючи їх рух. В результаті спостерігаються тенденції до зближення швидкостей осадження частинок з близькими швидкостями в кожному січенні апарату, але різними швидкостями по його висоті.

Як видно з схеми утворюється ясно виражена межа між зоною стисненого осадження (зона 2) і зоною вільного осадження, яка знаходиться вище (зона 3), над якою розміщується освітлена рідина.

Швидкість осадження:

$$\omega_{oc} = \sqrt{\frac{4g \cdot d \cdot (\rho_r - \rho_c)}{3\rho_c \cdot \xi}} \quad (6.2)$$

Коефіцієнт опору середовища  $\xi$  буде залежати від характеру руху частинки.

Режим руху частинки визначається критерієм Рейнольдса  $Re$ , який для падаючої частинки знаходиться з рівняння:

$$Re = \frac{\omega_{oc} \cdot d \cdot \rho_c}{\mu}, \quad (6.3)$$

Якщо в рівняння (6.2) підставити  $\xi = \frac{24}{Re}$  для ламінарного режиму:

$$\omega_{oc} = \frac{d^2 \cdot g \cdot (\rho_r - \rho_c)}{18\mu} \quad (6.4)$$

Для турбулентного режиму:

$$\omega_{oc} = 5,45 \sqrt{d \frac{\rho_r - \rho_c}{\rho_c}} \quad (6.5)$$

Відстоювання є найдешевшим процесом з усіх процесів розділення неоднорідних систем. Відстоювання використовують в якості первинного процесу розділення, проведення якого часто дозволяє прискорити фільтрування чи центрифугування.

Відстоювання проводять в апаратах, які називаються відстійниками. Розрізняють апарати періодичної, напівнеперервної і неперервної дії, які в свою чергу діляться на однарусні, двоярусні і багатоярусні.

В апаратах періодичної дії (рис.9.1) неоднорідна суміш від початку і до кінця відстоювання залишається практично нерухомою. Подача суміші в апарат та видалення продуктів відстоювання з нього відбувається періодично.

Продуктивність відстійника:

$$V_c = \frac{V}{\tau_0} = \frac{h_0 \cdot F_0}{\tau_0}, \quad (6.6)$$

де  $V$  – об'єм освітленого продукту;

$\tau_0$  – час відстоювання.

Так як  $\frac{h_0}{\tau_0} = \omega_{oc}$  – швидкість осадження,

$$V_c = \omega_{oc} \cdot F \cdot \quad (6.7)$$

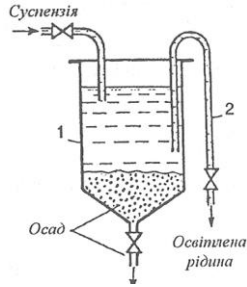


Рисунок 6.1 – Схема відстійника періодичної дії:

1 – циліндричний резервуар з конічним днищем; 2 – сифонна трубка

У відстійниках напівнеперервної дії суміш, що розділяється, на протязі деякого часу підводиться безперервно, рухається, розділяється, освітлений продукт відводиться безпосередньо, а осад виводиться періодично. Найчастіше відстійники напівнеперервної дії мають вигляд лотків і каналів з прямокутним січенням.

У відстійниках безперервної дії подача неоднорідної суміші і продуктів відстоювання здійснюється одночасно і безперервно. Одноярусний відстійник безперервної дії (рис.6.2) представляє собою циліндричну ємкість з конічним днищем та кільцевим лотком-водозливом 2 для відведення освітленої рідини.

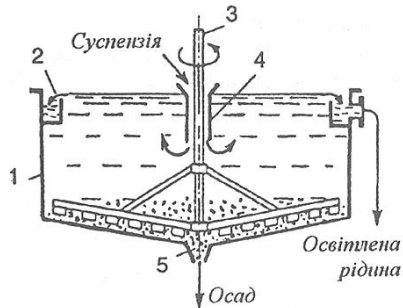


Рисунок 6.2 – Схема одноярусного відстійника з скребками:

1 – циліндричний резервуар; 2 – кільцевий лоток; 3 – вал із скребками;  
4 – центральна труба; 5 – вивантажувальний патрубок

У центрі ємкості встановлений вал 3 зі скребками, який повільно обертається. За допомогою скребок осад просувається по днищу від периферії до вивантажувального патрубку 5, розташованого у центрі ємкості. У виробництвах, де необхідні великі поверхні осадження, відстійники роблять багатоярусними. Наприклад, в цукровому виробництві для згущення сатураційних соків застосовується п'ятиярусний відстійник.

2. Відцентрове фільтрування. Центрифугування – процес розділення неоднорідних систем під дією поля відцентрових сил. Відбувається в центрифугах, сепараторах, циклонах, його кінцевою задачею є отримання осаду з найменшим вмістом рідкої фази. Відцентрове фільтрування складається з трьох періодів: утворення осаду, ущільнення осаду і механічного сушіння осаду.

Рушійною силою відцентрового фільтрування є відцентрова сила. Барабан центрифуги має отвори, внутрішня поверхня його покрита фільтруючою сіткою або тканиною з дрібними отворами. Дисперсна фаза, яка відкидається відцентровою силою, відкладається на фільтруючій поверхні барабана, утворюючи осад. Дисперсійна фаза проходить через пори цього осаду і через отвори фільтруючої перегородки і видаляється в прийомник від фільтрованої рідини.

Центрифуги застосовуються:

- в цукровому виробництві – для розділення утфелю на патоку і цукор і для його промивання;
- в крохмало – паточному виробництві – для відділення крохмалю від сокової води і зневоднення крохмалю;
- у виноробстві – для відділення мезги від виноградного сусла і для віджиму соку від м'якоті;
- в м'ясному виробництві – для відділення шквари від жирової суміші при витопці жирів;
- в плодоовочевій промисловості – для зневоднення свіжих овочів, для обробки томатної пульпи;
- в молочному виробництві – для зневоднення сиру, для відтискання молочного цукру.

Конструктивні особливості центрифуг – положення осі обертання ротора в просторі, будова ротора, будова і розташування опор вала ротора.

Важливий параметр, який характеризує центрифуги – прискорення відцентрового поля, яке створюється ротором. На практиці розглядають не прискорення відцентрового поля, а його безрозмірне відношення до прискорення поля тяжіння. Це відношення називають фактором розділення і визначається за формулою:

$$F_r = \frac{\omega^2 \cdot R}{g} \quad (6.8)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість обертання ротора,  $c^{-1}$ ;

$R$  – радіус ротора центрифуги, м;

$g$  – прискорення сили тяжіння,  $m/c^2$ .

В харчовій промисловості застосовуються фільтруючі центрифуги періодичної, напівнеперервної і неперервної дії.

В центрифугах періодичної дії (рис.6.3) робочий цикл складається з наступних операцій: розгону барабана, наповнення барабана суспензією, центрифугування, промивання і пропарювання осаду, підсушування осаду, гальмування, розвантаження. Допоміжні операції займають від 20 до 40% часу тривалості всього циклу. Особливо тривалою є операція вивантаження осаду, яке здійснюється вручну.

В центрифугах напівнеперервної дії нижня частина барабана має конічну форму. Кут нахилу стінок конуса барабана більший від кута природного скосу. Тому, після зупинки барабана осад сповзає вниз, де затримується запірним конусом. В період розвантаження конус підіймається і маса вивантажується через вивантажувальний люк.

До фільтруючих центрифуг відносять центрифуги з відцентровим розвантаженням, із шнековим розвантаженням і з пульсуючим поршнем. В центрифугах з відцентровим розвантаженням суспензія поступає по трубі, відкидається відцентровою силою до конічної поверхні і рухається вгору по ній.

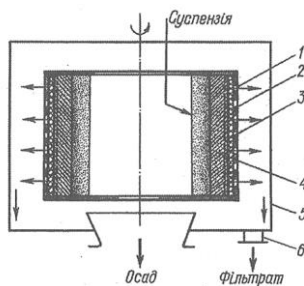


Рисунок 6.3 – Схема центрифуги:

1 – циліндрична обичайка; 2, 3, 4 – шар осаду, 5 – корпус;

6 – труба для відведення фільтрату

Товщина шару осаду регулюється циліндричною обичайкою, яка може підніматись і опускатись. Осад відкидається в кільцевий жолоб. Фільтрат відводиться по трубах, перегородка між якими дозволяє розділяти фільтрат на два сорти.

**Сепаратори** широко використовуються для виділення вершків з молока, дріжджів із дріжджового молока, освітлення пива, вина і т.п. У

харчовій промисловості використовуються сепаратори камерного та тарілчастого типів.

У камерному сепараторі емульсія входить у корпус барабана через центральну трубу, проходить між нижньою конічною перегородкою і дном барабана і потрапляє у робочу зону барабана. Під дією відцентрової сили емульсія розшаровується: важка рідина проходить над конічною перегородкою і відводиться крізь отвір, а легка рідина – під цією перегородкою і виводиться через інший отвір.

У тарілчастому сепараторі (рис.6.4) робоча камера – це корпус ротора 1, заповнений рядом встановлених одна над одною конічними вставками – тарілками 3, відстань між якими незначна. Важка фаза відкидається на внутрішню поверхню конічних тарілок, переміщається у периферійну частину ротора, проходить над верхньою конічною перегородкою і відводиться через отвір 5. Легка фаза витісняється до центра ротора і відводиться через канал.

Циклонні апарати завдяки дешевизні та простоті будови і обслуговування, порівняно невеликому опору і високій продуктивності є найрозповсюдженішим типом сухого механічного пиловловлювача.

Циклонні пиловловлювачі мають такі переваги:

- відсутність рухомих частин в апараті;
- надійне функціонування при температурах газів майже до 500°C без будь-яких конструктивних змін (якщо передбачається використання більш високих температур, то апарати можна виготовляти із спеціальних матеріалів);

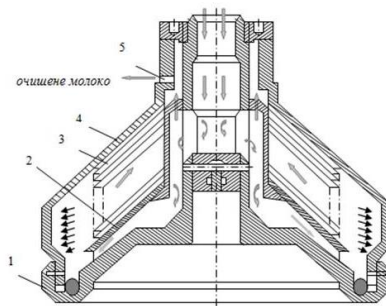


Рисунок 6.4 – Схема сепаратора

1 – корпус (дно) барабана; 2 – тарілотримач; 3 – пакет тарілок;  
4 – кришка барабана; 5 – канал виходу молока

- можливість вловлювання абразивних матеріалів при захисті внутрішньої поверхні циклонів спеціальним покриттям;
- пил вловлюється в сухому виді;

- гідравлічний опір апаратів майже постійний;
- апарати успішно працюють при високих тисках газів;
- пиловловлювачі надто прості у виготовленні;
- зростання запиленості газів не приводить до зниження фракційної ефективності очищення.

На рис. 6.5 наведено схематичне зображення потоків повітря в циклоні. Запилене повітря з великою швидкістю вводиться тангенціально в апарат. Сформований тут обертовий потік спускається кільцевим простором (утвореним циліндричною частиною циклона і вихлопною трубою) в його конічну частину, а потім, продовжуючи обертатися, виходить через вихлопну трубу. Частинки, маса яких достатньо велика, відділяються від потоку, досягають стінок циклона і під дією гравітаційних сил та захоплювальної дії осрової течії опускаються в бункер циклона. Чим більші частинки, завислі в потоці, і чим інтенсивніший (у відомих межах) обертовий рух, тим ефективніше очищається газ.

За конструктивним виконанням циклони відзначаються великою різноманітністю влаштування підводу запиленого газу (тангенціальний, тангенціальний похилий, спіральний, осьовий з напрямленим апаратом) і самого корпусу (циліндричний, перехідний в конус, з переважно розвинутою конічною частиною, конічний, з розширеною конічною частиною, з подвійною стінкою).

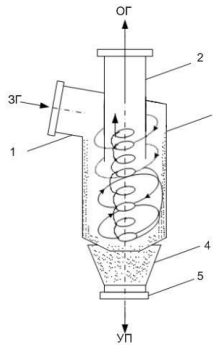


Рисунок 6.5 – Схематичне зображення потоків повітря в циклоні:  
 1 – вхідний патрубок; 2 – вихлопна труба; 3 – корпус;  
 4 – пилоосаджувальний бункер; 5 – пиловий затвор

**3. Фільтрування** є найпоширенішим методом розділення неоднорідних систем з рідким і газовим дисперсійним середовищем. При фільтруванні рідини або газу проходять через фільтрувальну перегородку, а завислі частинки затримуються на ній. Перевагою фільтрування над осадженням є те, що воно може забезпечити майже повне очищення рідини або газу від завислих частинок.

Фільтрування застосовують:

- для очищення рослинних олій від відбілювальних глин при виробництві маргарину;
- для очищення цукрових, вітамінних сиропів, фруктових-ягідних соків, пива, вина;
- для очищення повітря в сушильних установках, тощо.

Розрізняють фільтрування з відкладенням осаду (шламове) і фільтрування з забиванням пор фільтру (закупорне).

*Рушійною силою процесу фільтрування є різниця тисків перед фільтром і після нього. Інколи ця різниця створюється і відцентровими силами. Відповідно розрізняють фільтрування під дією перепаду тиску і відцентрове фільтрування.*

Під час фільтрування потік рідини проходить через фільтр. Кожен фільтр можна розглядати як шар зернистого матеріалу, частинки котрого можуть бути скріплені. Незалежно від цього пустоти між частинками (або пори) утворюють канали неправильної форми, по котрим рухається потік фільтрувальної рідини (рис.6.6).

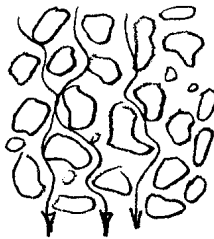


Рисунок 6.6 – Характер потоків фільтрувальної рідини.

Процес фільтрування може відбуватися:

- при постійній швидкості та змінному тиску;
- при постійному тиску та змінній швидкості;
- при змінних тиску і швидкості.

При фільтруванні під постійним тиском з часом накопичується на фільтрувальній перегородці осад, в результаті чого швидкість фільтрування зменшується. Якщо ж фільтрування проводити зі сталою швидкістю, то необхідно з часом збільшувати тиск, щоб через накопичення осаду на фільтрувальній перегородці підтримувати швидкість однаковою.

При фільтруванні з утворенням осаду пори фільтрувальної перегородки перекриваються шатрами із частинок, що захищають капіляри від забивання. Утворюється шар осаду, товщина якого збільшується пропорційно до часу фільтрування. При закупорному фільтруванні тверді частинки, що містяться в неоднорідній системі, проникають в капіляри, застрягають там, затримуючись за рахунок прилипання. Деякі частинки проходять, не затримуючись.

Основним завданням теорії фільтрування є визначення швидкості фільтрування в залежності від різних факторів, що впливають на процес. Швидкістю фільтрування називають кількість профільтрованої за одиницю часу рідини через одиницю площі фільтруючої поверхні:

$$v = \frac{V}{F \cdot \tau}, \text{ м/с} \quad (6.9)$$

де  $V$  - об'єм фільтрату,  $\text{м}^3$ ;  
 $F$  – площа фільтруючої поверхні,  $\text{м}^2$ ;  
 $\tau$  – час фільтрування, с.

Швидкість фільтрування залежить від структури осаду, товщини шару осаду, в'язкості та матеріалу, з якого виготовлена фільтруюча перегородка.

Рушійною силою процесу фільтрування є різниця тисків рідини над фільтруючим шаром  $p_1$  і на виході з цього шару  $p_2$ .

$$\Delta p = p_1 - p_2.$$

Апарати, призначені для фільтрування дисперсних систем називаються фільтрами. Фільтри класифікують:

- за способом ведення процесу: періодичної дії та неперервної дії.
- за конструктивними особливостями: рамні; камерні; мішкові; барабанні; дискові; стрічкові; патронні.
- за способом створення перепаду тисків по обидва боки фільтрувальної перегородки: апарати які працюють під тиском, створеним стовпом рідини; апарати які працюють під тиском, створеним насосом; апарати які працюють під вакуумом.

Розглянемо конструктивні особливості апаратів для фільтрування. Найпростішими є піскові фільтри періодичної дії, які працюють під тиском стовпа суспензії над фільтрувальною перегородкою (рис.6.7).

Пісковий фільтр застосовують для фільтрування води, горілки і інших рідин коли вміст твердої фази незначний і осад немає цінності. У циліндричному корпусі 1 між металевими 2 і 3 знаходиться шар дрібного (внизу) і шар крупного (вгорі) кварцового піску, розділених тканиною 4.. Тканину розміщують на нижню сітку, щоб пісок не потрапив у фільтрат і на верхню сітку, щоб не забруднити пісок. Перевага – простота конструкції та висока якість фільтрування.

Патронний фільтр (рис.6.8) періодичної працює під тиском.

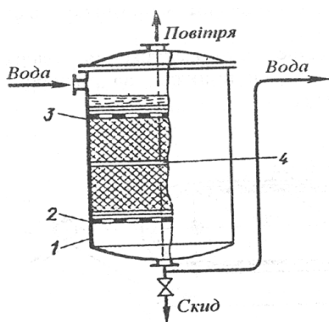


Рисунок 6.7 – Схема піскового фільтра:

1 – циліндричний корпус; 2, 3 – металева сітка; 4 – тканина

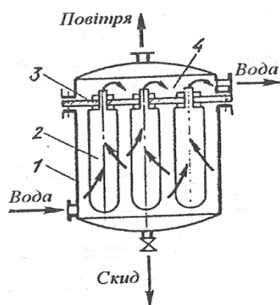


Рисунок 6.8 – Схема патронного фільтра:

1 – циліндричний корпус; 2 – патрони з фільтрувальною поверхнею; 3 – трубна решітка; 4 – верхня камера

Він складається з циліндричного корпусу 1, трубної решітки 3, в якій закріплені патрони 2 з дротяною, керамічною або тканинною фільтрувальною поверхнею. Принцип дії полягає у тому, що суспензія під тиском нагнітається у простір між патронами, фільтрується через стінки патронів, а потім фільтрат збирається у верхній камері 4 і виводиться з апарата через патрубок.

Рамний фільтр-прес (рис.6.9) працює під надлишковим тиском, що створює насос (0,3-0,4 МПа).

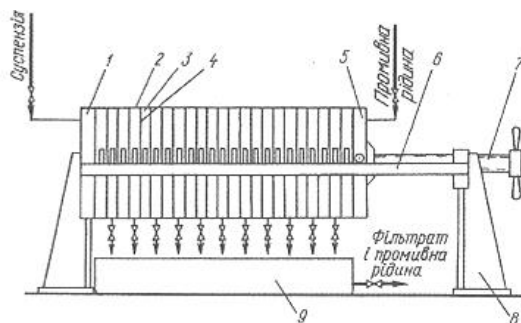


Рисунок 6.9 – Схема рамного фільтр-преса:

1 – нерухома плита; 2 – плита; 3 – рама; 4 – фільтрувальні перегородки; 5 – рухома плита; 6 – балка; 7 – затискний гвинт; 8 – опора; 9 – збірник фільтрату і рідини

Із фільтрів неперервної дії найбільш поширеними є барабанні, дискові та стрічкові вакуум-фільтри. Стрічковий вакуум-фільтр (рис.6.7) складається з двох барабанів 2, які охоплює перфорована нескінченна стрічка 1.

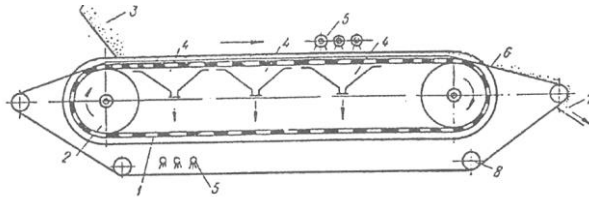


Рисунок 6.10 – Схема стрічкового вакуум-фільтра.

- 1 – перфорована стрічка; 2 – барабан; 3 – завантажувальний лоток;  
 4 – збірник фільтрату (вакуум-камера); 5 – розпилювач;  
 6 – фільтрувальна тканина; 7 – вивантажувальний лоток; 8 – ролик

Поверх стрічки знаходиться фільтрувальна тканина 6, для натягування якої змонтовані ролики 8. Суспензія потрапляє на верхню частину стрічки, фільтрат проходить через фільтрувальну тканину 6 та отвори стрічки і всмоктується вакуум камерами 4. Осад транспортується вздовж стрічки, промивається промивною рідиною, яка подається розпилювачами 5 і сходить з стрічки на лоток 7. Промивна рідина відсмоктується вакуум-камерою 4.

**Питання для самоконтролю:**

1. Що таке неоднорідна система? Класифікація неоднорідних систем.
2. При проведенні яких процесів утворюються неоднорідні системи?
3. В чому полягає проведення процесу відстоювання?
4. Основні види відстійників.
5. Будова та принцип роботи центрифуги.
6. Проведення процесу розділення неоднорідних систем в сепараторі.
7. В чому полягає проведення процесу фільтрування неоднорідних систем?
8. Будова та принцип роботи фільтрів періодичної дії.
9. Будова та принцип роботи фільтрів неперервної дії.

**Тема 7. ТЕПЛОВА ОБРОБКА ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ І МАТЕРІАЛІВ. ПРОЦЕС КОНДЕНСАЦІЇ.**

1. Загальні відомості про теплообмін.
2. Призначення та класифікація теплообмінних апаратів.
3. Будова та принцип роботи теплообмінних апаратів.

4. Основи розрахунку теплообмінників.
5. Загальні відомості про конденсацію. Поверхневі конденсатори.
6. Конденсатори змішування.  
(матеріал укладено на основі джерел [2, 3, 5, 8, 9, 13, 14, 17, 18, 19, 20]).

1. Тепловими називаються технологічні процеси, швидкість протікання яких характеризується швидкістю підведення або відведення тепла. Рушійною силою будь-якого теплового процесу є різниця температур більш нагрітого і менш нагрітого тіл, при наявності якої тепло самовільно, у відповідності із другим законом термодинаміки, переходить від більш нагрітого до менш нагрітого тіла.

До теплових процесів належать нагрівання, охолодження, конденсація, випаровування, випарювання.

Нагрівання – це процес, при якому відбувається підвищення температури матеріалів, що переробляються, шляхом підводу до них тепла.

Охолодження – це процес, що характеризується зниженням температури матеріалів, що переробляються, шляхом відводу від них тепла.

Конденсація – процес зрідження пари або газів шляхом відводу від них тепла.

Випаровування – це процес переходу у газоподібний стан якої-небудь рідини шляхом підводу до неї тепла.

Випарювання – процес згущення розчинів при кипінні шляхом відведення частини води у вигляді пари.

При протіканні теплових процесів відбувається теплообмін між середовищами. Теплообміном називається перенесення енергії у формі тепла, яке проходить між тілами, які мають різну температуру.

Тіла, які приймають участь в теплообміні називаються теплоносіями.

Існує три способи переносу теплоти: теплопровідність, конвекція, випромінювання або радіація. Теплопровідністю називається перенесення тепла внаслідок неупорядкованого (теплого) руху мікрочастинок, які безпосередньо дотикаються один з одним. Теплопровідність є основним видом поширення тепла в твердих тілах.

Конвекцією називають перенесення тепла внаслідок руху і перемішування макроскопічних об'ємів газу чи рідини.

Теплове випромінювання – це процес поширення електромагнітних коливань з різною довжиною хвиль, обумовлений тепловим рухом атомів чи молекул тіла, яке випромінює.

