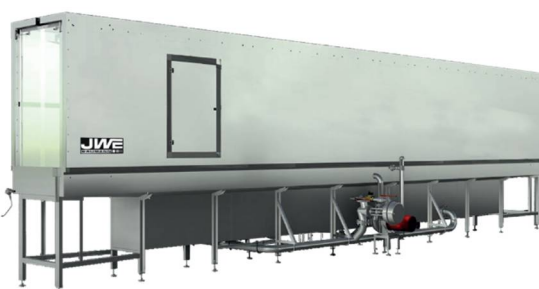




**І. В. Севостьянов, І. А. Зозуляк**

## **ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ЦЕХІВ ПЕРЕРОБКИ ПРОДУКЦІЇ ТВАРИНИЦТВА**



**Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний аграрний університет**

**І. В. Севостьянов, І. А. Зозуляк**

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ЦЕХІВ  
ПЕРЕРОБКИ ПРОДУКЦІЇ ТВАРИННИЦТВА**

**Навчальний посібник**

**Вінниця  
ВНАУ  
2020**

**УДК 637.02(075.8)**

**С-28**

*Рекомендовано Вченою радою Вінницького національного аграрного університету як навчальний посібник (Протокол №11 від 28.04.2020 р.)*

**Рецензенти:**

**В. Л. Зав'ялов** – доктор технічних наук, професор кафедри процесів та апаратів харчових виробництв Національного університету харчових технологій,

**О. В. Грушко** – доктор технічних наук, професор кафедри опору матеріалів та прикладної механіки Вінницького національного технічного університету,

**І. М. Берник** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри харчових технологій та мікробіології Вінницького національного аграрного університету.

**Севостьянов І. В.**

**С-28** Технологічне обладнання цехів переробки продукції тваринництва. Навчальний посібник / І. В. Севостьянов, І. А. Зозуляк. – Вінниця : ВНАУ, 2020. – 127 с.

У навчальному посібнику розглядаються загальні відомості щодо технологічного обладнання цехів переробки продукції тваринництва, зокрема, його класифікації, техніко-економічні показники, параметри надійності та продуктивності. Наведений детальний огляд обладнання для перемішування та подрібнення цехів перероблення, обладнання для розділення неоднорідних дисперсних систем, проведення теплообмінних процесів та об'ємної теплової обробки тваринницької продукції. Для кожного виду обладнання у посібнику наводяться його класифікації за основними ознаками, залежності для визначення робочих параметрів апаратів і машин, найбільш поширені варіанти схем обладнання та аналіз перспектив його подальшого використання та удосконалення.

Посібник призначений для студентів, що навчаються за спеціальністю 204 «Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва».

**ISBN 978-617-7789-16-0**  
**УДК 637.02(075.8)**  
**С-28**

© І. В. Севостьянов, 2020

© ВНАУ, 2020

ISBN 978-617-7789-16-0

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ПРОДУКЦІЇ ТВАРИННИЦТВА.....	7
1.1 Класифікаційні ознаки машин.....	7
1.2 Вимоги до обладнання.....	9
1.3 Витрати часу на реалізацію технологічного процесу.....	10
1.4 Техніко-економічні показники технологічного рівня та ефективності технологічних машин.....	11
1.5 Основні терміни та визначення з надійності та технологічності обладнання.....	12
1.6 Параметри продуктивності машин та апаратів.....	14
2 ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЕРЕМІШУВАННЯ ПРОДУКЦІЇ ТВАРИННИЦТВА.....	16
2.1 Загальні положення процесів перемішування.....	16
2.2 Перемішування рідких середовищ.....	17
2.2.1 Механічне перемішування.....	17
2.2.2 Основні типи апаратів для механічного перемішування.....	17
2.3 Перемішування високов'язких середовищ.....	21
2.4 Перемішування у потоках нерухомими турбулізаторами.....	24
2.5 Пневматичне перемішування.....	25
2.6 Перемішування сипких матеріалів.....	26
2.7 Параметри ефективності процесів перемішування.....	27
3 ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПОДРІБНЕННЯ ЦЕХІВ ПЕРЕРОБЛЕННЯ ПРОДУКЦІЇ ТВАРИННИЦТВА.....	29
3.1 Теоретичні основи процесів подрібнення.....	30
3.2 Основні типи подрібнювальних машин.....	32
3.2.1 Розтиральні-роздавлювальні дробарки.....	32
3.2.2 Дробарки ударної дії.....	34
3.2.3 Млини.....	36
3.3 Подрібнення матеріалів різанням.....	38
4 ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РОЗДІЛЕННЯ НЕОДНОРІДНИХ РІДКИХ СИСТЕМ.....	43
4.1 Характеристика та методи розділення неоднорідних систем.....	43
4.2 Обладнання для розділення неоднорідних систем у гравітаційному полі.....	44
4.3 Обладнання для осадження в полі відцентрової сили.....	47
4.4 Обладнання для фільтрування.....	49
4.4.1 Механізм процесів фільтрування.....	49
4.4.2 Елементи теорії фільтрування.....	52
4.4.3 Обладнання для фільтрування.....	53

5 ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ТЕПЛООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ.....	63
5.1 Основи теплообміну для проведення теплових процесів.....	63
5.2 Рушійна сила теплових процесів.....	64
5.3 Теплообмінні апарати.....	65
6 ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОБ'ЄМНОЇ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ ТВАРИННИЦЬКОЇ ПРОДУКЦІЇ.....	84
6.1 Загальна характеристика теплової обробки.....	84
6.2 Обладнання для здійснення варення, пастеризації, стерилізації, смаження та шпаріння.....	89
6.3 Обладнання для випарювання.....	94
6.3.1 Характеристики та методи процесів випарювання.....	94
6.3.2 Багатокорпусні випарні установки.....	99
6.3.3 Основні типи випарних апаратів.....	103
6.4 Обладнання для охолодження та заморожування.....	109
6.4.1 Основні означення та положення.....	109
6.4.2 Теоретичні основи процесів охолодження продукції тваринництва.....	111
6.4.3 Теоретичні основи процесів заморожування продукції тваринництва.....	115
6.4.4 Основні типи морозильних апаратів.....	117
ЗАКЛЮЧЕННЯ.....	123
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	124

## ВСТУП

Головним напрямком розвитку харчової промисловості, в тому числі галузі виробництва продукції тваринництва є удосконалення використовуваних технологій та обладнання, а також створення і впровадження нових прогресивних технологічних процесів та апаратів, що забезпечує значне підвищення продуктивності праці та якості готової продукції, покращення її споживчих якостей, зменшення негативного впливу виробництва на навколишнє середовище, економію вихідної сировини, паливно-енергетичних і матеріальних ресурсів.

Науково-технічний прогрес в харчовій промисловості пов'язаний з формуванням нових знань та ідей, технологічним освоєнням наукових відкриттів, винаходів, результатів досліджень та розробок, впровадженням передових технологій, прогресивної техніки, а також з іншими видами інноваційної науково-технічної діяльності.

Розробка та впровадження прогресивних технологій і нового обладнання пов'язані з глибокими дослідженнями закономірностей фізико-хімічних процесів в апаратах, призначених для переробки сировини і виробництва харчових продуктів.

Як самостійна галузь знань ця наука почала формуватись у ХІХ столітті. У 1897 р в книзі «Основи фабрично-заводської промисловості» Д.І. Менделєєв виклав принципи будови та класифікації процесів і апаратів хімічної технології, яка послужила основою для створення та удосконалення процесів і обладнання для переробки продукції тваринництва. У 1909 р А.К. Крупський опублікував книгу «Початкові глави вчення про проектування хімічної технології». У ній розглянуті основні положення з розрахунку та проектування основних процесів і апаратів.

А.К. Крупський та І.А. Тищенко написали перші підручники в даній галузі знань і по праву вважаються засновниками курсу. Аналогічний підручник Уокера, Льюїса і Мак-Адамса «Принципи науки про процеси та апарати» був виданий в США тільки в 1923 р.

Великий внесок у розвиток процесів та апаратів хімічної технології внесли вчені Л.Ф. Фокін, К.Ф. Павлов, Д.П. Коновалов, М.В. Кирпичов, М.А. Міхеєв, А.Г. Касаткін, П.Г. Романков, А.А. Гухман, А.Н. Плановський, Н.І. Гельперін, П.А. Ребіндер та інші.

У міру розвитку науки і промисловості в 30-х роках минулого століття з хімічної технології виділилася технологія харчових виробництв. Дані технології розвивались та удосконалювались представниками наукових шкіл, очолюваних А.Н. Плановським, М.М. Ліпатовим, Н.М. Жаворонковим, П.Г. Романковим, Н.І. Гельперіним, В.В. Кафаровим, Ю.І. Дитнерським, В.Н. Стабніковим і іншими. Заслуги в становленні і розвитку науки про обладнання для переробки продукції тваринництва мають такі вчені як А.А. Кіров, М.Д. Зуєв, Г.М. Знаменський, А.В. Ликов, А.С.

Гінзбург, С.Ф. Жигалов, В.І. Соколов, С.М. Гребенюк, Г.М. Знаменський, Г.А. Кук, Н.Є. Федоров та багато інших.

Серед іноземних учених, які зробили істотний внесок у розвиток даної галузі науки слід назвати Я. Ціборовського (Польща), П. Бендека і А. Ласло (Угорщина), Т. Шервуда (США).

В курсі «Технологічне обладнання цехів переробки продукції тваринництва» вивчаються виробничі процеси перетворення сировини в продукти харчування. Курс спирається на міцний фундамент хімії, фізики, математики, механіки, теплотехніки, електротехніки, технічної кібернетики, матеріалознавства, та інших дисциплін.

Будь-технологічний процес, попри розбіжності в методах, являє собою ряд взаємопов'язаних типових технологічних стадій, що протікають в апаратах певного виду та типу. Процеси переробки продукції тваринництва досить складні і зазвичай являють собою поєднання гідродинамічних, теплових, масообмінних (дифузійних), біохімічних та механічних процесів.

По суті, курс є теоретичною основою харчової технології, що дозволяє проаналізувати і розрахувати процес, визначити його оптимальні параметри, розробити обладнання для реалізації процесу.

Слід зазначити, що процеси та апарати хімічної і харчової технологій у фундаментальних основах не мають принципових розбіжностей. По суті в названих галузях використовуються одні й ті самі закони і методи розрахунку обладнання. Проте, специфіка, пов'язана з харчовими виробництвами, знайшла відображення у викладенні курсу, в методиках розрахунку ряду процесів та обладнання, в конструкціях апаратів і машин.

Курс «Технологічне обладнання цехів переробки продукції тваринництва» розглядає такі основні питання: загальні відомості щодо технологічного обладнання цехів переробки продукції тваринництва, в тому числі, його класифікації, техніко-економічні показники, параметри надійності та продуктивності; огляд обладнання для перемішування та подрібнення цехів перероблення, обладнання для розділення неоднорідних дисперсних систем, проведення теплообмінних процесів та об'ємної теплової обробки тваринницької продукції. Для кожного виду обладнання у посібнику наводяться його класифікації за основними ознаками, залежності для визначення робочих параметрів апаратів і машин, найбільш поширені варіанти схем обладнання та аналіз перспектив його подальшого використання та удосконалення.

# 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ПРОДУКЦІЇ ТВАРИННИЦТВА

## 1.1 Класифікаційні ознаки машин

Машина – це пристрій, який складається з певних елементів, що працюють узгоджено і виконують визначені функції для перетворення енергії, матеріалу або інформації.

Залежно від виду перетворення, що реалізує машина, всі вони поділяються на три основні класи [28]:

– машини-двигуни, що перетворюють один вид енергії в інший. Сюди належать електродвигуни, генератори, газові та електричні плити, печі тощо.

– машини-знаряддя або технологічні машини, що застосовують енергії для обробки матеріалу або продукту, зміни їх форми, властивостей, концентрації тощо.

– обчислювальні машини, призначені для перетворення інформації.

Машини та апарати харчових та переробних виробництв можна класифікувати за низкою інших ознак (рис. 1.1). При цьому в даному курсі поняття машини та апарату є тотожними, оскільки апарат, в загальному випадку, це пристрій, який містить робочу камеру, де відбувається процес перетворення матеріалу або продукту, механізми для завантаження та розвантаження робочої камери, а також елементи або системи для контролю і керування робочим процесом.

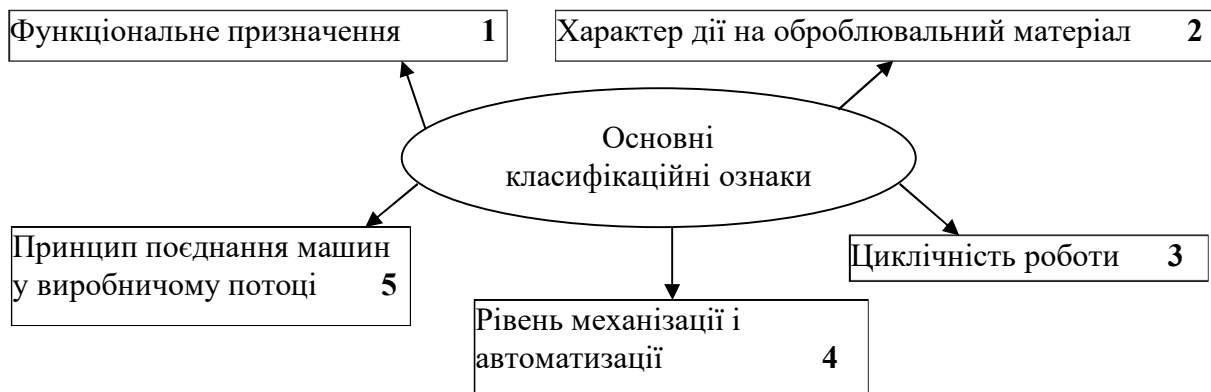


Рисунок 1.1 – Класифікаційні ознаки машин та обладнання

1. За функціональним призначенням машини поділяють на машини для виконання певного технологічного процесу, наприклад [13, 30]:

- для очищення та миття сировини, тари і допоміжних матеріалів;
- для подрібнення сировини та допоміжних матеріалів;
- для сортування та поділення сипких, рідких і грубодисперсних матеріалів;
- для пресування продуктів;
- для перемішування та отримання однорідних мас;
- для формування і поштучного розділення пластичних харчових мас;
- для загортання, пакування і фасування продуктів;



- для герметизації тари з харчовими продуктами;
- для дозування та зважування харчових продуктів;
- для проведення дифузійних процесів;
- для теплової обробки харчових продуктів.

2. За характером дії на оброблюваний матеріал розрізняють [1, 13]:

- машини, в яких продукт зазнає статичної або динамічної механічної дії і при цьому він не змінює своїх властивостей, а може змінювати лише форму, розміри або інші подібні параметри;
- машини, в яких матеріал унаслідок фізико-механічних, біохімічних, теплових або електричних впливів змінює свої фізичні, хімічні властивості або агрегатний стан.

У деяких випадках технологічне обладнання являє собою комбінацію елементів та систем, в яких реалізуються одночасно механічна, фізико-хімічна, тепла та інші види дій.

3. За циклічністю виконання технологічної операції виокремлюють машини періодичної і безперервної дії. У машинах періодичні дії оброблюваний матеріал зазнає впливу протягом певного часу, а готовий продукт виводиться з машини після закінчення цього часу. Тобто процес отримання певного продукту є циклічним і зазвичай складається із часу завантаження, приготування продукту і вивантаження [30].

У машинах безперервної дії процес завантаження, приготування і вивантаження готової продукції відбувається без зупинок. Прикладом машин цієї класифікаційної ознаки є змішувачі циклічної та безперервної дії.

4. За рівнем механізації і автоматизації операцій розрізняють машини неавтоматичної, напівавтоматичної та автоматичної дії [20].

У машинах неавтоматичної дії допоміжні операції (завантаження, вивантаження, переміщення, контроль) і деякі інші технологічні операції виконує людина. У таких машинах механізми та знаряддя лише полегшують працю, але не замінюють людину.

Напівавтоматичні машини виконують всі основні технологічні операції та процеси, а ручними залишаються деякі транспортні, контрольні та інші допоміжні операції.

Автоматичні машини виконують без участі робітника (оператора) як технологічні, так і всі допоміжні операції та процеси, зокрема транспортні і контрольні.

Особливістю машин напівавтоматів та автоматів є наявність в їх складі окрім основних механізмів і пристроїв, що забезпечують виконання технологічних операцій також спеціальних механізмів та пристроїв автоматичне функціонування машин.

5. За принципом поєднання у виробничому потоці розрізняють:

- окремі машини;
- агрегати або комплекси машин;
- комбіновані машини;

- автоматичні системи машин.

Якщо виконавчі елементи машини виконують різні процеси та операції в певній послідовності, то така машина є агрегатною чи комплексною. Завдяки таким машинам досягають прискорення процесів, економію праці та виробничих площ, зменшення споживаної енергії й експлуатаційних витрат. Більш досконалішими порівняно з агрегатними є комбіновані машини, що виконують певний закінчений цикл операцій і процесів.

Результатом послідовного розвитку виробництва є розробка і застосування автоматичних систем машин, що містять автоматизоване технологічне обладнання та автоматичні допоміжні завантажувально-розвантажувальні і транспортні пристрої (роботи, маніпулятори, конвеєри), які забезпечують високий рівень і ефективність робочого процесу.

## 1.2 Вимоги до обладнання

Машини та апарати харчових виробництв повинні задовольняти технологічним, експлуатаційним, конструктивним, ергономічним, економічним та іншим вимогам [28].

Технологічні вимоги визначаються призначенням апарату і прийнятою технологією ведення в ньому процесів. Вони конкретизуються в залежності від типу процесу, агрегатного стану оброблюваного матеріалу, його хімічного складу і фізичних властивостей. Технологічними вимогами визначаються форма робочого об'єму апарата та основні розміри елементів робочої зони, температура і тиск в ній, швидкість руху матеріалу та ступінь турбулізації рідинних потоків, необхідні площі контакту фаз, додаткові впливи на матеріал, запобігання інфікування і забруднення продукту.

Експлуатаційні вимоги надзвичайно різноманітні [20]. До них відносяться: висока інтенсивність процесу (продуктивність, віднесена до певного геометричного параметру апарату: об'єму робочої камери, площі нагрівальних поверхонь); корозійна стійкість матеріалів; витрати енергії; надійність; доступність для огляду і ремонту та інші.

Конструктивні вимоги залежать від багатьох факторів. До них відносяться: висока ступінь уніфікації і взаємозамінності з іншим обладнанням даного і споріднених підприємств; мала трудомісткість складання, монтажу та ремонту; зручність транспортування і ремонту; мінімальна маса, в тому числі металоємність; технологічність виготовлення і ремонту.

Ергономічні вимоги включають вимоги промислової естетики, та техніки безпеки, в тому числі вимоги забезпечення нормативних умов праці. Вони спрямовані на запобігання травм при експлуатації обладнання, створення здорових умов праці при безумовному виконанні санітарно-гігієнічних вимог до обладнання, створення сприятливих психофізіологічних умов для функціонування системи людина-машина-навколишнє середовище. Все ергономічні вимоги стандартизовані [28].

Економічні вимоги формулюються з умови мінімізації цільової функції витрат на розробку, виготовлення, складання та експлуатацію обладнання. У свою чергу, цільова функція витрат може враховувати умови проектування, статті виробничих та невиробничих витрат на виробництво, витрати на рекламу, транспортування, реалізацію та використання обладнання за прямим призначенням.

### 1.3 Витрати часу на реалізацію технологічного процесу

Кожний технологічний процес виконується з метою отримання якісного продукту у продовж лімітованого часу і з мінімальними витратами коштів. Для удосконалення організації виробництва та зниження його собівартості технологічний процес розбивається на ряд стадій від початкової до кінцевої.

Період, необхідний для обробки продукту, визначається тривалістю циклу  $T_u$ .

Як вказувалось, процес обробки поділяється на стадії, а стадії – на операції, кожна з яких має свою тривалість. Сумарна тривалість операцій циклу дорівнює  $T_u$ . Характер протікання стадій та операцій може бути безперервним (диференціальним) або із зупинками (дискретним). При безперервній обробці продукту технологічний процес відбувається у потоці. При цьому швидкість потоку і довжину шляху необхідно вибрати так, щоб час  $T_n$  проходження продукту через кожен одиницю обладнання (знаходження його в машині) був однаковим, або не меншим за  $T_u$ . Отже тривалість  $T_n$  визначає технологічний цикл. Для правильно сконструйованої машини повинна дотримуватися рівність [1]

$$T_u = T_n.$$

У деяких випадках задається термін  $T_u = T_n + \Delta T$ , тобто проектується машина з деяким запасом технологічного часу.

Однак цей запас не повинен бути занадто великим, що може призвести до зниження якості продукції, наприклад, до недопустимого ступеня подрібнення масляного зерна та підгоряння напівфабрикатів хлібобулочних виробів у конвеєрній печі.

Якщо швидкість  $v$  руху матеріалу в машині змінюється за певним сталим законом, то відповідний виробничий процес називається потоковим.

У випадку коли швидкість руху матеріалу змінюється дискретно і мають місце його зупинки, то процес називають перервно-потоким.

Якщо матеріал в машині рухається рівномірно з постійною швидкістю, то технологічний процес називається безперервно-потоким.

Обробка продукту в машині проходить під дією виконавчих елементів, які можуть бути нерухомими, здійснювати безперервний і рівномірний рух, або працювати із зупинками. Якщо кінематичні та динамічні параметри рухомого виконавчого елемента є змінними в часі, то

вони виконують циклічні операції. У більшості машин харчових та переробних виробництв застосовуються циклічні механізми.

Виконавчі елементи, що приводяться в дію такими механізмами, здійснюють періодичні рухи з поверненням у вихідне положення. Період часу між двома вихідними положеннями виконавчого елемента відповідає кінематичному циклу механізму  $T_k$ :

$$T_k = t_p + t_x + t_3,$$

де  $t_p$  – інтервал часу, що відповідає робочому ходу;

$t_x$  – тривалість холостого ходу;

$t_3$  – тривалість зупинок.

Проміжок часу між двома послідовними видачами робочою машиною готового штучного або порційного продукту називається робочим циклом  $T_p$ .

#### 1.4 Техніко-економічні показники технологічного рівня та ефективності технологічних машин

До оцінки будь-якої технологічної машини або системи машин можна підходити з різних точок зору. Для підприємств, що виготовляють продукцію за допомогою цієї машини важливо, щоб вона була високопродуктивною, надійною, зручною, безпечною та ефективною в експлуатації, мала невеликі габарити та видавала якісну і дешеву продукцію.

Для машинобудівних заводів, що виготовляють машини, важливим є те, щоб їх можна було швидко, просто та дешево виготовити і щоб вони знайшли попит у споживачів.

В інтересах економіки держави необхідно всебічно враховувати всі основні параметри машини, не обмежуючись розглядом окремих кількісних показників з вузьковідомчих чи галузевих позицій.

Коефіцієнт корисної дії (ККД), продуктивність та матеріалоємність технологічних машин є їх основними техніко-економічними показниками.

ККД двигуна технологічної машини являє собою відношення потужності, що віддає електродвигун до потужності, що яку він споживає

$$\eta = N_l / N_{cn} = (N_{cn} - \Delta N) / N_{cn},$$

де  $N_l$  – потужність, що віддає електродвигун, кВт;

$N_{cn}$  – потужність, що споживає електродвигун, кВт;

$\Delta N$  – втрата потужності в електродвигуні, кВт.

В машинах та апаратах, пов'язаних з тепловими процесами, основним є тепловий ККД, який виражається відношенням корисно спожитої теплоти до всієї теплоти, підведеної до нагрівача.

Витрата електричної енергії на пуск та роботу машини, віднесена до одиниці випущеної продукції, називається питомою витратою енергії і дає можливість зрівняти між собою економічність машин різних конструкцій та різної продуктивності.

Від конструкції машини та її виконавчих елементів залежить ефективність витрат вихідної сировини і допоміжних матеріалів.

Показниками якості конструкції машини є також її маса та габарити. Для визначення матеріалоемності машини її загальну масу відносять до продуктивності

$$M_{\text{нм}} = \frac{G}{\Pi_2},$$

де  $G$  – маса машини, кг;

$\Pi_2$  – її погодинна продуктивність, кг/год (шт/год).

Що ж стосується розмірів машин, то для порівняння та оцінки їх слід враховувати також продуктивність  $\Pi_2$  та тривалість робочого циклу машини  $T_{\text{ц}}$ . Тоді для машини, що має довжину  $l$ , ширину  $b$  та висоту  $h$  коефіцієнт габаритності  $K_2$  може бути визначений як [2]

$$K_2 = l \cdot b \cdot h / \Pi_2 \cdot T_{\text{ц}}.$$

### 1.5 Основні терміни та визначення з надійності та технологічності обладнання

Надійність є комплексним поняттям, яке визначає її здатність зберігати працездатність у продовж устанавленого терміну до переходу у граничний стан за умови використання машини за призначенням та за допустимих навантажень, при своєчасному та якісному виконанні планових заходів з її технічного обслуговування та ремонту. Складовими елементами надійності машини є її безвідмовність, довговічність, ремонтоздатність та збережність.

Роботоздатність – стан машини, при якому вона здатна виконувати задані функції з можливими перервами на ремонт до повного руйнування, коли відновлення втраченої роботоздатності стає неможливим або економічно не вигідним.

Справність – стан машини, при якому вона відповідає всім основним та другорядним вимогам нормативно-технічної документації.

Відмова – стан машини, що полягає у порушенні її роботоздатності. Відмови здебільшого пов'язані із руйнуванням деталей або їх поверхні. Відмови можуть бути повними або частковими, коли зберігається можливість подальшого використання деталі після її відновлення [14].

За характером прояву відмови також поділяються на раптові (поломка) і поступові (зношування), ліквідовані та неліквідовані.

Напрацювання на відмову – це середній час роботи машини до її першої відмови, а для відновлювальних машин вводиться ще показник середній час між двома сусідніми відмовами.

Безвідмовність – це властивість машини зберігати роботоздатність без вимушених перерв протягом заданого напрацювання до переходу у граничний стан.

Довговічність – це властивість машини зберігати свою роботоздатність до переходу у граничний стан, за необхідних перерв на технічне обслуговування та ремонт.

Технологічність машин та апаратів – сукупність параметрів конструкції, що визначають її відповідність прогресивній технології машинобудування, заданим умовам виробництва, які забезпечують найменші терміни освоєння, тривалість виробничого циклу, витрати праці та матеріалів [11].

Критеріями оцінки технологічності машин і апаратів є:

а) коефіцієнт конструктивної сприйняття, що визначається відношенням кількості деталей в конструкції нової машини, взятих з освоєних машин, до загальної кількості деталей нової машини, за винятком нормалізованих

$$K_1 = \frac{n_1 + n_2}{n_0 - n_3},$$

$n_0$  – загальна кількість деталей в машині;

$n_1$  – кількість деталей, взятих з базової конструкції;

$n_2$  – кількість деталей, взятих з інших конструкцій;

$n_3$  – кількість стандартизованих та нормалізованих деталей.

б) коефіцієнт нормалізації – визначає степінь застосування стандартизованих і нормалізованих деталей:

$$K_2 = \frac{n_3}{n_0}.$$

Збільшення цього коефіцієнта забезпечує зниження вартості машини.

в) коефіцієнт повторності деталей – виражає середню кількість однакових деталей, які припадають на одну машину:

$$K_2 = \frac{n_0}{m},$$

де  $m$  – кількість однакових деталей.

Окрім цього до показників технологічності машин належать:

– коефіцієнт використання матеріалу, що виражає відношення загальної маси машини до маси матеріалів та заготовок, з яких вона виготовлена;

– коефіцієнт взаємозамінності, що показує зниження трудомісткості складання та ремонту машини за рахунок наявності запасних деталей і вузлів, якими відразу можна замінити несправні або невідповідні під час реалізації вказаних процесів;

– коефіцієнт раціонального використання заготовок з лиття, штамповок і профільного матеріалу.

### 1.6 Параметри продуктивності машин та апаратів

Продуктивність машини характеризується кількістю продукції, що виготовляється в одиницю часу. Розрізняють три види продуктивності: дійсну  $\Pi$ , теоретичну  $\Pi'$  та технологічну  $\Pi''$ .

Дійсна продуктивність визначає ту кількість продукції, яку машина виробляє в одиницю часу, з врахуванням налагодження, передбачуваних та непередбачуваних зупинок та зміни інструменту.

Для машин циклічної дії [30]:

$$\Pi = \frac{n}{T_m} = \frac{n}{T_{zm} - T_{nz} - T_{no}},$$

де  $T_m$  – машинний час роботи машини за зміну;

$T_{nz}$  – підготовчо-заклучний час машини у продовж зміни (на отримання документації, необхідної для виготовлення продукції, налагодження машини, здійснення спробних робочих циклів);

$T_{no}$  – тривалість простоїв машини, обумовлених виконанням планових заходів з її технічного обслуговування та ремонту, а також з організаційно-технічних причин (відсутності, сировини, необхідного оснащення, електрики, робітника на робочому місці);

$n$  – кількість циклів, що виконуються за час  $T_m$ .

Теоретична продуктивність – це кількість продукції, яку могла б виготовити машина за одиницю часу за відсутності простоїв. Для циклічної машини

$$\Pi' = \frac{n}{T_{zm} - T_{nz}}.$$

Відношення дійсної продуктивності до теоретичної характеризує витрати робочого часу машини і називається коефіцієнтом використання теоретичної продуктивності

$$\eta = \frac{\Pi}{\Pi'} = \frac{T_{zm} - T_{nz} - T_{no}}{T_{zm} - T_{nz}}.$$

Технологічна продуктивність – це максимально можлива кількість продукції, яку могла б виготовити машина в одиницю часу без його втрат на зупинки:

$$П'' = \frac{n}{T_{зм}}$$

Відношення теоретичної продуктивності до технологічної називається коефіцієнтом продуктивності:

$$\eta'' = \frac{П'}{П''}$$

Основною характеристикою машини є її теоретична продуктивність  $П'$ , яка залежить від класу машини, кількості каналів для обробки продукту, швидкості руху виконавчих елементів і степені суміщення циклових операцій.

Для всіх видів машин і ліній справедливі наступні положення:

а) виробничий цикл  $T_{ув}$ , тобто час від моменту подачі продукту в машину до виходу його з неї повинен бути не меншим тривалості технологічного циклу  $T_{ум}$ , з урахуванням часу, необхідного для завантаження і розвантаження продукту –  $T_{з.р}$  і часу  $T_{тр}$  для транспортування його в машині формула в загальному має вигляд [1]

$$T_{ув} = T_{ум} + T_{тр} + T_{з.р};$$

б) продуктивність машини дорівнює відношенню кількості одиниць  $B$  реально виготовленої продукції до загального технологічного циклу:

$$П' = \frac{B}{T_{ум}};$$

в) продуктивність машин зворотно пропорційна часу на виготовлення одиниці продукції.

Для машин циклічної безперервної дії, що обробляють масові продукти, формула теоретичної продуктивності має вигляд

$$П' = \frac{M}{T_{ум}},$$

де  $M$  – маса продукту, який виробляє машина за час  $T_{ум}$ .



## 2 ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЕРЕМІШУВАННЯ ПРОДУКЦІЇ ТВАРИННИЦТВА

### 2.1 Загальні положення процесів перемішування

Перемішуванням називають процес приведення у відносний рух об'ємів речовини, що взаємодіють, з метою їх взаємопроникнення і рівномірного розподілення концентрацій, температур або окремих частинок [1, 30].

Перемішування є ефективним способом створення тісного контакту між компонентами, що взаємодіють та інтенсифікації теплових (нагрівання, охолодження, вирівнювання температур), масообмінних (сушіння, кристалізація, розчинення, сорбція, екстрагування), хімічних (гомогенні й гетерогенні реакції) і біохімічних (бродиння, вирощування бактеріальних культур) процесів.

Перемішування з метою рівномірного розподілення компонентів у суміші називають змішуванням.

Цей процес у більшості випадків є складовою частиною гідромеханічних процесів, який реалізується для рівномірного розподілення в об'ємі рідини завислих частинок, диспергування емульсій, суспензій та газорідних систем, одержання сумішей сипких продуктів з рівномірним розподіленням компонентів. Змішування та перемішування іноді здійснюють одночасно і суміщають з іншими технологічними процесами (тепломасообмінними, біохімічними).

За агрегатним станом середовищ розрізняють перемішування:

- рідких середовищ з малою та помірною в'язкістю (рідини, емульсії, суспензії, гази, газорідні суміші);
- високов'язких і пластичних середовищ (хлібопекарське тісто, тісто кондитерського та макаронного виробництва, карамельні, бісквітні, шоколадні маси);
- сипких матеріалів (зернові продукти, гранульовані матеріали, борошністі та порошкоподібні продукти).

Перемішування може відбуватися внаслідок як вільного, так і примусового відносного руху окремих об'ємів середовища. Вільне перемішування здійснюється внаслідок молекулярної дифузії та природної конвекції, зумовленої градієнтами температури або густини у різних зонах рідкого середовища. Примусове перемішування створюють за допомогою спеціальних пристроїв – мішалок.

Примусове перемішування широко застосовується у харчових виробництвах і характеризується значно більшою інтенсивністю взаємопроникнення частинок у порівнянні із вільним перемішуванням. Перемішування значно прискорює технологічні процеси, але потребує додаткових витрат енергії та ускладнює конструкції апаратів.

## 2.2 Перемішування рідких середовищ

Основними способами перемішування рідких середовищ малої та помірної в'язкості є: перемішування за допомогою мішалок (механічне); перемішування у потоках з використанням нерухомих турбулізаторів (потокове); барботажем та ерліфтне (пневматичне); циркуляційне (гідралічне); ультразвукове [11].

На перемішування високов'язких і пластичних середовищ, а також сипких матеріалів витрачається більше енергії, ніж на перемішування рідини помірної в'язкості. Тому майже завжди їх перемішують з використанням механічного способу, Малов'язкі рідини перемішують переважно за допомогою механічного способу.

### 2.2.1 Механічне перемішування

Традиційний апарат для даного перемішування – це посудина, переважно циліндричної форми, обладнана мішалним пристроєм, що включає двигун, вал та закріплену на валу всередині посудини мішалку (часто мішалкою називають весь апарат для перемішування.) Під час обертання, мішалка передає рідині певну кількість руху від двигуна і змушує її перемішуватись. Передня частина виконавчих елементів мішалки (наприклад, лопатей) тисне на рідину і вона їх обтікає, за лопатями виникає розрідження, яке спричинює підсмоктування рідини з оточуючого об'єму. Внаслідок обтікання і підсмоктування біля лопатей створюються турбулентні завихрення, які із збільшенням розмірів мішалки і частоти обертання машини поширюються на весь об'єм рідини, забезпечуючи її перемішування.

В обертових апаратах при турбулентному режимі руху рідина захоплюється лопатями мішалки й обертається разом з ними з досить високою коловою швидкістю. Із збільшенням частоти обертання на рідину, що перебуває в просторі між лопатями, діє дедалі більша відцентрова сила. Внаслідок цього виникає також рух рідини в радіальному напрямку від центра до стінок апарата. На місці витіснених об'ємів рідина підсмоктується до центра апарата з верхніх і нижніх шарів. Створюється складний тривимірний циркуляційний контур, в якому дві із трьох просторових складових (радіальна та осьова), як правило, в багато разів менші від колової швидкості, значення якої майже не змінюється по висоті апарата і практично не залежить від рівня розміщення мішалки. Співвідношення між складовими швидкостей може бути різним і залежить від конструкцій мішалок [13].

### 2.2.2 Основні типи апаратів для механічного перемішування

Механічні мішалки змушують суміжні шари рідкого середовища рухатися з різними відносними швидкостями. При турбулентному режимі руху перемішування є результатом двох процесів, що проходять одночасно: 1) конвективного перенесення великих об'ємів потоку зі спрямованою

течією рідини; 2) накладених на нього пульсаційних рухів різної швидкості та енергії. Залежно від переважаючої довжини шляху (або часу існування) окремих об'ємів потоку (струменів, пульсацій) та впливу їх на перенесення енергії і маси розрізняють мікро- та макромасштабне перемішування.

У разі перемішування на мікрорівні розмір окремих об'ємів, що переміщуються є значно меншим за розміри апарату, але сумірний з розмірами дисперсних частинок. Перемішування на мікрорівні забезпечує руйнування примежових шарів, сприяє активізації та оновленню поверхонь контакту фаз.

Розмір рухомих об'ємів порції середовища при його перемішуванні на макрорівні є сумірним з розмірами апарату. Макроперемішування збільшує рушійну силу в об'ємі апарату, впливаючи на режим потоків, який може змінюватися від ідеального витіснення до ідеального перемішування.

Для орієнтовної характеристики перемішувальних пристроїв, можна скористатися аналогією між роботою апарату для перемішування та насоса. В цій аналогії більша продуктивність насоса відповідає більшій частоті циркуляції, а вищий напір – вищому ступеню турбулентності. Для інтенсифікації макроперемішування вибирають мішалки з більшою частотою циркуляцій, для підвищення інтенсивності мікроперемішування – обладнання, що забезпечує більший ступінь турбулентності. Класифікація мішалок для перероблення малов'язких та високов'язких матеріалів показана на рис. 2.1.

Кожен режим перемішування дає змогу вирішити ті чи інші технологічні завдання й, у свою чергу, може бути ефективно реалізований за допомогою апаратів з мішалками відповідних типів.

Класифікацію слід розглядати як орієнтовну й усереднену. Остаточний вибір типу апарату виконують на основі розрахунку його параметрів та експериментальних даних. В той же час один і той же технологічний ефект може бути досягнутий за допомогою апаратів різних конструкцій.

Змінити масштабний рівень перемішування та відповідний технологічний ефект можна за рахунок зміни частоти обертання та співвідношення розмірів виконавчих елементів та встановленням внутрішніх пристроїв (відбивних перегородок, напрямних і циркуляційних елементів). Наприклад, встановлення в посудині відбивних перегородок істотно змінює характеристики процесу перемішування і практично відповідає зміні типу апарату.

Найбільш універсальними для перемішування при турбулентному режимі руху з метою переважного вирівнювання концентрацій і температур є лопатеві, пропелерні та турбінні апарати з мішалками, що створюють одночасно макро- і мікропотоки. В лопатевих апаратах переважає колова складова швидкості руху, в пропелерних і турбінних – відповідно зростають аксіальна і радіальна складові.



Рисунок 2.1 – Класифікація механічних мішалок за видом середовища, що перемішується, масштабним рівнем процесу та технологічним призначенням

Лопатеві мішалки є найпростішими за будовою. Вони містять закріплені на вертикальному або горизонтальному валу виконавчі елементи, встановлені перпендикулярно або під кутом до напрямку руху (рис. 2.2, а, г). Кількість лопатей, їх рядів по висоті може також бути різною (рис. 2.2, б), як і форма самих лопатей. Будова лопатей визначається фізичними властивостями перемішуваного середовища.

Звичайні лопатеві мішалки найбільш придатні для перемішування малов'язких рідин (до  $0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ). Частота їх обертання як правило складає  $0,4 \dots 1,5 \text{ с}^{-1}$  і не перевищує  $6,5 \text{ с}^{-1}$ . Для більш в'язких рідин рекомендуються мішалки в посудинах з відбивними перегородками (рис. 2.2, б) та рамні мішалки (рис. 2.2, в) [5].

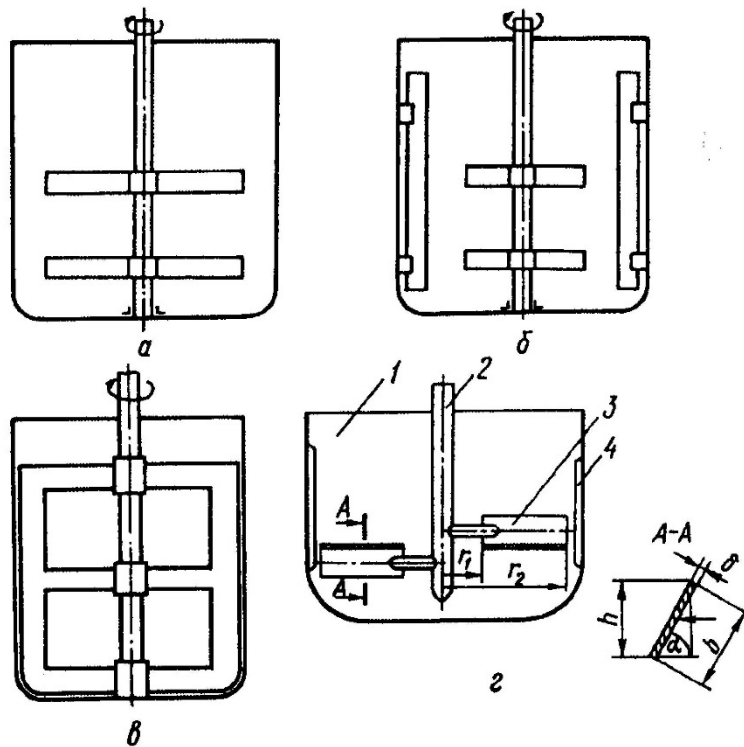


Рисунок 2.2 – Схеми апаратів з лопатевими мішалками: а – з парними лопатями; б – в посудині з відбивними перегородками; в – рамної; г – з несиметрично розміщеними похилими лопатями; 1 — посудина; 2 — вал; 3 — лопать; 4 — відбивна перегородка

Перевагою лопатевих мішалок є простота їхньої будови. Проте вони не забезпечують інтенсивного перемішування в радіальному та осьовому напрямках. Якщо лопаті встановлено перпендикулярно до напрямку руху, то вони слабо утримують частинки суспензії в завислому стані, особливо якщо густина частинок значна, а в'язкість рідкого середовища невелика.

Багатолопатеві мішалки з несиметрично розміщеними на вертикальному або горизонтальному валу тонкими лопатями (рис. 2.2, г), що обертаються з великою частотою, застосовують для збивання кондитерських мас.

За лопатями, що рухаються з великою швидкістю, утворюються численні дрібні порожнини, у які засмоктується повітря. Внаслідок багаторазового впливу лопатей бульбашки захопленого повітря роздроблюються і утворюють густу піну, в якій об'єм повітря може у кілька разів перевищувати початковий об'єм рідкої фази. Утворення піни забезпечується за рахунок уведення в продукт поверхнево-активних речовин (наприклад, білків курячих яєць), а стійкість піни – шляхом додавання стабілізаторів (драглеутворювачів), до яких належать агар, желатин та пектин.

Пропелерні мішалки (рис. 2.3, а) мають виконавчий елемент у вигляді гвинта (пропелера), насадженого на вертикальний або горизонтальний вал. Гвинти бувають дво- і трилопатевими. Діаметр гвинта становить від 1/3 до

1/4 діаметра посудини. Завдяки зміні кута нахилу лопатей по їхній довжині частинки рідини відштовхуються гвинтом у багатьох напрямках, що забезпечує кращу циркуляцію рідини. Щоб збільшити циркуляцію рідини в осьовому напрямку, пропелер іноді встановлюють у короткий циліндр з розтрубом. А щоб створити зустрічні потоки, на одній осі можна встановлювати два гвинти, спрямовані назустріч один одному. Частота обертання гвинтів  $2,5 \dots 17,0 \text{ с}^{-1}$ .

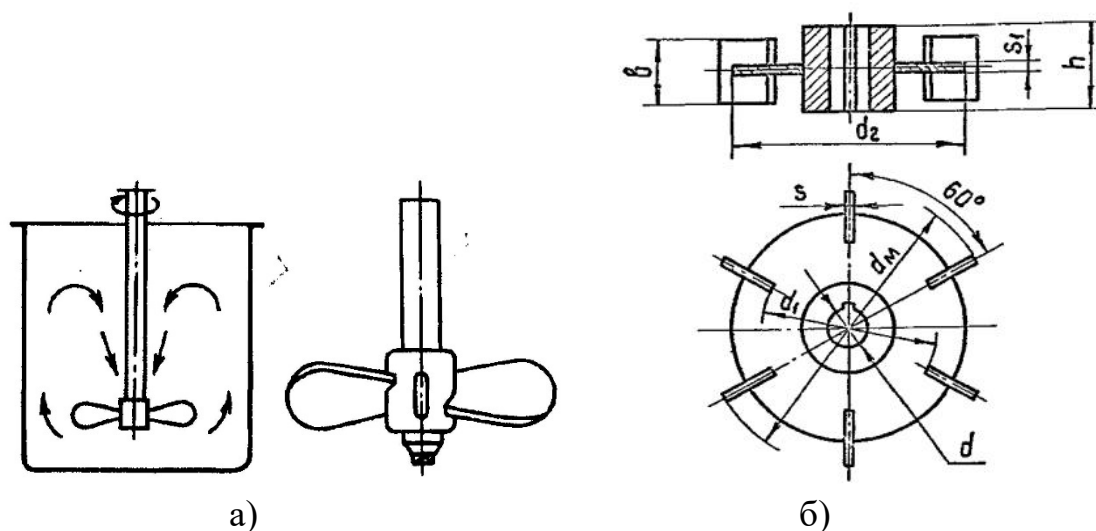


Рисунок 2.3 – Схеми пропелерної (а) та турбінної (б) мішалок

Пропелерні мішалки доцільно використовувати для макроперемішування малов'язких рідин з коефіцієнтом динамічної в'язкості до  $0,6 \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Порівняно з лопатевими мішалками пропелерні апарати ефективніші, але вони потребують більше енергії. У разі спрямування потоку рідини до дна посудини вони добре скаламучують осад з розміром частинок до  $0,15 \text{ мм}$ . Похиле розміщення гвинта дещо підвищує ефективність перемішування.

Турбінні мішалки мають в якості виконавчого елемента турбіну, яка встановлена на вертикальному чи горизонтальному валу, що обертається з частотою  $3,5 \dots 35,0 \text{ с}^{-1}$ . Розрізняють турбіни закритого і відкритого типу (рис. 2.3, б) [4].

Рідина входить у колесо турбінної мішалки з двох сторін крізь вісесиметричні кільцеві отвори і, діставши прискорення від лопатей, викидається з колеса в радіальному напрямку, що створює в посудині циркуляційні контури руху рідини з інтенсивними радіальною та осьовою складовими. У турбінах відкритого типу лопаті закріплені на диску і можуть бути прямими та загнутими. Перемішування можна покращити, якщо на вал мішалки встановити дві турбіни.

Турбінні мішалки забезпечують інтенсивне макро- і мікроперемішування. Вони придатні для перемішування рідин різної в'язкості (до  $0,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ), скаламучування осадів у суспензіях, що містять до

60% твердої фази, і для змішування з рідиною сипких матеріалів з розміром частинок до 5 мм.

Турбінні мішалки з лопатями відкритого типу за будовою та принципом дії більше нагадують лопатеві мішалки, а за ефективністю перемішування займають проміжне місце між лопатевими та турбінними мішалками закритого типу. Лопаті можуть бути нахилені під кутом до напрямку руху.

Перемішування рідких середовищ переважно на мікрорівні потребує створення турбулентних пульсацій малого масштабу. Для цього використовують якірні та турбінні мішалки в посудинах з відбивними перегородками, вібраційні, кавітаційні, ультразвукові та інші апарати [31].

Якірні мішалки (рис. 2.4, а) використовують, щоб запобігти місцевому перегріванню рідини біля нагрівних стінок або осаду на дні посудини. Форма профілю лопатей якірних мішалок практично повторює профіль дна та стінок апарата, що обігривається зовні. Частота обертання цих мішалок невелика і розраховується за коловою швидкістю контуру лопатей, яку приймають в межах 0,5... 1,5 м/с; зазор між лопатями і стінками не перевищує кількох міліметрів. Якірні мішалки застосовують для перемішування рідин з коефіцієнтом динамічної в'язкості до 1 Па·с.

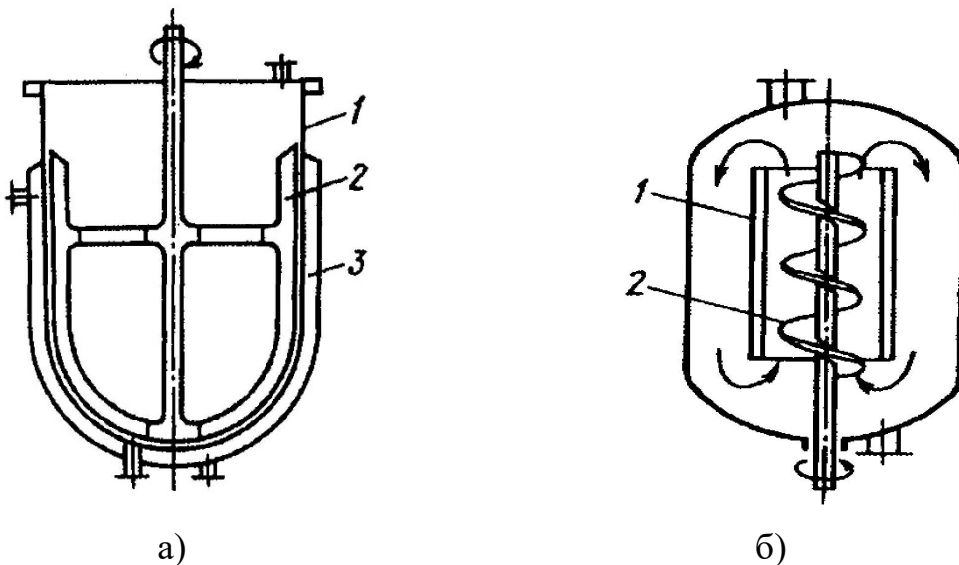


Рисунок 2.4 – Схеми: а – якірної мішалки (1 – корпус; 2 – лопаті; 3 – водяна сорочка для підігріву); б – шнекової мішалки (1 – дифузор; 2 – шнек)

### 2.3 Перемішування високов'язких середовищ

Оскільки в апаратах з мішалками градієнт швидкості в різних зонах суттєво відрізняється, то під час перемішування неньютонівських рідин (борошняне тісто, м'ясні, рибні та фруктові фарші, джеми, соуси) часто створюються умови для різкої зміни швидкості руху середовища в окремих об'ємах, з утворенням застійних зон, де перемішування практично не відбувається.

Ефективність перемішування неньютонівських рідин забезпечується не лише введенням енергії в робочу зону апаратів, а й примусовим розподіленням введеної кількості руху на весь об'єм маси, що перемішується, завдяки її циркуляції.

Це потребує застосування мішалок таких конструкцій, в яких все середовище періодично проходить через зони активного перемішування. До таких апаратів відносяться шнекові, лопатеві із складним просторовим рухом виконавчих елементів, стрічкові та інші типи мішалок.

Шнекові мішалки періодичної дії з циркуляційною трубою або з відбивними перегородками на стінках посудини (рис. 2.4, б) працюють при невеликих частотах обертання ( $0,5 \dots 3,5 \text{ с}^{-1}$ ) і застосовуються для перемішування рідин з коефіцієнтом динамічної в'язкості до  $1000 \text{ Па}\cdot\text{с}$ , а також та пастоподібних продуктів [6].

В апаратах харчових виробництв часто потрібно перемішувати густі пластичні середовища типу тіста для хлібопекарських, макаронних і кондитерських виробів. Мета перемішування в таких випадках полягає не лише у розподіленні компонентів (води, борошна, дріжджів, цукру, солі, жирів тощо), а й у розминанні маси, насиченні її повітрям, наданні їй певних механічних властивостей. Виконавчі елементи апаратів для оброблення таких середовищ мають різні конструкції, серед яких найпоширенішими є лопатеві мішалки. При цьому форма лопатей (траєкторія їх руху) складніша, ніж в апаратах для перемішування середовищ невисокої в'язкості і вибирається таким чином, щоб забезпечити перемішування в усіх точках об'єму апарата.

Мішалка безперервної дії з лопатевим шнеком обертається всередині циліндричної посудини. Лопатевий шнек, який може бути одинарним або парним, не тільки перемішує масу, а й одночасно транспортує і пластифікує її. Для того, щоб перемішувати пружно-в'язкі маси (пшеничне тісто з борошна вищого ґатунку), застосовують також апарати із складною траєкторією руху або з кількома місильними органами, що обертаються назустріч один одному з однаковими або різними швидкостями (рис. 2.5).

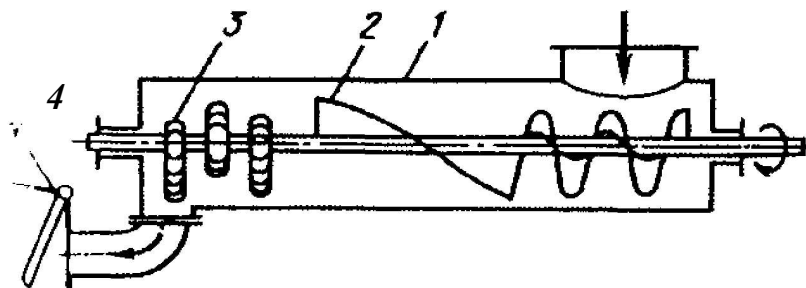


Рисунок 2.5 – Схема мішалки з кількома виконавчими елементами, що забезпечують складний рух середовища, що перемішується: 1 – корпус; 2 – шнек; 3 – турбінні мішалки зі зміщеною віссю обертання; 4 - заслінка



В м'ясній промисловості змішувачі використовують для приготування фаршу та тіста (в'язкі середовища). Найбільш розповсюдженні механічні змішувачі з лопатями механічного типу, лопатеві звичайні та Z-подібної форми, а також з комбінованими робочими органами (рис. 2.6). За способами вивантаження готового продукту – з відкидними місильними коритами та з боковим вивантаженням без перевертання ємності. В залежності від умов роботи фаршезмішувачі розділяють на відкриті (атмосферні) та закриті (вакуумні).

У молочній промисловості використовують переважно механічні змішувачі, які комплектують разом з теплообмінним або масообмінним обладнанням. Наприклад, вертикальні ванни з теплообмінними стінками, ванни та танки для дозрівання вершків, сироробні ванни та сировиготовлювачі, пропелерні змішувачі, фризери рамного типу.

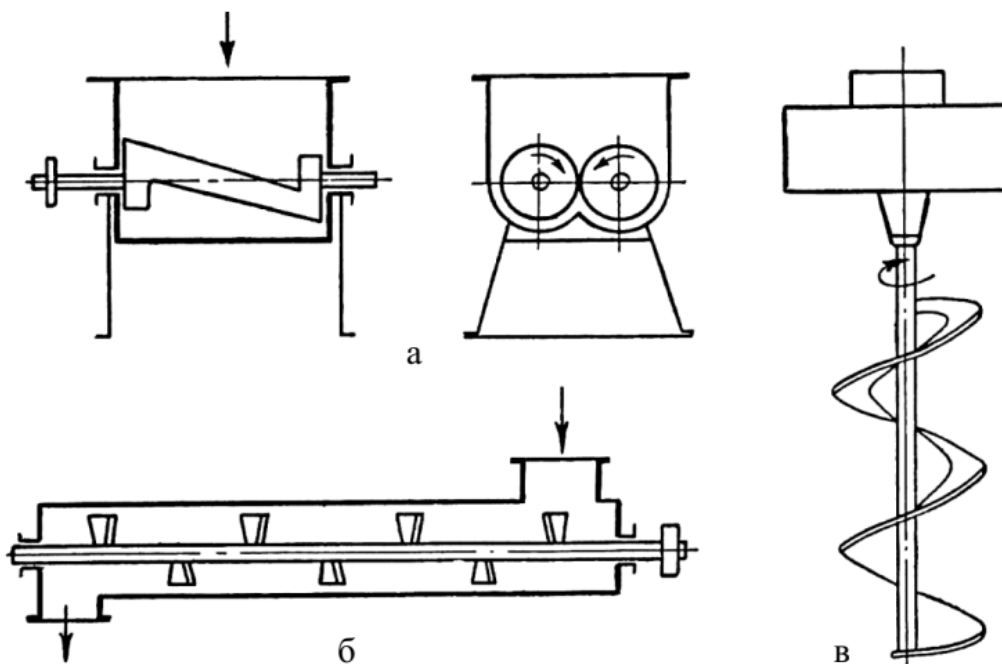


Рисунок 2.6 – Схеми змішувачів для пластичних матеріалів: а – із Z-подібними лопатями; б – зі стрічковим виконавчим елементом; в – з шнековим лопатевим виконавчим елементом

#### 2.4 Перемішування у потоках нерухомими турбулізаторами

Малов'язкі рідини і гази, рухаючись у трубопроводах, перемішуються самовільно внаслідок взаємопроникнення струменів, які мають різні швидкості в різних місцях перерізу трубопроводу. Ефективне перемішування забезпечується при турбулентному режимі руху і достатній довжині трубопроводів. Щоб прискорити перемішування, в трубопроводах або в розширених частинах апаратах розміщують нерухомі турбулізатори (напівперегородки, діафрагми із зміщеними отворами, гвинтові вставки – рис. 2.7), які забезпечують багаторазову зміну швидкості і напрямку потоку [3].

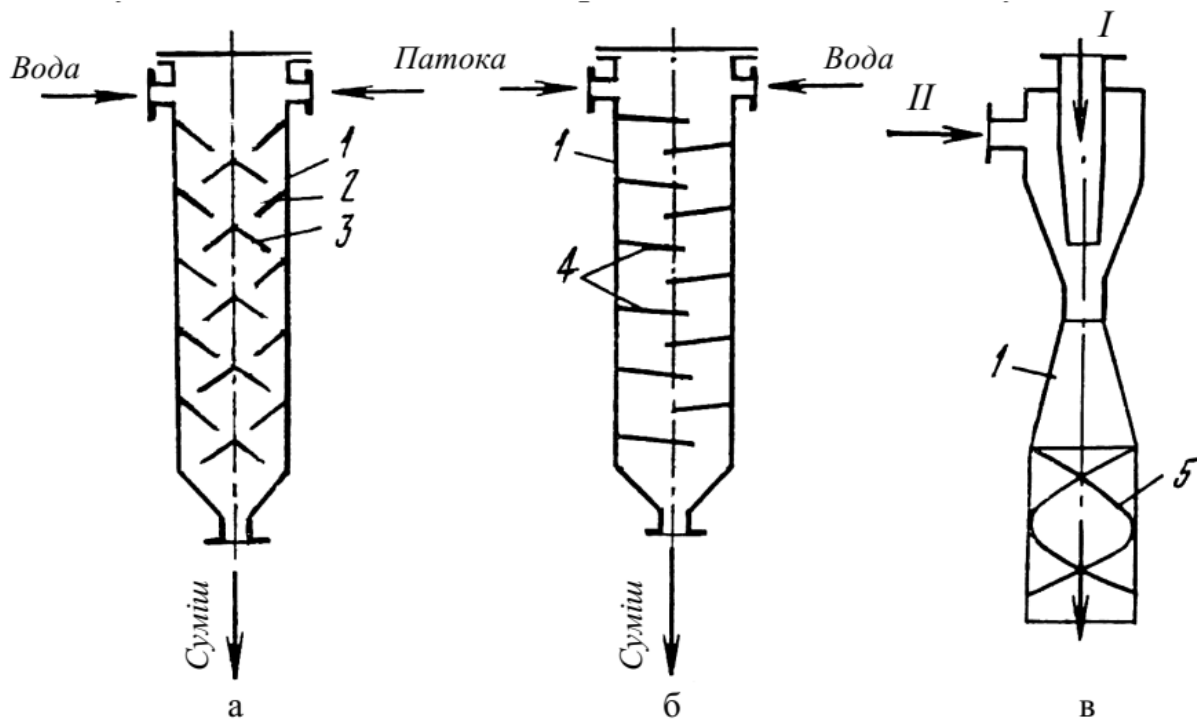


Рисунок 2.7 – Схеми потокового перемішування: а – за допомогою діафрагм та розсікачів; б – за допомогою похилих напівперегородок; в – за допомогою ежектора та гвинтової вставки

Використовують також змішувачі ежекторного типу. Потокові змішувачі, як правило, працюють безперервно, в той час як механічні мішалки частіше використовують у періодичному режимі.

## 2.5 Пневматичне перемішування

Перемішування барботажем (пневматичне) (рис. 2.8, а, б) застосовують для рідин з невеликим коефіцієнтом динамічної в'язкості (до  $0,2 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ), а також для замочування зерна у воді (під час виробництва солоду). Іноді для перемішування застосовують не повітря (газ), а водяну пару, тоді рідина одночасно нагрівається і розбавляється конденсатом.

Під час барботажного перемішування газ подають у рідину крізь отвори в трубах (барботери), розміщених поблизу дна посудини. Виходячи з отворів, струмені газу (пари) розпадаються на бульбашки, що піднімаються в масі рідини. Перемішування відбувається внаслідок того, що бульбашки, які спливають, виштовхують частину рідини вгору і в боки, а на її місце із сусідніх зон надходить рідина без бульбашок.

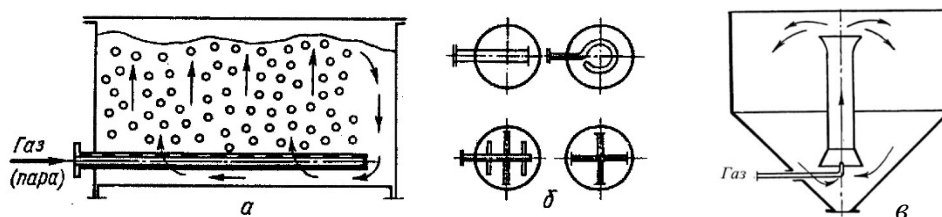


Рисунок 2.8 – Схеми барботажного (а, б) та ерліфтного (в) перемішування

Будова барботерів досить різноманітна — розподільні труби, хрестовини, зміювки. Діаметр отворів у барботерах для перемішування рекомендується 4...6 мм. Щоб окремі струмені не об'єднувались, відстань між отворами має бути 30...40 мм. Загальна площа отворів не може перевищувати площу перерізу підвідного трубопроводу більше ніж у 1,5 рази. Якщо під час перемішування потрібно одночасно привести в тісну взаємодію газ і рідину, то барботери влаштовують з меншими отворами і з більш рівномірним розподілом газу.

Перемішування летких рідин пневматичним способом не рекомендується, оскільки вони при цьому видаляються разом з газом.

Щоб розрахувати витрати повітря на перемішування, можна скористатись орієнтовними рекомендаціями щодо питомих витрат повітря (віднесених до 1 м<sup>2</sup> вільної поверхні рідини), м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>год): перемішування слабке – 25, середньої інтенсивності – 50, інтенсивне – 60.

Витрати енергії на барботажне перемішування залежить від об'ємних витрат повітря  $V$ , м<sup>3</sup>/с, і тиску, Па, який створює газодувка. Цей тиск містить дві складові: тиск  $p$ , потрібний на подолання опору стовпа рідини в посудині, і тиск  $p_m$ , який втрачається під час проходження газу через систему трубопроводів. Тоді потужність електродвигуна газодувки, Вт [1]

$$N = V(p + p_m)/\eta,$$

де  $\eta$  – ККД газодувки.

Як правило, витрати енергії на барботажне перемішування більші, ніж при використанні механічних мішалок.