Залежно від цілей технології в харчовій промисловості проходять такі теплові процеси:

- а) нагрівання і охолодження однофазних та багатofазних середовищ;
- б) конденсація парів хімічно однорідних рідин і їх сумішей;

- в) конденсація водяних парів із пароповітряних сумішей;
- г) випаровування води в парогазове середовище;
- д) кипіння рідин.

### Основні рівняння теплопередачі.

Тепловий потік. Це кількість теплоти, що проходить за одиницю часу через довільну поверхню.

Відношення теплового потоку до одиниці площі ізотермічної поверхні називають поверхневою густиною теплового потоку:

$$q = \frac{Q}{F}, \quad (7.1)$$

де  $q$  – поверхнева густина теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>;

$Q$  – тепловий потік, Вт;

$F$  – площа ізотермічної поверхні, м<sup>2</sup>.

При розрахунку теплопередачі через циліндричні поверхні, наприклад, труби застосовуються лінійна густина теплового потоку:

$$q = \frac{Q}{l}, \quad \text{Вт/м.}$$

Площу теплообмінного апарата можна визначити за формулою:

$$F = \frac{Q}{q}, \quad (7.2)$$

Тепловим потоком називають кількість теплоти, що віддається гріючим теплоносієм і приймається тим, який нагрівається, що може бути виражена рівнянням теплового балансу:

$$Q = M_1 \Delta i_1 = M_2 \Delta i_2, \quad (7.3)$$

де  $M_1$  і  $M_2$  – масові витрати гріючого і того, що нагрівається теплоносіїв, кг/с;

$\Delta i_1 = i_{1n} - i_{1k}$  – зменшення питомої ентальпії гріючого теплоносія, Дж/кг;

$i_{1n}, i_{1k}$  – початкове і кінцеве значення питомої ентальпії гріючого теплоносія, Дж/кг;

$\Delta i_2 = i_{2k} - i_{2n}$  – приріст питомої ентальпії теплоносія, який нагрівається, Дж/кг;

$i_{2n}, i_{2k}$  – початкове і кінцеве значення питомої ентальпії, Дж/кг.

При охолодженні однофазного середовища:

$$\Delta i_1 = \bar{c}_1 (t_{1n} - t_{1k}), \quad (7.4)$$

де  $c_1$  – середня питома теплоємність в інтервалі температур  $(t_{1n} - t_{1k})$ , Дж/кг;  
 $t_{1n}$  і  $t_{1k}$  – початкова і кінцева температури теплоносія, °С.  
 При фазовому перетворенні:

$$\Delta i_1 = r_k ; \quad \Delta i_2 = r_g \quad (7.5)$$

де  $r_k$  і  $r_g$  - питома теплота конденсації і ви паровування, Дж/кг.

Поверхнева густина теплового потоку у відповідності із законом теплопровідності Фур'є пропорційна градієнту температури в напрямку нормалі до ізотермічної поверхні:

$$q = -\lambda \nabla t, \quad (7.6)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності середовища, Вт/м·К;  
 $\nabla t$  – градієнт температури, К/м.

У відповідності із законом тепловіддачі Ньютона-Ріхмана поверхнева густина теплового потоку пропорційна температурному напору між поверхнею стінки і рухомим середовищем, яке її омиває:

$$q = \alpha \theta_c, \quad (7.7)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м<sup>2</sup>·К;  
 $\theta_c = |t_c - t|$  - різниця температур стінки та рухомого середовища, К.

Густина теплового потоку при передачі через розділяючу стінку пропорційна загальному температурному напору між теплоносіями:

$$q = K \Delta t, \quad (7.8)$$

де  $K$ - коефіцієнт теплопередачі, Вт/м<sup>2</sup>·К ;  
 $\Delta t = t_1 - t_2$  – відповідно температура гріючого та того, що нагрівається теплоносіїв, °С.

**Коефіцієнт теплопередачі та загальний термічний опір.** Розглянемо стаціонарну теплопередачу через плоску стінку.

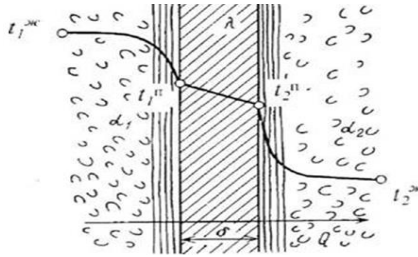


Рисунок 7.1 – Характер зміни температур при теплопередачі через плоску стінку

В результаті теплообміну між рідинами на обмежуючих поверхнях стінки встановляються деякі постійні температури  $t_1^n$  і  $t_2^n$  (режим стаціонарний), причому  $t_1^n > t_2^n > t_2$ .

При сталому процесі кількість тепла, що передається за одиницю часу через площу  $F$  від ядра потоку першого теплоносія до стінки, рівна кількості тепла, що передається через стінку і від стінки до ядра потоку другого теплоносія. Передача тепла від першого середовища проходить за рахунок конвективної тепловіддачі:

$$Q = \alpha_1(t_1^p - t_1^n) F \quad (7.9)$$

Режим стаціонарний. Тому цей потік пройде і через стінку. Передача тепла теплопровідністю від однієї поверхні стінки до іншої визначається за залежністю:

$$Q = \frac{\gamma}{\delta} \cdot (t_1^p - t_1^n) F \quad (7.10)$$

Конвективна тепловіддача від поверхні стінки до ядра потоку рідини холодного теплоносія:

$$Q = \alpha_2(t_2^n - t_2) F \quad (7.11)$$

В загальному вигляді кількість тепла, що передається через одношарову стінку, записується:

$$Q = \alpha_1(t_1^p - t_1^n) F = \frac{\gamma}{\delta} \cdot (t_1^p - t_1^n) F = \alpha_2(t_2^n - t_2) F \quad (7.12)$$

Із попередніх співвідношень виразимо різницю температур (витрати, передачу) середовищ, що стикаються:

$$t_1^p - t_1^n = \frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{Q}{F};$$

$$t_1^p - t_2^n = \frac{\delta}{\gamma} \cdot \frac{Q}{F};$$

$$t_2^n - t_2^p = \frac{1}{\alpha_2} \cdot \frac{Q}{F}.$$

Складення цих рівнянь дозволить виключити поки що невідомі нам температури поверхонь шарів  $t_1^n$  та  $t_2^n$  і дає можливість отримати розрахункове рівняння для обчислення кількості тепла, що передається:

$$t_1^p - t_2^p = \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\gamma} + \frac{1}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{Q}{F}.$$

Із цього рівняння визначимо Q:

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\gamma} + \frac{1}{\alpha_2}} (t_1^p - t_2^p) F.$$

Коефіцієнт теплопередачі:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (7.13)$$

де  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  – коефіцієнти тепловіддачі на 1-й та 2-й ділянках, Вт/м<sup>2</sup>·К.

2. Теплообмінниками називають апарати, в яких проходить теплообмін між робочими середовищами незалежно від їх технологічного чи енергетичного призначення (підігрівачі, випарні апарати, конденсатори, пастеризатори, випарювачі).

Класифікація теплообмінників:

– за способом передачі тепла: теплообмінники змішування, в яких робочі середовища безпосередньо дотикаються або перемішуються і поверхневі теплообмінники – рекуператори, в яких тепло передається через поверхню нагрівання;

– за основним призначенням: підігрівачі, випарювачі, холодильники, конденсатори;

– залежно від виду робочих середовищ є теплообмінники: рідинні – при теплообміні між двома рідкими середовищами; паро рідинні – при теплообміні між паром і рідиною; газорідинні – при теплообміні між газом і рідиною;

– за тепловим режимом є теплообмінники періодичної дії, в яких тепловому обробітку піддають визначену порцію продукту, і неперервної дії, які характеризуються постійністю теплового режиму і витрати робочих середовищ, які протікають через теплообмінник.

В якості теплоносія найбільш широко застосовують насичену або трохи перегріту пару. В змішувальних апаратах пару найчастіше барботують в рідину, при цьому конденсат пари змішується з продуктом (це не завжди бажано). В поверхневих апаратах пара конденсується на поверхні нагрівання і конденсат видаляється окремо від продукту за допомогою водовідводів.

Рідинне підігрівання менш інтенсивне в порівнянні з паровим і відрізняється змінною температурою, яка знижується. Перевагою застосування водяної пари та рідини є регулювання процесу і зручність транспортування рідини. Недоліком парового і водяного нагрівання є швидке зростання тиску з підвищенням температури (обмеж. 150 - 160°)

Широко застосовують нагрівання гарячими газами і повітрям (до 300 - 1000°С) в печах, сушильних установках. Газовий обігрів має ряд недоліків: важкістю регулювання і транспортування теплоносія, низькою інтенсивністю теплообміну, забрудненням поверхні апаратури при використанні паливних газів.

В холодильній техніці використовують ряд холодоагентів повітря: повітря, вода, розсолу, аміак, вуглекислота, фреон та ін.

Оболонкові теплообмінники застосовують для періодичного нагрівання чи охолодження. Ці апарати мають циліндричні, сферичні чи плоскі подвійні стінки – водяні чи парові оболонки, через які проходить теплообмін. Вони характеризуються низькими коефіцієнтами теплопередачі і низькими значеннями коефіцієнтів тепловіддачі зі сторони продукту.

Кожухотрубні теплообмінники можуть бути одноходовими, багатходовими, з U – подібними трубками і плаваючою головою.

Одноходовий багатотрубний теплообмінник (рис. 7.2) являє собою пучок трубок 3 розміснених в циліндричній камері – кожусі. Між трубним простором є середини камери. Трубки ввальцьовані в трубні решітки 2, які обмежують камеру з обох сторін. До трубних решіток 2 кріпляться розподільчі коробки 5 з патрубками 4 для випуску робочої рідини, яка протікає в середині трубок 3. Камера має патрубки 4 для підведення і відведення другого робочого середовища (пари). Теплообмінник встановлюються на опорах 6.

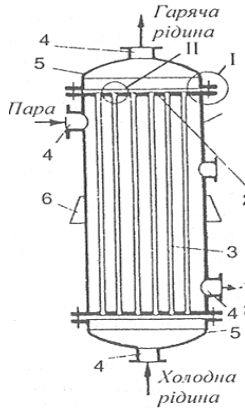


Рисунок 7.2 – Схема кожухотрубного теплообмінника:  
 1 – корпус; 2 – трубна решітка; 3 – трубка; 4 – патрубок;  
 5 – розподільча камера; 6 – опора

Трубні решітки наглухо приварюють або клепають до корпусу. Одна з решіток може бути не з'єднана з камерою. При цьому щілину між корпусом і решіткою ущільнюють гумовим кільцем.

Кожух теплообмінника циліндричної форми виготовляють з сталі.

Розподільчі коробки можуть бути виконані у вигляді випуклого днища з патрубками, які з'єднують з решіткою болтами. Застосовують також розподільчі коробки із з'ємною кришкою.

При встановленні теплообмінників потрібно звертати увагу на напрям руху робочих тіл. Гаряча вода повинна опускатись, а холодна підніматись. Одноходовий теплообмінник краще ставити вертикально, багатходовий – горизонтально.

Теплообмінники з плоскими поверхнями нагріву. До них відносяться ребристі, пластинчасті теплообмінники.

Ребристий теплообмінник використовують для нагрівання або охолодження газів і називається калорифером. Калорифер являє собою дві коробки, площини яких з'єднанні рядом трубок із зовнішньою ребристою поверхнею. Через вхідний патрубок поступає вода або пара, які заповнюють коробки і трубки; через патрубок В входить вода або конденсат, між ребрами трубок проходить повітря або газ, потік якого обмежений з боків калорифера плоскими металами С.

Пластинчасті теплообмінники широко використовуються в молочному, пивоварному, виноробному виробництвах для нагрівання, охолодження, пастеризації і стерилізації рідин. Переваги пластинчатих теплообмінників в порівнянні з іншими видами:

- більш високий коефіцієнт теплопередачі при порівняно невисоких гідравлічних опорах;
- для передачі заданого теплового навантаження необхідна менша поверхня теплообміну;
- компактність та зручність монтажу.

В пластинчастому теплообміннику (рис.7.3) поверхня теплообміну утворюється гофрованими паралельними пластинами, з допомогою яких створюється система вузьких каналів шириною 3 – 6мм з хвилястими стінками. Рідина, між якими проходить теплообмін, рухаючись в каналах між суміжними пластинами, омиваючи протилежні бокові сторони кожної пластини.

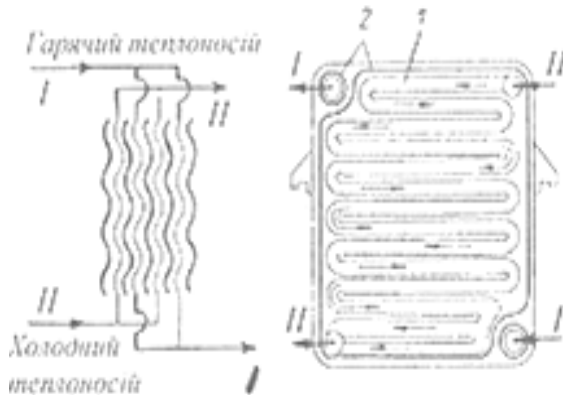


Рисунок 7.3 – Схема руху теплоносіїв у пластинчастому теплообміннику (а) та конструкція пластини (б): 1 - герметичний канал; 2 – прокладка

Є ще занурені трубчасті та орошувальні теплообмінники. Занурений трубчастий теплообмінник (рис. 7.4) має в більшості випадків вигляд змійовика, зануреного з посудиною з водою.

Орошувальний теплообмінник (рис.7.5) являє собою трубу з прямокутними витками, розміщеними у вертикальній і горизонтальних площинах. Зовні труби омиваються рідиною, яка витікає із щілини на верхній виток труби і стікає на нижні витки.

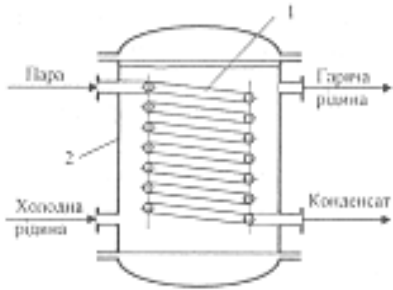


Рисунок 7.4 – Схема зануреного змішувального теплообмінника

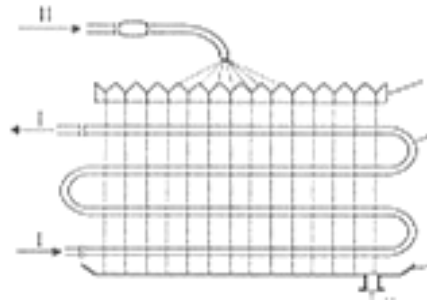


Рисунок 7.5 – Схема орошувального теплообмінника

### 3. Основи розрахунку поверхневих теплообмінників

За тиском насиченої пари  $p$  визначається температура його насичення  $t_s$ . Тоді різниці температур на початку і в кінці нагрівання:

$$\Delta t_\delta = t_s - t_n \quad \Delta t_m = t_s - t_k \quad (7.14)$$

Середня різниця температур:

$$\bar{\Delta t} = \frac{\Delta t_\delta - \Delta t_m}{2.31 \lg \frac{t_\delta}{t_m}} \quad (7.15)$$

Середня температура розчину, що нагрівається:

$$\bar{t} = t_s - \bar{\Delta t} \quad (7.16)$$

При середній температурі  $t$  і концентрації  $CP$  фізичні параметри визначають з довідкових таблиць, графіків і номограм.

Фізичні параметри: кінематична в'язкість  $\nu$ ,  $m^2/c$ ; густина  $\rho$ ,  $kg/m^3$ ; теплопровідність  $\lambda$ ,  $W/(m \cdot K)$ ; питома теплоємність  $c$ ,  $DJ/kg \cdot K$ ; температуропровідність  $a$ ,  $m^2/c$ ; критерій Прандтля  $Pr = \nu/a$ .

Теплове навантаження визначають з врахуванням теплових витрат:

$$Q = x M c (t_k - t_n) \quad (7.17)$$

де  $x = 1,02 - 1,05$  – коефіцієнт, який враховує плові витрати;

$M$  – масова витрата рідини,  $kg/c$ ;

$c$  – середня питома теплоємність розчину,  $DJ/kg \cdot K$ .

Витрата пари:

$$D = \frac{Q}{i'' - i'}$$

де  $i''$  та  $i'$  – питома ентальпія гріючої пари і її конденсату, Дж/кг;  
 $i' = [t_s - (2 \div 5)^\circ\text{C}] \cdot C_K = t' \cdot C_K$ ,  
 $i''$  – визначається з таблиць водяної пари при даному тиску;  
 $i'$  – середня температура конденсату;  
 $C_K$  – його питома теплоємність, Дж/кг·К.

Коефіцієнт тепловіддачі від пари, що конденсується до вертикальної стінки  $\alpha_1$  визначається з рівняння для ламінарно-хвильового руху конденсату:

$$Nu = 1,15 (Pr \cdot Ga \cdot Ku)^{1,4}. \quad (7.18)$$

В розмірній формі це рівняння має вигляд:

$$\alpha_1 = \frac{A_1}{\sqrt[3]{l \Delta t}} = \frac{A'_1}{\sqrt[3]{l q}} = f(q), \quad (7.19)$$

де  $\Delta t$  – різниця між температурами пари і стінки, К;

$q$  – густина теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>;

$l = H$  – висота трубки, м;

$A_1$  і  $A'_1$  – функції фізичних параметрів конденсату.

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки до розчину  $\alpha_2$  визначається за різними формулами залежно від режиму руху.

Для цього визначають критерії Рейнольда:

$$Re = \frac{\omega \cdot d_b}{\nu},$$

де  $d_b$  – внутрішній діаметр трубки.

При  $Re > 10 \cdot 10^3$   $\alpha_2$  визначають за формулою:

$$\alpha_2 = \frac{B \cdot \omega^{0,8}}{\alpha^{0,2}}, \quad (7.20)$$

Де  $B$  – функція фізичних параметрів для даної рідини в залежності від концентрації і температури.

Критерій Нусельта розраховують:

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} E_t E_b, \quad (7.21)$$

де  $E_t$  і  $E_b$  – поправочні функції, введені в уточнений розрахунок.

Термічний опір металевої стінки:

$$Re = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{d_3 - d_b}{2\lambda}, \quad (7.22)$$

Термічний опір при чистій поверхні нагрівання:

$$R_0 = R_l + R_c + R_2, \quad (7.23)$$

Термічний опір забруднення:

$$R_H = \frac{(1-\varphi)R_0}{\varphi}, \quad (7.24)$$

де  $\varphi$  – коефіцієнт використання поверхні нагрівання.  
Загальний термічний опір:

$$R = R_0 + R_H = R_0 / \varphi, \quad (7.25)$$

Так як значення поверхневої густини теплового потоку  $q$  і  $\Delta t_1$  невідомі, то ними потрібно задаватись з наступною перевіркою прийнятих значень, які повинні відповідати рівнянням:

$$q = K \Delta t \text{ або } \Delta t = qR = rUR, \quad (7.26)$$

де  $r$  – питома тепла конденсація, Дж/кг;

$U$  – масове напруження поверхні нагріву по конденсату грійочої пари, кг/с·м<sup>2</sup>.

Треба визначити густину теплового потоку  $q$ , що відповідає розрахованому раніше значенню  $\Delta t = \Delta \bar{t}$ . Для цього будують навантажувальну характеристику теплообмінника  $\Delta t = f(q)$  за декількома точками, які відповідають декільком довільно прийнятим значенням густини теплового потоку  $q'$ ,  $q''$  і ін. шукана розрахункова густина теплового потоку  $q_p$  знаходиться по кривій при  $t = \Delta \bar{t}$ ; потім по  $q_p$  визначається коефіцієнт теплопередачі:

$$K = \frac{q_p}{\Delta t}, \text{ або } R = \frac{\Delta \bar{t}}{q_p}.$$

Визначення поверхні нагріву із загальної формули теплопередачі:

$$Q = K \Delta \bar{t} F,$$

$$\text{Звідки} \quad F = \frac{Q}{q_p} = \frac{Q}{K \Delta \bar{t}}, \quad (7.27)$$

Цю поверхню нагріву необхідно розмістити у відповідності із заданою схемою теплообмінника і з врахування раніше прийнятих розмірів діаметра і довжини трубок.

**6. Конденсація** – це процес перетворення пари або газу у рідкий стан. Перехід пари у рідку фазу здійснюється під час її охолодження, а газу – стисненням та подальшим охолодженням.

У харчових виробництвах цей процес застосовують при використанні теплоти конденсації парів у рекуперативних теплообмінниках з паровим обігрівом, для зрідження спиртових парів та вуглекислого газу у спиртовому

виробництві, аміаку і фреонів у холодильних установках та створення розрідження у вакуумних установках.

Апарати, призначені для проведення процесу конденсації, називають конденсаторами. У якості холодоносія найчастіше використовують воду, рідше – повітря.

Конденсація пари відбувається при дотиканні її до стінки, що розділяє потік пари і омивається холодоносієм з протилежного боку або безпосередньо при контакті з холодною водою. У першому випадку апарати називають поверхневими конденсаторами, у другому – конденсаторами змішування.

Поверхневі конденсатори використовують у випадках, коли необхідно отримати конденсат у частому вигляді або створити розрідження в апаратах, конденсат вторинної пари яких є цінним продуктом. У таких апаратах теплота пари відводиться за рахунок нагрівання стінки, яка з протилежного боку омивається водою. Будова поверхневих конденсаторів аналогічна до будь-яких теплообмінних апаратів рекуперативного типу, але процес теплообміну є складнішим і відбувається у декілька стадій. Як приклад розглянемо вертикальний кожухотрубний конденсатор (рис.7.6), у якому проходить конденсація перегрітої пари та подальше охолодження конденсату.

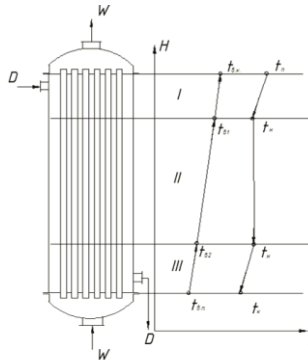


Рисунок 7.6 – Схема поверхневого конденсатора

Висоту такого апарату можна умовно розділити на три зони: I – охолодження перегрітої пари від початкової температури  $t_{п.п.}$  до температури насичення  $t_{н.}$ , II – зона конденсації насиченої пари при сталій температурі насичення  $t_{н.}$ , III – зона охолодження конденсату до заданої кінцевої температури  $t_{к.}$ . У цих умовно позначених зонах процеси різняться за фізичною суттю, тому площу поверхні теплообміну визначають для кожної зони окремо із врахуванням їх теплового навантаження, коефіцієнта

теплопередачі та середньої різниці температур, а потім знайдені значення сумують.

Витрату охолоджуючої води, середню різницю температур, коефіцієнт теплопередачі та площу поверхні теплообміну визначають із рівняння теплового балансу для кожної зони:

$$\text{I зона } Q_1 = xDc_{n,n}(t_{n,n} - t_n) = Wc_g(t_{g,k} - t_{g1}); \quad (7.28)$$

$$\text{II зона } Q_2 = xDr = Wc_g(t_{g1} - t_{g2}); \quad (7.29)$$

$$\text{III зона } Q_3 = xDc_k(t_n - t_k) = Wc_g(t_{g2} - t_{g,n}), \quad (7.30)$$

де  $c_{n,n}, c_k, c_g$  – питома теплоємність перегрітої пари, конденсату і води відповідно, Дж/ (кг·К);

$r$  – теплота конденсації насиченої пари, Дж/кг;

$t_{g1}, t_{g2}$  – проміжні температури на межі зон, °С;

$t_{g,n}, t_{g,k}$  – початкова та кінцева температури води відповідно.