При перемішуванні сипких тіл (зерна) газорідним потоком – ерліфтом (рис. 2.8, в) – стиснене повітря подають компресором у центральну трубу апарата. При цьому в трубі утворюється суміш газу, рідини і зерна, густина якої менша від густини суміші навколо труби. Внаслідок різниці між густинами виникає циркуляційний рух всієї маси.

## 2.6 Перемішування сипких матеріалів

Апарати для перемішування сипких матеріалів дуже різноманітні. Класифікацію їх основних типів наведено на рис. 2.9.

Ці апарати за частотою обертання можна поділити на тихохідні та швидкохідні. До перших належать апарати, для яких безрозмірний критерій Фруда складає [5]:

$$Fr = \left( \frac{v^2}{R \cdot g} \right) < 30.$$

де  $v$  – колова швидкість обертання виконавчого елемента мішалки, м/с;

$R$  – радіус обертання виконавчого елемента, м;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.



Рисунок 2.9 – Класифікація змішувачів для перероблення сипких матеріалів

Для барабанних змішувачів  $v$  і  $R$  беруть для внутрішньої поверхні барабана, для шнекових змішувачів  $R$  — радіус шнека, а  $v$  — відповідна цьому радіусу колова швидкість.

Прогресивнішими є змішувачі безперервної дії, в яких матеріал переміщується й одночасно транспортується.

## 2.7 Параметри ефективності процесів перемішування

Важливою характеристикою апаратів з мішалками є ефективність перемішування. Проте простої і універсальної фізичної величини для оцінки даної ефективності немає. Тому ефективність перемішування для апаратів різного технологічного призначення та різної періодичності дії виражають різними фізичними величинами [4].

Зокрема дана ефективність може визначатись ступенем однорідності середовища, що переміщується, який досягається при заданій кількості підведеної корисної енергії до одиниці об'єму цієї речовини за одиницю часу. При цьому під поняттям корисної енергії розуміють енергію, яка витрачається на утворення вихорів у оброблюваному середовищі.

У разі перемішування взаємно розчинних рідин з близькими густинами або рідин з різною температурою в апаратах періодичної дії при турбулентному режимі ефективність перемішування за іншою методикою

визначається як тривалість досягнення заданого ступеня однорідності середовища, що перемішується. Цю тривалість називають часом гомогенізації.

Під ступенем однорідності середовища  $\varepsilon$  в апараті з незмінною температурою, який досягається за час  $\tau$  після початку перемішування розуміють відношення [31]:

$$\varepsilon = c / c_{cp},$$

де  $c$  – мінімальне локальне (місцеве) значення масової концентрації речовини, що розподіляється по об'єму апарату за відрізок часу  $\tau$  після початку перемішування кг/м<sup>3</sup>;

$c_{cp} = m / V$  – середнє значення масової концентрації, кг/м<sup>3</sup>;

$m$  – маса введеного компонента, кг;

$V$  – загальний об'єм речовини в апараті, м<sup>3</sup>.

Ступінь однорідності для речовини зі змінною температурою розраховується як:

$$\varepsilon = \frac{t - t_0}{t_{cp} - t_0},$$

де  $t$  – мінімальне (максимальне) локальне значення температури за час  $\tau$  від початку перемішування, °С;

$t_0$  – початкова температура речовини, °С;

$t_{cp}$  – середнє значення температури, °С.

В апаратах з мішалками ступінь однорідності середовища звичайно знаходиться в межах  $0,7 \leq \varepsilon \leq 1,0$  [30].

Показниками ефективності перемішування в тепло- і масообмінних апаратах з мішалками є коефіцієнти тепло- і масовіддачі. Більшим значенням цих коефіцієнтів при однакових питомих об'ємних витратах енергії відповідає більша ефективність перемішування.

Час гомогенізації змінюється приблизно обернено пропорційно частоті обертання мішалки і прямопропорційно до квадрату її діаметра. Чим меншим є час гомогенізації при однакових витратах енергії, тим вищою є ефективність перемішування.

Для більш повної оцінки ефективності застосування мішалок певних конструкцій, потрібно, крім часу гомогенізації, враховувати ще й питомі витрати енергії, тобто витрати енергії на одиницю об'єму середовища, що перемішується [26]. Остаточний вибір конструкції мішалки визначається техніко-економічним розрахунком.

### 3 ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПОДРІБНЕННЯ ЦЕХІВ ПЕРЕРОБЛЕННЯ ПРОДУКЦІЇ ТВАРИННИЦТВА

Одним з основних видів процесів харчових та переробних технологій є процеси механічного подрібненні твердої сировини та матеріалів, що супроводжуються руйнуванням та зменшенням розмірів їх частинок під дією зовнішніх сил. В результаті реалізації даних процесів збільшується площа активної поверхні частинок матеріалу, що обробляється і тим самим створюються передумови для інтенсифікації його подальших теплових, масообмінних і біохімічних перетворень [13].

Основною характеристикою розглядуваних процесів є ступінь подрібнення  $i$  частинок оброблюваного матеріалу, що дорівнює відношенню їх середнього розміру до –  $d_n$  та після –  $d_k$  подрібнення:

$$i = d_n / d_k.$$

За величиною  $i$  процеси подрібнення умовно поділяють на дроблення і помел. Принципової різниці за фізичною суттю між ними немає. Параметри, що кількісно характеризують процеси подрібнення, наведені у табл. 3.1. Умовно вважають, що після дроблення частинки матеріалу мають середній розмір більший за 5 мм. Тонке дроблення матеріалу (середній кінцевий розмір частинок до 5 мкм) називають помелом.

Вважається, що частинки матеріалу до та після подрібнення мають правильну сферичну форму, таким чином, визначальними середніми розмірами цих частинок є діаметри  $d_n$  та  $d_k$ . Використовують також поняття об'ємний ступінь подрібнення.

Таблиця 3.1 – Кількісна характеристика процесів подрібнення

Клас подрібнення	Розмір частинок матеріалу, мм	
	До подрібнення	Після подрібнення
Дроблення:		
Грубе	1000	250
Середнє	250	20
Дрібне	25	5
Помел	5–1	0,1–0,005
Колоїдний помел	0,1	0,001

Відповідно змінюється ступінь  $i$  подрібнення. При грубому дробленні  $i = 2...6$ , середньому –  $i = 5 - 10$ ; при тонкому подрібненні  $i >> 100$ .

Фізико-механічні властивості матеріалу, вид та ступінь подрібнення визначають вибір способу реалізації відповідного робочого процесу. Залежно від схеми та характеру прикладання зовнішніх механічних зусиль до частинок матеріалу ці способи класифікуються на: роздавлювання, розколювання, розтирання, розламування за допомогою удару, розривання,

згинання (рис. 3.1). При грубому і середньому дробленні найчастіше використовують спосіб роздавлювання, при тонкому – розтирання. Для твердих матеріалів доцільно застосовувати розколювання та ударне навантаження, для крихких – роздавлювання та удар, для в'язких – розтирання. В процесі дроблення часто комбінують різні способи, наприклад: розтирання і роздавлювання; розтирання та ударне навантаження.

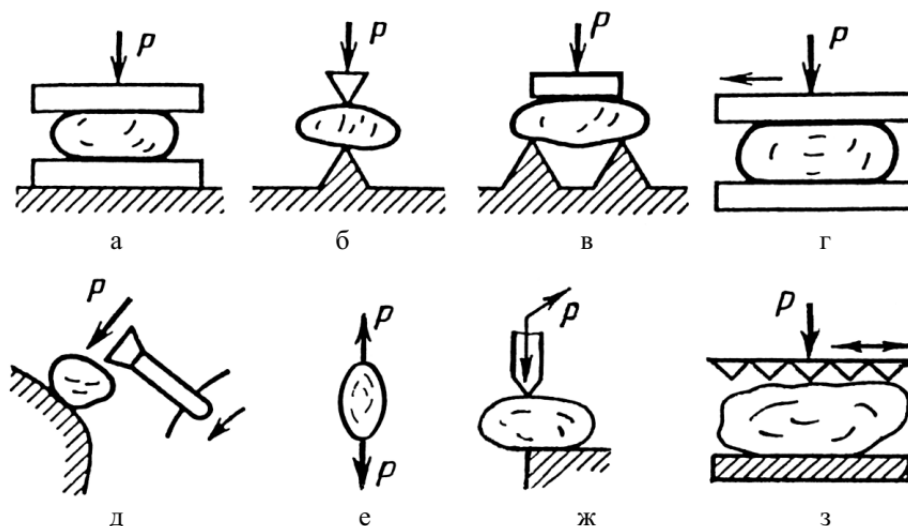


Рисунок 3.1 – Схеми способів механічного подрібнення матеріалів

### 3.1 Теоретичні основи процесів подрібнення

Процес утворення в тілах нових поверхонь під дією внутрішніх напружень або зовнішніх сил називають руйнуванням. При частковому руйнуванні у твердому тілі виникають тріщини, що призводить до зміни структурно-механічних характеристик тіла. Подрібнення матеріалу є штучним повним руйнуванням тіла, при якому воно розділяється на частини [11].

Руйнування під дією зовнішніх сил може відбуватися за наявності однієї з умов:

1. Локальне перенапруження поверхневих мікрооб'ємів у місцях прикладання навантажень.
2. Наявність порожнин, неоднорідностей та інших дефектів у структурі тіла.
3. Розвиток у матеріалі значних пружних і пластичних деформацій.

Механічні характеристики твердого тіла, такі як пружність, текучість, міцність, пластичність визначають його поведінку під впливом зовнішнього навантаження. За умови, коли останнє перевищує межу пружності, матеріал піддається пластичній деформації, а при досягненні межі текучості починає текти. При досягненні межі міцності матеріал руйнується, причому зі зменшенням розміру тіла межа міцності зростає, оскільки при цьому зменшується кількість дефектів у матеріалі [25].

У процесі дроблення відбуваються в основному крихке та пластичне руйнування. Для крихкого руйнування характерна незначна деформація

матеріалу, причому після руйнування залишкових деформацій вже немає. Прикладена енергія витрачається на подолання сил взаємного зчеплення частинок тіла, тобто на утворення нової поверхні. Під час руйнування пластичних матеріалів енергія витрачається як на розрив структурних зв'язків, так і на пластичні деформації. Причому енергія, що витрачається на деформацію, перетворюється в теплоту. Руйнування крихких матеріалів потребує значно менших витрат енергії порівняно з руйнуванням пластичних. Оскільки крихкість та пластичність ряду матеріалів визначаються їх агрегатним станом, з енергетичного погляду доцільно подрібнювати матеріал у крихкому стані [29].

Механічне подрібнення будь-яких твердих та близьких до твердих харчових продуктів здійснюється внаслідок їх взаємодії з виконавчими елементами машини. При цьому в місці контакту матеріал спочатку деформується, а потім руйнується в напрямку найбільшої концентрації напружень, або по площинах послаблених дефектами. Тобто на руйнування використовується енергія, що витрачена попередньо на пружну деформацію [11].

В дробарках більшість частинок оброблюваного матеріалу під час деформації знаходяться під впливом напружень, що є недостатніми для їх руйнування. Фактично у молоткових дробарках лише близько 1% витраченої енергії використовується на утворення нової поверхні, тобто безпосередньо на подрібнення. Решта підведеної енергії витрачається на підвищення внутрішньої енергії тіла, що призводить до підвищення температури продукту. Отже, доцільно подрібнювати однорідні за розмірами частинки матеріалу [10].

Подрібнення, як правило, здійснюють у декілька стадій, оскільки під час дроблення утворюються частинки різної дисперсності. У зв'язку з цим доцільно здійснювати їх попередню класифікацію, з відбором проміжної фракції, яка не потребує подальшого подрібнення. У разі грубого, середнього і дрібного дроблення робочий процес здійснюється з реалізацією одного-трьох прийомів руйнування, у разі тонкого подрібнення – 100...200 прийомів, причому матеріал значний час перебуває в зоні руйнування, що сповільнює процес. Цим фактом пояснюються підвищені витрати енергії на здійснення подрібнення даного класу порівняно з іншими [26].

Значний вплив на процес подрібнення мають фізико-хімічні фактори. Як показав П. А. Ребіндер, при адсорбції поверхнево-активних речовин поверхнею твердого тіла міцність останнього зменшується. Руйнування твердих тіл починається з утворення мікротріщин. Рідина, що містить поверхнево-активні речовини, проникає в мікротріщини і сприяє їх збільшенню. Також шар рідини перешкоджає відновленню початкової будови тіла в разі зняття навантажень, що забезпечує зменшення опору під час руйнування. Цей ефект реалізується в процесі дроблення зерна з одночасним змочуванням його водою.



### 3.2 Основні типи подрібнювальних машин

Подрібнення матеріалу здійснюють, як правило, послідовно в різних машинах. Відповідно всі подрібнювальні машини можуть бути класифіковані за ступенем подрібнення, який вони забезпечують. Відповідно їх поділяють на дробарки для грубого, середнього і дрібного дроблення та млини для тонкого і колоїдного помелу. Доцільнішою є класифікація, в основу якої покладено спосіб подрібнення.

За даною ознакою розрізняють машини [1, 30]:

- 1) розколювальні та розламувальні (щоківі, конусні);
- 2) роздавлювальні (щоківі, конусні);
- 3) розтирально-роздавлювальні (валкові, бігуни);
- 4) ударні (молоткові, зубчасті, ножові, барабанні, дезінтегратори, дисембратори);
- 5) ударно-розтиральні;
- 6) колоїдні (колоїдні млини).

Для харчових виробництв характерна широка різноманітність перероблюваної вихідної сировини за фізико-механічними властивостями (твердість, міцність, форма та однорідність частинок, заданий ступінь їх подрібнення), що вимагає розроблення і застосування подрібнювачів різних конструкцій [10, 29].

#### 3.2.1 Розтирально-роздавлювальні дробарки

До цієї групи належать валкові дробарки і бігуни.

Валкові дробарки (рис. 3.2) подрібнюють матеріал роздавлюванням між двома циліндричними робочими поверхнями, для чого найчастіше використовують пару валків, що обертаються назустріч один одному.

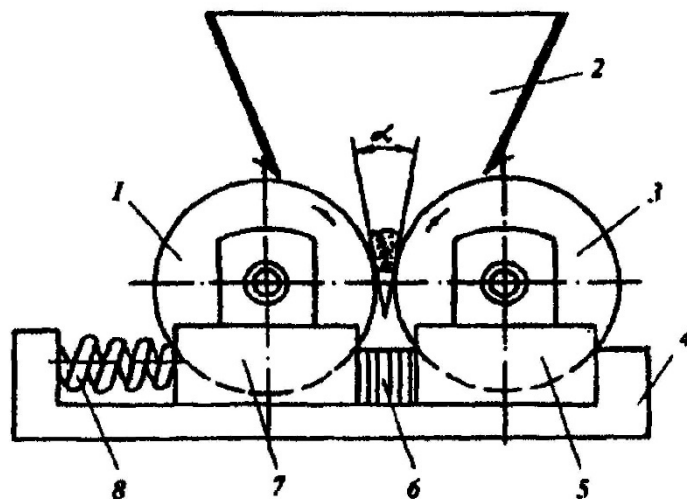


Рисунок 3.2 – Схема валкової дробарки: 1, 3 – валки; 2 – завантажувальний бункер; 4 – станина; 5, 7 – підшипникові вузли; 6 – прокладки; 8 – пружина

Валки 1 та 3 встановлені на станині 4 в підшипникових вузлах 5, 7, один з яких є нерухомих (5), а другий (7) переміщується в горизонтальній

площині, завдяки чому змінюється і установлюється за допомогою прокладок 6 потрібна величина зазору між валками. Пружини 8, що діють на рухомий підшипник, забезпечують потрібний тиск і запобігають руйнуванню дробарки у разі потрапляння в зазор між валками металевих предметів. Матеріал, що надходить з бункера 2 над валками, має рівномірно розподілятися по довжині валків. Частинки матеріалу захоплюються обертовими валками і при стисканні між ними роздавлюються та дробляться, для чого втягувальні сили мають бути більшими за виштовхувальні.

Оптимальний кут затягнення  $\alpha$ , при якому частинки втягуються в зазор між валками, визначається діаметрами валків –  $D$  та частинок матеріалу –  $d$ . Отже, при фіксованому зазорі встановлюється певне співвідношення  $D/d$ , яке для гладких валків складає 20...25 [3].

Гладкі валки для дроблення зерна мають діаметр 250...350 мм, колова швидкість їх обертання 2,5...5,0 м/с. Кут затягнення чавунних для валків становить 12 – 21°.

Крім гладких, для подрібнення зерна застосовують зубчасті та рифлені валки. На поверхню останніх наносять рифлі різного профілю і розмірів. Ці валки не тільки роздавлюють, а й розколюють частинки матеріалу, тому співвідношення  $D/d$  для них складає 10...12 [5].

Валки повинні бути міцними, жорсткими, зносостійкими, відбалансованими, мати правильну циліндричну поверхню.

Валки можуть мати різну (до 20 %) швидкість обертання. При цьому поряд з роздавлюванням та розколюванням відбувається також розтирання матеріалу. Оскільки під час подрібнення виділяється велика кількість теплоти, валки доцільно виготовляти порожнистими, а всередину подавати воду для охолодження.

Для підвищення ступеню подрібнення збільшують кількість валків в напрямку переміщення матеріалу зверху вниз та зменшують зазор між ними. Так, комбіновані млини для одержання тертого какао мають 3, 5, 8 пар валків. Змінюючи їх кількість, розміщення, форму і профіль рифлів, можна одержати різні конструкції дробарок, що забезпечують подрібнення роздавлюванням, розтиранням, розколюванням. Налиплий продукт з поверхні гладких валків зчищають ножами, а з поверхні рифлених валків – щітками.

Продуктивність валкових дробарок, кг/год, визначають за формулою:

$$G = 60 \cdot b \cdot l \cdot \pi \cdot D \cdot n \cdot \rho \cdot \varphi,$$

де  $b$  — ширина зазору між валками, м;

$l$  — довжина валків, м;

$D$  — діаметр валка, м;

$n$  — частота обертання валків,  $\text{хв}^{-1}$ ;

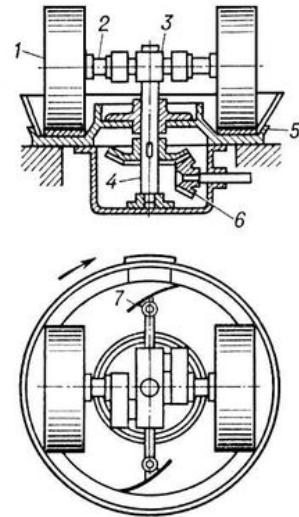
$\rho$  — густина оброблюваного матеріалу,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\varphi$  – коефіцієнт, що враховує нерівномірність подавання матеріалу.

Бігуни (рис. 3.3) належать до дробарок, за допомогою яких можна здійснити середнє і дрібне дроблення матеріалів. Основним робочим органом їх є важкі котки, що котяться по плоскому днищі круглої чаші, куди засипано оброблюваний матеріал. Він подрібнюється роздавлюванням та розтиранням, оскільки котки рухаються по колу й обід бігуна залежно від радіуса обертання має різну лінійну швидкість. Розтиранням забезпечується тонке подрібнення.



а)



б)

Рисунок 3.3 – Фото реконструкції стародавнього бігуна (а) та схема сучасного бігуна (б): 1 – котки; 2 – півосі котків; 3 – водило; 4 – центральний вал; 5 – чаша; 6 – привод; 7 – шкребки

Аналогічний принцип подрібнення мають жорнові й дискові млини.

### 3.2.2 Дробарки ударної дії

Подрібнення матеріалу в них відбувається під дією динамічних навантажень під час механічного удару. Подібний вплив на тіло при зосередженому навантаженні аналогічний розколюванню, а при розподіленому навантаженні – роздавлюванню.

Розрізняють подрібнення вільним і стисненим ударом. У першому випадку руйнування відбувається внаслідок зіткнення однієї частинки матеріалу з іншою або з виконавчим елементом, що здійснює ударне навантаження. У другому випадку тіло руйнується між двома виконавчими елементами під час прикладання до нього протилежно спрямованих ударних навантажень [10, 29].

Під час ударного навантаження кінетична енергія рухомих тіл частково або повністю переходить в енергію деформації руйнування. Дробарки даного принципу дії прості за конструкцією та забезпечують високий ступінь подрібнення ( $i = 15...20$ ).

Виконавчим елементом молоткової дробарки (рис. 3.4, а) є ротор, який являє собою горизонтальний обертовий вал з дисками або шатунами, на яких шарнірно закріплені сталеві пластинчасті молотки 4. Як правило, для підвищення продуктивності дробарки на валу паралельно установлюються декілька рядів дисків або шатунів з молотками. При обертанні вала матеріал 2, що надходить через завантажувальний бункер у корпус 3, піддається багаторазовим ударам молотків 4, руйнується і після досягнення заданого ступеня подрібнення, проходить крізь сито 1 та вивантажується. В основному застосовують дробарки з молотками кулачкового типу.

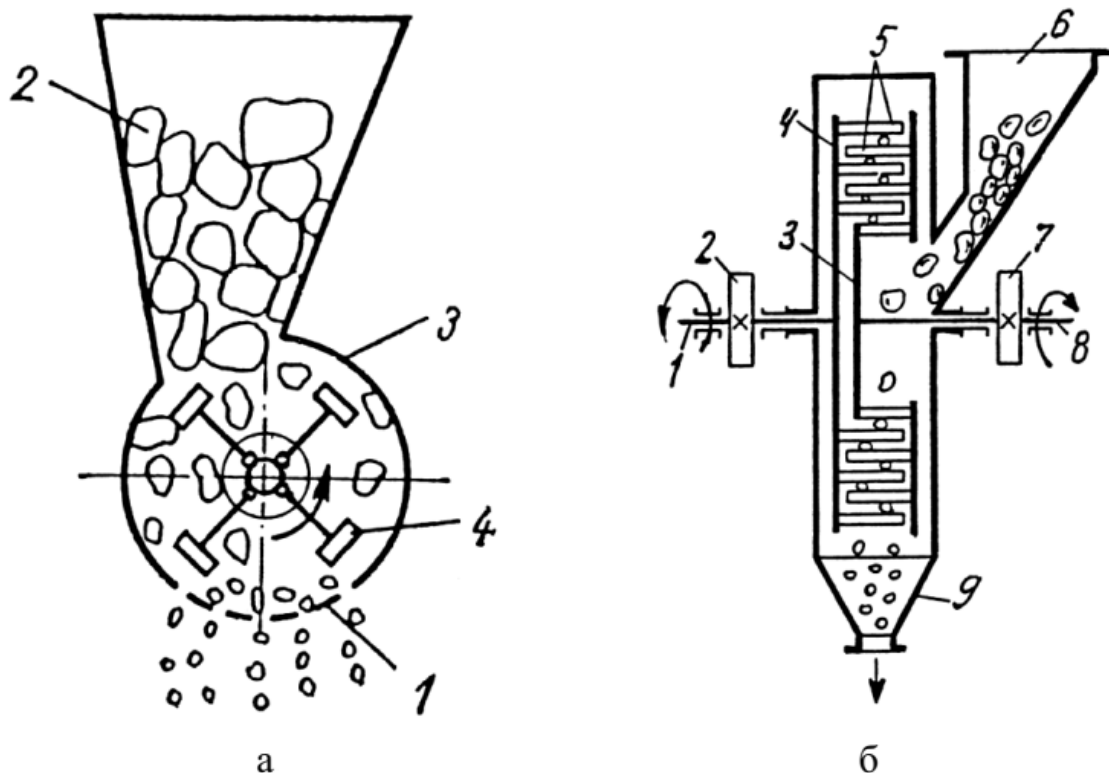


Рисунок 3.4 – Схеми роботи дробарок ударної дії: а – молоткової дробарки: 1 – сито; 2 – оброблюваний матеріал; 3 – корпус; 4 – молотки; б – дезінтегратора: 1, 8 – приводні вали; 2, 7 – приводні шківи; 3, 4 – обертові диски; 5 – біла; 6 – завантажувальний бункер; 9 – вивантажувальний патрубок

При обертанні ротора його швидкість та кінетична енергія удару мають бути достатніми для руйнування матеріалу. Критична (мінімальна) швидкість удару –  $v_{кр}$ , м/с, за якої забезпечується подрібнення матеріалу, залежить від початкових розмірів частинок і може бути визначена за формулою [11]

$$v_{кр} = 175 \left( \frac{\sigma_p}{\rho \cdot d_n} \right)^{2/3},$$

де  $\sigma_p$  – межа міцності матеріалу при розтягуванні, МПа;

$\rho$  – густина матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

$d_n$  — початковий розмір частинок матеріалу, м.

Продуктивність молоткових дробарок, кг/год, рекомендують розраховувати за формулою

$$G = \frac{K \cdot l \cdot D^2 n^2}{3,6 \cdot (i - 1)},$$

де  $K$  – коефіцієнт, який вибирається в межах  $K = 4,0 \dots 6,2$ ;

$l$  – довжина ротора, м;

$D$  – зовнішній діаметр молотків, м;

$n$  – частота обертання ротора, хв.<sup>-1</sup>;

$i$  – ступінь подрібнення.

Дезінтегратори і дисмембратори використовують для подрібнення матеріалів низької та середньої твердості. Рекомендується застосовувати їх також і для механічної активації матеріалів [13].

Виконавчими елементами дезінтегратора (рис. 3.4, б) є диски 3 і 4, що змонтовані на горизонтальних валах 1, 8. На дисках закріплено приводні штифти 2, 7 із зносостійкої сталі. В робочому стані ряд бил 5 (штифтів) одного диска розміщується між двома рядами іншого диска. Диски обертаються зі швидкістю 500...3000 хв<sup>-1</sup> в протилежних напрямках. Матеріал через завантажувальний бункер 6 надходить у центральну частину дробарки і потім, починаючи з внутрішнього ряду, послідовно і багаторазово подрібнюється билами.



Рисунок 3.5 – Фото дисмембратора

Максимальний розмір частинок матеріалу на виході визначається відстанню між билами зовнішнього ряду і становить 50...20 мкм.

Дисмембратори (рис. 3.5) мають один диск, що обертається. Замість іншого диска використовують внутрішню стінку корпусу, на якій кріплять нерухомі била.

### 3.2.3 Млини

Основним елементом млина (рис. 3.6) є барабан 2, що обертається в підшипниках навколо горизонтальної осі з приводом від шестеренної передачі, редуктора та електродвигуна. Всередині барабан заповнений подрібнювальними тілами 1 (металевими чи фарфоровими кулями, галькою, стержнями).

Під час обертання барабана кульки разом з подрібнюваним матеріалом під дією відцентрової сили і тертя піднімаються на певну висоту,

а потім падають по параболічних траєкторіях. Матеріал подрібнюється спочатку внаслідок ударної дії куль, що падають, з подальшим його розтиранням між кулями, а також між кулями і металевими плитами 9 на внутрішній поверхні барабана. Така комбінація подрібнювальних зусиль є найефективнішою. При невеликих частотах обертання кулі скочуються і розтирають матеріал.

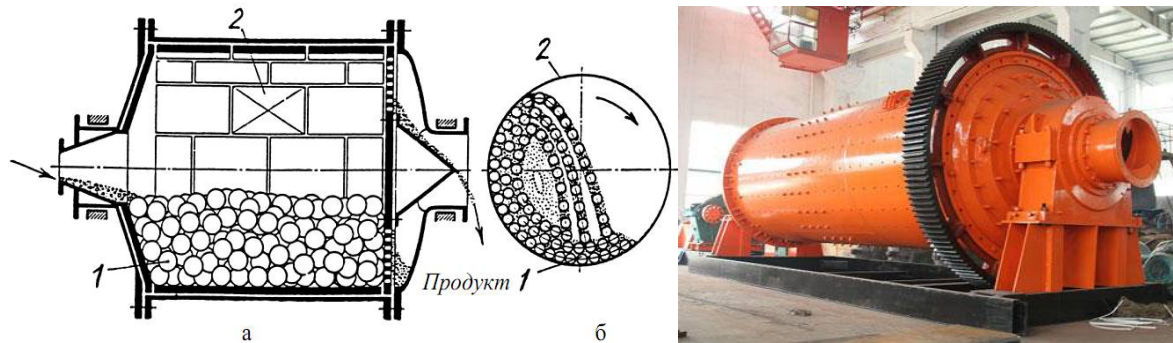


Рисунок 3.6 – Схема роботи та фото барабанного млина: 1 – подрібнювальні тіла; 2 – барабан

Заповнення кулями становить 30 – 35% об'єму барабану. Діаметр сталевих куль 30...125 мм. При цьому на кулю, що піднімається діють сила тяжіння та відцентрова сила.

У барабанних млинах застосовують мокрий або сухий спосіб подрібнення. Для надтонкого подрібнення використовують вібраційні кульові млини, які також працюють за принципом ударно-розтиральної дії [10, 29].

Колоїдні подрібнювачі забезпечують подрібнення матеріалу до часток мікрметра, тобто до величин колоїдних частинок. Оскільки частинки таких розмірів притягуються одна до одної і злипаються, подрібнення здійснюють у дисперсному середовищі. Найчастіше при цьому використовують рідину, тобто здійснюють мокре подрібнення. Колоїдні подрібнювачі (або колоїдні млини) використовують для приготування паст і емульсій, для тонкого подрібнення м'яса при виробництві сосисок і сардельок.

Механізм подрібнення у конусному колоїдному млині (рис. 3.7) здійснюється за допомогою ротора 3 і статора 1 з гладкими або рифленими робочими поверхнями, що утворюють похилі паралельні виступи і западини. Ротор і статор по висоті можуть складатися з декількох кілець, причому розмір виступів і западин для кожного кільця зменшується зверху вниз. Ротор зв'язаний з валом електродвигуна, а статор – з корпусом млина. Зазор 2 між ротором і статором дуже малий (0,05 мм). Матеріал з бункера подають на верхнє кільце швидкохідного ротора (колова швидкість досягає 125 м/с), після чого під дією відцентрової сили він надходить у зону подрібнення між ротором і статором. Інтенсивність подрібнення збільшується в міру проходження матеріалу вниз, після чого він виводиться через вихідний патрубок.



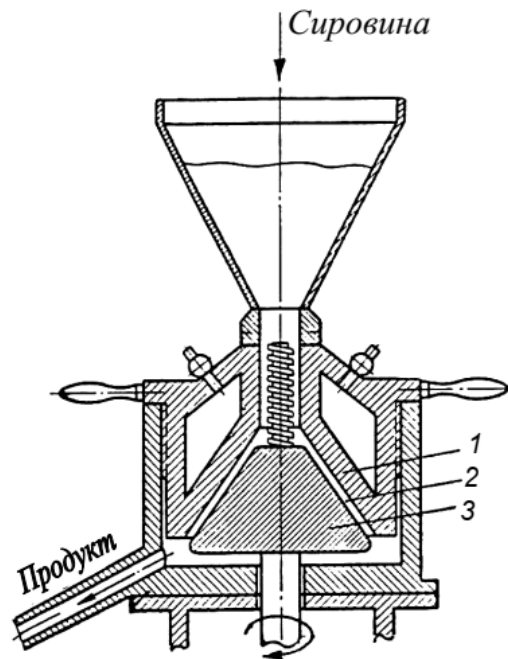


Рисунок 3.7 – Схема колоїдного млина: 1 – статор; 2 – зазор; 3 – ротор

### 3.3 Подрібнення матеріалів різанням

Цей вид подрібнення матеріалів застосовують тоді, коли треба одержати продукт певної форми і розмірів або потрібну кількість знову утворених поверхонь.