З урахуванням рівнянь (7.28) – (7.30) рівняння теплового балансу в конденсаторі буде мати вигляд:

$$Q = xD(i - c_k t_k) = Wc_g(t_{g,k} - t_{g,n}) \quad (7.31)$$

З урахуванням рівняння (7.30) витрата охолоджувальної води:

$$W = \frac{xD(i - c_k t_k)}{c_g(t_{g,k} - t_{g,n})}. \quad (7.32)$$

Проміжні температури охолоджувальної води, необхідні для розрахунку площі поверхні теплообміну можна визначити за формулами:

$$t_{g1} = t_{g,k} - \frac{Q_1}{Wc_g}; \quad (7.33)$$

$$t_{g2} = t_{g,n} + \frac{Q_3}{Wc_g}. \quad (7.34)$$

Конденсатори змішування використовують для конденсації пари рідин, які практично не розчиняються у воді, для утилізації теплоти водяної пари низького потенціалу, для створення розрідження у випарних апаратах, вакуум-фільтрах чи інших вакуумних установках. Ефективність роботи конденсаторів змішування залежить від площі поверхні теплообміну між парою і рідиною.

Конденсатори змішування ділять на мокрі і сухі. У сухих конденсаторах гази, які не конденсуються, та суміш води та конденсату відводяться окремо, у мокрих – неконденсовані гази відкачуються із апарата разом з водою та конденсатом.

Мокрі конденсатори застосовують у малопродуктивних вакуумних установках. Схема мокрого конденсатора представлена на рис. 7.7. Він складається із камери змішування 1, центральної труби 3, патрубків для подачі пари 2, охолоджувальної води 5 та для відведення суміші води, конденсату і неконденсованих газів 4. Апарат працює таким чином. У камеру змішування 1 через патрубок 5 за допомогою насоса подається вода, яка поступає у центральну трубу 3 і через отвори в ній розбризкується по всьому об'єму камери змішування. Пара надходить у верхню частину конденсатора через патрубок 2, при взаємодії із краплями охолоджуючої води конденсується, а конденсат змішується із водою та стікає у нижню частину апарата. Суміш води, конденсату і неконденсованих газів відкачують мокроповітряним насосом через патрубок 4.

Сухі конденсатори низького рівня застосовують для вакуумних установок малої та середньої продуктивності. Основними складовими частинами конденсатора є: камера змішування, сопла та патрубки. Принцип роботи полягає у наступному. Через патрубок у апарат поступає охолоджувальна вода, яка розбризкується у камері змішування через сопла під напором насоса або розрідження у конденсаторі. Через патрубок у апарат подається пара, яка конденсується. Конденсат змішується з водою і утворена суміш відкачується з апарата через патрубок. Неконденсовані гази через патрубок відсмоктується вакуум-насосом.

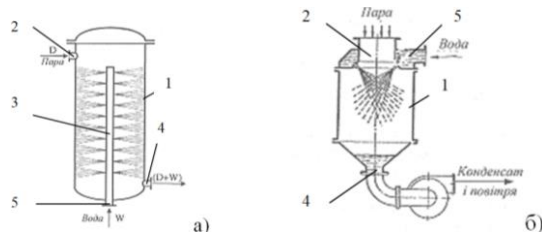


Рисунок 7.7 – Схеми конденсаторів змішування:  
 а) мокрого протічійного; б) мокрого прямотічійного

Найпоширенішими є сухі барометричні конденсатори високого рівня, які застосовують для вакуумних установок великої продуктивності. Схема апарата показана на рис. 7.8. Основні складові частини: камера змішування із сегментними пластинами 2, патрубок подачі охолоджувальної води, барометрична труба 5, бризковловлювач 4, збірник, патрубки 1, 3. Камера

змішування має циліндричну форму, всередині розташовані сегментні пластини, які більше ніж наполовину перекривають переріз конденсатора. Працює конденсатор таким чином. Охолоджувальна вода подається через приймач, у якому відбувається згладжування її пульсації та виділяється значна частина розчиненого повітря. Дегазована вода далі через патрубок у верхній частині камери поступає на верхню полицю конденсатора і послідовно стікає вниз з полиці на полицю. Через патрубок 1 на нижню полицю підводять пару, яка підіймається вгору, рухаючись між сегментними полицями.

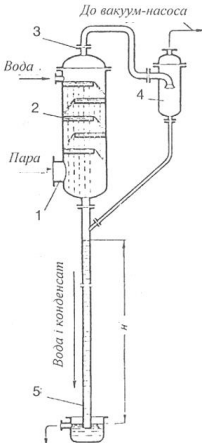


Рисунок 7.8 – Схема сухого конденсатора змішування:  
 1 – патрубок подачі пари;  
 2 – сегментна полиця;  
 3 – патрубок відведення повітря;  
 4 – брызколовлювач;  
 5 – барометрична труба

Пара поступово конденсується, конденсат змішується з водою і суміш, що утворилася, через патрубок у днищі камери надходить у барометричну трубу 5. Барометрична труба відіграє роль гідравлічного затвору, що не дозволяє проникати зовнішньому повітрю через збірник і трубу у конденсатор та сприяє відведенню води з нього самотечією. Вода із збірника залежно від цілей її застосування відкачується насосом або відводиться самотечією через патрубок у збірнику. Неконденсовані гази збираються у верхній частині камери змішування та відсмоктуються вакуум-насосом через брызколовлювач 4.

При розрахунку барометричного конденсатора визначають витрату охолоджувальної води, діаметр та висоту камери змішування, кількість полиць, діаметр та висоту барометричної труби та кількість повітря, що відсмоктується вакуум-насосом.

Витрату охолоджувальної води визначають із рівняння теплового балансу, яке має вигляд:

$$D_i^n + W c_{e,t_{e,n}} = (D + W) c_{e,t_{e,k}} \quad , \quad (7.35)$$

Звідки

$$W = \frac{D(i'' - c_v t_{в.к})}{c_v(t_{в.к} - t_{в.л})}, \quad (7.36)$$

де  $i''$  – питома ентальпія пари, Дж/кг;

$c_v$  – питома теплоємність води Дж/ (кг·К);

$t_{в.л}, t_{в.к}$  – початкова та кінцева температури води відповідно.

Діаметр конденсатора при швидкості пари  $\omega=12\dots 18$  м/с:

$$d_k = 1,13 \sqrt{\frac{D}{\rho\omega}}, \quad (7.37)$$

де  $\rho$  – густина пари при тиску  $p$  у конденсаторі, кг/м<sup>3</sup>.

Кількість повітря, яка відсмоктується з конденсатора за одиницю часу:

$$m_{\text{воз}} = 0,0001(0,025W + 10D). \quad (7.38)$$

#### **Питання для самоконтролю:**

1. Як визначається коефіцієнт теплопередачі та загальний термічний опір?
2. Наведіть класифікацію теплообмінників.
3. Будова та принцип роботи кожухотрубного теплообмінника.
4. Охарактеризуйте роботу пластинчастого теплообмінника.
5. Як розрахувати площу поверхні теплообміну поверхневого теплообмінника?
6. Як відбувається процес конденсації у поверхневому конденсаторі?
7. Поясніть роботу конденсатора змішування.

### **Тема 8. ПРОЦЕС ВИПАРЮВАННЯ**

1. Поняття про процес випарювання. Способи випарювання.
2. Основні величини, які характеризують роботу випарного апарата.
3. Основи теорії робочого процесу випарних установок.
4. Конструктивні схеми випарних апаратів.  
(матеріал укладено на основі джерел [1, 2, 3, 5, 8, 9, 13, 14, 18, 19, 20]).

1. **Випарюванням** називається процес згущення розчинів при кипінні. В процесі випарювання розчинник видаляється з усього об'єму розчину, в той час, як при  $t < t_{\text{кип}}$  випарювання проходить лише з поверхні рідини.

В харчових виробництвах випарюються в більшості випарюють водні розчини: бурякові соки, сиропи, барду, пектиновий клей, молоко і ін. Особливість процесу полягає в постійності температури кипіння при даному тиску і даному складі розчину.

Випарювання проводиться у випарниках технологічного призначення, які називаються випарними апаратами, при випарюванні під вакуумом ці апарати називаються вакуум-апаратами.

По мірі згущення розчину його фізичні властивості розчинів змінюються.

Теплоносієм в більшості випадків є насичена водяна пара, тому будемо розглядати апарати з паровим підігрівом:

Залежно від умов випарювання застосовують одиночні випарні апарати або багатокорпусні випарні установки (БВУ), складені з декількох одиночних випарників.

За методом проведення процесу розрізняють періодичне і безперервне випарювання. При періодичному випарюванні розчин поступає в один апарат і згущується до заданої концентрації або по мірі випарювання безперервно чи періодично вводиться свіжий розчин до тих пір, поки маса, яка випарюється заповнить весь апарат. Згущений розчин випускають, апарат заповнюють порцією свіжого розчину.

Безперервний процес випарювання здійснюється в одиночних апаратах безперервної дії або в багатокорпусній випарній установці. Гріюча пара і рідкий розчин поступають безперервно відводиться конденсат гріючої пари і вторинна пара з кожного корпусу.

Основною метою є оцінка придатності розрахунку для забезпечення заданої продуктивності і знаходження умов, що забезпечують оптимальний режим роботи.

Для цього визначають коефіцієнт запасу продуктивності:

$$\chi = \frac{\Delta t_p}{\Delta t_{mp}}, \quad (8.1)$$

де  $\Delta t_p$  - дійсна різниця температур;

$\Delta t_{mp}$  - необхідна різниця температур.

За дійсну різницю  $\Delta t_p$  приймають максимальну різницю температур, яка може бути використана в даному теплообміннику.

Необхідна різниця температур – це та різниця, яка необхідна для забезпечення заданої продуктивності даного апарата  $\chi \geq 1$ .

В харчових виробництвах застосовують одиночне випарювання, яке проводиться неперервним способом чи періодичним, багаторазове випарювання, яке проводиться неперервно і випарювання з використанням теплового насоса.

Всі вказані процеси проводять як під тиском, так і під вакуумом в залежності від параметрів теплоносія і властивостей розчинів, які випаровуються.

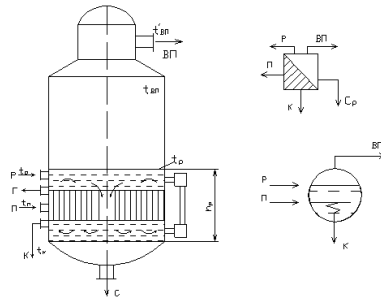


Рисунок 8.1 – Схема випарного апарата:

*П – підвід гріючої пари; р – ввід розчину;  $C_p$  – вивід згущеного розчину; К – вивід конденсату гріючої пари; ВП – вивід вторинної пари; г – вивід газів, що не конденсується;  $t_n$  – температура гріючої пари;  $t_p$  – температура киплячого розчину на середньому рівні;  $t_k = t_n - (2...3)^{\circ}C$  – температура конденсату;  $t_{вп}$  – температура вторинної пари над розчином;  $t_{вп}'$  – температура вторинної пари в кінці паропроводу, що відводить вторинну пару*

При простому однократному випарюванні в одиночному апараті витрата гріючої пари складає близько 1кг на 1кг випарної води.

Доцільніше випарювання з багаторазовим використанням гріючої пари. Питома витрата пари знижується в багатокорпусних випарних установках і в випарних апаратах з тепловим насосом.

## 2. Основні величини, які характеризують роботу випарного апарата.

Основним фактором, який визначає інтенсивність випарювання і продуктивність випарного апарата є температурний напір – різниця між температурою гріючої пари і киплячої рідини.

Повна різниця температур:

$$\Delta t_{повн} = t_{II} - t'_{BT}, \quad (8.2)$$

де  $t_{II}$  – температура гріючої (первинної) пари;  $t'_{BT}$  – температура вторинної пари в кінці паропроводу, що проводить цю пару із апарата.

Корисна різниця температур:

$$\Delta t = \Delta t_{повн} - \Delta,$$

де  $\Delta$  - температурні втрати  $\Delta = \Delta_C + \Delta_r + \Delta_\phi$ ,

$\Delta c = t_{BT} - t'_{BT}$  - різниця між температурами вторинної пари ;

$\Delta c$  - температурна втрата над розчином і пари, що знаходиться в кінці паропроводу;

$\Delta_{\Gamma}$  - гідродинамічна депресія;

$\Delta_{\Phi}$  - фізико - хімічна депресія.

Температура кипіння розчину вища за температуру насиченої пари, що знаходиться над розчином на величину ( $\Delta_{\Gamma} + \Delta_{\Phi}$ ):

$$t_p = t_{BT} + (\Delta_{\Gamma} + \Delta_{\Phi}) ;$$

Корисна різниця температур:

$$\Delta t = (t_{II} - t'_{BT}) - \Delta = t_{II} - t_p$$

Ця температура розподіляється відповідно термічним опорам, які послідовно долали тепловий потік:  $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_c + \Delta t_H + \Delta t_2$ ;

де  $\Delta t_1$  - перепад температур на ділянці конденсації грійучої пари;

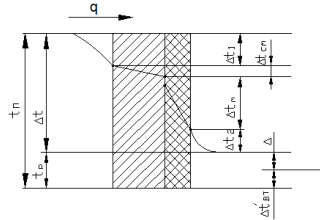


Рисунок 8.2 – До визначення корисної різниці температур:

$\Delta t_c$  – перепад температур в товщині стінок кип'ятильних труб апарата;

$\Delta t_H$  – в товщині шару накипу;  $\Delta t_2$  – на ділянці тепловіддачі від шару накипу до киплячого розчину

Корисна різниця температур, яка необхідна для передачі заданого теплового потоку  $Q$  через поверхню нагріву  $F$  визначається з формули:

$$\Delta t = \frac{Q}{KF} \approx \frac{rW}{KF} = rUR, \quad (8.3)$$

де  $r$  – питома теплота випаровування, Дж/кг;

$W$  – маса води, яка випарюється за одиницю часу кг/с;

$R$  – тепловий опір поверхні нагріву випарного апарату,  $m^2 \cdot \frac{K}{Bm}$ ;

$K$  – загальний коефіцієнт теплопередачі,  $\frac{Bm}{(m^2 \cdot c)}$ ;

$U = \frac{W}{F}$  – маса води, що випаровується з 1 метра поверхні нагріву за

одиницю часу,  $\frac{кг}{(m^2 \cdot c)}$ .

Необхідна поверхня нагріву:

$$F = \frac{W}{U}. \quad (8.4)$$

Таким чином, роботу випарних апаратів характеризують температурний перепад  $\Delta t$ , термічний опір апарата  $R$  і масова напруга поверхні нагріву  $U$ .

#### 4. Основи теорії робочого процесу випарних установок.

Матеріальний баланс випарювання при безперервному процесі представлено графіком, який зображає зміну кількостей розчину, розчинника і розчинених сухих речовин за час згущення розчину в апараті.

Приймають, що в кожному корпусі 1 кг грючої пари при конденсації віддає кількість теплоти, достатньої для утримання 1 кг вторинної пари.

Рівняння балансу всієї речовини:

$$S_{II} = S_{\kappa} + W, \quad (8.5)$$

де  $S_{II}$  – масова витрата розчину, що проступає в головний корпус;

$S_{\kappa}$  – масова витрата згущеного розчину, що видаляється із останнього корпусу;

$W = \sum_{i=1}^3 W_i$  – загальна масова витрата води, що випаровується з трьох корпусів установки, кг/с;

$i$  – порядковий номер корпусу.

Рівняння балансу сухих речовин:

$$S_{II} C_{p_{II}} = S_{\kappa} C_{p_{\kappa}}, \quad (8.6)$$

де  $C_{p_{II}}$  і  $C_{p_{\kappa}}$  – відповідно масова концентрація сухих речовин в розчині, виражена в частках одиниці, у відсотках чи кілограмах СР на 1 кг розчину.

При заданих початковій і кінцевій концентраціях маса води, яка випаровується:

$$W = S_{II} - S_{\kappa} = S_{II} \left(1 - \frac{C_{p_{II}}}{C_{p_{\kappa}}}\right). \quad (8.7)$$

Кінцева концентрація розчину при відомій продуктивності установки:

$$C_{p_{\kappa}} = \frac{S_{II} C_{p_{II}}}{S_{II} - W}. \quad (8.8)$$

де  $W = W_1 + W_2 + W_3$  – загальна масова витрата води, яка випаровується;

$W_1$  – масова витрата води, що випарюється в I корпусі, кг/с;

$$W_1 = D_1 = E_1 + D_2;$$

$W_2$  – масова витрата води, що випаровується в II корпусі, кг/с;

$$W_2 = E_2 + D_3;$$

$W_3$  – масова витрата води, що випаровується в III корпусі,  $W_3 = E_3$ ,  
 $E_1, E_2$  і  $E_3$  – паровідбори із корпусів установки або масові витрати екстра пари, що відбирається для обігріву інших апаратів.

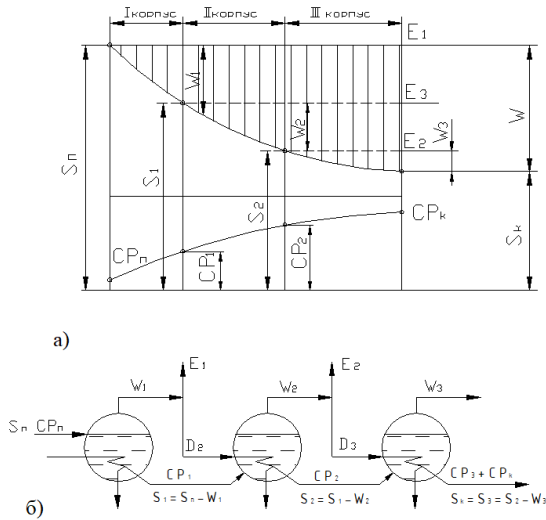


Рисунок 8.3 – Схема до матеріального балансу випарювання:  
*а* – матеріальний баланс розчину; *б* – матеріальний баланс випареної води

Масові витрати розчину, що виходить з корпусів установки:

$$S_1 = S_{II} - W_1; S_2 = S_1 - W_2; S_3 = S_2 - W_3 = S_k. \quad (8.9)$$

Кінцева концентрація розчину:

$$Cp_1 = \frac{S_{II} \cdot Cp_{II}}{S_{II} - W_1}; Cp_2 = \frac{S_{II} \cdot Cp_{II}}{S_{II} - W_1 - W_2}; Cp_3 = \frac{S_{II} \cdot Cp_{II}}{S_{II} - W_1 - W_2 - W_3} = Cp_k \quad (8.10)$$

Масова витрата води:

$$W_1 = S_{II} \left(1 - \frac{Cp_n}{Cp_k}\right); W_2 = S_1 \left(1 - \frac{Cp_1}{Cp_2}\right); W_3 = S_2 \left(1 - \frac{Cp_2}{Cp_3}\right); \quad (8.11)$$

$$W_1 + W_2 = S_{II} \left(1 - \frac{Cp_n}{Cp_2}\right); W_1 + W_2 + W_3 = S_{II} \left(1 - \frac{Cp_n}{Cp_3}\right). \quad (8.12)$$

Тепловий баланс випарювання:

$$S_{II} \cdot C_{II} \cdot t_{II} + Q = W_i + S_K C_K t_K + Q_{BT}, \quad (8.13)$$

де  $C_{II}$  і  $t_{II}$  – теплоємність і температура цього розчину;

$Q$  – теплота, яка поступає з граючою парою,  $Q = D(i'' - i')$ ;

$D$  – витрата пари, кг/с;

$i'$  – питома ентальпія пари, Дж/кг;

$i''$  – питома ентальпія конденсату, який видаляється з апарату, Дж/кг;

$W_i$  – теплота, яка виноситься з вторинною парою;

$i$  – ентальпія вторинної пари;

$C_K$  і  $t_K$  – питома теплоємність і температура кінцевого розчину (згущеного);:

$Q_{BT}$  – теплові втрати в навколишнє середовище.

Теоретична витрата пари при одноразовому випарюванні;

$$D = \frac{W(i - C_{Bt_k})}{i'' - i'}, \quad (8.14)$$

Питома витрата пари:

$$m = \frac{D}{W} = \frac{i - C_{Bt_k}}{i'' - i'} \quad (8.15)$$

Коефіцієнт випаровування, який показує кількість води, яка випаровується за рахунок використання теплоти 1 кг гріючої пари:

$$\alpha = \frac{1}{m} = \frac{i'' - i'}{i - C_{Bt_k}}. \quad (8.16)$$

Кількість води, яка випарена в даних умовах може бути виражена рівнянням:

$$W = D \cdot \frac{i'' - i'}{i - C_{Bt_k}} + S_{II} \cdot C_{II} \frac{t_{II} - t_K}{i - C_{Bt_k}} - \frac{Q_{BT}}{i - C_{Bt_k}}, \quad (8.17)$$

або

$$W = (D\alpha + Sc\beta)\delta, \quad (8.18)$$

де  $\delta$  - коефіцієнт, який враховує теплові втрати

$\beta$  - коефіцієнт самовипаровування,  $\frac{K \cdot \kappa_{\text{ст.пару}}}{D_{\text{жс}}}$

$$\beta = \frac{t_{II} - t_K}{i - C_{Bt_k}}. \quad (8.19)$$

В багатокорпусній установці кількість води, випареної в будь-якому корпусі:

$$W_i = D_i \alpha_i + (Sc - C_B \sum_{k=1}^{i-1} W_k) \beta_i \quad (8.20)$$

#### 4. Конструктивні схеми випарних апаратів.

Випарні апарати класифікують за різними ознаками (таблиця 8.1).

Таблиця 8.1 – Класифікація випарних апаратів

Ознака	Види
Розміщення поверхні нагріву	<ul style="list-style-type: none"> <li>– вертикальні;</li> <li>– горизонтальні;</li> <li>– похилі</li> </ul>
Конфігурація поверхні нагріву	<ul style="list-style-type: none"> <li>– трубчасті;</li> <li>– змійовикові;</li> <li>– з кільцевими сегментами;</li> <li>– оболонкові</li> </ul>
Режим циркуляції розчину	<ul style="list-style-type: none"> <li>– з вільною циркуляцією розчину;</li> <li>– з природною циркуляцією розчину;</li> <li>– з примусовою циркуляцією розчину;</li> <li>– плівкові.</li> </ul>
Кратність циркуляції розчину	<ul style="list-style-type: none"> <li>– з однократною циркуляцією розчину;</li> <li>– багатократною циркуляцією розчину</li> </ul>
Метод випарювання	<ul style="list-style-type: none"> <li>– поверхневого типу;</li> <li>– контактного типу;</li> <li>– адіабатного випарювання</li> </ul>

Розглянемо найпоширеніші типові конструкції випарних апаратів. Випарний апарат з оболонкою відноситься до апаратів періодичної дії, з паровим підігрівом та вільною циркуляцією розчину і застосовується для випарювання розчинів, здатних до кристалізації та в'язких розчинів. Вихідний розчин подається в корпус апарата, що має зовнішню парову оболонку, в яку подається гріюча пара. За рахунок нагрівання розчину парою виникає його вільна циркуляція. Після згущення розчину до потрібної концентрації, випарний розчин випускають з апарата і знову наповнюють апарат неконцентрованим розчином.

Широко використовуються в харчовій промисловості випарні апарати з внутрішніми нагрівальними камерами (рис. 8.4).