На рис. 3.8, а, б показані схеми двох основних типів ножів, на яких позначені різальні кромки А та опорна поверхня Б;  $\alpha$  – кут загострення.

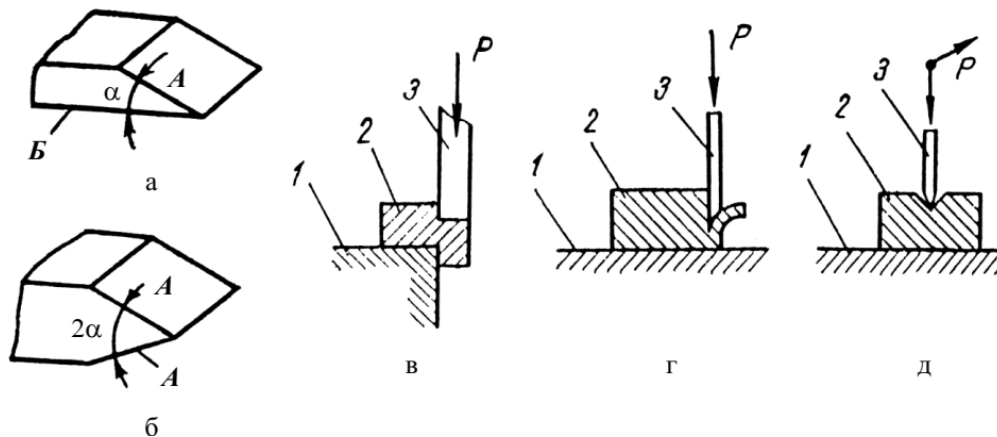


Рисунок 3.8 – Схеми різання: а – ніж з однією різальною кромкою; б – ніж з двома різальними кромками; в – різання пуансоном; г – різання клином з однією кромкою; д – різання клином з двома кромками; 1 – опорна поверхня; 2 – оброблюваний матеріал; 3 – різальний елемент

Також на рис. 3.8, в, г, д наведені схеми різання під дією сили  $P$  пуансоном, лезом з однією кромкою та лезом з двома кромками.

У процесі різання лезо ножа вклинюється в продукт і біля поверхні контакту створюється питомий тиск, достатній для руйнування тіла. Різання

може бути здійснене при вільному або стисненому стані продукту. У першому випадку частини продукту, який ріжуть, вільно розходяться. У другому випадку різання відбувається при об'ємному стисканні тіла і відрізки зміщуються повільніше.

Лезо є робочою гострою кромкою ножа. Ножі бувають з односторонньою та двосторонньою затонкою леза. При різанні матеріалів, міцність яких є значно меншою, ніж міцність матеріалу ножа, доцільно зменшити кут заточки леза. Це сприяє зменшенню зусилля  $P$  та зниженню витрат енергії. Раціональний кут заточки леза 12 ... 18.

Різання харчових матеріалів пов'язане з витратами енергії. Згідно з теорією П. А. Ребіндера енергія витрачається: 1) на утворення нової поверхні (безпосередньо подрібнення); 2) на об'ємні пружні й пластичні деформації; 3) на подолання сил поверхневого тертя [30].

Розглянемо основні види робочих органів та механізмів для різання харчових продуктів.

У харчовій промисловості поширені дискова, плоска, стрічкова, гвинтова, серпоподібна та інші форми різального інструменту. Форма різальної поверхні може бути гладкою з односторонньою або двосторонньою заточкою леза, зубчастою, хвилеподібною.

Дискові ножі (гладкі або зубчасті) використовують в основному для різання м'яких і пластичних матеріалів – м'яса, риби, тіста, овочів, в складі однодискових та багатодискових різальних машин (рис. 3.9, а). У корпусі з бункером 1 для завантаження та з вихідним патрубком 5 змонтовано вал 3 з дисковими ножами 2 та гребінку 6. Шматки м'яса, що надходять з бункера, затримуються гребінкою та розрізаються ножами на смужки певної товщини, яка визначається шириною проставочних шайб 4 між ножами. Колова швидкість обертання ножів 10...80 м/с [6].

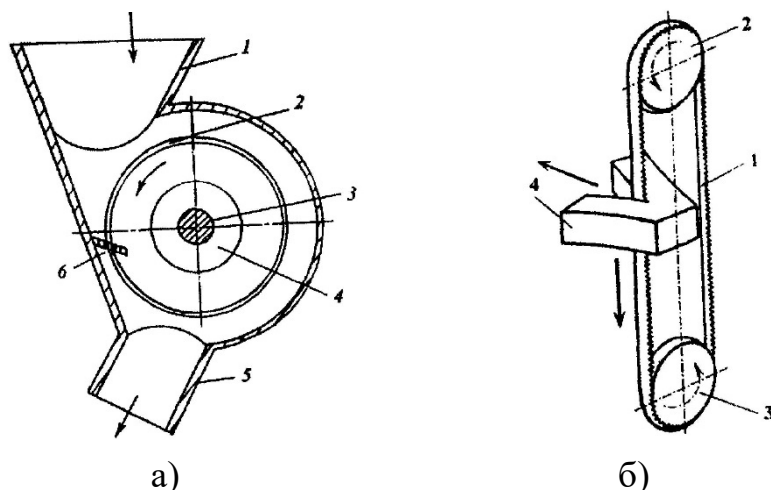


Рисунок 3.9 – Обладнання для різання м'ясних продуктів: а – багатодискова різальна машина (1 – бункер; 2 – дискові ножі; 3 – приводний вал; 4 – проставочні шайби; 5 – вихідний патрубок; 6 – гребінка); б – стрічкова пила (1 – полотно пили; 2, 3 – приводний та натяжний шків)



Багатодискові ножі можуть подрібнювати м'ясо, що подається конвеєром. Однодискові пили використовують для розділення туш тварин і розпилювання кісток.

Стрічкові пили із зубчастим полотном (рис. 3.9, б) використовують для різання хліба, м'ясних і мучних виробів. Полотно 1 – це пружна сталева стрічка, що обертається за допомогою двох шківів – 2 і 3. Один із шківів є приводним, а другий — натяжним. Швидкість руху стрічки коливається в межах 5...50 м/с, що забезпечує високу швидкість різання матеріалу 4 [5].

Але найбільш поширеним обладнанням для різання м'яса та м'ясної продукції на промислових підприємствах, на підприємствах ресторанного господарства та у торговельних закладах є вовчки та кутери.

Вовчок (рис. 3.10) призначений для середнього та дрібного подрібнення м'ясної сировини. Він складається з чотирьох основних механізмів: живильного механізму, ріжучого механізму – 2, приводу і станини, на якій монтуються всі складальні одиниці, деталі, електродвигун 9 і пускова електроапаратура.

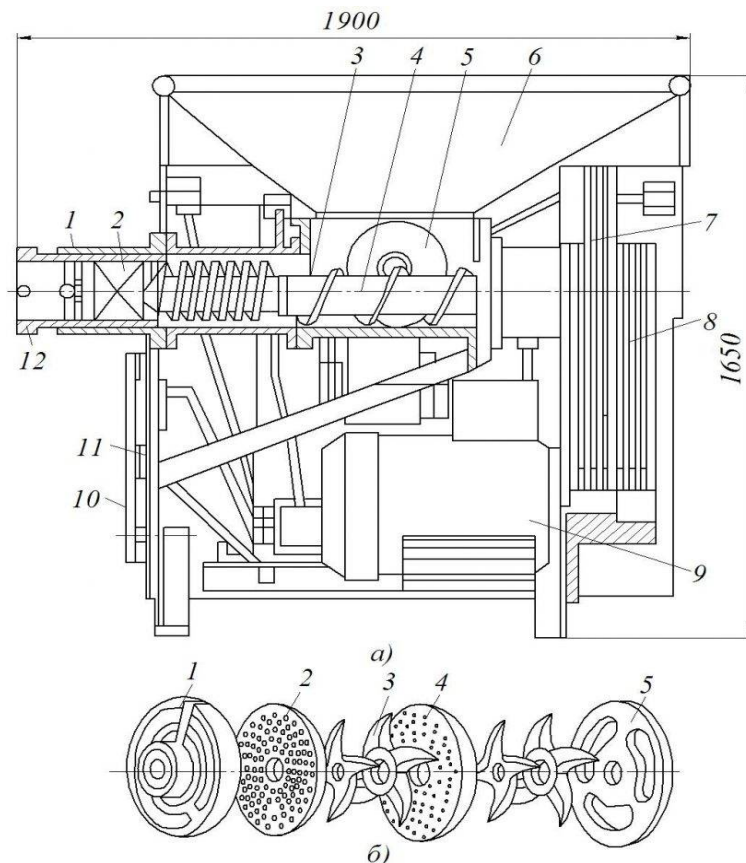


Рисунок 3.10 – Схема вовчка: а – загальний вид з осьовим розрізом (1 – підпирні ґрати; 2 – ріжучий механізм; 3 – ножовий вал; 4 – шнек; 5 – одновиткова лопать; 7, 8 – клинопасова передача; 9 – електродвигун; 10 – майданчик для санітарної обробки; 11 – жолоб; 12 – трубчаста насадку); б – ріжучий механізм вовчка (1 - підпирна решітка; 2 – вихідна ножова решітка; 3 – ножі; 4 – проміжна решітка; 5 – приймальна решітка)

Вовчок включає також підпірні грати 1, ножовий вал 3, одновиткову лопать 5, клинопасову передачу 7 ножового вала, майданчик 10 для санітарної обробки, жолоб 11 і трубчасту насадку 12.

Живильний механізм включає бункер 6 і шнеки 4. Ріжучий механізм (рис. 3.10, б) складається з підпірної решітки 1, вихідної ножової решітки 2, ножів 3, проміжної 4 та приймальної 5 решіток, а також циліндра з внутрішніми ребрами і гайкою-маховиком з трубчастою насадкою. Ножі виконані з двох частин і мають криволінійні різальні кромки, між якими розташовані прохідні канали для продукту [31].

Вал, що приводить в обертання ножі, проходить всередині робочого шнека і має самостійний привід. Робочий шнек в місці завантаження має западини для заповнення продуктом, а завантажувальний бункер під шнеком - ребра для відсікання. Така конструкція забезпечує рівномірну і безперервну подачу продукту в робочу зону.

Кількість спіральних ребер перевищує в два рази кількість ребер з боку завантажувального бункера, в результаті чого усувається ймовірність повернення продукту в бункер. Вихідна решітка товщиною 8 мм підтискається жорсткою підпорою з радіальними загостреними ребрами. Привод складається з електродвигуна 9, циліндричного редуктора та клинопасової передачі 7, 8.

Вовчок працює наступним чином: жиловане м'ясо в шматках масою до 0,5 кг подається в бункер, звідки захоплюється робочим і допоміжним шнеками і прямує в зону ріжучого механізму. В ньому сировину подрібнюється до заданого ступеня, який забезпечується шляхом установлення ножів і ножових решіток з відповідними діаметрами отворів.

Кутери призначені для тонкого подрібнення м'ясної м'якої сировини і перетворення її в однорідну гомогенну масу. М'ясну сировину в кутерах подрібнюється за допомогою швидкообертючих серпоподібних ножів, встановлених на валу. Ножі поперемінно занурюються в чашу, що обертається з частотою до  $0,3 \text{ с}^{-1}$ .

Подрібнення ведеться у відкритих чашах або під вакуумом. Крім того, в кутерах поєднують процеси подрібнення і змішування.

На рис. 3.11 показана схема кутера періодичної дії. Він складається з відкритої чаші 5, ріжучого механізму, що включає приводний вал 2 і серпоподібні ножі 4, з гребінки 3 і кришки 1, що закриває робочу зону кутера. До кришки 1 прикріплені шкребки 6, які направляють продукт під ріжучий механізм при обертанні чаші. Ріжучий механізм являє собою комплект серпоподібних ножів, закріплених в ножовий головці.

Кількість ножів в комплекті для кутерів періодичної дії становить не менше двох, і обертаються вони з частотою до  $100 \text{ с}^{-1}$  і більше. Ніж кутера може мати ріжучу кромку у вигляді прямої лінії з заточкою у вигляді клина або вигнутої лінії складної геометричної форми.

Вибір форми заточування ріжучої кромки ножа визначається вимогами якості подрібнення продукту та допустимими енергетичними

витратами. При існуючих формах заточування ножів перевага віддається асиметричному клину з кутом при вершині від 15 до 30°.

Чашу кутера завантажують вручну або за допомогою завантажувальних пристроїв (підйомниками з підлоговими візками). Подрібнений продукт вивантажують з кутерів періодичної дії вручну на підлоговий візок. Для цього чашу перекидають та звільняють її через борт за допомогою розвантажувальних тарілок і скребок. Крім цього, розвантаження може здійснюватись через центральний отвір в чаші, що закривається пробкою. Кришку панелі кутера відкривають і закривають з використанням спеціальних пристроїв [1].

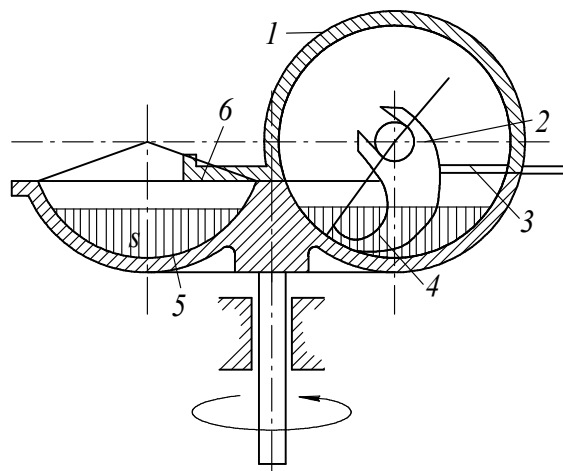


Рисунок 3.11 – Схема роботи кутера періодичної дії: 1 - кришка; 2 - вал; 3 - гребінка; 4 - ножі; 5 - чаша; 6 - скребок

## 4 ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РОЗДІЛЕННЯ НЕОДНОРІДНИХ РІДКИХ СИСТЕМ

### 4.1 Характеристика та методи розділення неоднорідних систем

Неоднорідними називають системи, які складаються як мінімум з двох фаз. Фазу, що перебуває у вигляді дрібних (дисперсних) частинок, називають дисперсною (внутрішньою), а фазу, що оточує ці частинки – суцільною (зовнішньою) фазою або дисперсійним середовищем.

Основні види неоднорідних систем: емульсії (рідка дисперсна фаза і рідке дисперсійне середовище), суспензії (тверда дисперсна фаза і рідке дисперсійне середовище), піни (газова дисперсна фаза і рідке дисперсійне середовище), пил, дим (тверда дисперсна фаза і газове дисперсійне середовище), туман (рідка дисперсна фаза і газове дисперсійне середовище).

У харчовій промисловості прикладами емульсій є молоко (жирові кульки у рідкому середовищі); суспензій — утфель (кристали цукру в між кристальному розчині).

Суспензії умовно поділяють на грубі з розміром частинок понад 100 мкм, тонкі (частинки з розмірами 0,5...100,0 мкм) і каламуті (частинки з розмірами 0,1...0,5 мкм). Середовища, що містять частинки менші за 0,1 мкм, називають колоїдними розчинами, вони займають проміжне положення між каламутями та справжніми розчинами.

Розміри частинок в емульсіях коливаються від 1...2 мм до часток мікрометра. Для емульсій при певних концентраціях дисперсної фази внаслідок коалесценції (злиття) крапель, фаза може перетворитися на суцільну і стати дисперсійним середовищем. Такий взаємний перехід називають інверсією фаз.

Як емульсії, так і суспензії під дією гравітаційної сили розшаровуються. Проте тонкі емульсії з розміром крапель дисперсної фази меншим, ніж 0,5 мкм, а також емульсії зі стабілізаторами стають стійкими і не розшаровуються протягом довгого часу (наприклад, гомогенізовані молочні продукти тощо).

Рідкі та газові неоднорідні системи можна розділяти осадженням або фільтруванням. Вибір способу розділення залежить від розмірів та густини дисперсних частинок, їхньої концентрації в неоднорідній системі, властивостей дисперсійного середовища [12, 17].

Необхідною умовою процесу осадження в полі гравітаційних та відцентрових сил є різниця густин дисперсної фази і дисперсійного середовища, тоді як умовою осадження в електричному полі є різниця реакцій на нього компонентів газової неоднорідної системи. Під час осадження неоднорідна система розділяється на продукти, що розрізняються концентрацією дисперсної фази. Залежно від конструкції апарата ці продукти тим чи іншим способом відокремлюються один від одного [18].

## 4.2 Обладнання для розділення неоднорідних систем у гравітаційному полі

Процес осадження під дією сил тяжіння називають гравітаційним осадженням або відстоюванням, а швидкість процесу – швидкістю осідання (відстоювання).

Загалом процес осадження є малоефективним і не забезпечує виділення з системи, що розділюється частинок з високим ступенем дисперсності [19].

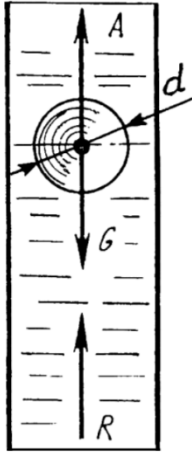


Рисунок 4.1 – Сили, що діють на частинку під час осадження

На окрему частинку, що має форму кулі й перебуває в нерухомому середовищі, густина якого менша за густину частинки, діє сила тяжіння  $G$  за вирахуванням архімедової  $A$  (виштовхувальної) сили (рис. 4.1). Ця сила змушує частинку рухатися вниз. Під час руху виникає сила  $R$  опору середовища. Частинка протягом досить короткого часу рухається з прискоренням, доки  $G - A$  і  $R$  не зрівнюються. З цього моменту частинка рухається з постійною швидкістю, що має назву швидкості осідання. Розглянутий процес можливий лише при незначній концентрації дисперсної фази, коли частинки під час руху не торкаються одна одної, що називається вільним осіданням. У разі збільшення концентрації частинок дисперсної фази умови процесу, на відміну від вільного осідання, характеризуються тертям між частинками та їх взаємними зіткненнями. Таке осідання називається стисненим. Під час зіткнення частинок втрачається енергія руху, тобто зростає коефіцієнт опору, внаслідок чого зменшується швидкість осідання. Крім того, зменшення швидкості осідання в міру наближення частинок до дна апарата і, відповідно, збільшення їхньої концентрації зумовлюються висхідними потоками середовища, що витискується цими частинками.

Процес гравітаційного осадження здійснюється в спеціальних апаратах – відстійниках. У техніці використовують відстійники періодичної, напівбезперервної та безперервної дії.

В апаратах періодичної дії для рідких неоднорідних систем суміш від початку до кінця відстоювання залишається практично нерухомою. Подачу її в апарат, а також видалення із нього продуктів розділення проводять періодично.

Схема відстійника періодичної дії для розділення суспензій показана на рис. 4.2, а. Відстійник заповнюють суспензією через патрубок 1. Після утворення в процесі осідання шару освітленої рідини, висота якого  $H$  у верхній частині апарата, цю рідину зливають за допомогою сифонної трубки або через патрубок 2, після чого через патрубок 3 відводять концентрований продукт (осад) у вигляді текучої згущеної суспензії.

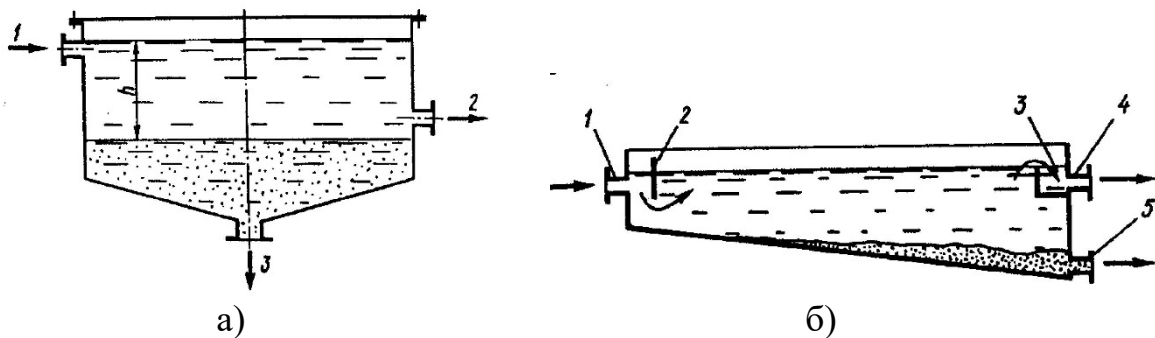


Рисунок 4.2 – Схеми: а – відстійника періодичної дії (1 – патрубок для подачі суспензії; 2 – патрубок для відведення освітленої рідини; 3 – патрубок для відведення концентрованого продукту); б – відстійника напівбезперервної дії (1 – патрубок для підведення суспензії; 2 – щиток; 3 – жолоб; 4 – патрубок для зливання освітленої рідини; 5 – патрубок для відвантаження осаду)

Якщо густина дисперсних частинок (осаду) –  $\rho_o$  менша за густина дисперсійного середовища (рідина) –  $\rho_p$  (наприклад, при відстоюванні молока), частинки дисперсної фази у відстійнику піднімаються вгору й утворюють концентрований продукт на поверхні очищеного дисперсійного середовища. У такому випадку зливають спочатку концентрований продукт, а потім освітлений [2].

Найпростішим серед відстійників напівбезперервної дії є відстійник, в якому частинки осідають під час проходження суспензії по лотку або каналу (рис. 4.2, б). Суспензію безперервно подають через патрубок 1, а освітлену рідину відводять через патрубок 4. Осад відводять періодично через патрубок 5. Щоб суспензія рухалась рівномірно по всьому перерізу каналу, за вхідним патрубком встановлюють щиток 2, а перед вихідним – жолоб 3.

Відстійники лоткового типу можна використовувати як класифікатори частинок. Частинки, більші за розміром, швидше досягають дна відстійника. Тому поблизу місця подачі суспензії осад містить переважно найкрупніші частинки. Чим далі від місця надходження суспензії, тим дрібніші частинки переважають у осаді. Розміщуючи на дні відстійника перегородки поперек напрямку руху суспензії, можна в кожному відсіку зібрати осад з певним розміром частинок, тобто здійснити класифікацію частинок за розмірами.

Схема відстійника безперервної дії з мішалкою показана на рис. 4.3, а. В циліндричний корпус 1 із конічним днищем по патрубку 4 безперервно подають суспензію. На шляху від патрубка 4 до кільцевого прямокутного жолоба 2 суспензія звільняється від дисперсних частинок, що осідають. Освітлена рідина переливається в жолоб, звідки відводиться через патрубок.

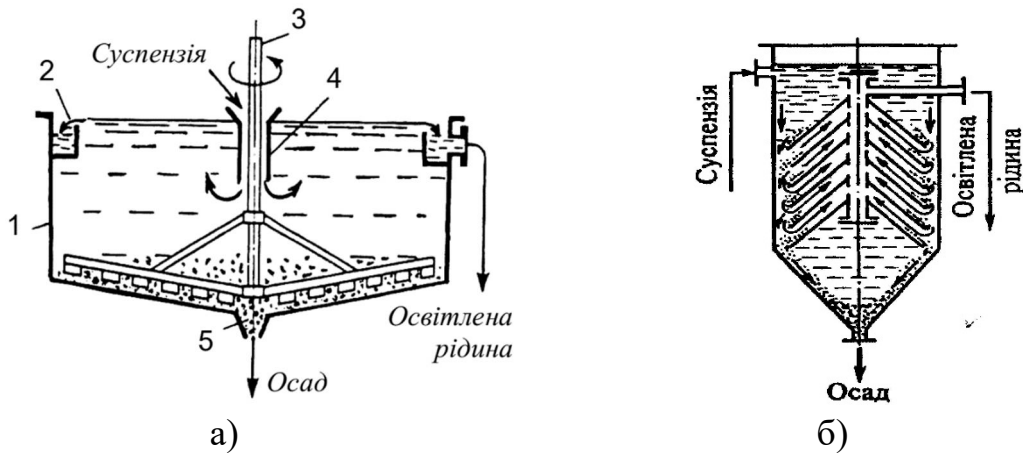


Рисунок 4.3 – Схеми відстійників безперервної дії: а – відстійника з мішалкою (1 – корпус; 2 – жолоб для відведення освітленої рідини; 3 – приводний вал; 4 – завантажувальний патрубок; 5 – патрубок для вивантаження осаду); б – відстійника з конічними перегородками

В об'ємі відстійника від нижнього краю патрубку 4 до днища відбуваються поступове згущення початкової суспензії і формування осаду на днищі. Шар утвореного осаду повільно згортається до патрубка 5 в центрі днища гребками, що закріплені на похилих лопатях під кутом до радіусу їх обертання. Лопаті з'єднані з валом мішалки 3, що обертається у підшипниках. Мішалка обертається з невеликою швидкістю (один оберт за кілька хвилин), тому гребки не порушують процесу осідання.

У промисловості, де потрібні великі поверхні осідання, з метою економії площ приміщень застосовують багатоярусні відстійники. В таких відстійниках продукти відводять окремо з кожного ярусу [11].

На рис. 4.3, б показаний циліндричний відстійник безперервної дії з конічними перегородками. Суспензія, що надходить в апарат, розподіляється по каналах між конусами. Тверді частинки осідають на поверхнях конусів. Утворений осад сповзає з конічних перегородок і виводиться з апарата через нижній центральний штуцер. Освітлена рідина надходить у центральну трубу і виводиться з верхньої частини апарата. Позитивні якості відстійників такого типу: велика поверхня осідання; відсутність рухомих частин; простота обслуговування. Проте вологість осаду в них більша, ніж у відстійниках з гребковою мішалкою. Також із зростанням кута нахилу конічних перегородок зменшується реальна площа поверхні осідання, яка дорівнює сумі площ проекцій перегородок.

Концентрацію дисперсних частинок в осаді регулюють змінюючи швидкість відведення осаду. Чим менший об'єм осаду відводиться, тим більша в ньому концентрація частинок. Однак при цьому потрібно враховувати можливість транспортування осаду по трубопроводу. Ступінь очищення суспензії від дисперсних частинок регулюють змінюючи швидкість надходження суспензії у відстійник. Зменшуючи швидкість надходження суспензії, збільшують тривалість її перебування у відстійнику

і, відповідно, концентрацію твердої фази в осаді та ефективність роботи відстійника в цілому.

Тривалість перебування суспензії у відстійниках пропорційна його висоті і коливається в межах від 10 хв. до кількох годин, залежно від властивостей суспензії та вимог до ступеня її очищення, і розраховується за формулою

$$\tau_n = V_{an} / V_c,$$

де  $V_{an}$  – об'єм апарата, м<sup>3</sup>;

$V_c$  — об'ємні витрати суспензії за одиницю часу, м<sup>3</sup>/хв.

Для прискорення осідання, часто збільшують розміри частинок дисперсної фази суспензій способом їх коагуляції під дією деяких речовин – коагулянтів. Як коагулянти застосовують електроліти. Внаслідок їх дії між частинками виникають сили зчеплення, що сприяє утворенню агрегатів частинок з більшим діаметром.

Злипанню агрегативно нестійких твердих частинок у суспензіях сприяють також флокулянти. Дія флокулянта полягає в адсорбції його молекул на частинках і об'єднанні їх у більші за розмірами та стійкіші агрегати. Наприклад, як флокулянт при відстоюванні сатураційних соків у цукровому виробництві використовують поліакриламід, додаючи до маси соку всього 0,015...0,02% поліакриламід [16].

Гравітаційні відстійники для розділення газових неоднорідних систем використовують рідко через малу продуктивність порівняно з іншими способами розділення цих систем.

Відстійники проектують у розрахунку на осідання найдрібніших частинок, що міститься в суспензії. Тому тривалість перебування суспензії в апараті повинна бути більшою за час, потрібний для осідання частинки найменшого розміру на дно апарата з відповідної висоти.

За час  $\tau$  частинки пройдуть відстань  $h$ . Тоді продуктивність відстійника, тобто об'єм освітленої рідни можна визначити як

$$V = \frac{Fh}{\tau} = Fv_0,$$

де  $F$  – площа поперечного перерізу апарату, м<sup>2</sup>;

$v_0$  – швидкість осідання частинок, м/с.

Згідно із наведеним рівнянням продуктивність відстійника не залежить від його висоти. Тому відстійники мають значну поверхню осідання при невеликій висоті.

#### 4.3 Обладнання для осадження в полі відцентрової сили

Оскільки відцентрова сила, що виникає під час обертання тіл, у багато разів перевищує силу тяжіння, її використовують для прискорення процесів осадження.



Для створення поля відцентрових сил у техніці використовують два основні прийоми [2]:

- 1) потік суспензії чи емульсії подають у барабан (ротатор) машин (апарата), який обертається разом з неоднорідною системою;
- 2) забезпечують обертальний рух пилу (диму) чи суспензії в нерухомому корпусі апарата.

У першому випадку відбувається відцентрове осадження, а у другому – циклонний процес.

Принципова схема барабана осаджувальної центрифуги – апарата для розділення суспензій і емульсій за допомогою відцентрової сили показана на рис. 4.6.

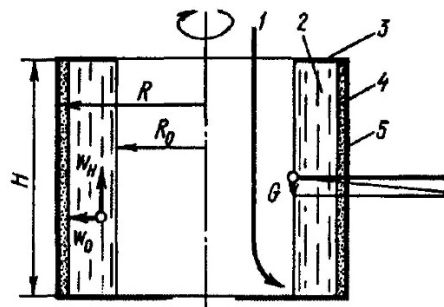


Рисунок 4.6 - Схема барабана осаджувальної центрифуги: 1 – напрямок подачі суспензії (емульсії); 2 – освітлена рідина; 3 – обмежувальне кільце; 4 – осад; 5 – корпус

Суспензія 1, яка потрапляє в барабан 5, що обертається, починає обертатися разом з ним, завдяки чому виникає відцентрова сила  $F_{ц}$ . Ця сила діє на кожний елементарний об'єм рідини. В центрифугах  $F_{ц}$  перевищує силу тяжіння  $G$  в сотні, а іноді в тисячі разів. Через те що поверхня рідини перпендикулярна до напрямку рівнодійної сили, яка діє на її елементи, вона в центрифугі розміщується практично паралельно осі обертання, незалежно від положення цієї осі у просторі та від нахилу твірних барабана до його осі.

Поверхнею осадження твердих частинок у центрифугах є внутрішня поверхня суцільних стінок барабана 5. Осад 4 з більшою густиною частинок накопичується на його внутрішній поверхні, а освітлена рідина 2 з меншою густиною розміщується кільцевим шаром ближче до вертикальної осі барабана. На торці барабана є обмежувальне кільце 3, ширина якого визначає максимальну товщину шару суспензії, що може вмістися в барабані. Оскільки вплив сили тяжіння в барабані, що обертається, незначний, барабан можна обертати навколо горизонтальної осі. Це зручно для механізації та автоматизації з метою вантаження осаду з центрифуги [30].

Для оцінки ефективності осадження під дією відцентрової сили, порівнюємо його з осіданням під дією сили тяжіння. На дисперсну частинку в суспензії у центрифугі діє відцентрова сила, що в  $K_p$  разів перевищує гравітаційну силу. Величина  $K_p$  – це відношення відцентрової сили до сили

тяжіння, або так званий фактор розділення (він ще має назву критерію Фруда) [31]:

$$K_p = \frac{C}{G} = \frac{mv_r^2}{mg} = \frac{v_r^2}{gr} = \frac{\omega^2 r}{g} = \frac{4\pi^2 n_r^2 r}{g} = 4\pi n_r^2,$$

де  $m$  – маса частинки, кг;

$v_r$  – колова швидкість обертання частинки, м/с;

$\omega$  – кутова швидкість обертання частинки, с<sup>-1</sup>;

$r$  – середній радіус обертання частинки, м;

$n_r$  – частота обертання, с<sup>-1</sup>.

Інтенсифікувати роботу центрифуг можна, збільшуючи частоту обертання, діаметр барабана та розділяючи гаряче середовище, якщо допускають технологічні умови. Продуктивність центрифуг за кількістю осаду можна збільшити, якщо попередньо згущувати суспензію у відстійниках чи згущувачах.

#### 4.4 Обладнання для фільтрування

##### 4.4.1 Механізм процесів фільтрування

Фільтруванням називають процес розділення неоднорідних систем з твердою дисперсною фазою за допомогою пористих фільтрувальних перегородок, що пропускають дисперсійне середовище і затримують тверді частинки. Залежно від стану дисперсійного середовища розрізняють фільтрування рідин та фільтрування газів.

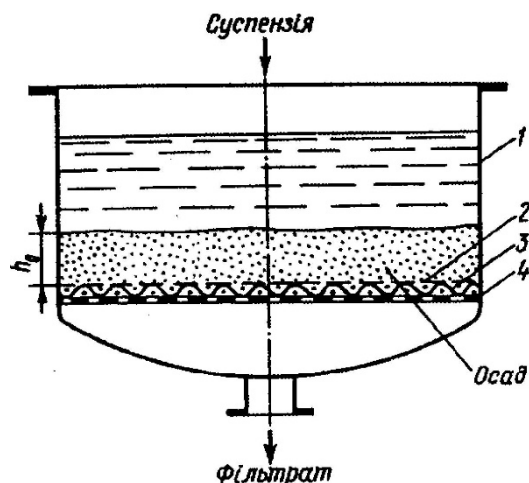


Рисунок 4.7 – Схема найпростішого апарату для фільтрування суспензій: 1 – вертикальна посудина; 2 – фільтрувальна тканина; 3 – дренажна сітка; 4 – опорна решітка

Фільтрування має перевагу перед процесом осадження, яка полягає в тому, що рідини або гази при цьому практично цілком звільняються від завислих частинок [32].

Утворений на перегородці під час фільтрування суспензій шар твердих частинок з деяким вмістом рідини в ньому називають осадом, а рідину, що пройшла крізь перегородку – фільтратом.

Рушійною силою процесу фільтрування є різниця тисків в обох частинах фільтра (до та після фільтрувальної перегородки).

У найпростішому вигляді апарат для фільтрування суспензії (рис. 4.7) – це вертикальна посудина 1, що розділена опорною решіткою 4 на дві частини. У верхню частину подають

суспензію, в нижню стікає фільтрат. Фільтрувальна перегородка складається з фільтрувальної тканини 2 і дренажної сітки 3. Осад, що утворюється на перегородці, періодично видаляють із фільтра.

Потрібну для процесу фільтрування різницю тисків можна забезпечити підвищенням тиску над суспензією понад атмосферного або створенням розрідження (вакууму) під фільтрувальною перегородкою. Відповідно розрізняють фільтрування під тиском та фільтрування під вакуумом. Досить часто фільтрування відбувається під гідростатичним тиском стовпа суспензії над перегородкою, тоді як при фільтруванні в центрифугах рушійна сила створюється завдяки відцентровій силі [21].

Отже, фізична суть процесу фільтрування полягає в розділенні фаз неоднорідних систем за допомогою проникних перегородок при наявності різниці тисків до та після них. Тому фільтрування часто розглядають як процес механічного затримання твердих частинок фільтрувальною перегородкою і шаром утвореного осаду. Такий механізм затримання твердих частинок характерний для фільтрування суспензій, що містять частинки розміром понад 30 мкм [22, 24].

У разі фільтрування суспензій, що мають частинки меншого розміру, на механічне затримання частинок накладається ефект фільтраційної адсорбції. Він проявляється у впливі між твердими поверхнями фільтрувального шару (фільтрувальної перегородки і твердими частинками осаду), а також рідиною (фільтратом) поверхневих, молекулярних, електрокінетичних або інших сил, наявність яких залежить від розміру частинок суспензії, структури, фізико-хімічних властивостей та розміру пор фільтрувального шару, швидкості проникання суспензії між частинками осаду тощо.

Залежно від типу фільтрувальної перегородки і властивостей суспензії процес фільтрування може бути двох видів: з утворенням осаду на поверхні фільтрувальної перегородки (рис. 4.8, а) та з поступовим закупорюванням пор фільтрувальної перегородки (закупорювальне фільтрування – рис. 4.8, б) [23].

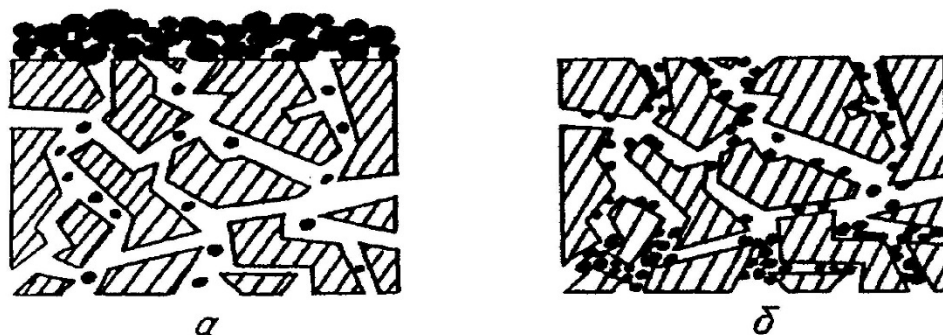


Рисунок 4.8 – Схеми процесів фільтрування з утворенням осаду на поверхні фільтрувальної перегородки (а) та з поступовим закупорюванням пор фільтрувальної перегородки (б)

Перший вид фільтрування на практиці трапляється значно частіше, ніж другий. Фільтрування з утворенням осаду застосовують здебільшого для малов'язких рідин, що містять значну кількість (умовно більше ніж 1% за об'ємом) завислих частинок. Нерідко розмір пор фільтрувальної перегородки більший за розмір завислих частинок. Тому перші порції фільтрату бувають мутними від незатриманих перегородкою частинок. Це спостерігається при фільтруванні полідисперсних суспензій, до яких належить більшість суспензій харчових виробництв. Згодом над входом у пори утворюються склепіння із твердих частинок, що перешкоджають їх проникненню крізь фільтрувальну перегородку разом із фільтратом. Утворений шар осаду починає відігравати головну роль у затриманні частинок. В міру нагромадження осаду збільшується опір фільтруванню, що призводить до зменшення кількості отриманого фільтрату. Щоб зменшити появу каламутного фільтрату на початку фільтрування, процес слід починати при меншому перепаді тисків [16].

Фільтрування з поступовим закупорюванням пор характерне для розділення суспензій з незначною кількістю частинок малих розмірів і, крім того, нерідко з високою в'язкістю рідини. У зв'язку з цим склепіння над входами у пори перегородки практично не встигають утворитись. Частинки проникають у пори перегородки і затримуються в них. Внаслідок зменшення сумарного живого перерізу пор фільтрувальної перегородки поступово збільшується її опір, що відповідно призводить до зниження продуктивності фільтра. На практиці застосовують також проміжний вид фільтрування в разі одночасного поступового закупорювання пор фільтрувальної перегородки та утворення осаду на її поверхні.

Фільтрувальна перегородка є важливою частиною будь-якого фільтра. Від правильного її вибору значною мірою залежать якісні та кількісні характеристики роботи фільтрувальних апаратів. Перегородка має не тільки затримувати тверді частинки, а й мати достатню механічну міцність і низький гідравлічний опір. Матеріал і конструкцію перегородки підбирають таким чином, щоб не допустити інтенсивного схоплення з її поверхнею твердих частинок, які мають легко видалятися з перегородки під час обслуговування фільтрувального апарату [26].

Залежно від дисперсності твердої фази, в'язкості фільтрату, а також конструктивних особливостей фільтрів в якості фільтрувальних перегородок використовують: металеві сітки; бавовняні, полімерні та шерстяні тканини; пористу кераміку і металокераміку; сипкі матеріали (пісок, кісткову крупу тощо) [27].

Для фільтрування тонкодисперсних суспензій (сироп, вино, пиво), а також суспензій, що містять незначну кількість твердих частинок, які легко деформуються (фруктові соки), часто використовують фільтрувальні допоміжні речовини (ФДР). Вони утворюють над порами фільтрувальної перегородки неначе каркас, який перешкоджає їх закупорюванню. Як ФДР,

що являють собою тонкодисперсні або тонковолокнисті матеріали, використовують деревне вугілля, перліт, кизельгур, силікагель, целюлозу.

Ці речовини наносять попередньо на фільтрувальну перегородку у вигляді шару певної товщини (1,5...2,5 мм) або додають до суспензії перед фільтруванням для збільшення в ній концентрації твердих частинок. Останнє сприяє утворенню склепінь над порами фільтрувальної перегородки і запобігає прониканню в них твердих частинок. Якщо ФДР мають адсорбційні властивості, то вони одночасно знебарвлюють рідку фазу суспензії.

#### 4.4.2 Елементи теорії фільтрування

Основним завданням теорії фільтрування є визначення швидкості фільтрування – об'єму фільтрату  $dV$ , який отримують з одиниці площі  $F$  фільтрувальної поверхні за одиницю часу  $d\tau$ . Оскільки в загальному випадку в процесі фільтрування перепад тиску  $\Delta p$  на фільтрувальній перегородці змінюється, а гідравлічний опір шару осаду внаслідок збільшення його товщини зростає, змінну швидкість фільтрування виражають в диференціальній формі,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

$$v = \frac{dV}{F \cdot d\tau}.$$

У найпростішій формі основне рівняння фільтрування було виведене французьким інженером А. Дарсі у 1856 р. при вивченні ним фільтрації води в ґрунтах і відоме як закон Дарсі: швидкість течії рідини в пористому середовищі прямо пропорційна градієнту тиску, тобто [11]

$$v = K \cdot \Delta p / h,$$

де  $h$  — товщина пористого шару (осаду);

$K$  — коефіцієнт пропорційності, який враховує вплив в'язкості рідини і геометричних характеристик пористого шару на швидкість процесу.

Процес фільтрування може відбуватися за таких основних режимів:

- 1) за постійної різниці тисків ( $\Delta p = \text{const}$ );
- 2) за постійної швидкості ( $\omega = \text{const}$ );
- 3) за змінних різниці тисків і швидкості;
- 4) за постійних різниці тисків і швидкості.

Перший режим відбувається, коли у герметичний простір над суспензією подають стиснений газ (звичайно повітря) або коли під фільтрувальною перегородкою створюють розрідження за допомогою вакуумної установки (у вакуум-фільтрах). При цьому швидкість фільтрування зменшується в міру збільшення товщини шару осаду на фільтрувальній перегородці [21].

Другий режим реалізується під час фільтрування з постійною швидкістю, що відбувається у разі подачі суспензії, наприклад, поршневим насосом у фільтрпрес. В одиницю часу він протискує крізь перегородку та осад постійний об'єм фільтрату, незважаючи на збільшення опору осаду внаслідок зростання його товщини.

Третій режим має місце, якщо суспензію подають на фільтр відцентровим насосом. Тоді в межах його робочої характеристики в міру зростання шару осаду збільшується різниця тисків, що супроводжується зменшенням потоку фільтрату. Тобто відбувається режим фільтрування при змінних різниці тисків і швидкості.

Четвертий режим фільтрування при постійній різниці тисків та швидкості відбувається в разі промивання осаду з витискуванням залишків фільтрату. При цьому чиста рідина фільтрується крізь шар осаду незмінної товщини [23].

#### 4.4.3 Обладнання для фільтрування

Рушійною силою процесу фільтрування є різниця тисків, яка створюється по обидва боки фільтрувальної перегородки. Різниця тисків може створюватись за рахунок:

- 1) гідростатичного тиску стовпа суспензії над фільтрувальною перегородкою;
- 2) надлишкового тиску, що створюється насосом або стисненим повітрям;
- 3) вакууму під фільтрувальною перегородкою;
- 4) відцентровими силами, які виникають у суспензії, що знаходиться в обертовій посудині

На рис. 4.9 наведені схеми до вказаних способів фільтрування.

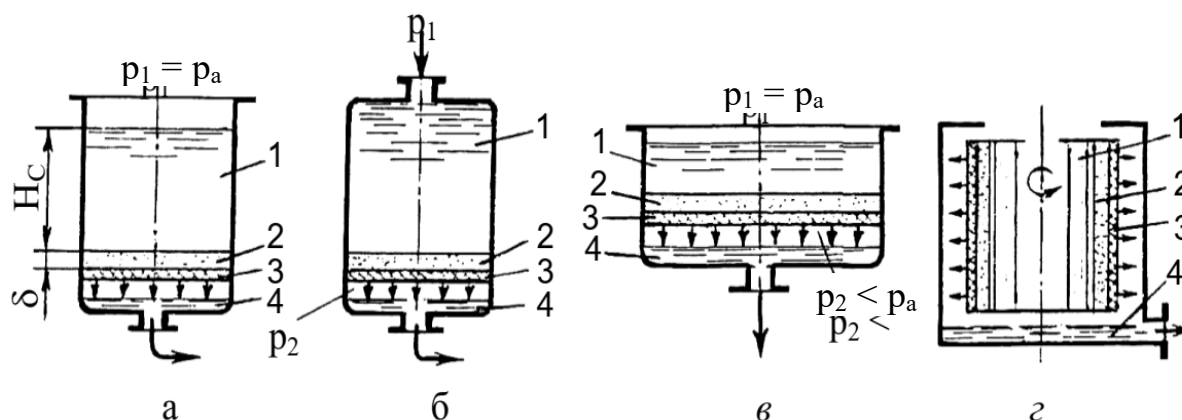


Рисунок 4.9 – Схеми способів фільтрування при створенні: а – гідростатичного тиску над фільтрувальною перегородкою; б – надлишкового тиску над фільтрувальною перегородкою; в – вакууму під фільтрувальною перегородкою; г – перепаду тиску на фільтрувальній перегородці під впливом відцентрової сили; 1 – суспензія; 2 – осад; 3 – фільтрувальна перегородка; 4 - фільтрат

Залежно від схеми реалізації процесу фільтри бувають періодичної та безперервної дії. Для процесів промислового фільтрування з утворенням осаду використовують фільтри як періодичної, так і безперервної дії. Фільтрування з поступовим закупорюванням пор проводять тільки на фільтрах періодичної дії. На фільтрах періодичної дії здійснюють будь-який режим фільтрування, а на фільтрах безперервної дії – лише режим з постійною різницею тисків (у випадку промивання осаду – режим з постійною різницею тисків та постійною швидкістю).

На рис. 4.10 наведені схеми найбільш поширених піскового та патронного фільтрів для фільтрування відповідно способом створення гідростатичного тиску над фільтрувальною перегородкою та надлишкового тиску на фільтрувальних перегородках.

Перевагами піскового фільтру є простота конструкції та забезпечення високої якості очищення суспензій та емульсій на водній основі з незначним вмістом дисперсних частинок, які після вилучення можуть бути утилізовані. Основними елементами фільтра є корпус 1, металеві сітки 2 і 3, крупний кварцовий пісок між сіткою 3 та марлевою прокладкою 4 і дрібний кварцовий пісок між марлею 4 та сіткою 3.

У патронному фільтрі (див. рис. 4.10, б) неоднорідна дисперсна система подається у корпус під тиском 0,2 – 0,4 МПа, в результаті чого рідка фаза проходить через стінки фільтрувальних елементів 2, закріплених на перегородці 3 і збирається у порожнині 4, звідки відводиться, тоді як тверда фаза затримується фільтрами та періодично видаляється. Фільтрувальні елементи виготовляються з металевої сітки, тканини або кераміки [30].

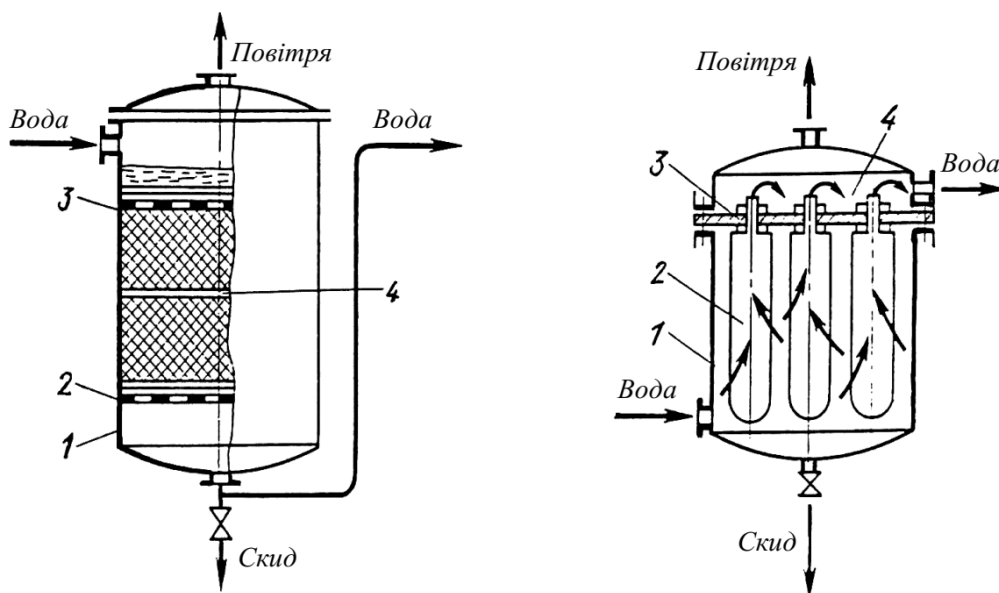


Рисунок 4.10 – Схеми: а – піскового фільтру (1 – корпус; 2, 3 – металеві сітки; 4 – марлева перегородка); б – патронного фільтру (1 – корпус; 2 – фільтрувальні елементи; 3 – перегородка; 4 – порожнина для відфільтрованої рідини)

На рис. 4.11 показана одна з численних конструкцій листових фільтрів, яка містить елементи у вигляді двох прямокутних рамок 2. Верхні частини рамок вставлені у повздовжній проріз трубки 5 з одним заглибленим кінцем. Всередині рамок розміщені металеві сітки 3 з великими отворами. Кожен елемент разом з трубками 5 обтягнутий фільтрувальною тканиною 6. Пакет таких елементів закріплений у закритому корпусі 7, а кінці трубок 5 виведені у приймач фільтрату 4.

Суспензію або емульсію через патрубок 1 подають під тиском у розподільні трубки 8. Фільтрат проходить крізь фільтрувальну тканину всередину рамок, звідки трубками 5 відводиться у приймач фільтрату 4 і виводиться з фільтра. Після закінчення стадії фільтрування фільтр розвантажують через патрубок 9. Осад відпадає з фільтрувальної тканини в нижню частину корпусу, де змішується із залишками суспензії, що була в апараті. Кращому відділенню осаду і регенерації фільтрувальної тканини сприяє розрідження, що виникає в корпусі фільтра під час його розвантаження. При цьому в апараті виникає зворотний потік фільтрату із приймача 4 і рамок 2 та повітря, що засмоктується через відкриті кінці трубок 5.

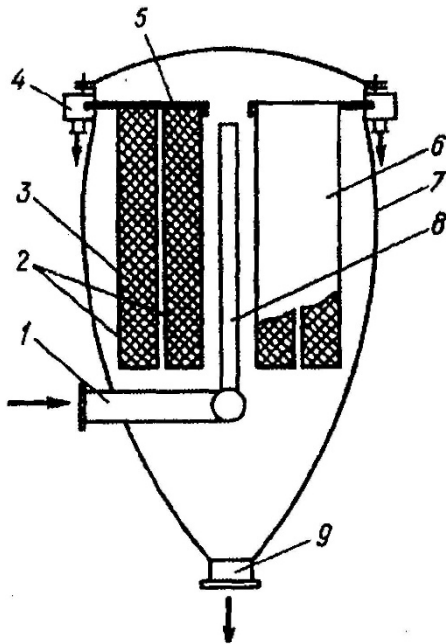


Рисунок 4.11 – Схема листового фільтра: 1 – патрубок подачі дисперсної суміші; 2 – металева рамка; 3 – фільтрувальний елемент (металева сітка); 4 – приймач фільтрату; 5 – трубки для збору фільтрату; 6 – фільтрувальна тканина; 7 – корпус; 8 – розподільна трубка; 9 – розвантажувальний патрубок

Такі фільтри використовують як згущувачі, а також для фільтрування малоконцентрованих суспензій. Головною перевагою даного обладнання є простота конструкції і компактність, а суттєвим недоліком – ручне обслуговування.

Фільтр-прес з вертикальними рамами є обладнанням періодичної дії, що працює під тиском, при цьому напрямку сили тяжіння і руху фільтрату є перпендикулярними. Фільтр-прес (рис. 4.12) складається зі станини 1, на якій змонтовані задня навантажувальна плита 5, передня навантажувальна плита 9 та проміжні плити 6, 8, установлені на два горизонтальних стрижні 7 [2].

Насос 2, що нагнітає суспензію в канал 4, приводиться в рух електродвигуном 3. Навантажувальна плита 9 переміщається гвинтом 10 за допомогою маховика 11. Стискання плит 8 здійснюється за допомогою гвинта 10 та важеля 12 або забезпечується механічним приводом.



Зібрані в пакет плити з розміщеними між ними фільтрувальними пластинами щільно стискаються. При цьому фільтрувальні пластини ділять зазор між двома плитами на дві частини, що досягається завдяки ребристій поверхні плит. В цьому зв'язку розрізняють парні і непарні відсіки. Якщо вихідна суспензія надходить в парний відсік, фільтрат буде виходити з непарного відсіку.

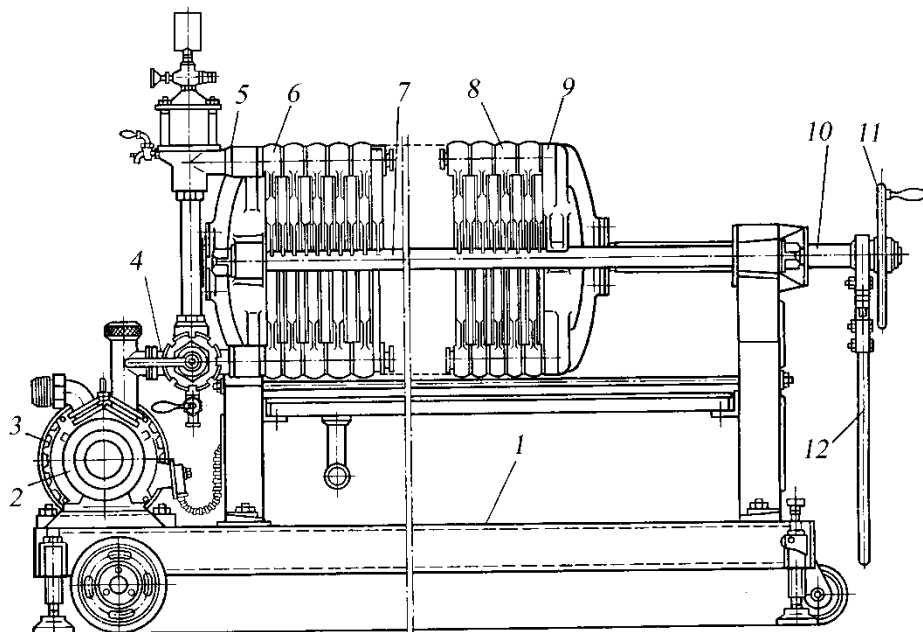


Рисунок 4.12 – Схема фільтр-преса: 1 – станина; 2 – насос; 3 – електродвигун; 4 – канал; 5 – задня навантажувальна плита; 6, 8 – проміжні плити; 7 - горизонтальний стрижень; 9 - передня навантажувальна плита; 10 – гвинт; 11 – маховик; 12 – важіль

Кожна плита має по два фасонні припливи з отворами. Ці припливи розташовані в двох кутах парних плит з одного боку, в непарних плитах – з протилежного боку. Таким чином, при з'єднанні плит в пакет створюються два канали в парних і два канали в непарних плитах, з'єднаних з порожнинами, утвореними кожною парою плит з фільтрувальною пластиною, що їх розділяє.

При роботі фільтр-преса суспензія нагнітається в канали парних плит, потім через отвори в них надходить у відсіки для вихідної суспензії та під тиском проходить через фільтрувальні пластини (рис. 4.13), при цьому частки суспензій затримуються, а фільтрат потрапляє у відсіки, потім по двом каналам непарних пластин виходить з фільтра.

Фільтр-прес використовується в промисловості для розділення суспензій з невеликою концентрацією твердих частинок, коли трудомісткі операції розбирання, розвантаження та складання виконуються відносно рідко [26].

До переваг фільтр-пресів відноситься велика поверхня фільтрування на одиницю займаної ними площі приміщення та відсутність рухомих частин в процесі експлуатації. До недоліків відноситься необхідність в

ручному обслуговуванні, недосконале промивання осаду та швидке зношування фільтрувальної тканини.

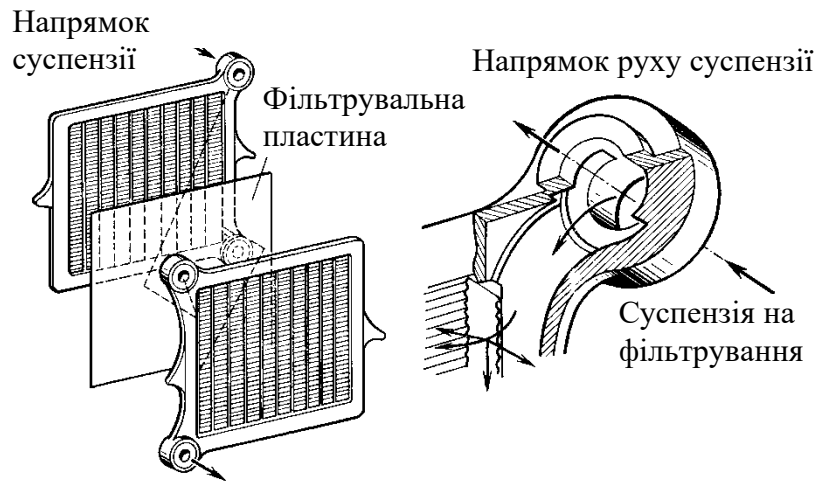


Рисунок 4.13 – Схема проходження суспензії у фільтр-пресі

Досить перспективним є зараз спосіб тангенціального потокового фільтрування неоднорідних дисперсних систем через трубчасті металокерамічні мембрани (рис. 4.14) [16].

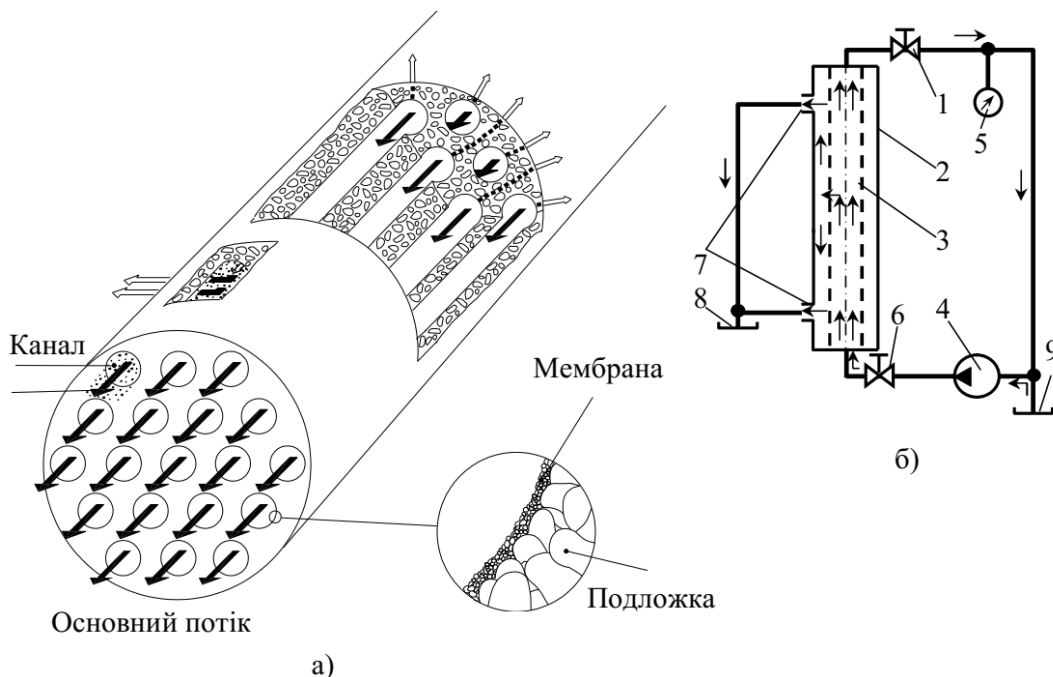


Рисунок 4.14 – Трубчаста керамічна мембрана (а) та схема установки (б) для тангенціального потокового фільтрування

При циркуляції суспензії або емульсії під тиском до 10,5 МПа по каналах мембрани (рис. 4.14, а), рідинна фаза проходить у порах в її стінках, очищується та відводиться. Тверді частинки затримуються мембраною. На рисунку 4.14, б показана схема установки для тангенціального потокового фільтрування, під час якого потік суспензії або емульсії з баку 9 подається

насосом 4 по каналах мембрани 3. Необхідний тиск фільтрату у каналах устанавлюється за допомогою кранів 1, 6. Фільтрат стікає у корпус 2 і відводиться далі у бак 8 [32]. При цьому на відміну від звичайного фільтрування у піщовому, патронному чи листовому фільтрі (див. рис. 4.10, 4.11), товщина осаду  $s_o$  на внутрішніх поверхнях мембрани залишається постійною (рисунок 4.15), оскільки більша частина твердих частинок змивається основним потоком. Тому, витрати відфільтрованої рідини  $Q_\phi$ , тобто продуктивність процесу зменшуються не так інтенсивно.

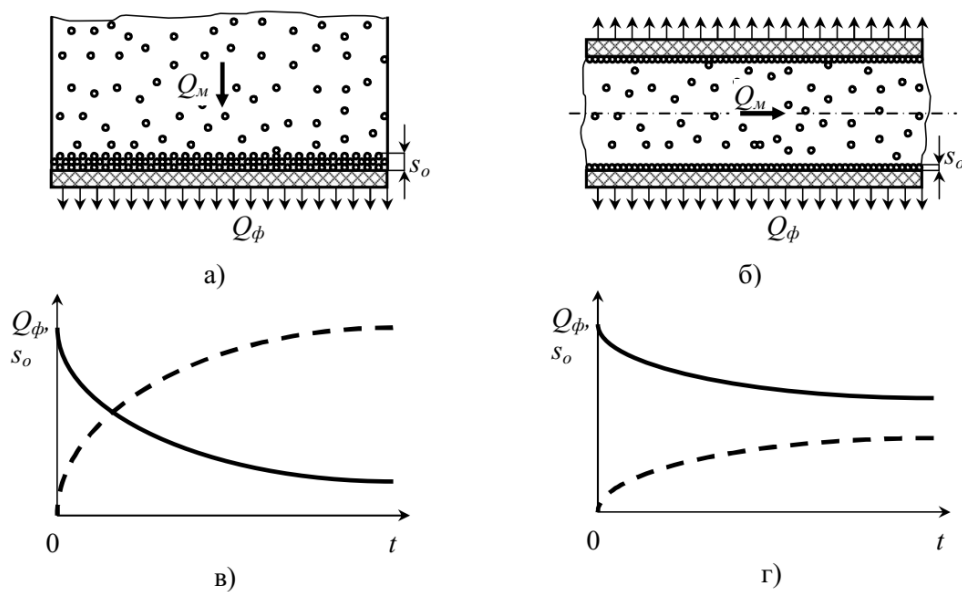


Рисунок. 4.15 – Схеми (а, б) та графіки залежностей основних параметрів (в, г) звичайного та тангенціального потокового фільтрування неоднорідних дисперсних систем

На рис. 4.16 наведені модель трубчастих мембран у корпусі промислової устанавки для потокового фільтрування та фото устанавки.