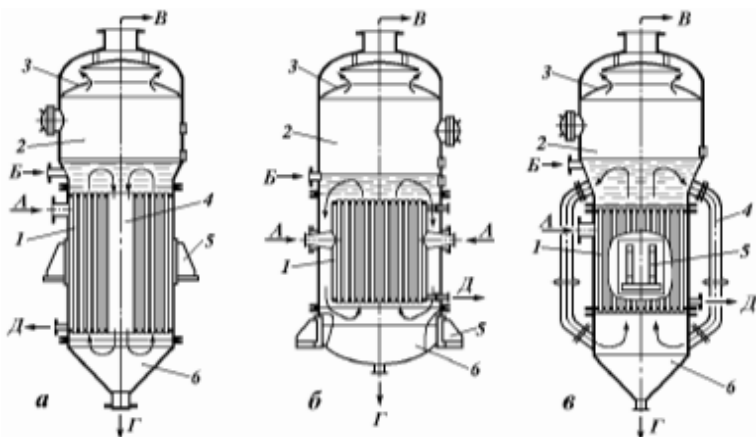


Рисунок 8.4 – Випарні апарати з внутрішніми нагрівальними камерами:  
*а* – апарат з центральною циркуляційною трубою; *б* – апарат з підвісною нагрівальною камерою; *в* – апарат з зовнішніми циркуляційними трубами;  
*1* – нагрівальна камера; *2* – сепаратор; *3* – бризковловлювач; *4* – циркуляційна труба; *5* – опора; *6* – днище; *А* – вхід грійочої пари; *Б* – вхід вихідного розчину; *В* – вихід вторинної пари; *Г* – вихід випареного розчину; *Д* – вихід конденсату

Вихідний розчин подається в корпус випарного апарата над трубою решіткою, опускається вниз по циркуляційній трубі 4 (рис. 8.4, а, в) або по кільцевому каналу (рис.8.4, б). Потім піднімається вгору кип'ятильними трубками нагрівальної камери 1, у міжтрубний простір якої подається грійоча пара. Розчин закипає, утворюючи парорідинну суміш, у якій по мірі піднімання вздовж кип'ятильних трубок зростає вміст пари. Вторинна пара разом з краплями рідини піднімається в сепаратор 2 та бризковловлювач 3, де від неї під дією інерційних сил відділяються краплі рідини. Після цього вторинна пара виводиться з випарного апарата через верхній штуцер, а розчин опускається вниз по центральній циркуляційній трубі (кільцевому каналу) у простір під нижньою трубою решіткою, знову закипає і т. д. Таким чином, виникає природна циркуляція розчину.

У випарних апаратах з підвісною грійочою камерою (рис. 8.4, б) зростає циркуляція розчину і підвищується коефіцієнт теплопередачі від грійочої пари до киплячого розчину, як через зменшення тепло припливу від стінок грійочої камери, так і за рахунок додаткового охолодження розчину в кільцевому каналі. При цьому збільшується різниця густин розчину в кільцевому каналі та у грійочих трубках. Напрямок циркуляції розчину в таких апаратах відбувається від центра апарата до периферії. Грійоча камера у таких апаратах може вийматися для чищення та ремонту.

У апаратах із природною циркуляцією і винесеними циркуляційними трубами забезпечується ще більша кратність циркуляції розчину через те, що циркуляційні труби взагалі не обігріваються (рис. 8.4, в).

У випарному апараті з виносною нагрівальною камерою (рис. 8.5) компактно зосереджено більшу поверхню нагріву в одному апараті, оскільки в ньому велика довжина труб (5–7 м).

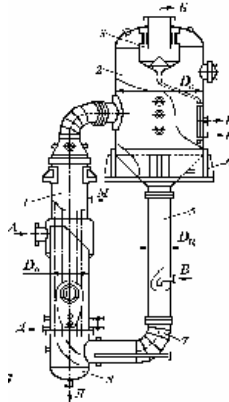


Рисунок 8.5. – Випарний апарат з виносною нагрівальною камерою:

1 – нагрівальна камера; 2 – сепаратор; 3 – бризковловлювач; 4 – циркуляційна труба; 5 – опора; 6 – днище; 7 – коліно; 8 – поворотна камера; А – вхід грійної пари; Б – вихід вторинної пари; В – вхід вихідного розчину; Г – вихід випареного розчину; Д – вихід конденсату; К – відбір проб; Л – злив розчину

Виносна нагрівальна камера 1 легко відділяється від корпусу, що спрощує її очистку та ремонт.

Вихідний розчин подається під нижню трубну решітку нагрівальної камери 1, і піднімаючись кип'ятильними трубками нагрівальної камери 1, у міжтрубний простір якої подається грійна пара, випарюється. Вторинна пара відділяється від рідини в сепараторі 2 та бризковловлювачі 3. Після цього вторинна пара виводиться з випарного апарата через верхній штуцер, а розчин опускається вниз циркуляційною трубою, яка не обігрівається, змішується з вихідним розчином і цикл циркуляції повторюється знову. За рахунок збільшення висоти трубок створюється значна різниця тиску стовпа парорідинної суміші у трубках та стовпа рідини у циркуляційній трубі, яка сприяє підвищенню природної циркуляції розчину.

Для організації примусової циркуляції розчину використовують вбудовані в апараті мішалки або винесені за межі апарата циркуляційні осьові насоси великої продуктивності (в інтервалі 600 – 9000 м<sup>3</sup>/год) з малим напором (3,5–6 м вод. ст.).

В апаратах із примусовою циркуляцією розчину кратність циркуляції становить 150–250, внаслідок цього розчин у кип'ятильних трубах перегрівается всього на 3–5 °С, закипання розчину в трубах не відбувається, тож в результаті паровміст у розчині невеликий. Кипіння розчину відбувається у винесеній зоні, утвореній за рахунок установки труби закипання над нагрівальною камерою.

Для випаровування термолабільних і розчинів, що піняться, застосовуються плівкові апарати (рис.8.6), які складаються з гріючої камери 1 з трубками довжиною 6-7 м і співвісного сепаратора 2.

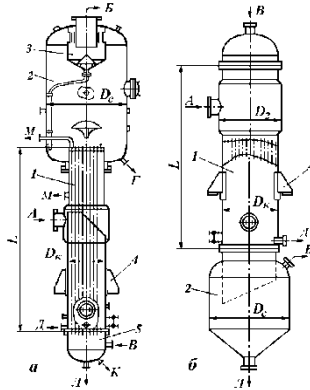


Рисунок 8.6 – Плівкові випарні апарати:

*а* – із висхідною плівкою; *б* – зі спадаючою плівкою; 1 – нагрівальна камера;

2 – сепаратор; 3 – бризковідділювач; 4 – лапа-опора; 5 – днище.

Потоки: А – подача гріючої пари; Б – вихід вторинної пари; В – подача початкового розчину; Г – відведення випареного розчину; Д – відведення конденсату; Л – злив розчину; М – відведення газів, що не конденсуються

У плівкових випарних апаратах розчин рухається вздовж теплообмінної поверхні у вигляді тонкої плівки, внаслідок чого досягаються високі коефіцієнти тепловіддачі, а також відбувається випарювання розчину до високої концентрації за один прохід.

В апаратах з висхідною плівкою (рис. 8.6, *а*) випарюваний розчин заповнює довгі (довжиною 5–9 м) кип'ятильні трубки знизу на 0,2–0,25 їх загальної висоти. При кипінні розчину в трубах утворюється парорідинна суміш, що піднімається вздовж внутрішньої поверхні труб у вигляді висхідної плівки, при цьому розчин випаровується до високої концентрації за один прохід (за відсутності його циркуляції).

Плівкові випарні апарати зі спадною (стікаючою) плівкою використовують для випарювання високов'язких розчинів (рис. 8.6, *б*).

Розчин подається під кришку нагрівальної камери, рівномірно розподіляється у вигляді плівки і випаровується на внутрішній поверхні нагрітих труб, разом із соковою парою плівка розчину відводиться знизу в сепаратор і розділяється.

***Питання для самоконтролю:***

1. В чому полягає фізичний зміст процесу випарювання?
2. Охарактеризуйте роботу одиночного випарного апарату.
3. Як визначається повна та корисна різниця температур у випарному апараті?
4. Як класифікують випарні апарати?
5. Охарактеризуйте роботу випарного апарату з центральною циркуляційною трубою.
6. Будова та принцип роботи випарного апарата з винесеною грюючою камерою.
7. В чому полягає особливість роботи плівкових випарних апаратів?

## **Тема 9. ОСНОВИ МАСОПЕРЕДАЧІ**

- 1.Класифікація масообмінних процесів.
- 2.Способи виразу складу фаз. Рівновага фаз.
- 3.Матеріальний баланс масообмінного процесу.
- 4.Основні закони масопередачі.  
(матеріал укладено на основі джерел [2, 4, 8, 9]).

1. **Масообмінними** називаються процеси, швидкість протікання яких визначається швидкістю перенесення речовини (маси) з однієї фази в іншу конвективною чи молекулярною дифузиею. Класифікацію масообмінних процесів доцільно проводити за такими ознаками: агрегатним станом, способом контакту і характером взаємодії фаз.

Масопередача має місце в процесах абсорбції, перегонки і ректифікації, екстракції, адсорбції, кристалізації, розчинення, сушіння та ін.

При **абсорбції** проходить селективне поглинання газів чи парів рідкими поглиначами – абсорбентами, тобто відбувається перехід речовини з газової чи парової фази в рідку.

При **перегонці і ректифікації** рідка суміш розділяється на складові компоненти. При цьому проходить перехід речовини з рідкої фази в парову і з парової в рідку.

При **екстракції** проходить добування однієї чи декількох речовин з розчинів чи твердих речовин за допомогою розчинників. При екстракції в системі рідина – рідина відбувається перехід речовини з однієї рідкої фази в іншу. Процеси добування речовин з твердого тіла за допомогою розчинника

називається вилуджуванням, при цьому проходить перехід речовини з твердої фази в рідку.

Процес *адсорбції* заключається в поглинанні газів або парів чи розчинених в рідинах речовин твердим поглиначем – адсорбентом, здатним поглинати один чи декілька компонентів з їх суміші.

При *сушінні* відбувається видалення вологи з твердих чи рідких вологих матеріалів випаровуванням. В цьому процесі має місце перехід вологи в парову чи газову фазу.

*Кристалізація* – це процес виділення твердої фази у вигляді кристалів з перенасичених розчинів. Має місце у виробництві цукру, глюкози, кухонної солі, тощо.

*Розчинення* – це процес переходу твердої фази у рідку.

За способом контакту між фазами процеси можуть бути розділені на здійснювані безпосереднім контактом фаз, контактом через мембрани і здійснювані без границі розділу фаз.

Способи взаємодії фаз залежить перш за все від того, чи є процес *періодичним чи безперервним*. При *періодичному* процесі зміна концентрацій кожної з фаз розглядається лише в часі, при *безперервному* – зміну концентрації фаз можна розглядати як в часі, так і по довжині апарата.

Безперервні масообміни процеси діляться на *прямотечійні, протитечійні, змішувані і комбіновані*.

Процеси можуть бути *стаціонарними і нестаціонарними*. При *стаціонарних* процесах концентрації в кожній точці апарата весь час залишаються незмінними, а по довжині апарата відбувається їх зміна за певним законом. Для стаціонарності процесу необхідна постійність складу і фізичних властивостей продуктів, що поступають в апарат, а також температур і інших зовнішніх факторів, які забезпечують протікання процесу в апараті.

*Нестаціонарний* процес характеризується зміною концентрацій в кожній точці апарата по мірі протікання. Всі періодичні процеси є нестаціонарними.

2. Кількісно склади фаз можуть виражатись в масових, мольних, об'ємних концентраціях.

*Масова концентрація* – відношення маси компонента до маси всієї суміші:

$$C_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (9.1)$$

де  $M_i$  – маса  $i$ -го компонента. При цьому:  $\sum_{i=1}^n C_i = 1$ .

Масову концентрацію без твердої фази іноді позначають а або х в рідкій і в або у – в газоподібній фазі.

*Мольна концентрація* – відношення числа молей компонента в одній фазі до загального числа молей цієї фази.

$$x_i = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^n N_i}, \quad (9.2)$$

де  $N_i$  – кількість молів  $i$ -го компонента в фазі. При цьому:  $\sum_{i=1}^n N_i = 1$ .

*Об'ємна масова концентрація* виражається кількістю кілограмів даного компонента, що міститься в 1 м<sup>3</sup> фази:

$$C_{vi} = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n V_i}, \quad (9.3)$$

де  $V_i$  – об'єм, який займає  $i$ -тий компонент

$n$  – кількість компонентів.

*Об'ємна мольна концентрація* – відношення числа молей даного компонента до всього об'єму суміші:

$$x_{vi} = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^n V_i}. \quad (9.4)$$

*Відносна масова концентрація* – відношення маси компонента  $M_i$  до маси компонента – носія, кількість якого не змінюється в процесі:

$$x_i = \frac{M_i}{M_o}. \quad (9.5)$$

Відповідно *відносна мольна концентрація* – відношення числа молей тих самих компонентів.

$$x_i^* = \frac{N_i}{N_o}. \quad (9.6)$$

Основною умовою протікання масообмінного процесу є порушення рівноваги між фазами, що може бути викликане зміною температури, тиску або складу хоча б однієї із фаз. Процес відбуватиметься до тих пір, поки знову не встановиться рівновага.

У стані рівноваги кожній концентрації будь-якого компонента (крім носія) в одній фазі відповідає строго відповідна концентрація того ж компонента в іншій фазі:

$$y^* = f(x), \quad (9.7)$$

де  $x$  – концентрація компонента в одній фазі;

$y^*$  – рівноважна концентрація цього ж компонента в іншій фазі.

Відповідно до концентрації у відповідає рівноважна концентрація  $x^*$ .

Графічне зображення цієї залежності називається лінією рівноваги, що є або кривою або прямою лінією.

Відношення концентрацій фаз при рівновазі називається коефіцієнтом розподілу:

$$m = \frac{y^*}{x} \quad (17.8)$$

Коефіцієнт розподілу – це тангенс куту нахилу лінії рівноваги. Для криволінійної залежності  $m$  є тангенсом куту нахилу дотичної до даної точки рівноважної кривої.

3. Найбільш раціональним способом проведення безперервних масообмінних процесів є протічечий. Розглянемо схему руху двофазних потоків в протічечному масообмінному апараті (рис. 9.1).

Приймаємо, що зверху в апарат поступає  $m_{2n}$  рідини з концентрацією одного з компонентів  $C_{2n}$ , а знизу відводиться  $m_{2k}$  рідини з концентрацією  $C_{2k}$ .

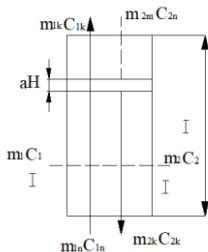


Рисунок 9.1 – Схема руху двофазних потоків в протічечному масообмінному апараті

$m_{1n}, C_{1n}$  – маса газоподібної фази і концентрація того ж компонента;

$m_{1k}, C_{1k}$ , – маса газу, який відводиться та концентрація компонента у газі.

Отже, в апарат поступає  $(m_{2n} + m_{1n})$ , а відводиться  $(m_{2k} + m_{1k})$  речовини. Нехтуючи втратами і припускаючи, що процес встановлений, можна записати:

$$m_{2n} + m_{1n} = m_{2k} + m_{1k} \quad (9.8)$$

Баланс по всьому апарату для компонента, що переходить з однієї фази в іншу, запишемо у вигляді:

$$m_{2П}C_{2П} + m_{1П}C_{1П} = m_{2к}C_{2к} + m_{1к}C_{1к} \quad (9.9)$$

Матеріальний баланс для ділянки апарата від нижнього кінця до перерізу I-I:

$$m_2C_2 + m_{1П}C_{1П} = m_{2к}C_{2к} + m_1C_1 \quad (9.10)$$

Оскільки в більшості масообмінних процесів можна вважати витрату кожної фази незмінною, тобто  $m_{2п} = m_{2к} = m_2$  і  $m_{1п} = m_{1к} = m_1$ , то можна записати:

$$C_1 = \frac{m_2}{m_1} \cdot C_2 + \frac{m_1C_{1п} - m_2C_{2к}}{m_1} \quad (9.11)$$

Це рівняння носить назву рівняння робочої лінії процесу. Воно встановлює зв'язок між концентраціями компонента, по якому проводиться розрахунок процесу, в будь-якому перерізі. На рис. 9.2 зображено робочу (AB) і рівноважну (OE) лінії процесу для випадку перенесення основного потоку компонента із газоподібної в рідку.

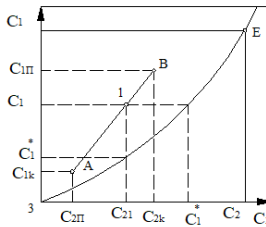


Рисунок 9.2 – Робоча (AB) і рівноважна (OE) лінії процесу для випадку перенесення основного потоку компонента із газоподібної в рідку.

4. Основними законами масопередачі є закон молекулярної дифузії (закон Фіка), закон конвективної дифузії (закон Шукарьова).

Молекулярною дифузиею називається перенесення речовини в напрямі зменшення її концентрації за рахунок неупорядкованого (хаотичного) руху мікрочастинок речовини.

Процес молекулярної дифузії нерозривно зв'язаний з розподілом концентрації всередині тіла. Сукупність значень концентрацій для всіх точок простору в даний момент часу називається полем концентрацій, яке в загальному вигляді описується рівнянням:

$$c = f_1(x, y, z, \tau) \quad (9.12)$$

Закон *молекулярної дифузії* (закон Фіка) оснований на тому, що

дифузія в газах та рідинах проходить в результаті хаотичного руху молекул, який приводить до переносу молекул речовини, що розподіляється із зони високих концентрацій в зону низьких концентрацій. Він полягає в тому що кількість продифундованої речовини пропорційна градієнту концентрацій, площі, перпендикулярній напрямку дифузійного потоку і тривалості процесу та обернено пропорційна товщині шару  $\delta$ :

$$M = \frac{D \cdot \Delta C \cdot F \cdot \tau}{\delta}, \quad (9.13)$$

де  $M$  – кількість продифундованої речовини,  
 $D$  – коефіцієнт пропорційності чи коефіцієнт дифузії;  
 $\Delta C$  – різниця концентрацій речовини у різних фазах;  
 $F$  – площа поверхні, через яку проходить дифузія;  
 $\tau$  – тривалість дифузії.

Коефіцієнт дифузії показує, яка кількість речовини дифундує через поверхню в  $1 \text{ м}^2$  протягом 1 години при різниці концентрації на відстані  $1 \text{ м}$ , що рівно  $1 \text{ кг/м}^3$ . Розмірність коефіцієнт дифузії  $\text{м}^2/\text{с}$ . Він залежить від матеріалу, через який дифундує речовина, а також від температури, концентрації і тиску (для газів).

При розгляді механізму перенесення речовини в рідкій або газоподібній фазі було встановлено, що в ядрі потоку речовина переміщається до границі розділу фаз головним чином за рахунок переміщення молярних частин середовища, тобто конвективної дифузії; в приграничному шарі – за рахунок молекулярної дифузії. Сумарне перенесення речовини від границі (чи до границі) розділу фаз носить назву масовіддачі.

**Конвективна дифузія** підпорядковується закону Щукарьова, згідно з яким кількість речовини, яка переходить від поверхні розділення фаз у середовище, що її сприймає (потік, що рухається), пропорційна площі поверхні розділення фаз, часу і різниці концентрацій перехідної речовини на поверхні розділу і в центрі потоку, що рухається:

$$M = \beta \cdot \Delta C \cdot F \cdot \tau, \quad (9.14)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт пропорційності або коефіцієнт масовіддачі,  $\text{м/с}$ ;  
 $\Delta C = C_{2n}$  і  $C_2$  – відповідно концентрація на границі розділення фаз і в ядрі потоку.

Коефіцієнт масовіддачі залежить від фізичних властивостей середовища, гідродинамічних умов руху рідини або газу, геометричних факторів (форми і розмірів апаратів і їх елементів).

Більшість масообмінних процесів протікає між двома фазами, які безпосередньо контактують між собою. Через це перенесення речовини із

однієї фази в іншу відбувається у декілька стадій:

а) перенесення маси всередині однієї із фаз із ядра до поверхні розділу фаз;

б) перехід через границю розділу фаз;

в) перенесення маси із поверхні розділу усередину іншої фази.

З рівняння швидкості процесу масопередачі випливає, що:

$$M = K \cdot \Delta C \cdot F, \quad (9.15)$$

де  $M$  – маса речовини, яка переноситься за одиницю часу із однієї фази в іншу, кг/с;

$K$  – коефіцієнт швидкості чи масопередачі, кг/м<sup>2</sup>·с;

$\Delta C$  – рушійна сила процесу, кг/м;

$F$  – площа контакту фаз, м<sup>2</sup>.

Коефіцієнт масопередачі може бути виражений через часткові коефіцієнти масовіддачі, що характеризують швидкість процесу масообміну в кожній з фаз. Згідно із схемою масопередачі через приграничну плівку (рис.9.15) для кожної фази можна записати:

$$M = \beta_1 (C_1 - C_{1gp}) F_1 \tau \quad (9.16)$$

$$M = \beta_2 (C_{2gp} - C_2) F_2 \tau, \quad (9.17)$$

де  $\beta_1, \beta_2$  – коефіцієнт масовіддачі у відповідних фазах;

$C_1, C_2$  – середня концентрація речовини у відповідній фазі.

$C_{1gp}, C_{2gp}$  – рівноважна концентрація на границі розділу фаз.

Прийнявши  $C_{1gp} = C_{2gp} = C_{gp}$  та розв'язавши спільно рівняння (9.16) і (9.17) отримаємо:

$$M = K_M \cdot (C_1 - C_2) \cdot F \cdot \tau, \quad (9.18)$$

де  $K_M$  – коефіцієнт масопередачі.

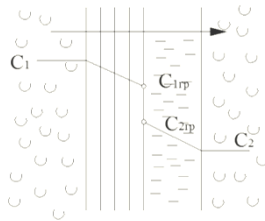


Рисунок 9.3 – Схема масопередачі в системі без твердої фази.

Розрахувати коефіцієнт масопередачі можна таким чином:

$$\frac{1}{K_M} = \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2}. \quad (9.19)$$

**Питання для самоконтролю:**

1. Які процеси називають масообмінними? Що є рушійною силою масообмінного процесу?
2. Наведіть класифікацію масообмінних процесів.
3. Як кількісно можуть виражатись склади фаз?
4. Як скласти рівняння матеріального балансу у протитечійному масообмінному апараті?
5. Сформулюйте закон молекулярної дифузії (закон Фіка)
6. Сформулюйте закон Щукарьова.
7. Поясніть схему масопередачі в системі без твердої фази.

### Тема 10. ПРОЦЕС СУШІННЯ

1. Загальна характеристика сушіння і його значення для харчової промисловості.
2. Вологі матеріали.
3. Кінетика сушіння.
4. Основи розрахунку сушарок.
5. Основні типи сушарок.  
(матеріал укладено на основі джерел [2, 5, 8, 9, 10, 15, 16, 20]).

1. Волога з матеріалів може бути видалена різними способами: механічним, фізико-хімічним і тепловим (сушіння). Сушіння часто є останньою операцією на виробництві, що передає випуску готового продукту. За своєю фізичною суттю сушіння є складним дифузійним процесом, швидкість якого визначається швидкістю дифузії вологи з глибини матеріалу, який висушується в навколишнє середовище. Процес сушіння є поєднанням пов'язаних один з одним тепло - і масообміну.