а)



б)

Рисунок 4.16 – Модель трубчастих мембран у корпусі промислової устанавки для потокового фільтрування (а) та фото устанавки (б)

Але і при тангенціальному потоковому фільтруванні пори мембрани з часом забиваються твердими частинками, що змушує зупинити процес і здійснювати промивання мембрани [21]. Крім цього, для забезпечення високої продуктивності необхідно підтримувати одночасно високу швидкість потоку неоднорідної дисперсної системи ( $Re = 2400$ ) та значний тиск в її середовищі [23, 25], що в умовах потокового виробництва, при значних обсягах суспензій та емульсій, що необхідно відфільтрувати, призведе до суттєвого зростання вартості установок та витрат електроенергії при їх експлуатації [22, 24].

Тому автором посібника запропоновані схеми обладнання для потокового віброударного фільтрування неоднорідних дисперсних систем, в якому вищевказані недоліки значною мірою усунені [8].

На рисунку 4.17 показана принципова схема установки для здійснення пропонуваного способу [27].

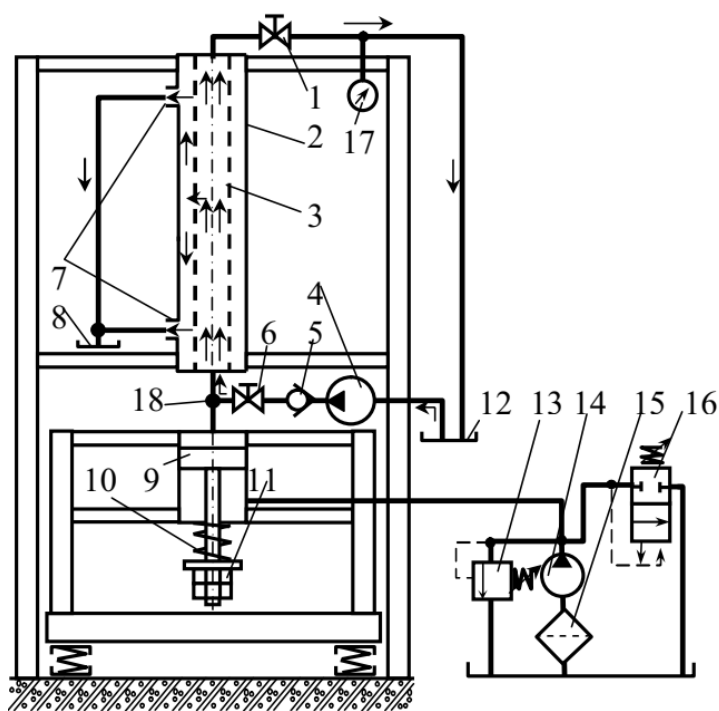


Рисунок 4.17 – Принципова схема установки для потокового віброударного фільтрування неоднорідних дисперсних систем: 1, 6 – крани; 2 – корпус; 3 – трубчаста керамічна мембрана; 4 – насос подачі суспензії; 5 – зворотний клапан; 7 – відводи для фільтрату; 8 – бак для фільтрату; 9 – гідроциліндр гідроімпульсного привода; 10 – пружина; 11 – регулювальні гайки; 12 – бак для суспензії; 13 – запобіжний клапан; 14 – насос гідроімпульсного привода; 15 – фільтр; 16 – генератор імпульсів тиску; 17 – манометр; 18 – розподільна порожнина

Суспензія або емульсія подається насосом 4 по каналах трубчастої керамічної мембрани 3. За допомогою кранів 1, 6 створюється опір і тиск у середовищі суспензії, в результаті чого її рідинна фаза витісняється через

стілки мембрани, фільтрується і стікає в резервуар 8. Поршень гідроциліндра 9 здійснює вертикальні зворотно-поступальні переміщення, які створюються за допомогою гідроімпульсного або дебалансного привода. Останнє призводить до виникнення у середовищі суспензії ударних хвиль напружень та деформацій. В результаті, як це було встановлено під час експериментів з фільтрування кавового шламу на стенді-прототипі, у порівнянні із безударним потоковим фільтруванням на 20 - 25% підвищується і стабілізується продуктивність процесу (при реалізації безударного фільтрування продуктивність падає через кожні півгодини роботи установки на 1%, тоді як під час віброударного фільтрування продуктивність в часі є незмінною) [16, 23].

Конструктивною особливістю дискових фільтрів (рис. 4.18) є наявність пакету із фільтрувальних дисків або секторів, що розміщені горизонтально або вертикально. Залежно від способу створення різниці тисків розрізняють дискові фільтри під тиском і дискові вакуум-фільтри. Фільтрувальні елементи дискових фільтрів можуть бути керамічними, металокерамічними, із спіральним металевим каркасом, обтягнутим фільтрувальною тканиною, тощо [9].

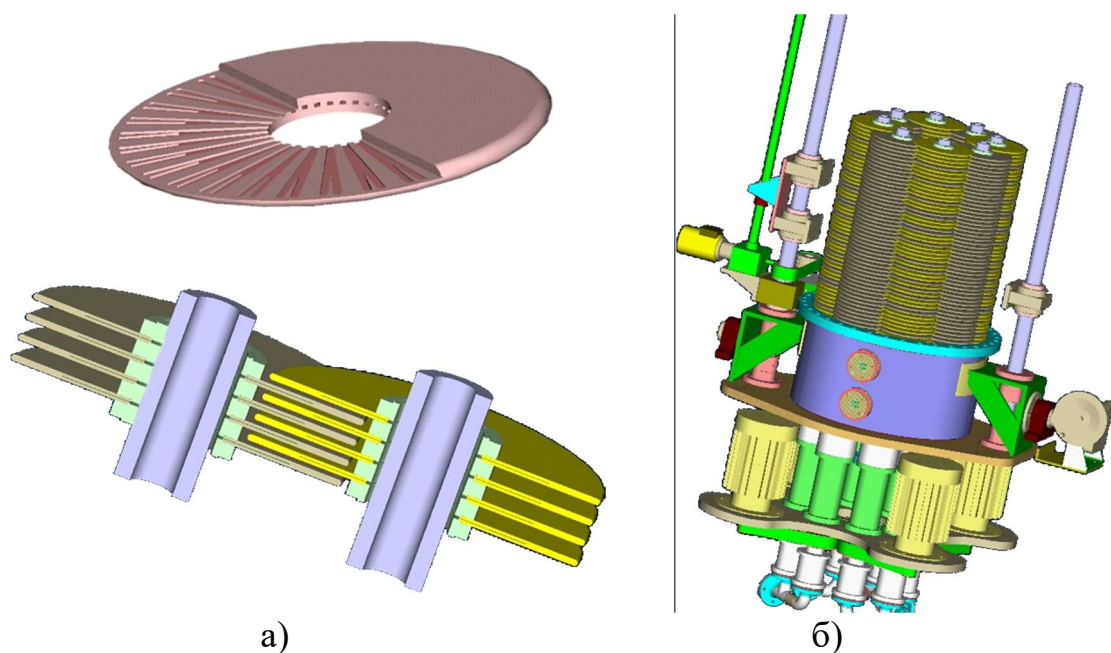


Рисунок 4.18 – Загальний вид дискових керамічних фільтрів (а) та установки з дисковими фільтрувальними елементами (б)

Диски встановлюються на порожнистому валу (валах) в середині робочої камери установки, де створюється надлишковий тиск. В результаті рідка фаза проходить скрізь пори у стінках дисків і потрапляє в їх радіальні канали (див. рис. 4.18, а), по яких стікає в осьовий канал вала та виводиться з установки. Тверді частинки затримуються поверхнями дисків. Для запобігання осідання твердих частинок на дисках, забивання їх пор та зниження продуктивності фільтрування порожнисті вали і разом з ними

диски приводяться в обертання. Диски, закріплені на сусідніх паралельних валах установки заходять один за одного (див. рис. 4.18, б), в результаті при їх обертанні уздовж поверхонь дисків створюються зустрічні потоки рідини, які ефективно змивають тверді частинки. Останні піддаються також впливу відцентрових сил при обертанні дисків.

Відцентрове фільтрування здійснюють у фільтрувальних центрифугах. Кінцева мета відцентрового фільтрування – отримати осад з найменшим, як правило, вмістом у ньому рідкої фази [2].

На рис. 4.19 показана вертикальна фільтрувальна центрифуга періодичної дії. Центрифуга складається з перфорованого барабана 2, насадженого на вал, що обертається. На внутрішній поверхні барабана розташована дренажна дротова сітка 3, а на ній – фільтрувальна тканина 4. Суспензія подається зверху в барабан. В результаті фільтрування на тканини 4 утворюється шар осаду. Фільтрат під дією відцентрової сили проходить через осад, фільтрувальну перегородку, перфорацію барабана і потрапляє в кожух 1, звідки і відводиться. Після закінчення процесу фільтрування барабан зупиняється і вручну вивантажується осад.

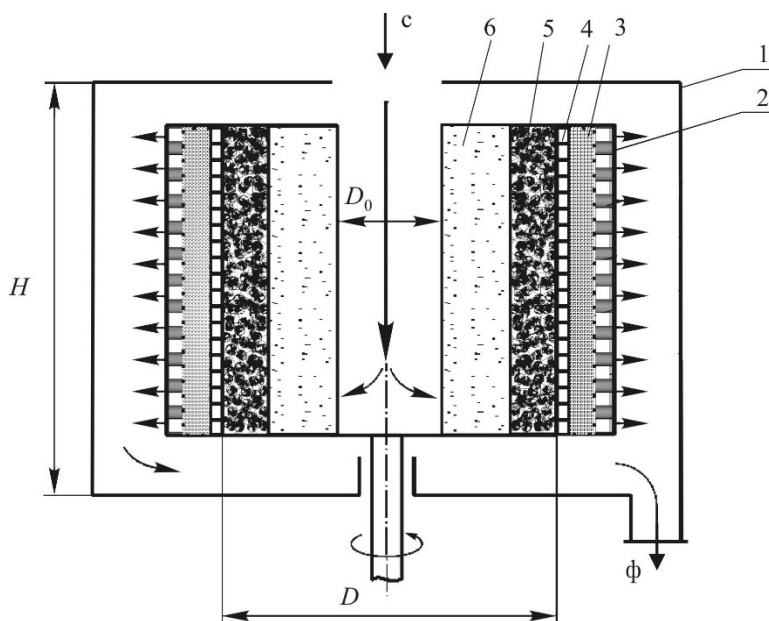


Рисунок 4.19 – Вертикальна фільтрувальна центрифуга: 1 – корпус; 2 – перфорований барабан; 3 – дротова сітка; 4 – фільтрувальна тканина; 5 – осад; 6 – суспензія. Потоки: с – суспензія; ф – фільтрат (фугат)

Горизонтальна фільтруюча центрифуга безперервної дії з ножовим зніманням осаду показана на рис. 4.20. На внутрішню поверхню перфорованого барабану 1 укладена дренажна сітка, на якій закріплюється фільтрувальна тканина 11, а на фільтрувальну тканину зверху укладається запобіжна сітка. Вона слугує для запобігання зношування тканини під впливом ножа під час знімання осаду. Особливістю даної центрифуги є здійснення всіх операцій процесу в автоматичному режимі і при постійній швидкості обертання барабана. Зрізаний ножом осад надходить в жолоб 5,

якому під час роботи ножа передаються вібраційні коливання для кращого відведення осаду. Такі центрифуги застосовуються для розділення суспензій з концентрацією твердої фази більше 10%, яка містить тверді частинки розміром понад 30 мкм і подрібнення яких допустимо [14].

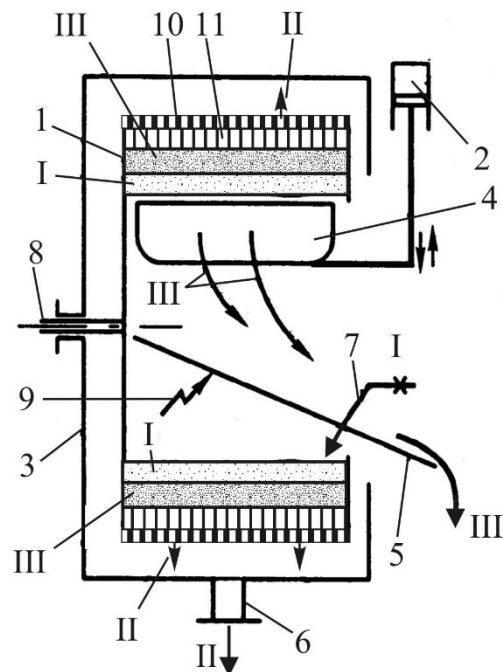


Рисунок 4.20 – Горизонтальна фільтрувальна центрифуга з ножовим зніманням осаду: 1 – барабан; 2 – гідравлічний циліндр для підйому і опускання ножа; 3 – кожух; 4 – ніж для знімання осаду; 5 – похилий жолоб; 6 – патрубок для відведення фільтрату; 7 – труба для подачі суспензії; 8 – вал; 9 – вібратор; 10 – перфоровані стінки барабана; 11 – фільтрувальна тканина. Потіки: I – суспензія; II – фільтрат; III – осад

Основною перевагою цих центрифуг є повна автоматизація процесу фільтрування. Недолік їх – відносно швидкий знос фільтрувальної перегородки [14].

## 5 ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ТЕПЛООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ

### 5.1 Основи теплообміну для проведення теплових процесів

Теплообміном називають процес передачі теплоти від одного тіла до іншого. Необхідною і достатньою умовою для теплообміну є різниця температур між цими тілами. Мірою теплообміну вважають кількість переданої теплоти [6].

Речовини, які беруть участь у процесі теплообміну, називають теплоносіями. Речовину з вищою температурою називають гарячим теплоносієм, а речовину з нижчою температурою – холодним. Як гарячі теплоносії в харчовій промисловості найчастіше використовують водяну пару, гарячу воду, нагріте повітря, димові гази і гарячі мінеральні оливи, а в якості холодних теплоносіїв – воду, повітря, ропу (розсіл), аміак та фреони.

Є три способи особи передачі теплоти: теплопровідність, конвекція та випромінювання.

Теплопровідністю називають явище перенесення теплової енергії безпосереднім контактом між частинками тіла.

Конвекцією називають процес поширення теплоти внаслідок руху рідини або газу. За природою виникнення розрізняють два види руху рідини: вільний і примусовий. Вільний рух рідини, або природна конвекція, виникає внаслідок різниці густин нагрітих і холодних частинок рідини, тобто під дією внутрішніх сил. Примусовий рух рідини виникає під дією зовнішніх сил (насоса, вентилятора).

Випромінюванням називають процес передачі теплоти від одного тіла до іншого поширенням електромагнітних хвиль у просторі між цими тілами.

Тепловіддачею називають процес теплообміну між твердою стінкою (тілом) і рідким (газоподібним) середовищем, що її омиває.

Теплопередачею називають процес теплообміну між двома середовищами, розділеними твердою перегородкою.

Основними кінетичними характеристиками процесу теплопередачі є середня різниця температур між середовищами – рушійна сила процесу, коефіцієнт теплопередачі та кількість переданої теплоти. Зв'язок між ними для усталеного процесу визначається основним рівнянням теплопередачі

$$Q=k \cdot F \cdot \Delta t_{cp},$$

де  $Q$  – кількість переданої теплоти, Вт;

$k$  – коефіцієнт теплопередачі (кінетичний коефіцієнт), який характеризує швидкість перенесення теплоти, Вт/(м<sup>2</sup> К);

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

$\Delta t_{cp}$  – рушійна сила процесу, або середня різниця температур між теплоносіями, К.



З рівняння теплопередачі площа поверхні теплообміну апарата

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_{cp}}$$

Для цього кількість переданої теплоти визначають з теплового балансу, середню різницю температур – за початковими та кінцевими температурами середовищ, які обмінюються теплотою. Коефіцієнт теплопередачі показує, яка кількість теплоти (Дж) передається від гарячого теплоносія до холодного за 1 с через 1 м<sup>2</sup> стінки при різниці температур між теплоносіями 1 К [14].

$$\text{Розмірність коефіцієнта теплопередачі } k = \left[ \frac{Вт}{м^2 К} \right].$$

При визначенні площі поверхні теплообміну розрахунок коефіцієнта теплопередачі спричинює найбільші труднощі.

## 5.2 Рушійна сила теплових процесів

Такою силою є різниця температур між теплоносіями, яку називають температурним напором.

Під час теплопередачі від одного теплоносія до іншого температурний напір, як правило, не зберігає постійного значення вздовж поверхні теплообміну. Тому в теплових розрахунках користуються середнім температурним напором [2].

Характер зміни температур теплоносіїв уздовж поверхні теплообміну визначається схемою їх взаємного руху і співвідношенням добутку масових витрат теплоносіїв на їх теплоємність (водяних еквівалентів):

$$W = G c_p.$$

Якщо в теплообмінному апараті гарячий та холодний теплоносії протікають паралельно і в одному напрямку, то така схема руху називається прямотечією (рис. 5.1, а). Якщо рідини протікають паралельно, але в протилежному напрямку то така схема називається протитечією (рис. 5.1, б). Схема взаємного руху, при якій рідини протікають в перехресному напрямку називається перехресною течією (рис. 5.1, в). Окрім таких простих схем руху, на практиці здійснюються також більш складні: одночасно прямотечія та протитечія (рис. 5.1, г), багаторазово перехресна течія, (рис. 5.1, д – ж) тощо.

Залежно від того, чи здійснюється прямотечія чи протитечія, а також від співвідношення  $W_1$  та  $W_2$ , можливі чотири характерні графіки зміни температури уздовж поверхні нагрівання, представлені на рис. 5.2. На графіках по осях абсцис відкладена площа поверхні нагрівання  $F$ , а по осях ординат – температура робочих рідин [15].

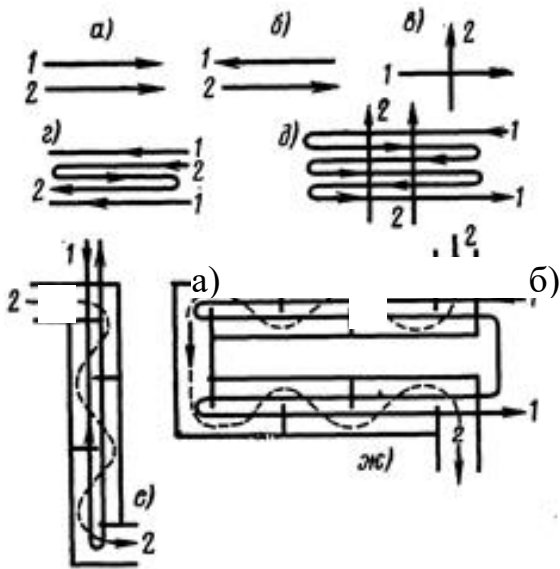


Рисунок 5.1 – Схеми руху робочих рідин в теплообмінниках: а – прямотечія; б – протитечія; в – перехресна течія; г - одночасна прямотечія та протитечія; д – ж – багаторазово перехресна течія

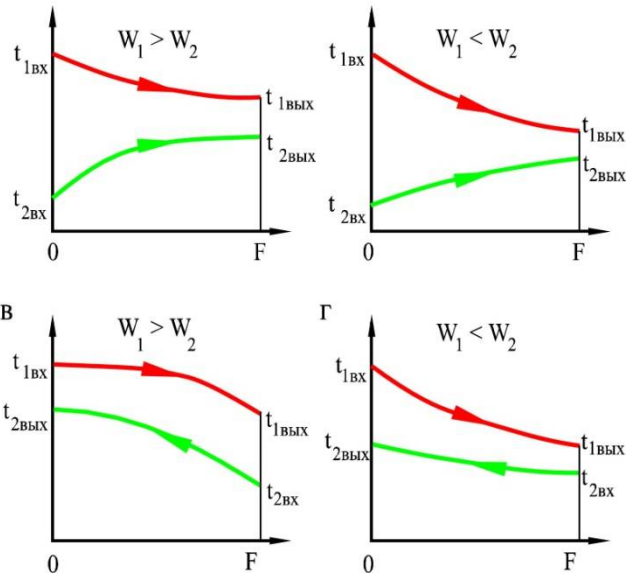


Рисунок 5.2 - Характер зміни температур робочих рідин при прямотечії (а) та протитечії (б)

Найбільш повно теплоносії використовуються у разі протитечії. При цьому кінцева температура холодного теплоносія може бути вищою від кінцевої температури гарячого теплоносія. Найменш ефективні прямотечійні теплообмінники. Кінцева температура холодного теплоносія в них не може перевищувати кінцевої температури гарячого теплоносія. Решта схем руху належить до середніх за ефективністю [7].

Середнє значення температурного напору у разі прямотечії менше, ніж у разі протитечії. Внаслідок цього, протитечійний теплообмінник компактніший.

### 5.3 Теплообмінні апарати

За способом передавання теплоти усі теплообмінники поділяють на дві великі групи: поверхневі і змішувальні.

В поверхневих теплообмінниках обидва теплоносії відокремлені один від одного твердою стінкою або по черзі контактують з однією і тою ж самою стінкою, яка бере участь у процесі теплообміну й утворює так звану поверхню теплообміну. Залежно від призначення теплообмінного апарата цю поверхню також часто називають поверхнею нагріву або охолодження. У змішувальних теплообмінниках, або апаратах змішування, теплообмін здійснюється внаслідок безпосереднього контакту змішування гарячого й холодного теплоносіїв.

Поверхневі теплообмінники, у свою чергу, поділяють на рекуперативні та регенеративні. В рекуперативних апаратах один бік

поверхні теплообміну весь час омиває гарячий теплоносіє, а інший – холодний. Теплота від одного теплоносія до іншого передається крізь стінку з теплопровідного матеріалу, що їх розділює. Напрямок теплового потоку в стінці лишається незмінним. У регенеративних апаратах одна й та сама поверхня теплообміну по чергово омивається то одним, то іншим теплоносієм. У період нагрівання, тобто під час контакту з гарячим теплоносієм, у виконавчих елементах (трубках, пластинах, дисках) робочої камери апарату акумулюється теплота, яка в період охолодження віддається рухомому холодному теплоносію. Напрямок потоку теплоти стінках періодично змінюється [15].

У харчовій промисловості для нагрівання й охолодження використовують переважно рекуперативні теплообмінники. Тому далі під назвою «поверхневі теплообмінники» або просто «теплообмінники» ми розумітимемо рекуперативні теплообмінники.

Теплообмінники класифікують також:

1) за видом теплоносіїв, залежно від їх агрегатного стану – на парорідинні, рідиннорідинні, газорідинні, газогазові, парогазові;

2) за конфігурацією поверхні теплообміну – на трубчасті апарати з прямими трубками, трубчасті апарати з U-подібним пучком труб, спіральні, пластинчасті, змієвикові, ребристі;

3) за компонованням поверхні нагріву – кожухотрубні, типу «труба в трубі», зрошувальні, заглибні, оболонкові, ламельні, пластинчасті, змієвикові, спіральні, пластинчато-ребристі, спеціальні (апарати з сорочками, ребристі апарати), комбіновані та інші.

Також теплообмінні апарати можна класифікувати за рядом додаткових ознак. Зокрема теплообмінні апарати поверхневого типу поділяють залежно від напрямку потоків теплоносіїв на (див. також рис. 5.1) [14]:

- прямотечійні, коли обидва теплоносії рухаються паралельно в одному напрямку;

- протитечійні, коли обидва теплоносії рухаються в протилежних напрямках назустріч один одному;

- з перехресною течією — теплоносії рухаються взаємно перпендикулярно;

- із складнішими схемами різного поєднання прямотечії, протитечії і перехресної течії.

За призначенням теплообмінники класифікуються на апарати для [2]:

- проведення теплопередачі без зміни агрегатного стану робочого середовища (нагрівачі, охолоджувачі);

- проведення теплопередачі зі зміною агрегатного стану робочих середовищ (випарники, кип'ятильники, конденсатори);

- одночасного проведення технологічного процесу та теплопередачі (реактори, абсорбери, теплообмінники, вбудовані в установки);

За характером температурного режиму теплообмінні апарати поділяються на:

- апарати зі сталим тепловим режимом, в яких температура робочого середовища на даній ділянці поверхні теплообміну з плином часу не змінюється (теплообмінники безперервної дії);

- апарати з несталим тепловим режимом, в яких температура робочого середовища на даній ділянці поверхні теплообміну змінюється з плином часу (теплообмінники періодичної дії).

Далі розглядаються конструкції та принцип дії найбільш поширених теплообмінних апаратів [7].

Теплообмінники типу «труба в трубі» являють собою один або кілька теплообмінних елементів, розташованих один під одним (рис. 5.3). Кожен з елементів складається з внутрішньої труби 1 і охоплюючої її зовнішньої труби 2. Внутрішні труби окремих елементів з'єднані послідовно колінами (калачами) 3. Зовнішні труби з'єднані також послідовно патрубками 4. Теплоносій I рухається по внутрішнім трубам, теплоносій II – по кільцевих каналах між трубами 1 і 2.

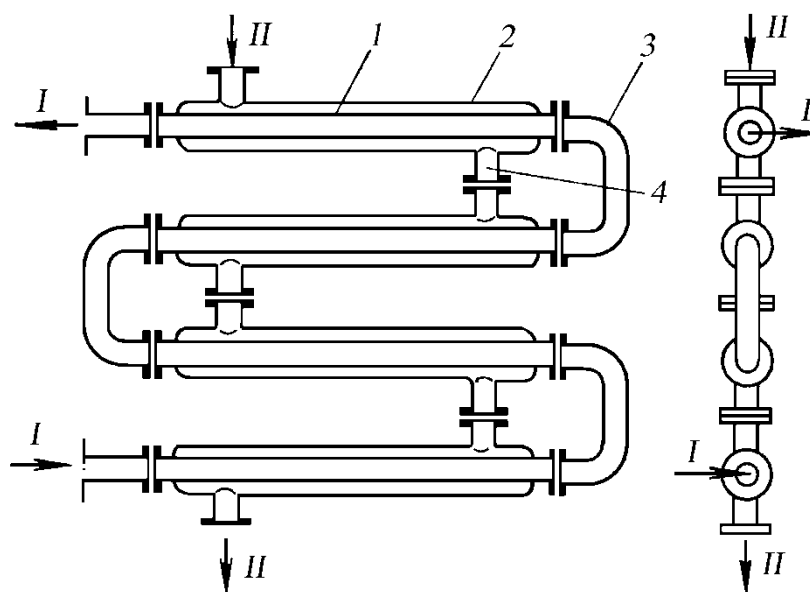


Рисунок 5.3 – Двотрубний теплообмінник типу «труба в трубі»: 1 – внутрішня труба; 2 – зовнішня труба; 3 – сполучне коліно; 4 – з'єднувальний патрубок; I, II – теплоносії

Теплообмін між теплоносіями здійснюється через стінки внутрішніх труб. У цих теплообмінниках забезпечуються висока швидкість теплоносіїв (навіть при малих витратах) і висока інтенсивність теплообміну. Однак ці теплообмінники громіздкі і металлоємні, тому їх застосовують переважно для проведення процесів нагрівання або охолодження при високих тисках. При необхідності створення великої площі поверхні теплообміну встановлюють кілька паралельно з'єднаних елементів.

Кожухотрубні теплообмінники – найбільш поширений тип поверхневих теплообмінників. Вони допускають створення великих поверхонь теплообміну в одному апараті, прості у виготовленні і надійні в роботі.

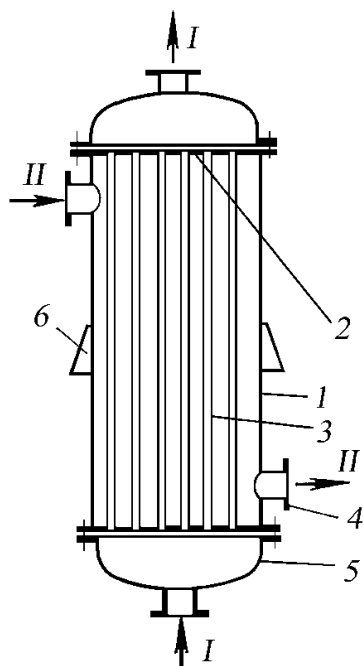


Рисунок 5.4 – Вертикальний кожухотрубний теплообмінник з нерухомими трубними решітками: 1 – кожух; 2 – трубна решітка; 3 – труби; 4 – патрубок; 5 – кришка; 6 – опорна лапа; I, II – теплоносії

Кожухотрубний вертикальний теплообмінник з нерухомими трубними решітками (жорсткої конструкції) складається з циліндричного корпусу, або кожуха 1, до якого з двох сторін приварені трубні решітки 2. У трубних решітках закріплені пучок труб 3. До кожуха за допомогою фланців приєднані болтами кришки 5. Для введення і виведення теплоносіїв до корпусу (кожуха) і кришок приварені патрубки 4. Теплообмінник установлюють на опорних лапах 6. Один потік теплоносія (I) направляєтся через патрубок в нижню камеру, проходить по трубках і виходить через патрубок у верхній камері, тобто рухається в трубному просторі. Інший потік теплоносія (II) вводиться через верхній патрубок на кожусі в міжтрубний простір теплообмінника, омиває зовні труби і виводиться через нижній патрубок, тобто рухається в міжтрубному просторі. Тепло від одного теплоносія до іншого передається через стінки труб.

Теплоносії зазвичай направляють протитоком один до одного. При цьому теплоносій, що нагрівається направляють знизу вгору, а теплоносій, який віддає теплоту – в протилежному напрямку. Такий напрям руху кожного теплоносія збігається з напрямком, в якому прагне рухатися даний теплоносій під впливом зміни його густини при нагріванні або охолодженні. Крім того, при зазначених напрямках руху теплоносіїв досягається більш рівномірний розподіл швидкостей та ідентичні умови теплообміну по площі поперечного перерізу апарату.

Існує декілька варіантів схем розміщення труб в трубних решітках: за сторонами та вершинами правильних шестикутників, за сторонами і вершинами квадратів, а також за концентричними колами (рис. 5.5). Вибір даних схем диктується вимогами забезпечення найбільшої компактності теплообмінника.

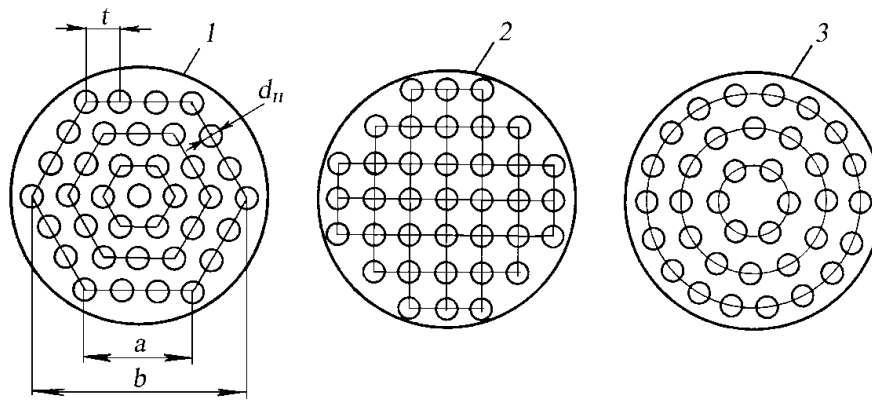


Рисунок 5.5 – Схеми розміщення труб в трубних решітках: 1 – за сторонами та вершинами правильних шестикутників; 2 – за сторонами та вершинами квадратів; 3 – за концентричними колами

Переважне поширення має розміщення труб за сторонами та вершинами правильних шестикутників.