За способом підведення тепла до матеріалу розрізняють наступні види сушіння:

- 1) *конвективне* – шляхом безпереднього дотикання матеріал, який висушується з сушильним агентом;
- 2) *контактне* – шляхом передачі тепла від теплоносія до матеріалу через стінку, що їх розділяє;
- 3) *радіаційне* – шляхом передачі тепла інфрачервоними променями;
- 4) *діелектричне* – шляхом нагрівання в полі струмів високої частоти;
- 5) *сублімаційне* – сушіння в замороженому стані при глибокому вакуумі.

В харчовій промисловості сушіння застосовується в таких випадках:

- в цукровому виробництві – сушать цукор-пісок, цукор-рафінад, а також відходи виробництва – жом.
- в спиртовому виробництві висушують відходи виробництва: барда, харчові і кормові дріжджі.
- при виробництві пива сушать солод і відходи виробництва.
- в крохмало-паточному виробництві – крохмаль і відходи виробництва.

Сушіння використовується при виробництві сухофруктів, сухих овочів, сухарів, макаронних виробів.

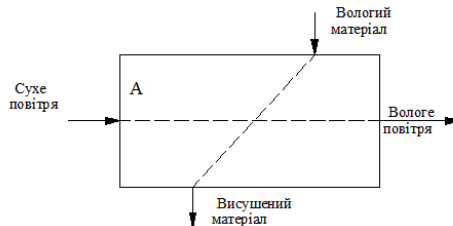


Рисунок 10.1 – Схема процесу сушіння

Розглянемо схему процесу сушіння. В сушарку А поступає вологий матеріал, який стикається з нагрітим повітрям, пічними газами чи перегрітою парю, нагрівається в результаті чого проходить випаровування вологи з поверхні матеріалу. Волога дифундує в повітря. Воно охолоджується, зволожується і виходячи з сушарки, вносить вологу.

## 2. Вологі матеріали ділять на такі групи:

- рідини, які містять вологу: розчини кристалоїдів та колоїдні розчини.
- тверді тіла, які містять вологу: кристалічні (цукор, кухонна сіль); колоїдно-дисперсні системи.

Остання група є найбільш поширеною. Колоїдні тіла, які піддаються сушінню, А.В. Ликов пропонує розділити на три групи:

- а) еластичні гелі (желатин, пресоване лучне тісто). При видаленні вологи ці тіла стискаються, але зберігають еластичність;
- б) крихкі гелі (деревне вугілля, керамічні матеріали). При видаленні вологи вони стають крихкими і можуть бути перетворені в порошок;
- в) колоїдні капілярно-пористі тіла (деревина, зерно, хліб). Стінки капілярів цих тіл еластичні, тому при сушінні відбувається усадка.

Види зв'язку вологи з матеріалом:

- хімічний (іонний, молекулярний);
- фізико-хімічний (адсорбційний), осмотичний, структурний;

– механічний (волога в капілярах і макрокапілярах, волога змочування.)

Найбільш міцним видом зв'язку вологи є хімічний.

Волога, зв'язана з матеріалом фізико-хімічно, може бути видалена сушінням. Форми цього зв'язку різноманітні.

Адсорбційно зв'язана волога утримується біля поверхні розділу колоїдних частинок з навколишнім середовищем молекулярним силовим полем. Міцно зв'язана з матеріалом, тому називається *зв'язаною водою*. Адсорбція вологи супроводжується виділенням тепла.

Осмотично утримувана і структурна волога відрізняється від адсорбційної тим, що при приєднанні вологи цих видів не виділяється тепла. Воно зв'язана з матеріалом менш міцно, як адсорбційна.

Волога, найменш зв'язана з матеріалом, яка втримується механічно. Механічна волога міститься в капілярах тіла і на його поверхні. Така волога може бути видалена механічним способом, тому така волога називається вільною.

Волога в матеріалі розподілена нерівномірно. Тому розрізняють середню концентрацію в матеріалі або концентрацію в даній точці.

**Вологістю матеріалу** називають вміст вологи у відсотках маси вологи матеріалу:

$$W = \frac{m_{\text{вл}}}{m} \cdot 100\%, \quad (10.1)$$

де  $m_{\text{вл}}$  – маса води, кг;

$m$  – загальна маса матеріалу, кг.

Вологість матеріалу в стані, коли припиняється перехід вологи з матеріалу в повітря або з повітря в матеріал і встановлюється рівновага, називається **рівноважною**. Вона є функцією парціального тиску водяної пари при заданій температурі.

3. При конвективному сушінні вологих матеріалів волога переміщується в матеріалі в напрямі від центру шматків матеріалу до периферії, де матеріал омивається сушильним агентом.

Таке переміщення вологи в основному дифузійний процес, рушійною силою якого є різниця між концентраціями вологи в різних точках матеріалу. Тому, основне рівняння волого провідності може бути записане аналогічно рівнянню Фур'є:

$$m_w = -K_w F \frac{dC}{dx} \tau, \quad (10.2)$$

де  $m_w$  – кількість вологи, яка пройшла через поверхню  $F$  за час  $t$  при градієнті концентрації;

$K_w$  – коефіцієнт, який залежить від характеру зв'язку вологи з матеріалом і від властивостей матеріалу.

Волога може переміщатись в матеріалі як у вигляді рідини, так і у вигляді пари. Осмотична волога буде мігрувати через стінки клітини у вигляді рідини. При великій вологості матеріалу переважає міграція вологи у вигляді рідини, при малій вологості – у вигляді пари.

При сушінні поряд з концентраційним градієнтним має місце і температурний градієнт, внаслідок наявності якого проявляється дія термовологопровідності. Експериментально встановлено, що під дією температурного градієнта у вологих матеріалах волога переміщається в напрямі потоку тепла.

Загальна кількість вологи, що переміщається під дією температурного градієнта  $\frac{dt}{dx}$  може бути виражена рівнянням:

$$m_t = -K_t F \frac{dt}{dx} \tau \quad (10.3)$$

Сумарна кількість вологи, яка переміщається при наявності обох градієнтів, при конвективному сушінні:

$$m = m_w - m_t \quad (10.4)$$

Процес сушіння протікає із швидкістю, яка залежить від форми зв'язку вологи з матеріалом і механізму переміщення в ньому вологи. Кінетика сушіння характеризується зміною в часі середньої вологи матеріалу, віднесеної до кількості абсолютно сухого матеріалу. Залежність між вологістю матеріалу і часом  $t$  відображається кривою сушіння, яку будують за дослідними даними (рис. 10.2).

В загальному вигляді крива сушіння складається з декількох ділянок.

Після невеликого проміжку часу матеріалу), протягом (періоду прогріву якого вологість незначно знижується (ділянка АВ) наступає період постійної швидкості сушіння (I період). При цьому вологість матеріалу інтенсивно знижується згідно прямолінійного закону (BC).

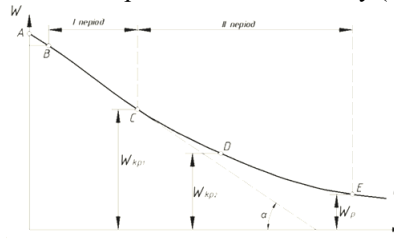


Рисунок 10.2 – Крива сушіння матеріалу.

Таке зменшення спостерігається до досягнення першої критичної вологості, після чого настає період падаючої швидкості сушіння (II період)

В цьому періоді зменшення вологості матеріалу виражається ділянкою СЕ. Наприкінці II періоду сушіння вологість асимптотично наближається до рівноважної. Досягнення рівноважної вологості означає повне припинення подальшого випаровування вологи з матеріалу.

Отже, в I періоді сушіння визначальними факторами є параметри сушильного агента.

В II-му періоді починає виділятися зв'язана волога. При цьому парціальний тиск водяних парів на поверхні матеріалу стає меншим від тиску чистої води при тій же температурі. Швидкість сушіння в цей період залежить не тільки від дифузії вологи в навколишнє повітря, а також від вологості матеріалу.

4. Основи розрахунку сушарок. Для теоретичного процесу сушіння ми вважаємо, що в сушильній камері повітря не надається тепло додатково і воно не втрачає внесеного тепла.

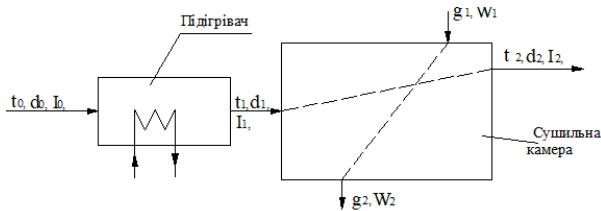


Рисунок 10. 3 – Схема сушильної установки з нормальним сушильним процесом

Повітря, яке поступило в сушарку з параметрами  $t_1, d_1, I_1, \varphi_1$ , передає своє тепло волозі матеріалу, яка нагрівається і випаровується. Утворені пари з усім теплом, одержаним від повітря, змішуються з повітрям. Тому тепловміст залишається постійним, хоч температура його знижується.

Повітря, яке виходить з сушильної камери має параметри:  $t_2, d_2, I_2, \varphi_2$ . Очевидно, що  $d_2 > d_1; \varphi_2 > \varphi_1; t_2 > t_1$ , але  $I_1 = I_2$ .

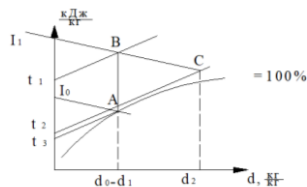


Рисунок 10.4 – Процес сушіння на I-d діаграмі

На  $I-d$  діаграмі теоретичний процес сушіння зобразиться лінією постійної ентальпії, тобто  $I=\text{const}$ . Точку С характеризує повітря на виході його з сушильної камери. Процес підігріву в підігрівнику зобразиться лінією АВ при  $d_1 = d_0$ . Точка А характеризує стан повітря при його вході в підігрівник.

Витрата сухого повітря на 1кг випареної води:

$$\ell = \frac{1}{d_2 - d_1} = \frac{1}{d_2 - d_0}. \quad (10.5)$$

Вологовміст  $d_1$  і  $d_2$  можна визначити з  $I-d$  діаграми.

Витрату тепла на 1кг випареної води:

$$g = \ell(I_1 - I_0) = \frac{I_1 - I_0}{d_2 - d_1}. \quad (10.6)$$

Рівняння матеріального балансу реального процесу сушіння:

$$L + Ld_0 + m_1 = L + Ld_2 + m_2, \quad (10.7)$$

де  $m_1$  – витрата вологого матеріалу, кг/год.;

$m_2$  – витрата висушеного матеріалу, кг/год.;

$L$  – витрата сухого повітря.

З рівняння матеріального балансу:

$$m_1 - m_2 = Ld_2 - Ld_0 = L(d_2 - d_0). \quad (10.8)$$

Позначимо  $W = m_1 - m_2$ , тоді:

$$L = \frac{W}{d_2 - d_0} \quad (10.9)$$

Для розгляду теплового балансу реальної сушарки складемо таблицю теплового балансу (таблиця 10.1):

Рівняння теплового балансу, матиме вигляд:

$$Li_1 + m_1 C_1 Q_1 + m_{mp} C_{mp} Q'_{TP} + g_{\text{доо}} = Li_2 + m_2 C_2 Q_2 + m_{mp} C_{mp} Q''_{TP} + Q_{BT}, \quad (10.9)$$

Звідси

$$L(i_2 - i_1) = m_1 C_1 Q_1 + m_{mp} C_{mp} Q'_{TP} + g_{\text{доо}} - m_2 C_2 Q_2 + m_{mp} C_{mp} Q''_{TP} - Q_{BT} \quad (10.10)$$

Таблиця 10.1 – Тепловий баланс сушарки

Прихід		Витрата	
Статті приходу	Позначення	Статті витрат	Позначення
Теплота, яка вноситься з повітрям і яка складається із теплоти, що вноситься в підігрівник повітрям, і теплоти, що вводиться в підігрівник.	$LI = L$ $Li_1 = Li_0 + Q_T$	Теплота, що виноситься повітрям, яке виходить в сушарки.	$Li_2$
Теплота, що вноситься матеріалом ( $C_1$ - теплоємність, кДж/кг·К; $\theta_1$ - його температура).	$m_1 C_1 Q_1$	Теплота, що виноситься висушеним матеріалом.	$m_2 C_2 Q_2$
Теплота, що вноситься транспортними пристроями.	$m_{mp} C_{mp} Q'_{TP}$	Теплота, що виноситься транспортними пристроями.	$m_{mp} C_{mp} Q''_{TP}$
Додатково теплота, що вводиться в камеру.	$g_{ood}$	Втрати теплоти в навколишній простір.	$Q_{om}$

або

$$L(i_2 - i_1) = \Sigma Q,$$

$$i_2 = i_1 + \frac{\Delta}{\ell}, \quad (10.11)$$

де  $\Delta$  – кількість теплоти, що вноситься в камеру сушарки або втрачається нею, Дж на 1кг випарної води.  $\Delta$  може бути додатною або від'ємною в залежності від значення складових теплового балансу. В частковому випадку, коли величини із знаком „-“ рівні величинам із знаком „+“  $\Delta = 0$ , а отже  $i_1 = i_2$ .

5. Класифікація сушарок. Апарати, які використовуються для сушіння харчових продуктів різноманітні за конструкцією і класифікуються за такими ознаками:

- за способом підведення теплоти до висушуваного матеріалу: конвективні; контактні; спеціальні;
- за видом теплоносія: повітряні; газові; парові;
- за величиною тиску у сушильній камері: атмосферні; вакуумні;

- за способом дії: періодичні; безперервні;
- за напрямком руху сушильного агенту: прямотечійні; протитечійні; з перехресним рухом; змішані;
- за станом шару матеріалу в сушильній камері: з нерухомим шаром; рухомим; з киплячим; фонтануючим;
- за конструкцією сушильної камери: барабанні; шахтні, стрічкові; карусельні; камерні; коридорні; вальцеві; розпилувальні.

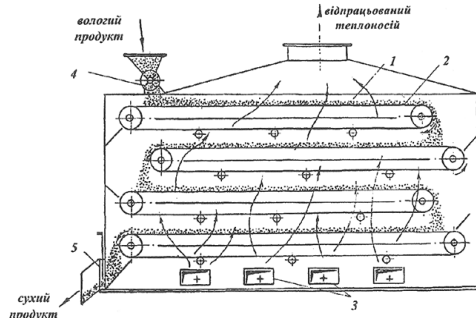


Рисунок 10.5 – Схема стрічкової сушарки:

1 – камера; 2 – транспортери; 3 – канали для теплоносія; 4 – завантажувальний пристрій; 5 – розвантажувальний пристрій

Багатострічкові сушарки безперервної дії застосовуються для сушіння овочів, плодів, макаронних виробів, сухарів, крохмалю та ін. Усередині сушильної камери розташовані один над одним декілька стрічкових транспортерів, що рухаються у протилежних напрямках. Стрічки транспортерів можуть бути виготовлені із тканини сітки або з металу. Вологий матеріал із завантажувального бункера потрапляє на стрічку верхнього транспортера переміщається вздовж сушильної камери та пересипається на транспортер, розташований нижче. Атмосферне повітря нагнітається через калорифери у сушильну камеру, проходить через матеріал, розташований на кожному транспортері, забирає вологу та видаляється із сушильної камери. Просушений матеріал вивантажується із сушильної камери через вивантажувальну горловину.

Барабанні сушарки є простими за будовою, високопродуктивними та мають широке застосування. За допомогою них сушать буряковий жом, зерно-картопляну барду, цукор пісок, зерно та інші сипкі матеріали. Вони складаються з барабана, розташованого з можливістю обертатися за допомогою зубчастого вінця та встановленого під кутом  $1-5^{\circ}$ , тепловентиляційного блока. Всередині металевого барабана розташовані насадки для забезпечення перемішування матеріалу та його транспортування вздовж барабана.

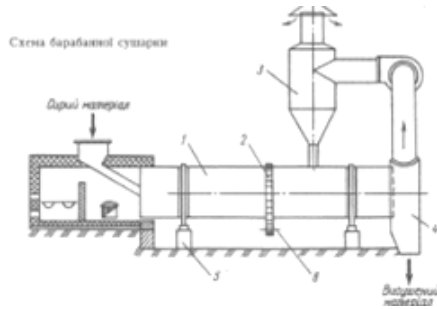


Рисунок 10.6 – Принципова схема барабанної сушарки:  
 1-барабан; 2-зубчастий вінець; 3- циклон; 4- вивантажувальний пристрій;  
 5-опори; 6-зубчасте колесо

Валкові сушарки (рис. 10.7) відносяться до контактних сушарок і призначені для сушіння пастоподібних продуктів.

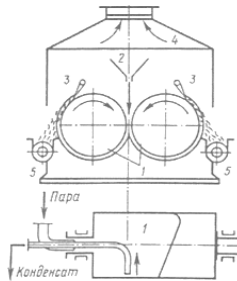


Рисунок 10. 7 – Схема валкової сушарки:  
 1- валок; 2-завантажувальний живильник; 3-ніж; 4-пристрій для відведення  
 сушильного агенту; 5- вивантажувальний пристрій

Висушування продукту відбувається у валковій сушарці шляхом його нагрівання при контакті з нагрітою поверхнею валків 1, які обертаються назустріч один одному. Висушений продукт зчищається з поверхні валка ножем та просипається до вивантажувального шнека 5. Випарена волога видаляється з сушильної камери 3 через патрубок у кришці 4.

Шахтні сушарки призначені для сушіння сипких продуктів. Вони являють собою вертикальні шахти прямокутного перерізу зі сітчастими або жалюзійними стінками. Сушарки можуть бути прямооточні або рециркуляційні. У прямооточних сушарках продукт проходить через сушильну камеру один раз, в рециркуляційних – кілька разів, число рециркуляції залежить від початкової вологості продукту.

Розпилювальні сушарки (рис.10.8) застосовуються для сушіння рідких продуктів.

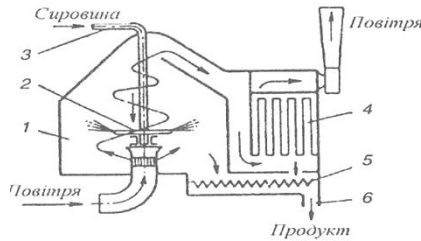


Рисунок 10.8 – Схема розпилювальної сушарки:

1– сушильна камера; 2 – розпилювальний диск; 3–патрубок для подачі продукту; 4 – фільтри; 5 – вивантажувальний механізм; 6 – впускна горловина

Рідкий продукт через патрубок 3 подається до розпилюючого пристрою 2, яким розбризкується всередині сушильної камери 1. Розмір крапель рідини не перевищує 10-15 мкм. Краплі рідини при контакті з сушильним агентом віддаючи вологу, перетворюються у порошкоподібний матеріал. Висушений матеріал вивантажувальним шнеком 5 переміщується до вивантажувальної горловини 6 та виводиться із сушарки. Сушильний агент, насичений вологою та дрібними частинками висушеного продукту надходить у фільтр 4, де очищається від твердих частинок та викидається в навколишнє середовище.

#### **Питання для самоконтролю:**

1. Який процес називається процесом сушіння і де його застосовують?
2. Як поділяють вологі матеріали?
3. Назвіть основні види вологи з матеріалом.
4. Яким чином проходить процес сушіння у конвективній сушарці?
5. Складіть рівняння теплового балансу конвективної сушарки.
6. Як класифікують сушарки?
7. Будова та принцип роботи стрічкової сушарки.
8. Будова та принцип роботи розпилювальної сушарки.

### **Тема 11. ПЕРЕГОНКА І РЕКТИФІКАЦІЯ**

1. Суть процесу перегонки. Основні закони перегонки.
  2. Апарати для проведення простої перегонки
  3. Складна перегонка (ректифікація).
- (матеріал укладено на основі джерел [2, 5, 8, 9, 10, 15, 16, 20]).

1. **Перегонка і ректифікація** – найбільш розповсюдженні методи розділення рідких однорідних сумішей, які складаються із двох або декількох летких компонентів.

Процес перегонки і ректифікації широко використовують в харчовій промисловості для одержання технічного і харчового етилового спирту, у кон'ячному виробництві при одержанні кон'ячного спирту з вина, у вітамінному виробництві при витяганні вітамінів А і Е з рибачого жиру і олій, у маргариновому виробництві при дезодорації жиру та олій, у виробництві ароматичних речовин (ефірних олій) з натуральних прянощів і ін. Перегонка використовується для грубого розділення сумішей. Для найбільш повного їх розділення застосовується ректифікація.

Процеси перегонки і ректифікації ґрунтуються на різній леткості компонентів суміші при одній і тій самій температурі. Компонент суміші, що має більшу леткість, називається легколетким, а компонент, що має меншу леткість - важколетким. Відповідно, легколеткий компонент кипить при нижчій температурі, ніж важколеткий, тому їх називають відповідно низькокиплячими і висококиплячими компонентами.

В результаті перегонки чи ректифікації початкова суміш розділяється на дистилят, збагачений легколетким компонентом, і кубовий залишок, збагачений важколетким компонентом. Дистилят одержують в результаті конденсації парів в конденсаторі – дефлегматорі. Кубовий залишок одержують в кубі установки.

**Простою перегонкою** називається процес часткового розділення суміші рідин шляхом поступового випаровування і безперервного видалення з перегінного апарата утворених парів без їх дефлегмації.

В основу сучасної теорії перегонки покладені закономірності перегонки бінарних сумішей, встановлені Д.П. Коноваловим і М.С. Вревським.

Досліджуючи розчини спиртів і органічних кислот у воді, Коновалов встановив два основних закони, які дають відповіді на питання про склад фаз, що знаходяться в рівновазі.

Перший закон Д.П.Коновалова: *„Пара, яка знаходиться в рівновазі з розчином, завжди має в надлишку той компонент, додавання якого до розчину знижує температуру кипіння”*.

Інакше кажучи, пара збагачується тим компонентом, додавання якого до рідини підвищує загальний тиск парів над нею.

Цей закон визначає якісний склад парової фази. Наприклад, в системі „етиловий спирт-вода” додавання до рідкої фази спирту викликає зниження температури кипіння. Отже, при кипінні парова фаза буде збагачуватись парами спирту.

Другий закон Коновалова Д.П. визначає положення на графіку  $p$ - $x$  нероздільнокиплячої чи азеотропної суміші, при якій пари, що виділяються,

мають той же склад, що і рідка фаза: **„В екстремумах тисків пари (чи точок кипіння) сумішей складу рідкої і парової фаз співпадають”**.

Цей закон встановлює, що якщо на кривій „склад-тиск” є точка перегину, то в цій точці концентрації компонентів в обох фазах будуть однакові. До цієї групи нероздільних сумішей відносяться суміші етилового спирту і води, етилового спирту і бензолу та ін.

Закони, які управляють зміною рівноваги при зміні тиску в системі, встановлені М.С. Вревським, який сформулював два закони.

**1. При підвищенні температури кипіння( тиску) розчину двох рідин в парах зростає відносний вміст того компонента, випаровування якого потребує більшої затрати енергії.**

**2. При підвищенні температури (тиску) кипіння розчинів, пружність пари яких має максимум, в нероздільнокиплячій суміші зростає відносний вміст того компонента, випаровування якого потребує більшої затрати енергії.**

**При підвищенні температури кипіння розчинів, пружність пари яких має мінімум, в нероздільнокиплячій суміші зростає відносний вміст того компонента, випаровування якого потребує меншої затрати енергії.**

Закони М.С. Вревського вказують напрям, в якому змінюється рівновага при зміні тиску в системі. Зокрема для системи „етиловий спирт-вода” вони вказують на те, що із зменшенням тиску при низьких концентраціях спирту в рідині (до 21 % мол.) збільшується вміст води в парах, а при вищих концентраціях спирту в рідині збільшується вміст спирту в парах.

**2. Простою перегонкою** називається процес часткового розділення суміші рідин шляхом поступового випаровування і безперервного видалення з перегінного апарата утворених парів.

Під час кипіння суміші вміст більш леткого компонента в парі, а отже і в дистилаті, що утворюється під час конденсації пари, більший ніж у рідині. Завдяки цьому в кубі поступово збільшується відносний вміст менш леткого компонента.

Перегонку проводять шляхом поступового випаровування рідини, яка знаходиться в перегінному кубі (рис. 11.1). Робочий цикл простого перегінного куба складається із таких операцій: наповнення, нагрівання вмісту до кипіння, згонка, спуск залишку і підготовка до наступного наповнення.

Вихідну суміш завантажують у перегінний куб 1, обладнаний змійовиком для обігріву і доводять до кипіння. Пару відводять у конденсатор - холодильник 2, де вона повністю конденсується і відводиться у вигляді дистилату у збірники дистилату 3.

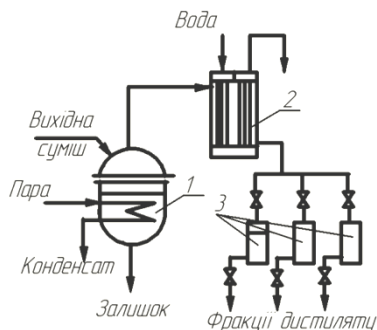


Рисунок 11.1 – Схема простого кубового апарата:  
 1- перегінний куб; 2- конденсатор-холодильник; 3 – збірники дистилату

Перші порції дистилату містять більшу кількість легколеткого компонента, ніж останні. Після закінчення процесу з куба зливають залишок і готують куб до наступного наповнення. Після цього у куб завантажують свіжу порцію вихідної суміші.

Матеріальний баланс простої перегонки в кубі, що працює без дефлегмації:

$$W \cdot x = (W - dW) \cdot (x - dx) + dW \cdot y, \quad (11.1)$$

де  $W$  – кількість суміші в кубі в будь-який момент перегонки,  
 $dW$  – кількість нижчекиплячого компонента, видаленого з куба.  
 $x$  – концентрація нижчекиплячого компонента в кубі,  
 $dx$  – зміна концентрації цього ж компонента,  
 $y$  – концентрація нижчекиплячого компонента в парі.

Розкривши дужки у рівнянні (12.1), скоротивши подібні члени рівняння, і нехтуючи добутком  $dW \cdot dx$ , як нескінченно малою величиною, отримаємо:

$$-W \cdot dx - dW \cdot x + dW \cdot y = 0,$$

$$\frac{dW}{W} = \frac{dx}{y - x}. \quad (11.2)$$

Позначимо через  $W_0$  початковий вміст суміші в кубі, а через  $x_0$  – вміст нижчекиплячого компонента в ній,  $W_1$  – масу залишку в кінці перегонки,  $x_1$  – вміст нижчекиплячого компонента в кубовому залишку.

Проінтегруємо останнє рівняння в межах від  $W_0$  до  $W_1$  і від  $x_0$  до  $x_1$ :

$$\int_{W_1}^{W_0} \frac{dW}{W} = \int_{x_1}^{x_0} \frac{dx}{y - x}$$

або

$$\ln \frac{W_0}{W_1} = \int_{x_1}^{x_0} \frac{dx}{y-x} \quad (11.3)$$

Рівняння (12.3) використовують для визначення кубового залишку  $W_1$ , кількості дистиляту  $W_0$  і його складу  $x_0$ . Найпростіше це зробити графічним методом, при якому крива підінтегральної функції будується за точками при допомозі таблиці рівноваги або кривої рівноваги.

За допомогою простої перегонки неможливо отримати дистилят з високим середнім вмістом нижчекиплячого компонента. Лише перші порції дистиляту містять значний процент нижчекиплячого компонента. Зі збільшенням кількості дистиляту процентний вміст нижчекиплячого компонента в ньому наближається до його вмісту в початковій суміші.

Тому, для підвищення ефективності процесу розділення суміші використовують перегонку з дефлегмацією (частковою конденсацією), обладнучи перегінний куб дефлегматором (рис.11.2)

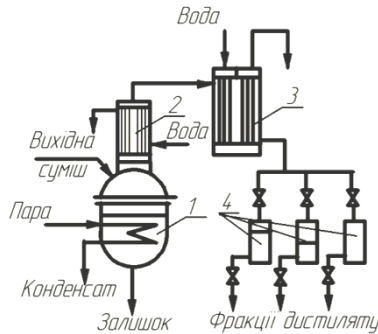


Рисунок 11.2 – Схема перегінного куба з дефлегмацією:

1 – перегінний куб; 2 – дефлегматор; 3 – конденсатор-холодильник;  
4 – збірники дистиляту

Вихідна суміш заливається у перегінний куб 1 та нагрівається до температури кипіння. Пара з перегінного кубу 1 поступає в дефлегматор 2, де вони частково конденсуються. При чому, з пари конденсується переважно висококиплячий компонент (ВК). Отримана в дефлегматорі рідина, яку називають флегмою зливається в перегінний куб 1. Пара, збагачена низькокиплячим компонентом, поступає в конденсатор-холодильник 3, де повністю конденсується. Утворений дистилят збирається у збірниках 4.

Закінчення операції контролюють за температурою кипіння рідини в кубі, яка повинна відповідати заданому складу залишку.

3. Розділення суміші на відносно чисті компоненти називається ректифікацією. Сучасні апарати, в яких куби замінені тарілками, розміщеними одна над одною по вертикалі, називаються ректифікаційними колонами. Вони є періодичної та безперервної дії. В ректифікаційній колоні періодичної дії (рис.11.3) пара піднімається із куба, проходить через отвори сітчастих тарілок до верху колони і поступає в дефлегматор 3.

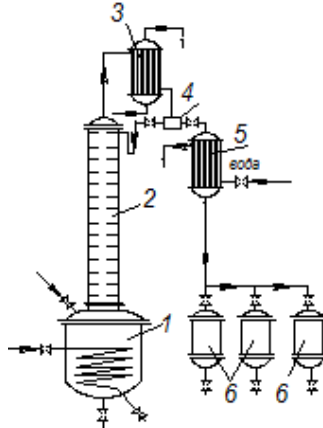


Рисунок 11.3 – Схема ректифікаційної колони періодичної дії:  
 1 – куб; 2 – ректифікаційна колона; 3 – дефлегматор; 4 – дільник флегми; 5 – холодильник; 6 – збірники дистилляту

Флегма, яка утворюється, стікає назад на верхню тарілку, а потім опускається в куб, проходячи по тарілках і зливаючись через зливні стакани. Частина пари, що не сконденсувалася у дефлегматорі надходить у холодильники 5, а конденсат (дистиллят) надходить у збірники дистилляту 6. Ректифікацію проводять доти, доки рідина в кубі (кубовий залишок) не досягне заданого складу. Після цього припиняють підігрівання кубової рідини, кубовий залишок виводять, а куб знову заповнюють вихідною сумішшю.

Ректифікаційні колони періодичної дії найчастіше використовують у виноробстві та на невеликих спиртових заводах.

В ректифікаційній колоні неперервної дії подача вихідної суміші, відведення дистилляту та кубового залишку здійснюється безперервно. Ректифікаційна колона в установках безперервної дії може бути повною (містити зміцнюючу або концентраційну частину та виснажну частину) або неповною, тобто містити лише зміцнюючу (концентраційну) або лише виснажну частини. В зміцнюючій (концентраційній) частині збільшується вміст ЛЛК в парі, яка рухається вгору за рахунок флегми. Вихідна суміш

подається в колону на межі між зміцнюючою та виснажуючою частинами колони.

Тарілка ректифікаційної установки призначена для створення тісного контакту між фазами. Пара, яка поступає на тарілку барботує через рідину, яка стікає по тарілці. Деякі конструкції тарілок представлені на рис.11.4.

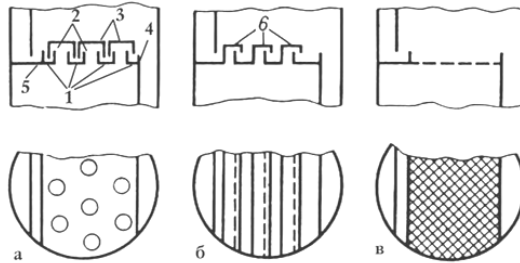


Рисунок 11.4 – Конструкції тарілок:  
а) ковпачкова; б) з S-подібними елементами; в) сітчаста

Для складання рівняння матеріального балансу припустимо, згідно до схеми на рис. 11.5, що в колону надходить  $F$  вихідної суміші. З колони видаляється  $G$  пари, утворюючої після конденсації флегму і дистилат. Кількість одержуваного дистилату  $P$  із вмістом  $x_P$  мол. часток ЛЛК. На зрошування колони повертається флегма в кількості  $\Phi$ , причому її склад дорівнює складу дистилату ( $x_\Phi = x_P$  мол. часток). Знизу з колони видаляється  $W$  залишку із вмістом  $x_W$  мол. часток ЛЛК.

Матеріальний баланс повної ректифікаційної колони можна записати у вигляді:

$$F = P + W, \quad (11.4)$$

де  $F, P, W$  – витрати відповідно вихідного продукту, дистилату та кубового залишку, кмоль/с.

Матеріальний баланс для ЛЛК можна подати у вигляді:

$$Fx_F = Px_P + Wx_W, \quad (11.5)$$

де  $x_F, x_P, x_W$  – молярні маси ЛЛК відповідно у вихідній суміші, дистилаті та кубовому залишку.

З розв'язку рівнянь матеріального балансу можна визначити витрати дистилату та кубового залишку:

$$P = F \frac{x_F - x_W}{x_P - x_W}, \quad (11.6)$$

$$W = F \frac{x_P - x_F}{x_P - x_W} \quad (11.7)$$

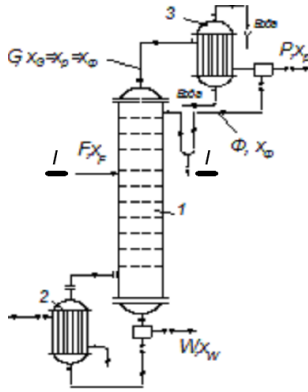


Рисунок 12.5 – Схема ректифікаційної колони неперервної дії :  
 1 – колона; 2 – куб; 3 – дефлегматор

Матеріальний баланс ЛЛК для концентраційної частини колони над перерізом I-I записують у вигляді:

$$Gy = Lx + Dx_P, \quad (11.8)$$

де  $G$  і  $L$  – витрати пари і рідини в частині колони, що розглядається;  
 $x$  і  $y$  – молярні частки ЛЛК відповідно в рідині та парі в перерізі I-I.

Баланс ЛЛК може бути записаний для будь-якого перерізу концентраційної частини колони.

З рівняння отримаємо:

$$y = \frac{L}{G}x + \frac{P}{G}x_P \quad (11.9)$$

Враховуємо, що  $G = L + P$ , можемо записати:

$$y = \frac{L}{L+P}x + \frac{P}{L+P}x_P \quad (11.10)$$

Виразимо витрату рідини  $L$  через флегмове число:  $L = RP$ . Тоді:

$$y = \frac{R}{R+1}x + \frac{x_P}{R+1} \quad (11.11)$$

Рівняння (11.11) називається робочою лінією концентраційної частини

колони.

Аналогічно можна записати рівняння робочої лінії виснажної частини, записавши рівняння матеріального балансу для перерізу II-II:

$$L'x = G'y + Wx_W \quad (11.12)$$

Рівняння робочої лінії виснажної колони буде мати вигляд:

$$y = \frac{L'}{G'}(x - x_W) + x_W \quad (11.13)$$

Кількість тарілок в ректифікаційній колоні можна визначити графічно за допомогою кривої рівноваги та робочих ліній процесу (рис.12.6).

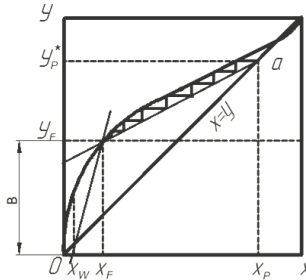


Рисунок 11.6 – Схема до визначення кількості тарілок у ректифікаційній колоні

Для складання теплового балансу ректифікаційної колони безперервної дії (рис. 11.7) прихід та витрати тепла занесемо у таблицю 11.1:

Таблиця 11.1 – Статті приходу та витрат тепла у ректифікаційній колоні безперервної дії

Прихід тепла	Витрата тепла
З теплоносієм у кип'ятильнику $Q_{\text{кип}}$ З вихідною сумішшю $Q_F = F \cdot i_F$ З флегмою $Q_\phi = \Phi \cdot i_\phi$	З паром, що надходить з колони в дефлегматор: $Q_G = G \cdot I$ Із залишком: $Q_W = W \cdot i_W$ Втрати у навколишнє середовище $Q_{\text{втр}}$

Рівняння теплового балансу матиме вигляд:

$$Q_{\text{кип}} + Q_F + Q_\phi = Q_G + Q_W + Q_{\text{втр}} \quad (11.14)$$

Підставляючи у рівняння (11.14) замість  $Q$  їх значення і враховуючи, що  $F = P + W$ ,  $G = P \cdot (R + 1)$   $\Phi = P \cdot R$ , отримаємо:

$$Q_{\text{кит}} + (P + W) \cdot i_F + P \cdot R \cdot i_\phi = P \cdot (R + 1) \cdot I + W \cdot i_W + Q_{\text{втр}}, \quad (11.15)$$

де  $I$ ,  $i_F$ ,  $i_\phi$  і  $i_W$  – ентальпії відповідно пари, що виходить з колони, початкової суміші, флегми і залишку.

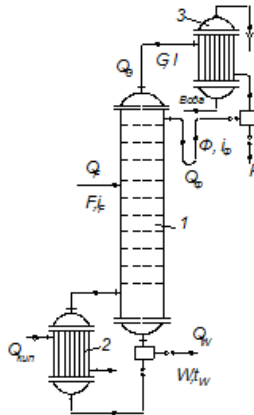


Рисунок 11.7 – До складання теплового балансу ректифікаційної колони безперервної дії:

1 – колона; 2 – кип'ятильник; 3 – дефлегматор

Розв'язуючи рівняння (11.15) щодо  $Q_{\text{кит}}$ , знаходимо витрату тепла в кип'ятильнику:

$$Q_{\text{кит}} = P \cdot (I - i_F) + P \cdot R (I - i_\phi) + W (i_W - i_F) + Q_{\text{втр}}. \quad (11.16)$$

З рівняння теплового балансу (11.16) видно, що тепло, яке надходить в кип'ятильник, витрачається на випаровування дистилляту  $P \cdot (I - i_F)$ , випаровування флегми  $P \cdot R (I - i_\phi)$ , нагрівання залишку до температури кипіння  $W (i_W - i_F)$ , а також на компенсацію втрат тепла в навколишнє середовище.

Флегма з дефлегматора надходить в колону за температури її кипіння. Тому ентальпія пари, що виходить з колони  $I = i_\phi + r_\phi$ , де  $r_\phi$  – теплота випаровування флегми.

Втрати тепла в навколишнє середовище зазвичай виражають у частках тепла, що підводиться в кип'ятильник, тобто приймають  $Q_{\text{втр}} = \alpha_{\text{втр}} \cdot Q_{\text{кит}}$ .

Після відповідних підстановок в рівняння (11.16), остаточно отримаємо:

$$Q_{\text{кит}} = \frac{P \cdot (I - i_F) + P \cdot R \cdot r_{\phi} + W(i_W - i_F)}{1 - \alpha_{\text{отр}}} \quad (11.17)$$

**Питання для самоконтролю:**

1. Що таке проста перегонка?
2. Сформулюйте основні закони перегонки.
3. Охарактеризуйте процес перегонки у перегонному кубі без дефлегмації.
4. Охарактеризуйте процес перегонки у перегонному кубі з дефлегмацією.
5. Охарактеризуйте процес ректифікації у ректифікаційній колоні періодичної дії.
6. Як визначити витрати тепла в кип'ятильнику з рівняння теплового балансу.
7. Охарактеризуйте процес ректифікації у ректифікаційній колоні неперервної дії.

**Тема 12. ПРОЦЕС ЕКСТРАГУВАННЯ**

1. Сутність і область застосування процесу.
2. Фізична суть процесу. Матеріальний баланс екстрагування.
3. Апарати для екстрагування.  
(матеріал укладено на основі джерел [2, 5, 8, 9, 10, 15, 16, 20]).

1. **Екстрагування** – процес вибіркового добування одного або декількох компонентів з розчину або твердого тіла за допомогою розчинника, що називається екстрагентом. У екстрагенті добре розчиняються тільки компоненти, що добуваються і значно гірше або практично зовсім не розчиняються інші компоненти, тому розчинник називається вибіркоvim або селективним. У харчовій промисловості в якості екстрагентів застосовують: воду, спирт, водно-спиртові суміші, зріджений вуглекислий газ, жир та різні органічні розчинники (дихлоретан, бензин тощо).

У харчовій технології дуже поширене екстрагування у системі тверде тіло-рідина. Для деяких харчових виробництв екстрагування є основним технологічним процесом.

Екстрагування застосовують:

- в цукровій промисловості- добування цукрози з бурякової стружки;
- в олієдобувній - олії з соняшника, сої, бавовника (екстрагент - бензин).

- в кон'ячному виробництві і- добування ароматичних, дубильних, барвникових речовин з дуба (екстрагент - спирт).
- в агаровому виробництві - добування агару з морських водоростей.
- добування екстрактів прянощів(екстрагент - діоксид вуглецю).
- при виробництві пива, крохмалю, желатину, лікєро-горітчаних виробів, розчинних кави або чаю.

Екстрагування в системі “рідина-рідина” застосовується при виділенні молочної кислоти з ферментаційних розчинів, сивушні масла з суміші компонентів. Під час екстрагування рідини, екстрагент повинен бути нерозчинним у рідині, що піддається обробці і мати більшу розчинність по відношенню до речовини, що добувається, ніж вихідна речовина. Після проведення екстрагування рідини повинні легко відокремлюватись за густиною.

У процесі екстрагування, як і в інших масообмінних процесах присутні дві фази (тверда і рідка або дві рідкі). У більшості харчових виробництв є необхідність отримання екстрагованої речовини у чистому вигляді, для чого після екстрагування проводять випаровування або відгонку розчинника.

**2. Екстрагування** – дифузійний процес, рушійною силою якого є різниця концентрацій цільового компонента у двох фазах, які стикаються. Цільовий компонент переміщується з однієї фази в іншу з області із більшою концентрацією у бік меншої концентрації. Екстрагування, яке проходить при кімнатній температурі відбувається за рахунок молекулярної дифузії, а при нагріванні або перемішуванні - конвективної дифузії.

Екстрагування у системі тверде тіло-рідина в загальному вигляді включає в себе чотири стадії:

- 1) дифузія розчинника (екстрагента) у пори твердого тіла;
- 2) розчинення цільового компонента (або декількох компонентів);
- 3) перенесення екстрагованої речовини у капілярах всередині твердого тіла до поверхні розділу фаз (внутрішня дифузія);
- 4) перенесення екстрагованої речовини у рідкому розчинникові від поверхні розділу фаз через приграничну плівку в ядро потоку екстрагента (зовнішня дифузія).

Загальний дифузійний опір масопереносу складається з дифузійного опору всередині твердого тіла і у розчинникові, а швидкість екстрагування визначається швидкістю протікання внутрішньої та зовнішньої дифузії.

Можливі такі випадки відносного впливу внутрішньої та зовнішньої дифузії на масопередачу при екстрагуванні:

1. Швидкість зовнішньої дифузії значно більша швидкості внутрішньої дифузії. У цьому випадку швидкість екстрагування визначається внутрішньою дифузією. Кількість екстрагованої речовини у цьому випадку визначається за формулою:

$$M = \frac{D_b}{R} \cdot S \Delta C \tau \quad (12.1)$$

де  $M$  – кількість екстрагованої речовини, кг;

$S$  – площа контакту між фазами,  $m^2$ ;

$\Delta C$  – різниця концентрацій компонента всередині тіла і в екстрагенті на межі розділу фаз,  $kg/m^3$ ;

$\tau$  – час екстрагування, с;

$D_b$  – коефіцієнт внутрішньої дифузії,  $m^2/c$ ;

$R$  – характерний розмір твердого тіла, м.

2. Швидкість внутрішньої дифузії більше швидкості зовнішньої дифузії.

У цьому випадку можна знехтувати процесом, що відбувається всередині твердого тіла, і швидкість екстрагування визначатиметься зовнішньою дифузиею. Рівняння, що описує процес екстрагування, можна представити у вигляді:

$$M = \frac{D_3}{\delta} \cdot S \Delta C_1 \tau, \quad (12.2)$$

де  $\Delta C_1$  – різниця концентрацій компонента на межі розділу твердого тіла та рідини та компонента в розчині,  $kg/m^3$ ;

$\delta$  – товщина приграничної плівки, м;

$D_3$  – коефіцієнт зовнішньої дифузії,  $m^2/c$ .

3. **Апарати для екстрагування.** Апарати, в яких здійснюється екстрагування, називаються екстракторами.

Для проведення процесу екстрагування в системі тверде тіло-рідина застосовуються три способи взаємодії фаз: контакт у замкненому об'ємі; фільтрування рідини через нерухомий шар пористих частинок; протитечій на взаємодія твердих частинок з рідиною.

Екстракційні установки за кількістю апаратів розділяють на **однокорпусні та багатокорпусні, апарати періодичної та безперервної дії**, з перемішувальними та без перемішувальних пристроїв. У великих виробництвах найчастіше встановлюють багатокорпусні установки, які складаються із декількох екстракторів, з'єднаних послідовно.

На рис. 12.1 зображено екстрактори простої конструкції для вилучення екстракту. Він має корпус 1 із завантажувальним люком 2 та відкидним днищем 3. У нижній частині розміщене конічне сито, а далі – конічне дно. Застосування таких апаратів доцільне для екстрагування рослинної сировини настоюванням протягом певного часу. Для інтенсифікації процесу можна здійснювати циркуляційне перемішування, застосовуючи при цьому відповідні насоси. Такі екстрактори можуть бути у вигляді батарей, які складаються із 12, 14 або 16 апаратів з проміжними підігрівачами для екстракту.

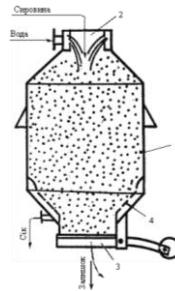


Рис. 12. 1 – Схема екстрактора:

*1 – корпус; 2 – завантажуваний люк з покритишкою; 3 – відкидне днище;  
4 – конусне сито*

Періодичний спосіб екстрагування пов'язаний із застосуванням громіздкої апаратури і не забезпечує комплексної механізації і достатньо повного виділення розчинених у рідині речовин. Більш ефективним є застосування апаратів безперервної дії. Прикладом апарата неперервної дії для екстрагування твердих речовин є зрошувальний стрічковий екстрактор, схема якого подана на рис. 12.2. Такі екстрактори використовують для виробництва олії з насіння соняшнику або сої. За схемою спеціально підготовлене насіння шаром певної висоти подається через бункер 2 на перфоровану стрічку транспортера 3, який рухається назустріч розпилювальному екстрагенту. Свіжий екстрагент подається в розпилювач 1, проходить через шар насіння, вбирає із нього залишок олії і стікає в збірник 5. Потім насос 4 подає цей ще слабо насичений олією екстрагент у наступну зону оброблення шару насіння, при цьому отримують більш насичений екстрагент і т. д. У результаті із правої частини екстрактора одержують концентрований продукт, а із лівої — відходи матеріалу майже без олії. Із одержаного екстракту екстрагент відділяють, а олію очищають.