Труби закріплюють в решітках розвальцюванням, зварюванням, а також паянням (для з'єднання мідних та латунних труб). Іноді використовують з'єднання труб з решітками за допомогою сальників, що допускають вільне поздовжнє переміщення труб при температурних подовженнях і можливість їх швидкої заміни. Це дозволяє значно зменшити температурну деформацію труб, але є складним, дорогим та недостатньо надійним.

Розрізняють одноходові та багатходові кожухотрубні теплообмінники.

В одноходовому теплообміннику (рис. 5.4) один потік теплоносія рухається паралельно у всіх трубах, інший – в міжтрубному просторі паралельно до труб. У багатходову (за трубним простором) теплообміннику (рис. 5.6, а) пучок труб розділений на декілька секцій (ходів), по яких теплоносій  $I$  проходить послідовно. Розбивка труб на секції здійснюється перегородками 2 у верхньому та нижньому днищах 1 теплообмінника. Шлях теплоносія  $I$  за чотирма ходами показаний стрілками. Цим досягається підвищення швидкості теплоносія, що призводить до збільшення коефіцієнта тепловіддачі в трубному просторі. На рис. 5.6, б показаний багатходовою горизонтальний теплообмінник, в якому збільшення швидкості теплоносія  $I$  в міжтрубному просторі досягається установленням ряду напрямних перегородок 2 [11].

З двох теплоносіїв, що рухаються за трубним та міжтрубним простором, потрібно, в першу чергу, збільшувати швидкість того, який при теплообміні має більший термічний опір і, отже, обмінюється теплотою за менших значень коефіцієнта тепловіддачі. В розглянутих кожухотрубних теплообмінниках труби жорстко закріплені в трубній решітці.

Внаслідок різниці температур між кожухом і трубами в них виникають температурні напруження, які можуть призвести до руйнування

апарату. Теплообмінники з жорстким кріпленням труб в трубній решітці надійно працюють при різницях температур 25 ... 30 °С. Якщо ця різниця перевищує зазначені межі, застосовують теплообмінники з різними компенсаторами температурних подовжень [30].

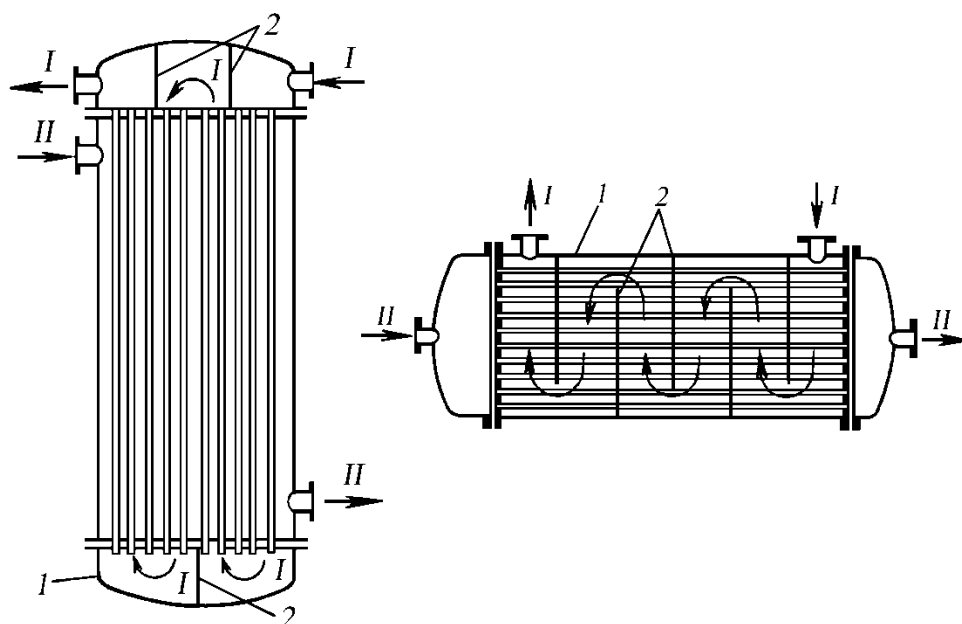


Рисунок 5.6 – Багатоходові кожухотрубні теплообмінники: а – вертикальний (за трубним простором): 1 – днище; 2 – перегородки; б – горизонтальний (за міжтрубним простором): 1 – кожух; 2 – напрямні перегородки; I, II – теплоносії

На рис. 5.7, а і б показані теплообмінники з «плаваючою» головкою, в яких одна з трубних решіток не з'єднана з кожухом і може вільно переміщатися уздовж осі при температурних подовженнях. В теплообміннику на рис. 5.7, а «плаваюча» головка відкритого типу, на рис. 5.7, б – закритого типу.

На рис. 5.7, в показаний теплообмінник з лінзовим компенсатором на корпусі. Температурні деформації компенсуються осьовим стисненням і розширенням цього компенсатора. Такі теплообмінники застосовують при температурних деформаціях, що не перевищують 10...15 мм і при тиску в міжтрубному просторі не вищим 0,25 МПа [31].

В теплообміннику з сальниковим компенсатором (рис. 5.7, г) одна з трубних решіток при температурних розширеннях може вільно переміщатися уздовж осі. Ущільнення патрубка, по якому виводиться з теплообмінника теплоносій I, досягається установленням на верхньому днище сальника 4.

В теплообміннику з U-подібними трубами (рис. 5.7, д) обидва кінці труб закріплені в однієї трубної решітці. Кожна труба може вільно подовжуватися незалежно від інших; при цьому температурні напруга не виникають.

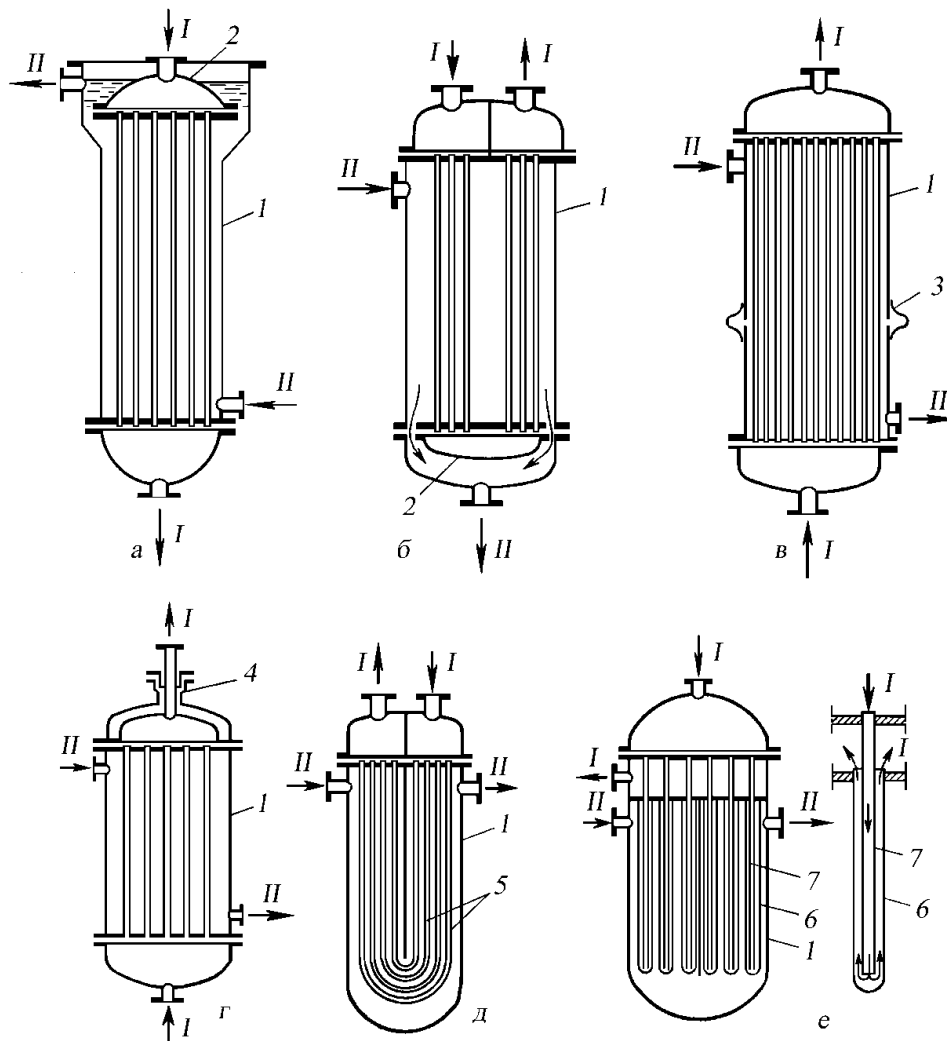


Рисунок 5.7 – Теплообмінники з компенсацією температурних подовжень: а – з «плаваючою» головкою відкритого типу; б – з «плаваючою» головкою закритого типу; в – з лінзовим компенсатором; г – із сальниковим компенсатором; д – з U-подібними трубами; е – з подвійними трубами; 1 – кожух; 2 – «плаваюча» головка; 3 – лінзовий компенсатор; 4 – сальник; 5 – U-подібні труби; 6 – зовнішня труба з закритим нижнім кінцем; 7 – внутрішня труба з відкритими кінцями; I, II – теплоносії

В теплообміннику з подвійними трубами (рис. 5.7, е) кожен з теплообмінних елементів складається з двох труб: труби 6 із закритим нижнім кінцем і розташованої усередині неї труби 7 з відкритими кінцями. Верхній кінець труби 7 закріплений у верхній трубній решітці, верхній кінець труби 6 – в нижній решітці. Теплоносій I надходить в трубу 7 зверху і, після її проходження, рухається далі по кільцевому каналу між трубами 6 і 7. Теплообмін між теплоносіями I і II здійснюється через стінку труби 6. Кожна з труб 7 і 6 може вільно подовжуватися без виникнення температурних напружень.

Дуже важливим фактором, що визначає роботу теплообмінників, є швидкість руху теплоносіїв. При збільшенні швидкості зростає



інтенсивність теплообміну, але збільшується гідравлічний опір. Оптимальні швидкості зазвичай відповідають сталому турбулентному режиму руху теплоносіїв і в більшості випадків знаходяться в межах 0,1 ... 2,0 м/с для рідин та 2 ... 20 кг/(м<sup>2</sup>·с) – для газів.

Ламельний теплообмінник складається з пакету зварних попарно пластин, що утворюють пучок плоских труб, вмонтованих в кожух (рис. 5.8). Пучок плоских труб закінчується звареними трубними решітками. Прямокутна в поперечному перерізі форма трубного пучка застосовується в апаратах для невеликих тисків. У цьому випадку конструкція теплообмінника спрощена. Кожух має в перерізі прямокутну форму, відповідну формі трубного пучка, причому плоскі стінки кожуха доводиться робити з ребрами жорсткості. Циліндричний кожух і відповідна йому кругла в поперечному перерізі форма трубного пучка здатні краще сприймати навантаження при більш високому тиску. Для забезпечення повного заповнення круглого перетину циліндричного кожуха ширина кожної плоскої труби повинна відповідати довжині хорди, по якій встановлюється дана труба [15].

Застосовувані в промисловості ламельні теплообмінники мають діаметри кожухів від 100 до 1000 мм. Відповідної ширини виготовляють і зварні плоскі труби. Зазор між стінками всередині труб, а також в між трубному просторі становить від 2 до 12 мм. Довжина плоских труб від 2 до 6 м.

На рис. 5.8 показано будова зварної трубної решітки та її з'єднання з трубним пучком і камерою. Друга трубна решітка аналогічна за конструкцією, але з'єднана вона з циліндричним патрубком, який через сальниковий пристрій виходить з кожуха. На кінець цього патрубка нагвинчений фланець. Сальниковий пристрій між кожухом і пучком плоских труб компенсує температурні подовження трубного пучка в робочому стані, а також дозволяє витягувати трубний пучок з кожуха для очищення від забруднень в міжтрубному просторі [2].

Плоскі труби мають певні термодинамічні переваги в порівнянні з круглими. При рівній площі поперечного перерізу каналу для робочого середовища поверхня теплообміну плоскої труби в кілька разів більша поверхні круглої труби.

Велика поверхня теплообміну на одиницю довжини плоскої труби при малих еквівалентних діаметрах каналу і порівняно малих площах поперечного перерізу каналу робить можливим застосування коротких (одноходових) компоновок апаратів цього типу. При цьому гідравлічний опір таких апаратів є невеликим, оскільки як в міжтрубному, так і в трубному просторі рідина рухається переважно без поворотів.

Малий еквівалентний діаметр плоских труб (зазвичай 7 ... 14 мм) дозволяє досягти більш високих коефіцієнтів теплопередачі, що перевищують на 40 ... 100% величину коефіцієнта теплопередачі в аналогічних умовах в кожухотрубних теплообмінниках. Тут проявляється

спільна дія таких чинників, як передача теплоти до тонкого шару рідини і загальне підвищення швидкостей потоків робочого середовища по каналах малих поперечних перерізів.

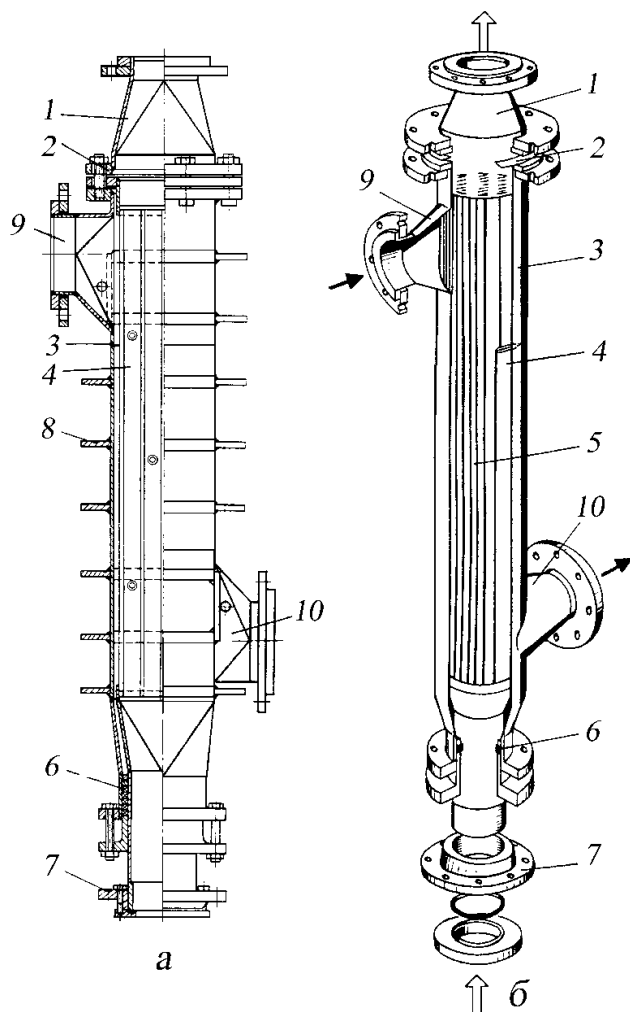


Рисунок 5.8 – Ламельні теплообмінники в корпусі прямокутної (а) і циліндричної (б) форми: 1 – камера для введення робочого середовища в канали; 2 – фланцеве рознімне р'єднання ламельного пучка з корпусом; 3 – корпус апарату; 4 – пучок ламелей (плоских труб); 5 – міжтрубний простір; 6 – сальниковий пристрій; 7 – фланець знімний; 8 – ребра жорсткості; 9, 10 – штуцера для другого робочого середовища, що подається в міжтрубний простір

товщиною 1,5 і 2,0 мм.

Ламельні теплообмінники призначені для роботи за схемою рідина – рідина, газ – газ і пар – рідина (конденсатори та підігрівники).

На поверхні плоских каналів виштампувані поздовжні жолобки і кульові сегменти, які в робочому стані пакету слугують опорами суміжних пластин і в певній мірі турбулізують потік робочого середовища. Однак ступінь турбулізації потоку в таких каналах значно менший, ніж в каналах з гофрованих пластин.

Для отримання великих поверхонь теплообміну ламельні теплообмінники можна компонувати в блоки. При цьому з'єднання елементів може бути паралельним або послідовним в залежності від бажаних швидкостей потоків в трубному та міжтрубному просторах.

Ламельні теплообмінники можна установлювати у вертикальному або горизонтальному положенні. Змішування двох робочих середовищ при цьому не спостерігається. Сальникове ущільнення знаходиться між робочим середовищем у міжтрубному просторі і атмосферою. Як матеріал для виготовлення плоских труб найбільш часто застосовують нержавіючу сталь у вигляді холоднокатаної стрічки

З огляду на неможливість механічного очищення внутрітрубного простору від відкладень, ламельні теплообмінники застосовують у випадках, коли одне з робочих середовищ не дає відкладень усередині плоских труб. Друга робоче середовище може давати відкладення. Його направляють в міжтрубний простір, який можна механічно очищувати, якщо витягти з кожуха трубний пучок.

Одним з перспективних видів теплообмінних апаратів є пластинчасті теплообмінники. Основні вимоги до їх конструкцій: забезпечення високого коефіцієнта теплопередачі при найменшому гідравлічному опорі; мінімальні витрати матеріалів на одиницю продуктивності апарату; надійність та герметичність в поєднанні з розбірністю і доступністю до поверхонь теплообміну з метою механічного очищення їх від забруднень; уніфікація вузлів та деталей; технологічність механізованого виготовлення різноманітних поверхонь теплообміну для різного діапазону робочих температур та тисків [2].

Поверхня теплообміну утворюється з окремих пластин, а канали для робочого середовища мають щілинну форму. Робоче середовище рухається уздовж поверхні теплообміну тонким шаром, що сприяє інтенсифікації процесу тепловіддачі. Форми пластин та профілі їх поверхонь є різноманітними, а конструкції – досить складними. Пластини розміщені паралельно одна одній, причому між робочими поверхнями двох суміжних пластин створюється невелика щілина – канал для робочого середовища, що піддається в ньому нагріванню або охолодженню. Пластини можуть бути плоскими, з гладкими стінками і мати прямокутну, квадратну, круглу або іншу форму.

Мала товщина пластин та їх паралельне установлення з малими проміжками між сусідніми пластинами дозволяє розмістити в просторі робочу камеру теплообмінника найбільш компактно і з такою «щільністю», яка є недосяжною для інших типів рідинних теплообмінників. В кінцевому рахунку це призводить до того, що пластинчасті теплообмінні апарати мають при рівному тепловому навантаженні значно менші габаритні розміри та металоємність, ніж апарати типу «труба в трубі», кожухотрубні та інші.

На теплопередавальних стінках можуть залишитися різні відкладення, які перешкоджають процесу теплопередачі. Крім того, при тепловій обробці термічно нестійких продуктів на стінках утворюється пригар. В цих випадках необхідно часто розбирати апарат для очищення поверхні теплообміну від шару пригару, осаду або залишків продукту. Пластини в цих апаратах мають прокладки для ущільнення каналів між пластинами при складанні всієї системи.

Особливості конструкції пластини визначаються формою та розмірами гофрів або профілем робочої теплообмінної стінки; формою кутових отворів для підведення та відведення робочого середовища з метою зниження гідравлічного опору ділянок входу і виходу; ущільнювальною

системою; системою підвіски пластин на рамі апарату та фіксації положення пластин в пакеті; пристроєм для безпечного обслуговування пакета пластин; будовою допоміжних конструктивних елементів пластини, що підвищують жорсткість складеної системи, сприяють технологічності виготовлення, створюють умови для зручного обслуговування та ремонту тощо.

Теплопередавальні пластини класифікуються за формою профілю робочої поверхні на:

- плоскі;
- вузькоканалні (зі спіральними фрезерованими каналами, із зигзагоподібними фрезерованими каналами, із зигзагоподібними штампованими каналами, конічні зі спіральними каналами);
- з турбулізуючими вставками;
- стрічково-потоківі (з плоскою робочою поверхнею, з простими горизонтальними гофрами, з рифленими горизонтальними гофрами);
- сітчасто-потоківі (з переривчастими турбулізаторами, з безперервними турбулізаторами) [14].

Кожна пластина має прокладки двох призначень: а) велика гумова кільцева прокладка, що обмежує на лицьовій стороні пластини канал для відповідного потоку робочого середовища і охоплює також два кутові отвори (з одного боку пластини або по діагоналі), через які відбувається приплив середовища в міжпластинний канал; б) дві малі гумові прокладки, що ізолюють два інші отвори та створюють транзитний прохід для іншого робочого середовища.

Пластинчасті теплообмінники за конструкцією можуть бути односекційними, багатосекційними або комбінованими.

Односекційним пластинчастим теплообмінником називають апарат, в якому в теплообміні беруть участь тільки два робочі середовища.

У харчовій промисловості широке застосування знаходять і такі конструкції пластинчастих апаратів, в яких відбувається кілька видів теплової обробки рідкого харчового продукту – основного робочого середовища. Це досягається шляхом з'єднання в одному апараті декількох взаємопов'язаних, але самостійних теплообмінних зон, в яких, наприклад, нагрівають продукт парою з метою стерилізації або пастеризації, потім поступово охолоджують його холодним продуктом, що йде на підігрів, потім холодною водою і, нарешті, розсолем до кінцевої температури. Таку конструкцію мають відомі пастеризаційно-охолоджувальні апарати, які прийнято називати комбінованими [13].

Елементом тракту руху рідини в пластинчастому апараті є канал – простір між двома сусідніми пластинами. Робоче середовище, що входить в апарат, потрапляє в канали через подовжні колектори, утворені кутовими отворами пластин і малими прокладками, оточуючими ці отвори.

З колектора робоче середовище розподіляється зазвичай за кількома паралельними каналами. Сукупність декількох каналів, за якими робоче

середовище тече в одному напрямку, в практиці проектування називають пакетом. З першого пакету робоче середовище потрапляє в протилежний колекторний канал, проходить по ньому вздовж апарату до чергової граничної пластини (пластини із заглибленим кутовим отвором) і розподіляється по каналах другого пакету. У другому пакеті робоче середовище рухається в напрямку, протилежному його руху в першому пакеті. Кількість каналів у другому пакеті може дорівнювати або не дорівнювати їх кількості у першому пакеті.

При різній кількості каналів в розташованих послідовно пакетах швидкість руху робочого середовища в кожному пакеті буде змінюватися. При однаковій кількості каналів швидкість робочого середовища практично не змінюється. Інше робоче середовище, переміщення якого на схемах (рис. 5.9) показано штриховою лінією, проходить по своєму колекторному каналу і рухається далі в міжпластинних каналах, суміжних з каналами для першого робочого середовища.

Можливі різні варіанти компоувальних схем каналів для робочих середовищ [14].

1. Канали для першого робочого середовища складено так само, як і канали для другого середовища. Таким чином, якщо в першому пакеті для першого робочого середовища є чотири канали, то і в пакеті з боку іншого робочого середовища їх чотири; далі йде пакет з трьох каналів і т. д. Таку схему компоування пластин в теплообміннику називають симетричною.

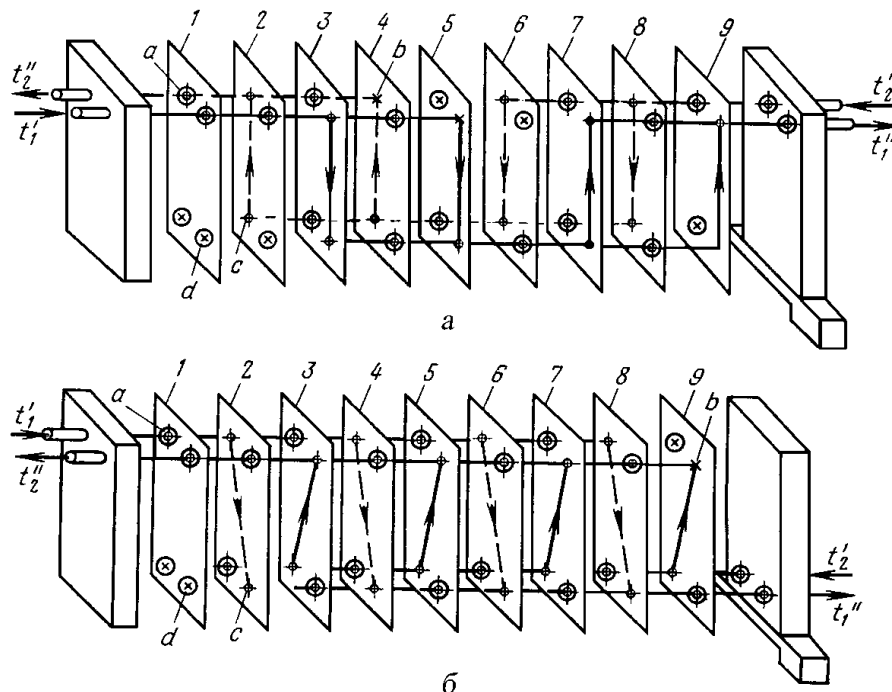


Рисунок 5.9 – Схеми простих апаратів з різними типами пластин: а – з прямим розташуванням отворів; б – з діагональним розташуванням отворів; 1 – 9 – номери пластин; а – отвір з ущільнювальним гумовим кільцем; б – непросічений кут без ущільнювального гумового кільця; с – отвір без

ущільнювального гумового кільця;  $d$  – непросічений кут з ущільнювальним гумовим кільцем

При такій схемі одне робоче середовище проходить послідовно таку саму кількість пакетів, як і інше. Якщо витрати двох робочих середовищ рівні, то при симетричному компонованні рівними будуть і їх швидкості в міжпластинних каналах.

2. Всі канали для другого робочого середовища з'єднані паралельно і утворюють один загальний пакет, що охоплює зону всіх пакетів для першого робочого середовища. Схему компоновання, при якій кількість каналів в пакетах для першого і другого робочого середовища неоднакова, називають несиметричною.

Пластинчасті апарати часто використовують для підігрівання та охолодження робочих середовищ без зміни їх агрегатного стану. При цьому зазвичай застосовують односекційні одно- та багатопакетні апарати. За розташуванням прохідних отворів для кожного робочого середовища на пластинах розрізняють пластини з одностороннім розташуванням отворів (рис. 5.9, а) та з діагональним розташуванням отворів (рис. 5.9, б).

При використанні пластин з одностороннім напрямком потоку всі штуцери для першого робочого середовища розташовані по одну сторону апарату, а для другого робочого середовища – по іншу. При використанні пластин з діагональним напрямком потоку робоче середовище переміщається в кожному пакеті по черзі з одного боку апарату на іншу. Якщо кількість пакетів в секції по лінії руху даного середовища парна, то місця входу і виходу її виявляються розташованими з одного боку апарату. Якщо ж секція складається з непарної кількості пакетів, то вхідний і вихідний штуцери повинні бути розташовані в різних кутах плит [11].

Пластинчастий теплообмінник (рис. 5.10) складається з групи теплообмінних пластин 15, підвішених на верхній горизонтальній штанзі 7. Кінці верхньої і нижньої штанг закріплені в передній стійці 3 (нерухомій плиті) та на задній стійці 9. За допомогою натискної плити 8 і гвинта 10 пластини в складеному стані стиснені в один пакет на гумових прокладках 13 і 5. Велика гумова кільцева прокладка 13 обмежує на пластині канал для потоку робочого середовища і охоплює також два кутових отвори, через які відбувається приплив середовища в міжпластинний канал і стікання з нього. Дві малі гумові прокладки 5 ізолюють два інші отвори і створюють транзитний прохід для другого робочого середовища.

Система ущільнювальних прокладок побудована таким чином, що після складання і стиснення пластин в апараті утворюються дві системи герметичних каналів, ізолюваних одна від одної металевою стінкою і прокладками: одна для гарячого робочого середовища, інша для холодного. Перша складається з непарних каналів між пластинами, а друга – з парних, завдяки чому потоки гарячого і холодного середовищ чергуються. Обидві системи герметичних каналів з'єднуються зі своїми колекторами і штуцерами для входу і виходу робочих середовищ, розташованих на плитах.

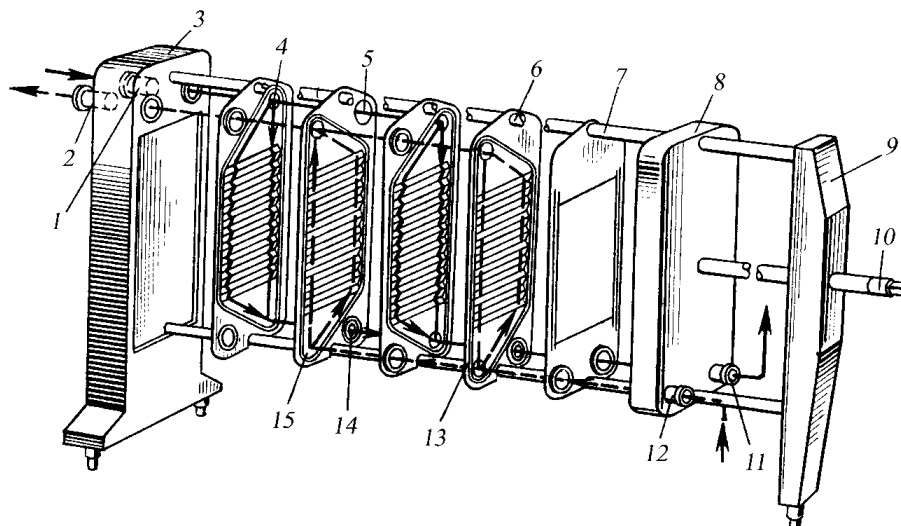


Рисунок 5.10 – Схема пластинчатого апарату: 1, 2, 11, 12 – штуцера; 3 – передня стійка; 4 – верхній кутовий отвір; 5 – кільцева гумова прокладка; 6 – гранична пластина; 7 – штанга; 8 – натискна плита; 9 – задня стійка; 10 – гвинт; 13 – велика гумова прокладка; 14 – нижній кутовий отвір; 15 – теплообмінна пластина

Змієвикові теплообмінники (рис. 5.11) відрізняються простотою конструкції. Теплообмінний елемент (змійовик) являє собою вигнуту трубу, занурену в рідину, яка нагрівається або охолоджується теплоносієм, що рухається по змійовику.

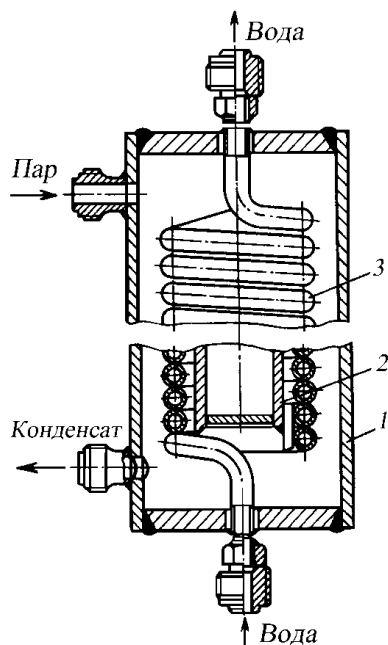


Рисунок 5.11 – Змієвиковий теплообмінник: 1 – корпус; 2 – стакан; 3 – змійовик з труби

Змієвиковий теплообмінник має корпус 1, в якому розміщений змійовик 3. Витки змійовика орієнтовані по гвинтовій лінії. При великій площі поверхні теплообміну змійовики за довжиною набирають з декількох секцій. Для уникнення прогинів труб при великій кількості витків і великому діаметрі навивки кожен виток закріплюють на стаканах 2.