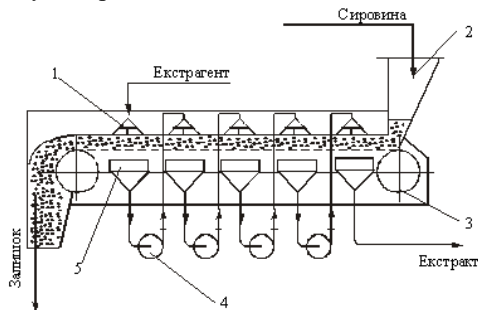


Рисунок 14. 2– Схема стрічкового екстрактора:

*1 – розпилювачі екстрагенту; 2 – завантажувальний бункер; 3 – перфорований стрічковий транспортер; 4 – насоси; 5 – прийомні піддони*

До екстракторів безперервної дії відносяться двоколонні екстрактори (рис.12.3), які знайшли застосування в олійному і ферментному виробництвах. Екстрактор складається із вертикальної колони 1 з перфорованим шнековим транспортером, в яку завантажуються підготовлена сировина. У нижній частині установки змонтовано горизонтальний шнек 2, який подає сировину в екстракційну колону 3. У верхню частину колони 3 подається екстрагент, який рухається проти напрямку руху твердої фази і виводиться насиченим екстрактом у верхній частині завантажувальної колони. Такі екстрактори продуктивністю 100...200 т/добу переробляють насіння соняшнику, сої або насіння бавовни на олію.

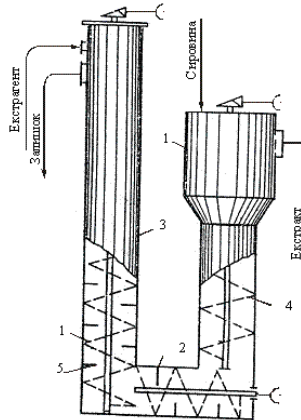


Рисунок 12. 3– Схема двоколонного екстрактора:  
 1 – завантажувана колона; 2 – горизонтальний апарат; 3 – екстракційна колона; 4 – перфоровані шнеки; 5 – металеві планки

На рис. 12.4 зображено двошнековий апарат для екстрагування чаю.

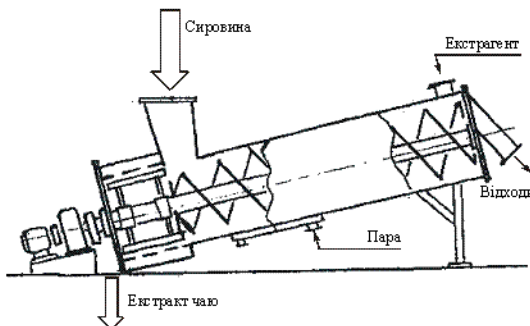


Рисунок 12.4 –Схема двошнекового апарата для екстрагування чаю

У багатьох виробництвах (у ферментному, сокоекстрактному виноградному) в шнекових апаратах екстрагування рослинної сировини проводиться в герметичному стані за оптимальної температури і заданого тиску.

Питання для самоконтролю:

1. В чому полягає процес екстрагування?
2. Поясніть фізичний зміст процесу екстрагування в системі «тверде тіло – рідина».
3. Назвіть основні стадії процесу екстрагування в системі «тверде тіло – рідина».
4. Які існують випадки відносного впливу внутрішньої та зовнішньої дифузії на масопередачу при екстрагуванні?
5. Будова та принцип роботи екстрактора періодичної дії.
6. Будова та принцип роботи екстрактора неперервної дії.

### Тема 13. СОРБЦІЙНІ ПРОЦЕСИ

1. Поняття про абсорбцію. Матеріальний баланс процесу.
2. Класифікація абсорберів і визначення їх основних розмірів.
3. Процес адсорбції.
4. Адсорбери.  
(матеріал укладено на основі джерел [2, 5, 8, 9, 10, 15, 16, 20]).

1. **Абсорбція** – це процес поглинання газів чи парів з газових чи парогазових сумішей рідкими поглиначами. Цей процес застосовується у виробництві кукурудзяного крохмалю (поглинання сірчистого газу водою з утворенням розчину сірчистої кислоти. В спиртовому виробництві і виноробстві при бродінні, водою для уловлювання парів етилового спирту, що в них містяться.

Зобразимо сорбційний процес схематично (рис. 13.1).

На основі збереження речовини може бути складене рівняння матеріального балансу абсорбційного процесу:

$$Vy_{II} + Wx_{II} = Vy_k + Wx_k, \quad (13.1)$$

з цього рівняння можемо записати:

$$V(y_{II} - y_k) = W(x_k + x_{II}) = M, \quad (13.2)$$

де  $M$  – кількість компонента, переданого із однієї фази в іншу, кмоль/с.

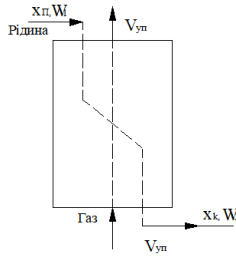


Рисунок 13.1 – Схема сорбційного процесу

Питому витрату сорбента можна визначити з формули:

$$m = \frac{W}{V} = \frac{y_p - y_k}{x_k - x_k} \quad (13.3)$$

Рівняння (13.3) є рівнянням прямої лінії, побудованої в координатах  $x$ - $y$  (лінія АВ). Лінія АВ носить назву робочої лінії абсорбера (рис. 13.2).

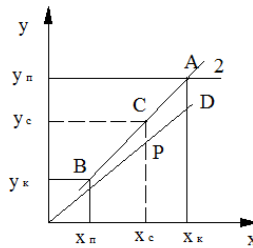


Рисунок 13.2 – Робоча (АВ) та рівноважна лінія абсорбції

За її допомогою встановлюється зв'язок між складом рідини і складом газу для будь-якого перерізу апарата, кутівий коефіцієнт цієї лінії, тобто  $m = tg\alpha$ . Для ідеальних розчинів, в яких сили взаємодії між молекулами компонентів системи однакові, умови рівноваги визначаються законами Генрі і Роселя.

Закон Генрі можна сформулювати так: розчинність газу за даної температури прямо пропорційна парціальному тиску газу над рідиною:

$$x = p\psi \quad (13.4)$$

де  $x$  – кількість розчинного газу в поглинаючій рідині, моль-долі;  
 $\psi$  – коефіцієнт пропорційності, який визначається експериментально.  
 Парціальний тиск компонента може бути виражений рівнянням:

$$p = yP, \quad (13.5)$$

де  $y$  – мольна доля компонента в газовій суміші;

$P$  – загальний тиск в суміші.

Рівняння фазової рівноваги процесу абсорбції:

$$H = \frac{1}{p\psi}, \quad (13.6)$$

де  $H$  – константа фазової рівноваги. Для ідеальних розчинів величина  $H$  є постійною і лінія рівноваги є прямою.

В загальному випадку залежність між  $y$  і  $x$  представляється кривою, яка називається кривою рівноваги. Вона будується на основі експериментальних даних в тих же координатах, що і робоча лінія процесу абсорбції.

Рушійна сила абсорбції може бути виражена як різниця  $(P_A - P_A^*)$ , де  $P_A$  – парціальний тиск компонента, що поглинається, в газовій суміші;  $P_A^*$  – парціальний рівноважний тиск цього ж компонента. Процес сорбції зупиниться, коли  $y_A = y_A^*$  або  $P_A = P_A^*$ . Якщо ж величина  $y_A = y_A^*$  стане від'ємною, то буде мати місце десорбція – процес, при якому компонент, що поглинається, буде виділятися з рідкої фази і переходити в газу.

Основне рівняння абсорбції може бути представлено в такому вигляді:

$$M = KF\Delta C\tau, \quad (13.7)$$

де  $M$  – маса речовини, переданої з газової фази в рідку, кг;

$K$  – коефіцієнт абсорбції, аналогічний коефіцієнту теплопередачі в процесі теплообміну;

$F$  – площа поверхні контакту фаз, м<sup>2</sup>;

$\Delta C$  – рушійна сила, яка виражена як різниця концентрацій або різниця парціальних тисків ( $\text{кг}/\text{м}^3$  або  $\text{Па}$ );

$\tau$  – тривалість процесу, год.;

Розмірність коефіцієнту  $K$  –  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па}}$ . Цей коефіцієнт є величиною, оберненою до опору масопередачі.

Якщо процес абсорбції розглядати з точки зору приграничних плівок механізм процесу може бути представлений таким чином (рис. 13.3).

Вважається, що в при граничних плівках компонент, який поглинається, переміщається тільки за рахунок молекулярної дифузії.

Таким чином, весь опір процесу масопередачі зосереджений в пограничних плівках.

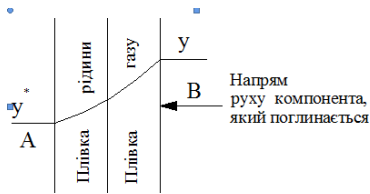


Рисунок 13.3 – Схема перенесення компонента через приграничні плівки

Тоді 
$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\beta_p} + \frac{\psi}{\beta_g}, \quad (13.7)$$

де  $\frac{1}{\beta_p}$  – опір масопередачі в рідкій плівці;

$\frac{\psi}{\beta_g}$  – опір масопередачі в газовій плівці.

Для добре розчинних газів:  $\frac{1}{K} = \frac{\psi}{\beta_g} \Rightarrow K = \frac{\beta_g}{\psi}$ , для погано розчинних газів

$$K = \beta_p.$$

2. При абсорбційних процесах масообмін відбувається на поверхні зіткнення фаз. Тому абсорбційні апарати повинні мати розвинену поверхню дотику між газом і рідиною. Виходячи із засобу створення цієї поверхні абсорбційні апарати можна поділити на такі групи:

а) поверхневі абсорбери, в яких поверхнею контакту між фазами є дзеркало рідини (власне поверхневі абсорбери) або поверхня поточної плівки рідини (плівкові абсорбери). До цієї групи належать насадкові абсорбери, в яких рідина стікає по поверхні завантаженої в абсорбер насадки з тіл різної форми (кільця, кусковий матеріал і т. д.), і механічні плівкові абсорбери.

б) барботажні абсорбери, в яких поверхня контакту розвивається потоками газу, розподілених в рідині у вигляді бульбашок і цівок. Такий рух газу (барботаж) здійснюється шляхом пропускання його через заповнений рідиною апарат (суцільний барботаж) або в апаратах колонного типу з різного типу тарілками. Подібний характер взаємодії газу і рідини спостерігається також у насадок абсорбера з затопленої насадкою.

в) розпилювальні абсорбери, в яких поверхня контакту утворюється шляхом розпилення рідини в масі газу на дрібні краплі. Поверхня контакту визначається гідродинамічним режимом (витратами рідини). До цієї групи відносяться абсорбери, в яких розпилення рідини проводиться форсунками або механічними пристроями, що обертаються.

Наведена класифікація абсорбційних апаратів є умовною, оскільки відображає не стільки конструкцію апарату, скільки характер поверхні контакту. Один і той же тип апарата залежно від умов роботи може

виявитися при цьому в різних групах. Найбільш розповсюдженими в харчових виробництвах є насадкові і тарілкові абсорбери.

Насадкові абсорбери (рис.13.4) відрізняють простотою конструкції і високою ефективністю. Насадковий абсорбер являє собою циліндричну башту, заповнену насадкою. Найпоширенішим є хордові і кільцеві насадки. Дерев'яна хордова насадка може використовуватись при низьких температурах, має малу масу і є дешевою. Але має низьку стійкість проти корозії, малу питому поверхню і малий вільний об'єм.

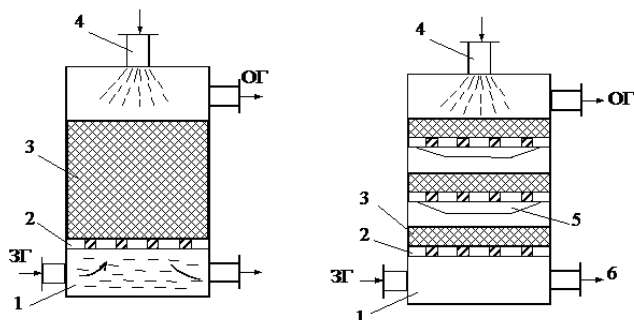


Рисунок 13.4 – Схема насадкового абсорбера:

- 1 – корпус; 2 – опорна решітка; 3 – насадка; 4 – розподільник рідини;  
5 – перерозподільник рідини. 6 – патрубок

Кільцеві насадки виготовляють з металевих або керамічних і тонкостінних кілець діаметром 15-150мм. Дрібні кільця насипають довільно, а великі –кладають правильними рядами.

При роботі абсорбера суміш газів подається в нижню частину колони і піднімається вгору. Назустріч їй насадками стікає вниз абсорбент, внаслідок чого газ або суміш газів контактують з плівкою рідини на насадках і один або декілька газів цієї суміші розчиняються в рідині. Нерозчинені складові частини газової суміші видаляються з абсорбера через вихідний патрубок, а рідина витікає трубопроводом.

Вихідними даними для розрахунку абсорберів є кількість інертного газу за одиницю часу; вміст в ньому компонента, який поглинається; вміст цього компонента в газах які, виходять з абсорберів; та в рідині, що поступає в апарат і виходить з нього.

Основні розміри насадкового абсорбера:

Діаметр абсорбера визначається з рівняння витрати:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \omega \Rightarrow D = \sqrt{\frac{4V}{\pi \omega}}, \quad (13.8)$$

де  $\omega$  – фіктивна швидкість руху газу, віднесена до вільного перерізу абсорбера м/с,

$V$  - об'єм газу, що протікає за секунду,  $m^3$ .

Об'єм насадки:

$$V_n = \frac{F}{\sigma}, \quad (13.9)$$

де  $F$  – площа поверхні контакту,

$\sigma$  – питома поверхня насадки .

Висота абсорбера:

$$H = \frac{4V_n}{\pi D^2}.$$

Площу поверхні контакту можна визначити з основного рівня абсорбції, написаного для одиниці часу:

$$M = KF\Delta C \Rightarrow F = \frac{M}{K\Delta C}. \quad (13.10)$$

або за таким рівнянням:

$$F = \frac{Mm_0}{K(y_{II} - y_K)}, \quad (13.11)$$

де  $m_0 = \frac{\Delta y}{(y - y^*)_{PC}}$  – коефіцієнт розподілу.

Процес абсорбції можна інтенсифікувати, якщо в насадкових апаратах насадку привести в стан псевдозрідження.

У тарілкових абсорберах переливання рідини з тарілки на тарілку здійснюється за допомогою спеціальних пристроїв – наприклад, зливних трубок. Нижні кінці трубок занурені в стакан, який знаходиться на нижніх тарілках, і утворюють гідравлічні затвори, що виключають можливість проходження газу через зливний пристрій.

Принцип роботи колон такого типу на прикладі абсорбера з сітчастими тарілками показано на рис.13.5. Рідина надходить на верхню тарілку 1, зливається з тарілки на тарілку через переливний пристрій 2 і видаляється з нижньої частини колони. Газ надходить в нижню частину апарату, проходить послідовно крізь отвори або ковпачки кожної тарілки. При цьому газ розподіляється у вигляді бульбашок чи струменів в шарі рідини на тарілці, утворюючи на ній шар піни, що є основою масообміну та теплообміну на тарілці. Відібраний газ видаляється згори колони.

Переливні трубки розміщено на тарілках так, щоб рідина на сусідніх тарілках проходила у протилежних напрямках. Зливні пристрої зазвичай виконують у вигляді сегментів, які вирізані в тарілці з обмеженим порогом – переливом.

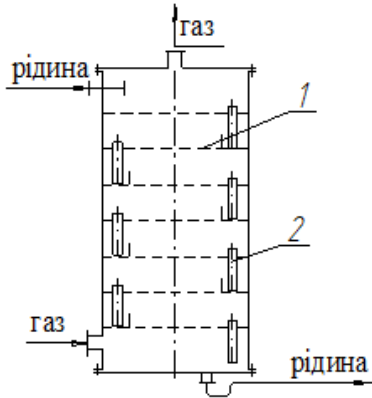


Рисунок 13.5 – Тарілчаста колона із зливними механізмами:  
1 – тарілка; 2 – зливні механізми

Тарілкові абсорбери обладнують ковпачковими або ситчастими тарілками. Для визначення числа тарілок в абсорберах використовують графічний розрахунок числа теоретичних контактів чи числа теоретичних тарілок (рис.13.6). Для виконання цієї побудови послідовно визначають склад газової і рідких фаз на послідовних тарілках. Точка 1 відповідає початковому вмісту компонента, який поглинається в газовій суміші. Знайдене число тарілок буде меншим від практичного в реальних апаратах:

$$N_g = \frac{N_T}{\eta}$$

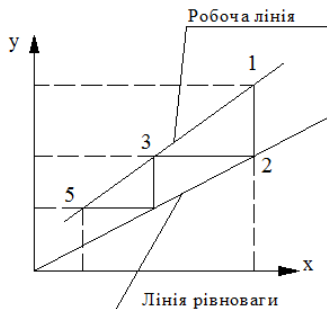


Рисунок 13.6 – Схема до розрахунку числа теоретичних тарілок в тарілкового абсорбері

Для поглинання спиртових парів водою орієнтовно  $\eta = 0,25$ .

3. **Адсорбція** – це процес вибіркового поглинання одного або декількох компонентів із газової, паро-газової або рідкої і концентрування їх на поверхні твердого пористого тіла, яке називається адсорбентом.

Явище адсорбції ґрунтується на силах взаємодії, що виникають між молекулами речовини, що поглинається (адсорбтива) і адсорбента на поверхні розділу фаз.

В харчовій промисловості адсорбція використовується для очистки дифузійного соку і сиропів в буряково-цукровому виробництві, сиропів крохмало-паточному виробництві, очистки (освітлення) і стабілізації вин, освітлення соків в консервному виробництві, рафінації рослинних олій, очистки спирту і водоспиртових сумішей в спиртовому та лікєро-горілчаному виробництві.

Адсорбенти що застосовуються в промислових умовах повинні мати такі властивості:

- вибірковість (селективність) - здатність поглинати тільки той компонент (ті компоненти), які необхідно виділити або видалити із суміші;
- максимальна адсорбційна ємність (активність) – кількість адсорбтива, який поглинається одиницею маси чи об'єму адсорбента;
- здатність гранично десорбуватись, яка необхідна для регенерації адсорбента;
- достатня міцність гранул адсорбента, їх руйнування погіршує гідродинаміку процесу;
- хімічне інертність по відношенню до речовин, що поглинаються;
- низька вартість.

Важливу роль в процесі грає величина питомої поверхні і розміри пор адсорбента. Чим менший розмір пор, тим більша поверхня адсорбента і відповідно його активність.

Активність адсорбента залежить від умов, в яких протікає процес адсорбції: температури, тиску (для газів і парів) і концентрації адсорбтива в середовищі, із якого поглинаються цільові компоненти.

Адсорбенти в промислових апаратах для адсорбції – адсорберах використовуються у вигляді гранул і порошоків. Для аналізу процесу адсорбції і розрахунку адсорберів повинні бути відомі геометричні і фізичні властивості адсорбентів:

- еквівалентний діаметр гранул –  $d_e = \frac{6}{S}$  ;
- де  $S$  – відношення поверхні гранул  $S_r$  до її об'єму;
- істинна густина речовини, з якої складається гранула  $\rho(\text{кг}/\text{м}^3)$ ;
- уявна густина гранули або відношення маси гранули до одиниці об'єму  $\rho_y(\text{кг}/\text{м}^3)$ ;

– насипна густина шару адсорбента або маса шару, віднесена до його об'єму,  $\rho_u$  ( $\text{кг} / \text{м}^3$ );

– пористість шару:

$$E_u = 1 - \frac{\rho_u}{\rho};$$

- пористість гранул:

$$E_r = 1 - \frac{\rho_y}{\rho}.$$

В харчових виробництвах в якості адсорбентів використовують активоване вугілля, силікагелі, алюмогелі і цеоліти (алюмосилікати). Процес, протилежний адсорбції-виділення із адсорбента поглиненої речовини, називається десорбцією.

До основних способів регенерації адсорбента відносяться:

– підвищення температури адсорбента або зниження тиску над ним (для видалення легколетких компонентів);

– продування перегрітою парою або нагрітим газом;

– витіснення поглинених компонентів іншою речовиною, що має вищу адсорбтивність, але легко потім видаляється одним із простих методів десорбції.

Десорбція протікає тим швидше і повніше, чим вища температура процесу.

Кількість речовини, адсорбована одиницею маси чи об'єму даного поглинача при досягненні стану рівноваги, залежить від температури і концентрації речовини, яка поглинається в парі газовій суміші чи розчині.

Розрахунок процесу адсорбції в нерухомому шарі адсорбента (періодичної адсорбції) оснований на рівнянні Шилова, яке встановлює зв'язок між тривалістю процесу, швидкістю потоку середовища через шар, концентрацією компонента, що поглинається рівноважною активністю адсорбента.

Момент часу, до якого фронт рідини або газу з концентрацією  $C_{II}$  досягає останнього шару частинок адсорбента, називається моментом проскоку. Після цього моменту із апарата почне виходити рідина або газ з концентрацією адсорбента, яка весь час збільшується.

Період від моменту постування рідини в шар до моменту проскоку називається часом захисту дії шару. За теорією Шилова його можна розрахувати за рівнянням:

$$\tau = \kappa H - \tau_0, \quad (13.12)$$

де  $\kappa$  – константа Шилова, яка розраховується:

$$K = \frac{a^*}{\omega C_0}, \quad (13.13)$$

де  $H$  – загальна висота шару;

$\tau_0$  – період швидкості переміщення фронту рівних концентрацій, яка зменшується;

$a^*$  – статична активність адсорбенту;

$\omega$  – швидкість руху рідини чи газу через шар.

Для того, щоб процес адсорбції міг протікати безперервно, адсорбент повинен рухатись назустріч потоку газу або рідини. Це можливо в тому випадку, якщо частинки адсорбента після їх повного насичення будуть безперервно регенерувати, а потім знову поступати на робочу ділянку шару, в якому протікає процес адсорбції. Таким чином, частинки адсорбента повинні проходити через три зони: I- адсорбції  $H_0$ , II- десорбції  $H_p$  і III- сушіння та охолодження  $H_{cp}$  (II і III називається зонами регенерації).

Висота зони адсорбції визначається за рівнянням:

$$H_0 = \frac{V}{S\beta} \int_{C_1}^{C_0} \frac{dC}{C - C_p} = h_c m, \quad (13.14)$$

де  $V$ - витрата газової або рідкої фази,  $M^3 / c$ ;

$S$ - площа поперечного перерізу шару,  $M^2$ ;

$\beta$  - коефіцієнт масовіддачі,  $m/c$ ;

$$h_c = \frac{V}{S\beta}, \quad (13.15)$$

$m = \int_{C_1}^{C_0} \frac{dC}{C - C_p}$  – число одиниць переносу;

$C_0, C_1$  – відповідно концентрація речовини, що поглинається в газоподібній (рідкій) фазі, яка входить в адсорбер і на виході з адсорбера,  $kg / M^3$ ;

$C_p$  – рівноважна концентрація в газоподібній фазі,  $kg / M^3$ .

Кількість ступенів зміни концентрації знаходять графічно з допомогою ліній рівноважної концентрацій і робочої лінії (рис. 13.7), побудованих в координатах динамічна активність – концентрація речовини, яка адсорбується, в газовій чи рідкій суміші.

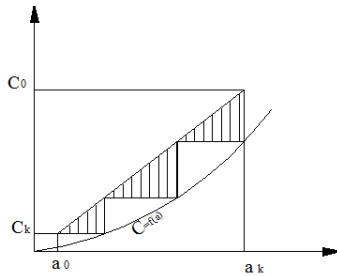


Рисунок 13.7 – Робоча та рівноважна лінії процесу адсорбції

4. **Адсорбери.** За принципом дії адсорбери поділяються на періодичні і безперервні. Періодичні адсорбери є з густим шаром і киплячим, безперервні – апарати з рухомих адсорбентом і з киплячим шаром адсорбента.

Цикл роботи періодичного адсорбера (рис.13.8) складається з 4-х стадій: адсорбції, десорбції, сушіння адсорбента і охолодження адсорбента.

В адсорбері періодичної дії газова суміш, з якої повинні бути витягнуті деякі компоненти, надходить через патрубок 1 в адсорбер, проходить через шар пористого адсорбенту 2, розташованого на горизонтальній решітці 3, і видаляється з апарата через патрубок 4.

Після насичення адсорбенту, яке визначається початком проскакування компоненту, що поглинається, проводиться десорбція. Шар адсорбенту прогрівається парою, яка надходить через патрубок 5. При цьому з адсорбенту відганяються пари витягнутих речовин, які відводяться через патрубок 6 на конденсацію і наступну переробку. Потім адсорбент сушать гарячою парою і після охолодження повторюють цикл процесу.

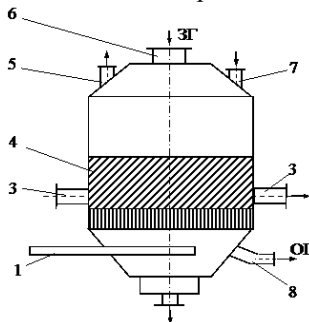


Рисунок 13.8 – Адсорбер періодичної дії:

1 – штуцер для відведення конденсату; 2 – решітка; 3 – люк для вивантаження адсорбенту; 4 – адсорбент; 5 – штуцер для відведення парів при десорбції; 6 – патрубок для підведення забрудненого газу; 7 – люк для завантаження адсорбенту; 8 – штуцер для відведення очищеного газу та повітря під час регенерації

В адсорберах безперервної дії (їх називають гіперсорбери) зернистий адсорбент переміщується вертикальною колоною, у верхній частині якої проходить адсорбція, а в нижній – десорбція під дією нагрівання.

Крім гіперсорберів застосовують адсорбери безперервної дії з киплячим шаром адсорбенту (рис. 13.9).

В корпусі 1 одноступеневого адсорбера встановлена розподільна решітка 2, через яку знизу подається газ, що приводить дрібно зернистий адсорбент в стан киплячого шару 3. Адсорбент безперервно надходить зверху і видаляється через трубу 5 на десорбцію.

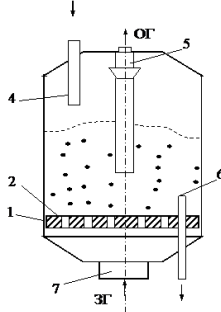


Рисунок 13.9 – Адсорбер з киплячим шаром адсорбенту:

- 1 – циліндричний корпус з конусом знизу; 2 – розподільна решітка;  
3 – адсорбент; 4 – патрубок для введення адсорбенту; 5 – пристрій для виведення очищеного газу; 6 – патрубок для виведення адсорбенту;  
7 – штуцер для подачі забрудненого газу

Питання для самоконтролю:

1. В чому полягає проведення процесу абсорбції?
2. Як складається рівняння матеріального балансу сорбційних процесів?
3. За якими ознаками класифікують абсорбери?
4. Поясність будову та принцип роботи абсорберів періодичної дії.
5. Поясність будову та принцип роботи абсорберів неперервної дії.
6. В чому полягає проведення процесу адсорбції?
7. Якими властивостями повинні характеризуватися адсорбенти?
8. Поясність будову та принцип роботи адсорберів періодичної дії.
9. Поясність будову та принцип роботи адсорберів неперервної дії

## Тема 14. КРИСТАЛІЗАЦІЯ І РОЗЧИНЕННЯ

1. Суть та механізм процесу кристалізації.
2. Матеріальний баланс кристалізації.
3. Будова кристалізаторів.

4. Суть та механізм процесу розчинення.
5. Апаратурне оформлення розчинення.  
(матеріал укладено на основі джерел [2, 5, 8, 9, 10, 15, 16, 20]).

1. Кристалізація — це масообмінний процес утворення твердої фази у вигляді кристалів з розчинів, розплавів, газів чи пари.

Кристал — це однорідне тверде тіло будь-якої геометричної форми, обмежене природними плоскими гранями, в якому молекули простих елементів або сполук впорядковано розташовані і об'єднані між собою у кристалічну ґратку.

У харчовій промисловості кристалізація речовин здійснюється здебільшого із перенасичених розчинів. За допомогою кристалізації одержують цукор, глюкозу, лактозу, фруктозу, лимонну кислоту, соду тощо.

У промисловості використовують такі основні способи кристалізації із розчинів:

- ізотермічний при сталій температурі з видаленням частини розчину випаровуванням;
- ізогідричний при сталому вмісті розчинника в розчині зміною температури розчину (нагріванням або охолодженням);
- комбіновані способи, до яких відносяться: вакуум-кристалізація шляхом випаровування розчинника за рахунок тепловіддачі розчину, кристалізація з випаровуванням частини розчину в потік повітря, що рухається над розчином та фракціонування кристалізація за наявності в розчині декількох речовин, що підлягають одночасному вилученню.

На кристалізацію впливає ряд факторів, зокрема, форма та розмір кристалів, фракційний склад та степінь чистоти продукту. Форма кристалів визначається природою речовини, що кристалізується, та залежить від вмісту домішок у розчині. Розмір кристала залежить від швидкості їх росту та степені перенасичення розчину. Одним з основних способів зниження швидкості процесу та утворення крупних кристалів є введення в розчин затравних кристалів і вивід із зони кристалізації найдрібніших фракцій.

**Кристалізація** – це один із найефективніших методів одержання речовин у чистому вигляді. У цукровому виробництві при очищенні соку і сиропу вилучається лише третина нецукрів, на стадії кристалізації отримується очищена цукроза, а нецукри залишаються у міжкристалічному розчині. Щоб отримати кристалічні речовини більш високої чистоти, застосовують розчинення їх та повторну кристалізацію.

На швидкість кристалізації мають вплив: температура та степінь перенасичення розчину, утворення зародків кристалів, інтенсивність перемішування та вміст домішок.

Зародки або центри кристалізації утворюються із перенасичених або охолоджених розчинів мимовільно за рахунок утворення асоціативних часток

при зіткненні окремих молекул розчиненої речовини в розчині. Зародки знаходяться у рівновазі з розчином, в результаті настає скритий період кристалізації, який називають індукційним. Утворення зародків можна прискорити підвищенням температури розчину або його перемішуванням.

Із сформованих зародків, які досягають критичних розмірів, починає рости кристал. Такі зародки називають центрами нової фази або центрами кристалізації. Ріст кристала відбувається одночасно по всіх його гранях, але з різними лінійними швидкостями росту.

Процес росту кристалів здійснюється в кілька основних послідовних стадій: дифузія речовини, що кристалізується, із об'єму перенасиченого розчину до поверхні кристала, адсорбція молекул цієї речовини на поверхні кристала, міграція найпростіших частинок по поверхні кристала та вбудова їх у кристалічну решітку.

Найсуттєвішими факторами, що визначають швидкість росту кристалів, є концентрація (пересичення), температура, в'язкість, доброякісність розчинів, питома поверхнева енергія кристалів.

**2. Матеріальний баланс процесу кристалізації** за загальними потоками речовин може бути представлений у вигляді:

$$G_0 = G_k + G_m + W, \quad (14.1)$$

де  $G_0, G_k, G_m$  – витрати відповідно вихідного розчину, отриманих кристалів та маточного розчину, кг/с;

$W$  – витрата води, що випаровується, кг/с.

Баланс за сухою речовиною:

$$G_0 \cdot x_0 = G_k \cdot y + G_m \cdot x_m \quad (14.2)$$

де  $x_0$  і  $x_m$  – концентрації відповідно вихідного і маточного розчинів, мас. частки;

$y = M/M_{кр}$  – відношення молекулярних мас абсолютно сухої розчиненої речовини ( $M$ ) і кристалогідрату ( $M_{кр}$ ).

Кількість продукту, що утворюється в процесі, знаходять шляхом спільного вирішення рівнянь (14.1) і (14.2):

$$G_k = \frac{G_m(x_0 - x_m) + Wx_m}{y - x_m}. \quad (14.3)$$

Якщо кристалічна фаза не містить розчинник (тобто  $y = M = 1$ ), рівняння (14.3) набуває вигляду:

$$G_k = \frac{G_m(x_0 - x_m) + Wx_m}{1 - x_m}.$$

У випадку ізогідричної кристалізації ( $W = 0$ ) рівняння (14.3) зводиться до вигляду:

$$G_k = \frac{G_m(x_0 - x_m)}{y - x_m}. \quad (14.4)$$

**3. Будова кристалізаторів.** Апарат, призначений для проведення процесу кристалізації шляхом охолодження розчинів називається кристалізатором.

За умовою утворення і росту кристалів кристалізатори ділять на такі умовні типи: 1) поверхневі, в яких утворення і ріст кристалів відбувається на охолодженій поверхні; 2) об'ємні, в яких утворення й ріст кристалів відбувається у всьому об'ємі апарата; 3) змішаного типу, у яких утворення й ріст кристалів відбувається на поверхні, що охолоджується, й в об'ємі апарата.

За типом створення умов пересичення розрізняють кристалізатори: 1) ізогідричні; 2) вакуумні; 3) випарні.

Ізогідричний поверхневий вальцевий кристалізатор (рис. 14.1) використовується для кристалізації солей, із розчинністю, що істотно знижується, при зниженні температури.

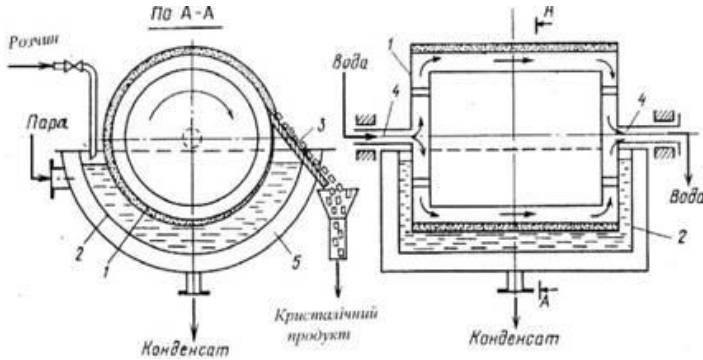


Рисунок 14.1. Схема поверхневого вальцевого кристалізатора:

1 – барабан; 2 – корито; 3 – ніж для знімання кристалів; 4 – порожнисті вали; 5 – парова сорочка

Апарат являє собою горизонтальний обертовий барабан 1 із водяною оболонкою, який занурений у корито 2 із розчином що кристалізується. Для уникнення передчасної кристалізації, корито має парову оболонку 5 для

нагрівання розчину. За один оберт барабана на його поверхні утвориться прошарок кристалів, що знімається з барабана ножем 3.

Вальцеві кристалізатори найчастіше застосовують для кристалізації розплавів або з розчинів із невеличким вмістом маточного розчину.

Для кристалізації розплавів застосовують також стрічкові кристалізатори (рис. 14.2).

Утворення кристалічного прошарку 4 відбувається нескінченній стрічці 8, на яку подається розплав, при його охолодженні знизу через цю стрічку. Розплав на стрічку можна подавати як суцільним шаром, так і смугами тощо. Утворені на стрічці кристали видаляються у бункер 6, а стрічки очищається від кристалів, що залишилися на ній за допомогою металевих щіток 7.

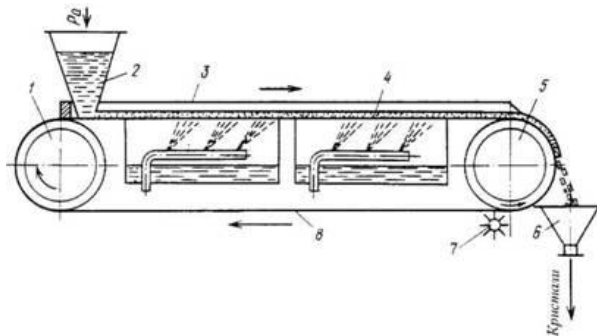


Рисунок 14.2 – Схема стрічкового кристалізатора:

1, 5 – барабани; 2 – бункер; 3 – бортик; 4 – прошарок, що кристалізується;  
6 – прийомний бункер; 7 – щітка; 8 – стрічка транспортера

Найпростішим об'ємним кристалізатором періодичної дії є апарат із оболонкою і мішалкою (рис. 14.3).

З метою уникнення інтенсивної інкрустації внутрішньої поверхні апарата, різниця температур розчину й охолодженої води (ропи) повинна бути невелика ( $8 - 10^0$  C). Корпус 1 об'ємного кристалізатора заповнюють розчином, а в оболонку 2 подають охолоджену воду. При зниженні температури розчину відбувається утворення зародків та ріст кристалів. Після закінчення процесу кристалізації суспензію, що утворилася, вивантажують і розділяють на фільтрах або центрифугах з одержанням кристалічної речовини і виділенням маточного розчину.

Для збільшення часу перебування розчину ці апарати часто з'єднують послідовно – каскадом.

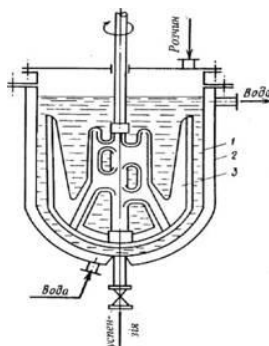


Рисунок 14.3 – Об’ємний кристалізатор періодичної дії з мішалкою:  
 1 – корпус; 2 – охолоджуюча оболонка; 3 – мішалка

4. **Розчинення** – процес, при якому відбувається перехід твердої речовини в розчинений стан в результаті розподілення молекул твердої речовини між молекулами розчинника.

Процес розчинення застосовується при виробництві рафінаду із цукру-піску, у хлібопекарському виробництві – приготування розчину солі, у молочної промисловості – для відновлення сухих молочних продуктів.

Процес розчинення відбувається у три стадії:

- перенесення молекул розчинника із рідкої фази до поверхні твердого тіла;
- перенесення молекул твердого тіла в рідину на межі розділу фаз;
- перенесення молекул розчиненої речовини від поверхні розділу фаз в об’єм рідини.

Прискорити процес розчинення можна збільшенням поверхні контакту твердих частинок з рідиною, що досягається подрібненням твердої речовини. Коефіцієнт масовіддачі залежить від розміру і форми твердих частинок тіла та їх швидкості руху у рідині. Тому інтенсифікувати процес розчинення можна за допомогою перемішуючих пристроїв, які збільшують швидкість руху частинок у рідині.

На процес розчинення впливає різниця концентрацій розчинника в перемішуваному об’ємі та приграничному шарі твердої речовини.

Багатокомпонентні системи розчинення застосовують у таких технологічних процесах, як, наприклад, виробництво фруктових газованих напоїв, де проводять розчинення фруктових соків, цукрового сиропу і вуглекислоти у воді. У таких випадках процес ускладнюється, оскільки необхідно експериментально визначити температурний режим розчинення. З підвищенням температури прискорюється процес розчинення твердих речовин і рідин, а газів зменшується, отже, необхідно розробити

технологічний регламент з оптимальними температурою і тиском для досягнення найкращої ефективності виробництва.

5. **Апарати для розчинення** бувають періодичної та безперервної дії. Апарат для розчинення сухого молока (рис.15.4) складається з ступінчастого циліндричного корпусу, всередині якого розташований перемішувач пристрій лопаткового типу 1, завантажувального бункера 2. У корпусі передбачені патрубки для подачі води 4 і виходу молока 6. Сухе молоко і вода подаються в завантажувальний бункер 2, з якого надходять у перший циліндр 3. Внаслідок інтенсивного перемішування відбувається рівномірний розподіл часточок сухого молока у воді, їх набухання і розчинення.

Далі продукт переходить у другий циліндр 5, куди подається вода з метою доведення вмісту сухих речовин у відновленому молоці до нормативного значення, процес розчинення завершується. Готовий продукт через патрубок 6 виводиться із апарату.

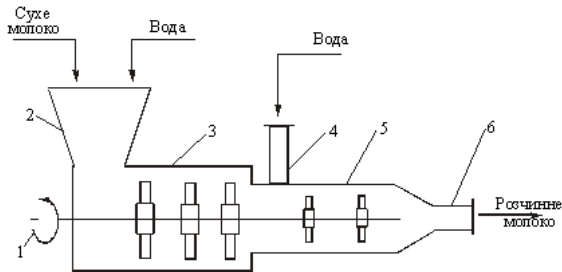


Рисунок 14.4 – Схема апарату безперервної дії для розчинення сухого молока:

1 – мішалка; 2 – завантажувальний бункер; 3 – перший циліндричний корпус;  
4 – патрубок; 5 – другий циліндричний корпус; 6 – патрубок

#### Питання для самоконтролю

1. Який процес називається процесом кристалізації, його фізична суть?
2. Складіть рівняння матеріального балансу процесу кристалізації.
3. Охарактеризуйте будову та принцип роботи кристалізаторів періодичної дії.
4. Охарактеризуйте будову та принцип роботи кристалізаторів неперервної дії.
5. Який процес називається процесом розчинення, його фізична суть?
6. Охарактеризуйте будову та принцип роботи апаратів для розчинення.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Михайлов В. М., Шевченко А. О., Прасол С. В., Маяк О. А. Процеси і апарати харчових виробництв. Ч. 2. Теплообмінні процеси: конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання за спец. 181 «Харчові технології». Харків: ДБТУ.2024. 153 с.
2. Процеси і апарати харчових виробництв: Підруч. / За ред.. І.Ф. Малежика. К.: НУХТ, 2021. 419 с.
3. Процеси і апарати. Механічні та гідромеханічні процеси: Підручник / В.С. Бойко, К.О. Самойчук, В.Г. Тарасенко, В.О. Верхоланцева, Н.О. Паляничка, С.В. Михайлов, О.О. Червоткіна. Мелітополь., 2021. 445 с.
4. Процеси і апарати харчових виробництв. Теплообмінні процеси: Підручник / В.С. Бойко, К.О. Самойчук, В.Г. Тарасенко, О.П. Ломейко. Мелітополь, 2020. 300 с.
5. Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум: Навчальний посібник / Ю.Г. Сухенко, М.М. Жеплінська, В.П. Василів, М.М. Муштрук, З.А. Бурова. 1–е перевидання, перероблене і доповнене. – К.: НУБіП України, 2025. 242 с.
6. Технологічне обладнання м'ясопереробних підприємств: Підручник. Частина I / В.В. Сарана, В.П. Василів, З.А. Бурова, М.М. Муштрук, М.М. Жеплінська, Н.М. Слободянюк. – К. : Компрінт, 2023. – 310 с.
7. Технологічне обладнання м'ясопереробних підприємств: Підручник. Частина 2 / В.В. Сарана, В.П. Василів, З.А. Бурова, М.М. Муштрук, М.М. Жеплінська, Н.М. Слободянюк. – К. : НУБіП України, 2024. – 369 с.
8. Черевко О.І., Поперечний А.М. Процеси і апарати харчових виробництв. Світ книг. 2019. 496 с.
9. Черевко О.І. Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум. Світ книг. 2020. 168 с.
10. Berk Z. Food Process Engineering and Technology. 3rd Edition. Academic Press, 2018. 744 p. ISBN: 978-0-12-812018-7.
11. Dudarev, I., Holiachuk, S., Hunko, Y., Panasyuk, S. (2021). Modeling of the mixing process in the gravitational mixer using the theory of Markov chains. In: Tonkonogiy V. et al. (eds) Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 119-128.
12. Dudarev, I., Olkhovskiy, V., Panasyuk, S., Khomych, S. (2021). Simulation of the bulk and granular materials separation process in the scissor type gravity separator. In: Ivanov V., Pavlenko I., Liaposhchenko O., Machado J., Edl M. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Volume 2: Mechanical and Chemical Engineering. Springer, Cham, 218–227.

13. Food Manufacturing Process: How Food Is Made. URL: <https://www.deskera.com/blog/food-manufacturing-process-how-food-is-made/> (дата звернення 15.12.2025)

14. Effective Separation Methods in Food Processing: Techniques and Applications. URL: <https://agriculture.institute/food-fundamentals-cpo/effective-separation-methods-food-processing/> (дата звернення 15.12.2025)

15. Food Processing Operations. URL: [https://nscpolteksby.ac.id/ebook/files/Ebook/Hospitality/Food%20Processing%20\(2011\)/3%20-%20Food%20Processing%20Operations.pdf](https://nscpolteksby.ac.id/ebook/files/Ebook/Hospitality/Food%20Processing%20(2011)/3%20-%20Food%20Processing%20Operations.pdf) (дата звернення 15.12.2025)

16. Heldman D.R., Lund D.B., Sabliov C.M. (Eds.) Handbook of Food Engineering. 3rd Edition. Press, 2019. 1231 p.

17. Mechanical Food Processing Equipment. URL: <https://ru.scribd.com/document/508877394/Mechanical-Processing-Equipment> (дата звернення 15.12.2025)

18. Neelesh K. Maurya, Anshu Thapa, Diana G. Nino, (2025), Thermal Processing in Food Preservation: A Comprehensive Review of Pasteurization, Sterilization, and Blanching, J. Nutrition and Food Processing, 8(5); DOI:10.31579/2637-8914/307

19. Thermal Processing of Food. URL: <https://www.tiselab.com/pdf/Thermal-Processing-of-Food.pdf> (дата звернення 15.12.2025).

20. What Is Food Processing Equipment? URL: <https://www.mirabake.com/what-is-food-processing-equipment/> (дата звернення 12.12.2025)

## ЗМІСТ

Передмова.....	3
Тема 1. Зміст та завдання курсу “Процеси та апарати харчових виробництв”. Моделювання процесів та апаратів на основі теорії подібності.....	4
Тема 2. Процес подрібнення.....	15
Тема 3. Процес сортування .....	24
Тема 4. Пресування і гранулювання.....	30
Тема 5. Процес перемішування.....	39
Тема 6. Розділення неоднорідних систем.....	46
Тема 7. Теплова обробка харчових продуктів і матеріалів. Процес конденсації.....	58
Тема 8. Процес випарювання.....	74
Тема 9. Основи масопередачі.....	85
Тема 10. Процес сушіння.....	92
Тема 11. Перегонка і ректифікація.....	101
Тема 12. Процес екстрагування.....	111
Тема 13. Сорбційні процеси.....	116
Тема 14. Кристалізація і розчинення.....	127
Список використаних джерел.....	134