Пара вводиться у верхню частину корпусу, конденсується і виходить через нижній вихід. Охолоджувальна вода надходить в змійовик знизу, рухається в ньому і виводиться через верхній штуцер. Різниця тисків теплоносіїв в змієвикових апаратах може досягати 10 МПа.

Змієвикові теплообмінники використовують в основному для підігрівання води.

Змійовики таких теплообмінників мають великий гідравлічний опір, тому швидкості теплоносіїв для них вибирають меншими, ніж в теплообмінниках з прямими трубами. Перевага змієвикових теплообмінників – простота виготовлення. Основний недолік їх полягає в складності очищення змієвоиків [30].

Зрошувальні теплообмінники застосовують, головним чином, для охолодження та нагрівання конденсату, а також для конденсації пари.

Зрошувальний теплообмінник (рис. 5.12) складається з ряду розташованих одна над одною труб 3, з'єднаних колінами 2. Зовні труби зрошуються водою. По трубах протікає охолоджуваний теплоносіє. Зрошувальна вода подається на верхню трубу, з якої стікає на розташовані нижче труби. Для рівномірного зрошення верхньої труби на ній встановлений жолоб 1 з зубчастими краями. У нижній частині є корито 4 для збирання води.

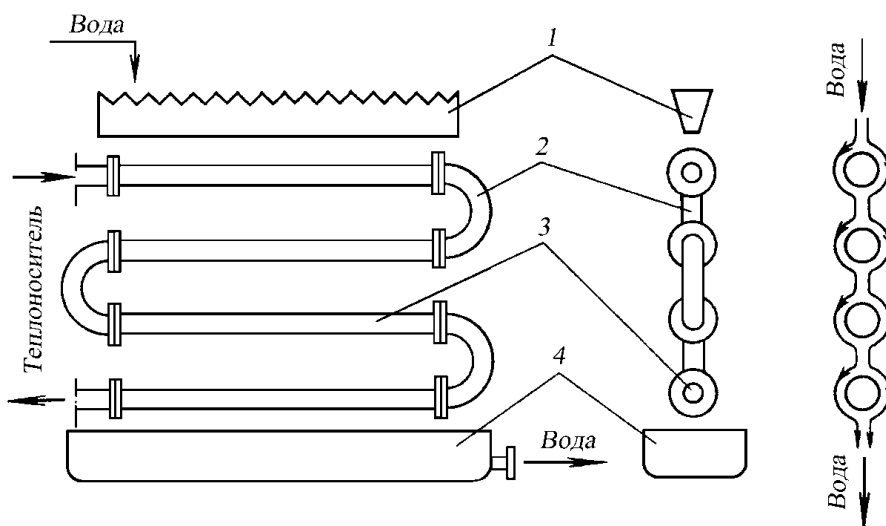


Рисунок 5.12 – Зрошувальний теплообмінник: 1 – жолоб; 2 – сполучне коліно; 3 – труба; 4 – корито

Зрошувальні теплообмінники прості за будовою, але є досить громіздкими. Теплообмін від труб до зрошувальної води характеризується невисокими значеннями коефіцієнтів тепловіддачі.

Вода, що зрошує труби частково випаровується, внаслідок чого витрати її в подібних апаратах є меншими, ніж в теплообмінниках інших типів. При недостатньому зрошенні відбувається сильне випаровування води, тому зрошувальні теплообмінники встановлюють зазвичай на відкритому повітрі. У приміщеннях ж під час роботи вони сильно зволожують повітря. Щоб цього уникнути, теплообмінники доводиться поміщати в громіздкі кожухи, підключені до витяжної вентиляції.

До спеціальних теплообмінників відносяться апарати, в яких нагрівання або охолодження теплоносіїв відбувається в будь-яких специфічних умовах.



До цієї групи теплообмінників відносять апарати з сорочками (рис. 5.13). В них нагрівання або охолодження здійснюють поряд з іншими процесами. Поверхнею теплообміну тут слугує стінка реактора. До корпусу 1 кріпиться сорочка 2 за допомогою фланцевого з'єднання 3. У просторі між сорочкою і зовнішньою поверхнею корпусу апарату циркулює теплоносій I. У апараті розміщується теплоносій II. Застосування таких апаратів обмежене невеликою площею поверхні теплообміну (до 10 м<sup>2</sup>) і тиском в сорочці (До 1 МПа) [31].

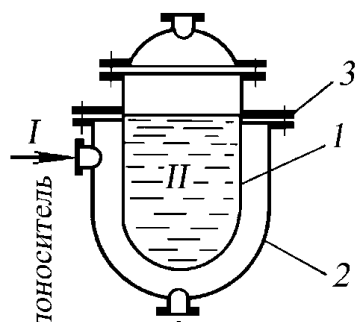


Рисунок 5.13 - Апарат з сорочкою: 1 – корпус; 2 – сорочка; 3 – фланцеве з'єднання; I, II – теплоносії

Теплообмін через стінку реактора здійснюється також в апаратах з привареними зовні змійовиками (рис. 5.14). Теплоносій подають в зігнутий з труби змійовик 2, приварений зовні до корпусу 1. Для поліпшення теплообміну між змійовиком і корпусом встановлюють фасонну металеву прокладку 3, що забезпечує щільне прилягання труби до корпусу (див. рис. 5.14, а). У трубчастих змійовиках допускається тиск до 25 МПа. Іноді змійовики утворюються між стінкою апарату та привареними до неї зігнутими половинками розрізаних за довжиною труб або сталевими кутниками (див. рис. 5.14, б); такі змійовики працюють при тисках до 6 МПа.

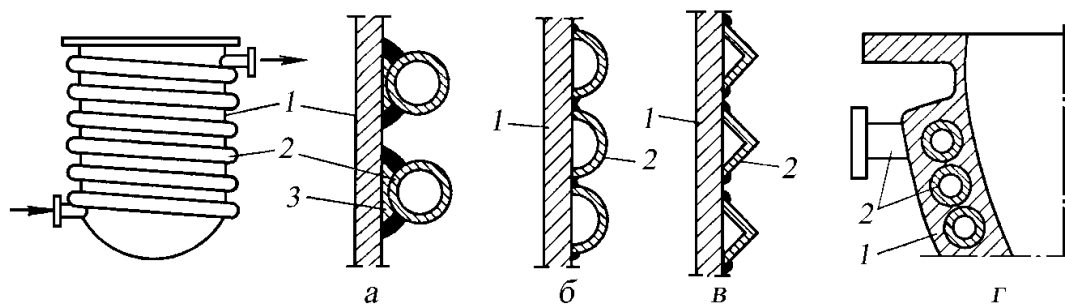


Рисунок 5.14 – Апарати з змійовиками: а, б, в – з привареними зовні змійовиками; г – із залитими в стінці змійовиками; 1 – корпус; 2 – змійовик; 3 – металева прокладка

До спеціальних апаратів належать також теплообмінники з ребристими поверхнями теплообміну. Поверхні теплообміну в них виконують з труб з різними ребрами (рис. 5.15). Такі теплообмінники застосовують у випадках, коли умови тепловіддачі по обидва боки стінки труби є різними, наприклад, в трубі відбувається конденсація пари, що гріє, а зовні труба омивається потоком повітря, яке нагрівається. Для поліпшення тепловіддачі від стінки труби до повітря з зовнішньої сторони труби

кріплять ребра. При наявності ребер зовнішня поверхню труби збільшується, в результаті значно поліпшується тепловіддача.

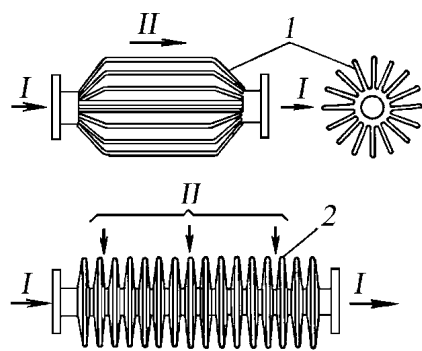


Рисунок 5.15 – Ребристі труби: 1 – поздовжні ребра; 2 – поперечні ребра; I, II – теплоносії

Ребра розміщують з того боку теплообмінної поверхні, де значення коефіцієнта тепловіддачі є порівняно меншими. Ребра значно покращують теплообмін тільки в тому випадку, якщо до них забезпечується хороше підведення тепла від стінки труби, тому ребристі труби виготовляють з матеріалів з великими коефіцієнтами теплопровідності. Напрямок ребер вибирають в залежності від напрямку потоку теплоносія, що їх омиває. У всіх випадках поверхня ребер повинна бути паралельна напрямку потоку теплоносія.

Спиральні теплообмінники застосовуються в харчовій промисловості в якості дефлегматорів, конденсаторів парів і поверхневих конденсаторів у випарних відділеннях, для нагріву і охолодження різноманітних розчинів тощо. Вони компактні, їх конструкція передбачає можливість реалізації повного протитоку. Площа поперечного перерізу каналів по всій довжині залишається незмінною, і потік не має різких змін напрямків, завдяки чому забруднення поверхні спіральних теплообмінників є меншим, ніж для теплообмінних апаратів інших типів. Гідравлічний опір спіральних теплообмінників при однаковій швидкості руху рідини менший, ніж в кожухотрубних апаратах.

Спиральний теплообмінник містить дві металеві стрічки, що з'єднані в середині центральною розділювальною перегородкою (керном) і які навиті навколо цієї перегородки таким чином, що утворюють два спіральні канали – для гарячого та холодного середовища, між якими через стінку стрічки передається теплота. Кожен канал приєднаний до штуцера в центрі теплообмінника і на його периферії. Для надання спіральним теплообмінникам стійкості проти зминання спіралі під дією зовнішнього тиску (особливо при тисках вищих 0,3 МПа) до поверхні однієї зі стрічок перед навивкою приварюють дистанційні штифти жорсткості. Висота штифтів визначає висоту каналу (щілину між стрічками), а частота їх розташування (поздовжній і поперечний крок) – допустимий тиск в апараті [13].

Спиральні теплообмінники за видами ущільнення торців каналів поділяються на три основні типи.

1. Апарати з тупиковими каналами і кришками (тип I). Одна бічна сторона спірального каналу закрита (заварена), а інша відкрита для механічного очищення від забруднень. Під кришку кладуть суцільну круглу еластичну прокладку з отвором в центрі. Прокладка перешкоджає перетіканню одного і того самого робочого середовища між витками

спіралі. Для чищення каналів кришку і прокладку знімають. Тупикова конструкція каналів є найбільш поширеною.

2. Апарати з наскрізними каналами і кришками (тип II). Такі апарати для одного з робочих середовищ мають канал, відкритий з обох торців. Для іншого робочого середовища канал наглухо заварений і не має доступу для механічного очищення. Ущільнення досягається за допомогою манжет U-подібного перерізу або прокладок з листового матеріалу. Канали такого типу легко піддаються чищенню, але основний їх недолік полягає в можливості перетікання теплоносія з одного каналу в інший.

3. Апарати з глухими каналами для обох робочих середовищ (тип III). В них канал заварюється на торцях по обидва боки. Недоліком такої конструкції є неможливість механічного очищення каналів від забруднень (реалізується тільки хімічне промивання апарату).

Навивка спіральних теплообмінників робиться з рулонної сталі шириною від 0,2 до 1,5 м, площа поверхні нагрівання теплообмінників – від 3,2 до 100 м<sup>2</sup>; ширина каналу – 8 або 12 мм, тиск – до 1 МПа. Товщина стінок при тиску до 0,3 МПа – 2 мм, до 0,6 МПа – 3 мм [11].

Спіральні теплообмінники виготовляють з тупиковими каналами (з кришками) – тип I і з глухими каналами (без кришок) – тип II. Тип I випускається в чотирьох виконаннях: горизонтальний теплообмінник на лапах для рідин (рис. 5.16, а); горизонтальний теплообмінник на цапфах для рідин (рис. 5.16, б); вертикальний теплообмінник на цапфах для конденсації пари (рис. 5.16, в); вертикальний теплообмінник на цапфах для парогазової суміші (рис. 5.16, г).

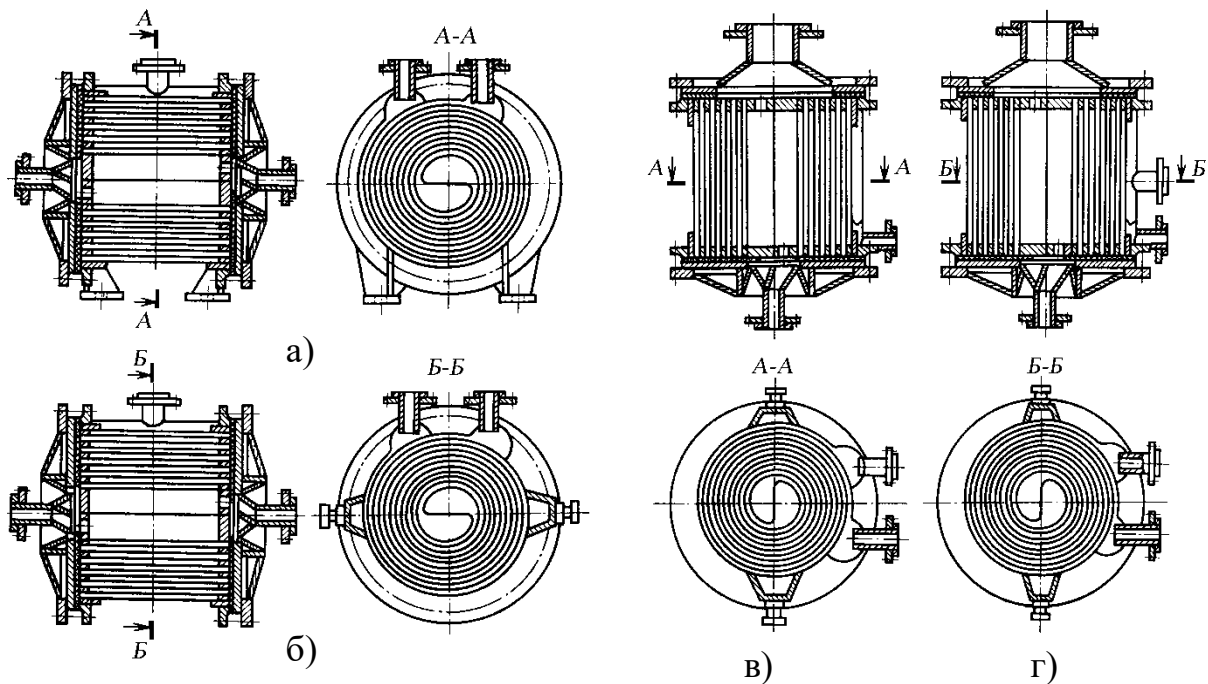


Рисунок 5.16 – Спіральні теплообмінники з тупиковими каналами (тип I): а – горизонтальний на лапах; б – горизонтальний на цапфах; в – вертикальний для пари; г – вертикальний для парогазових сумішей

Тип II випускається в трьох виконаннях: горизонтальний на лапах; горизонтальний на цапфах; вертикальний на лапах.

Теплообмінники спіральні для рідини складаються з корпусу, спіралі з тупиковими каналами, двох плоских кришок по торцях з прокладками, чотирьох штуцерів для входу і виходу теплоносіїв, два з яких установлені в центральній частині кришки, а два - у верхній частині корпусу на колекторах.

Корпус спіралі виконується на лапах для установлення безпосередньо на фундаменті в горизонтальному виконанні або на цапфах для установлення в будь-якому положенні: вертикальному, горизонтальному і похилому [2].

Під час роботи спіральних теплообмінників для рідин перший теплоносій надходить під тиском через штуцер, розташований на одній з кришок, в робочу камеру, а потім рухається по спіральному каналу до периферійного колектора, з якого через штуцер виводиться з апарату. Другий теплоносій через штуцер периферійного колектора подається в суміжний спіральний канал і рухається протитечією по відношенню до першого теплоносія, надходить до центру спіралі і виводиться з другої порожнини центровиків через штуцер, розташований на другій кришці апарату.

## 6 ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОБ'ЄМНОЇ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ ТВАРИННИЦЬКОЇ ПРОДУКЦІЇ

### 6.1 Загальна характеристика теплової обробки

Під тепловою обробкою розуміють дію на продукцію певного енергоносія з метою поліпшення її якісних параметрів

Теплова обробка тваринницької продукції використовується для надання останній споживчої вартості та створення умов для її зберігання.

При нагріванні продукту змінюються його структурно-механічні, фізико-хімічні, органолептичні властивості, які у сукупності визначають якісні параметри об'єкту переробки [30].

Серед основних способів реалізації теплової обробки продукції відзначаються випаровування, варіння та піджарювання, для здійснення яких використовуються такі способи нагрівання як поверхнева передача тепла за допомогою теплопровідності або конвекції, дія інфрачервоних променів, струмів високої та надвисокої частоти, комбінування даних способів. В якості енергоносія використовують нагріте до високої температури газорідке чи рідке середовище, електронагрівальне обладнання, інфрачервоне випромінювання, ультразвукові генератори.

Способами реалізації теплової обробки в рідинному середовищі є занурення та зрошення.

Занурення продукції у воду, олію, жир. При цьому під час реалізації способу, в результаті акумуляції значної кількості теплоти та завдяки високому коефіцієнту теплопередачі продукція обробляється рівномірно та порівняно швидко, що є перевагами способу. Але його недоліком є досить висока витрата енергоносія, внаслідок необхідності попереднього нагрівання рідини та випаровування її з відкритої поверхні. Крім цього, виникають труднощі з механізацією подачі до зони обробки продукції крупногабаритних виробів, мають місце втрати експлуатаційних речовин та виділення газоподібних сполук у навколишнє середовище тощо. При обробці продукції у розтопленому жирі тепловтрати у навколишнє середовище зменшуються порівняно з обробкою у воді. Однак, менший коефіцієнт теплопередачі за даного способу обробки вимагає підвищення температури робочого середовища до 140°C [14].

Основною перевагою способу зрошення є безперервність процесу, що забезпечує підвищення ступеня механізації та автоматизації виробничого обладнання. Недоліки – відсутність акумуляції теплоти в апараті та нерівномірність зрошення робочої рідини зумовлюють збільшення тривалості обробки. Також виникає потреба в ускладненні конструкції установки та її обслуговуванні, підвищуються витрати теплоти та енергії, що спонукає до пошуку більш досконалих конструкцій та технологій.

В якості газоподібного енергоносія при тепловій обробці поверхні продукції застосовують гостру пару, паровітряну суміш, продукти згорання газу. Перевагами їх застосування є значне спрощення організації та

регулювання переробного процесу, раціоналізація та підвищення технологічності конструкції обладнання, скорочення експлуатаційного часу, зменшення частки допоміжних операцій, зокрема, при реалізації завантажувально-розвантажувальних робіт та створення умов для їх механізації.

Обробка гострою парою широко застосовується при варінні ковбас, шпаренні водоплаваючої птиці та свиней (за методом Степанова) тощо. Недоліками даного способу є обводнення продукції, втрати екстрактивних речовин та жиру, нерівномірність обробки, ускладнення умов агрегування комплексних теплових апаратів. Крім того, даний спосіб обробки накладає особливі вимоги до герметичності обладнання для запобігання тепловтрат [15].

При обробці продукції пароповітряною сумішшю або продуктами горіння газу створюються умови для проведення ряду послідовних теплових процесів в одній робочій камері без перевантажень та при безперервному русі оброблюваного матеріалу. Проте необхідність використання калориферів, вентиляторів та іншої теплової апаратури призводить до ускладнення конструкції даного виробничого обладнання, а за рахунок викидання відпрацьованої суміші значно підвищуються питомі теплові витрати.

Об'ємний спосіб теплової обробки характеризується впливом на весь об'єм оброблюваної продукції, або на значну її глибину. При реалізації такої теплової обробки має місце інтенсивний теплообмін та масоперенесення в результаті зміни градієнту температур та вмісту вологи. Серед способів здійснення даного процесу термообробки найбільш поширені варіння та обжарювання.

Варінням сільськогосподарської сировини називають процес її термообробки рідинним або газоподібним енергоносієм з метою отримання готової до споживання продукції чи реалізації допоміжних операцій.

Стадіями даного процесу є нагрівання рідкого середовища до температури кипіння (коли температура в кожній точці апарату та рідини змінюється з часом – нестационарний режим), та власне варіння (коли температура технологічного середовища стала – стаціонарний режим).

В даному процесі здійснюється рівномірне прогрівання продукції по всьому об'ємі до необхідного стану. При цьому в харчових продуктах денатуруються та коагулюються білки, колаген сполучної тканини м'ясних та рибних продуктів переходить у глютин, знищується більшість вегетативних форм мікробів, інактивуються ферменти [30].

Варіння продукції здійснюють в умовах атмосферного або підвищеного тиску. Обробка при атмосферному тиску відбувається у відкритих варочних котлах або каструлях, в яких робоча температура не перевищує 100 °С. Пара, що утворюється при цьому, спрямовується безпосередньо у приміщення або у спеціальний паропровід. Варіння в умовах підвищеного тиску використовується для прискореної обробки

продукції, для виварювання кісток при приготуванні кісткового або м'ясо-кісткового бульйону.

Тривалість нагрівання рідини до кипіння у варильному апараті залежить від багатьох чинників: теплофізичних характеристик і початкової температури рідини, величини коефіцієнта теплопередачі, поверхні нагрівання, температурного напору. Без урахування теплових втрат тривалість нагрівання може бути визначена з рівняння теплового балансу

$$G \cdot c \cdot (t_k - t_n) = K \cdot S \cdot \Delta t_{сер} \cdot \tau,$$

Звідки

$$\tau = G \cdot c \cdot (t_k - t_n) / K \cdot S \cdot \Delta t_{сер},$$

де  $G$  – маса рідини, кг;  $c$  – питома теплоємність рідини, Дж/(кг К);

$K$  – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup> К);

$t_k$  і  $t_n$  – відповідно температура кипіння та початкова температура рідини, °С;

$S$  – робоча поверхня варильного апарату (поверхня теплообміну), м<sup>2</sup>;

$\Delta t_{сер}$  – температурний напір, °С.

Про характер зміни температури однорідного продукту за час прогрівання дають уявлення криві на рис. 6.1, де  $t_c$  – температура на поверхні,  $t_u$  – температура у центрі продукту,  $t_p$  – температура рідини.

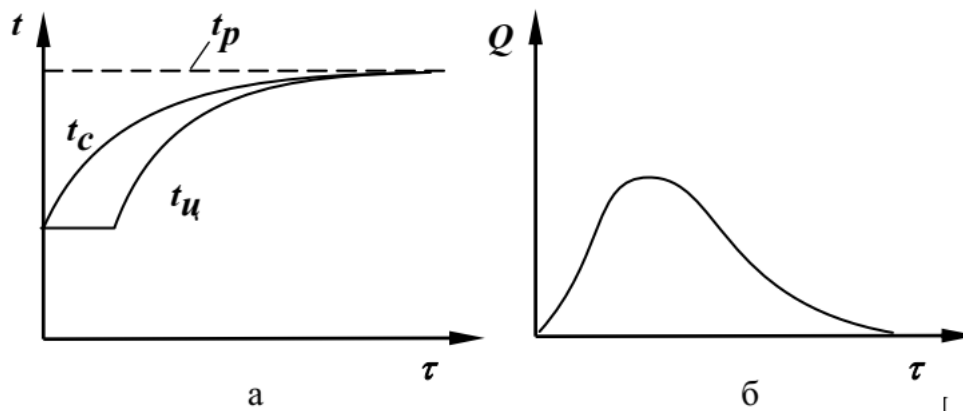


Рисунок 6.1 – Характер зміни температури (а) та кількості теплоти (б) в процесі нагрівання продукту

Через деякий час температура всіх частин продукту вирівнюється і дорівнює температурі довкілля, тобто настає тепла рівновага. За умов нестационарного режиму інтенсивність підведення теплоти також мінлива в часі. У міру прогрівання продукту кількість сприйнятої теплоти спочатку збільшується, досягає деякого максимуму, після цього зменшується і в межах теплової рівноваги дорівнює нулю. Через те, що швидкість зміни ентальпії прямо пропорційна здатності матеріалу проводити теплоту (тобто коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$ ) і обернено пропорційна його акумулюючій

здатності (тобто об'ємній теплоємності  $c \cdot \rho$ ), то в цілому швидкість нагрівання продукту за нестационарного режиму визначається значенням температуропровідності  $a = \lambda / c \cdot \rho$ . Зміна температурного поля твердого тіла за нестационарного режиму описується диференціальним рівнянням теплопровідності (рівнянням М. Фур'є) [31]

$$\frac{dt}{d\tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right).$$

За даної технології процес обробки продукції здійснюється або у її власному соку, або у невеликій кількості рідини, коли остання не покриває продукт повністю. Процес варіння, що здійснюється з метою збільшення концентрації сухих речовин у рідкій продукції шляхом переведення частини рідини у газоподібний стан, називається випарюванням. Таким чином отримують стійкі до зберігання концентрати, сиропи, кормові суміші, соуси тощо. Нагрівання рідини при випарюванні здійснюють у відкритих варильних котлах або у закритих апаратах в умовах вакууму.

Процеси варіння також широко розповсюджені при реалізації допоміжних операцій, які реалізують з метою полегшення подальшої обробки продукції, зокрема в процесах шпаріння, напівшпаріння, бланшування.

Смаженням називається нагрівання сировини або напівфабрикатів без робочої рідини або з невеликою її кількістю, що ведеться з метою отримання готової до споживання чи технологічного використання продукції [2].

При обсмажуванні продукції волога поверхневого шару частково випаровується, а частково переміщується у глибину до менш нагрітих ділянок. Це призводить до утворення зневодненої поверхневої кірочки, в якій підвищується температура та відбувається розкладання органічних речовин. В результаті утворюються хімічні речовини, частково леткі, що володіють специфічним ароматом та смаком. З моменту утворення кірочки випаровування вологи різко сповільнюється, що може призвести до недопустимої величини товщини такого поверхневого шару. Крім того, надлишкове підведення теплоти в період, коли волога починає мігрувати з центральних шарів продукту до менш вологої периферії, сприяє значній втраті маси кінцевого продукту.

Утворення скоринки є органолептичною ознакою готовності обсмаженої сировини. Проте є і більш надійний, об'єктивний критерій якості – зниження маси сировини під час обсмаження, що називається видимим усмаженням. Як було відзначено, під час обсмажування відбуваються два протилежних процеси масообміну: випарювання вологи (спрямований назовні) і всмоктування жиру (спрямований усередину). Вологи випарюється більше, ніж всмоктується жиру, тому в процесі



обсмажування маса сировини зменшується. Видимий відсоток усмаження (у % до маси вихідної сировини) визначається за формулою [11]

$$x = (A - B) \cdot 100 / A,$$

де  $A$  – маса сировини до обсмажування,

$B$  – маса обсмаженої сировини.

Для проведення теплових розрахунків жарильних апаратів необхідно мати відомості про істинний відсоток усмаження, що показує кількість випареної під час обсмажування вологи у % до вихідної кількості вологи в сировині. Залежність між істинним і видимим відсотками усмаження має вигляд

$$\omega = (x + m \cdot (100 - x)) / 100,$$

де  $\omega$  – істинне усмаження, % до маси вихідної сировини;

$m$  – кількість жиру, всмоктаного в сировину під час обсмажування, % до маси обсмаженої сировини.

Механізм переносу теплоти і вологи в продуктах під час обсмажування надто складний. Форма зв'язку вологи з матеріалом, колоїднокапілярнопориста структура багатьох продуктів, а також температура олії, розмір і форма шматочків та інші чинники впливають на механізм перенесення теплоти. За станом, що встановився, коли температура олії залишається постійною в часі, кількість теплоти (в кДж), сприйнятої олією від поверхні нагрівання, дорівнює кількості теплоти, що перейшла від олії через скоринку всередину продукту на його нагрівання та випаровування вологи, а також на компенсацію всіх втрат. Без врахування тепловтрат можна записати

$$Q = \alpha_1 S \cdot (t_{cm} - t_m) \cdot \tau,$$

$$Q = \alpha_2 S_1 \cdot (t_m - t_n) \cdot \tau,$$

$$Q = (\lambda \cdot S_1 \cdot (t_n - t_8) \cdot \tau) / \delta,$$

де  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$  – відповідно коефіцієнти тепловіддачі від поверхні нагрівання до олії, та від олії до продукту, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності скоринки, Вт/(м·К);

$\delta$  – товщина скоринки, м;

$S, S_1$  – відповідно площі поверхні нагрівання, що віддає теплоту олії та поверхні продукту, м<sup>2</sup>;

$t_{cm}, t_m, t_n, t_8$  – відповідно температура поверхні нагрівання, олії, поверхні продукту та поверхні випаровування, °С.

## 6.2 Обладнання для здійснення варення, пастеризації, стерилізації, смаження та шпаріння

Схеми основних типів стравоварильних котлів із оболонками наведено на рис. 6.2.

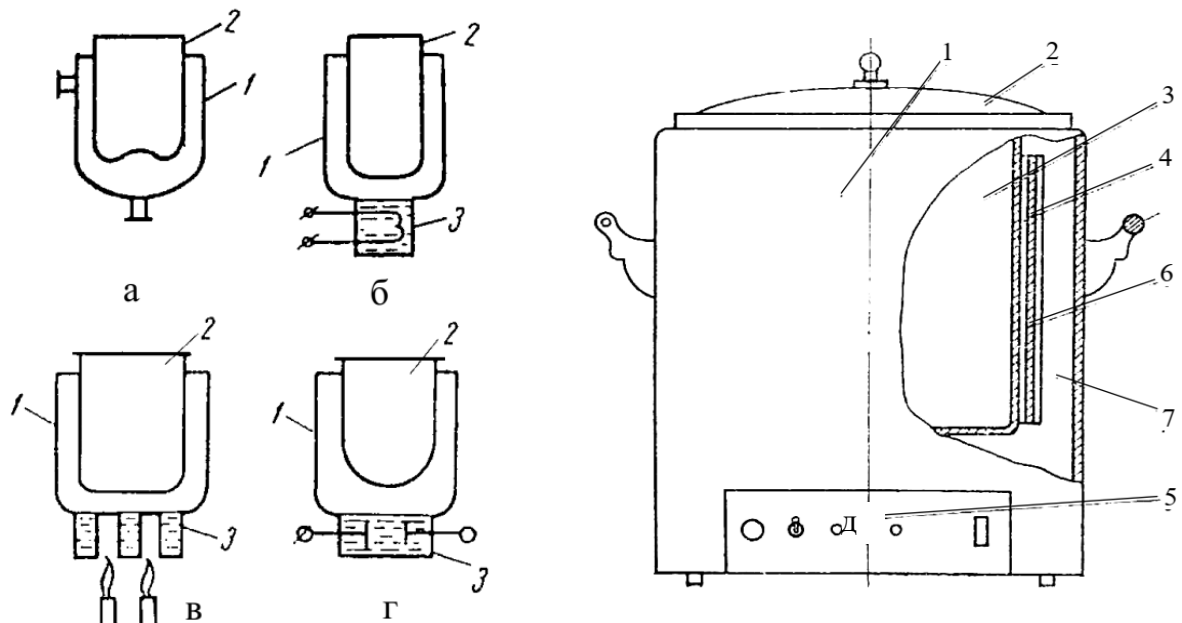


Рисунок 6.2 – Схеми стравоварильних котлів з оболонками: а – г – принципові схеми котлів (1 – пароводяна оболонка; 2 – посудина; 3 – парогенератор); д – схема котла з гнучким електронагрівачем (1 – кожух; 2 – кришка; 3 – варильна посудина; 4 – гнучкі нагрівальні елементи; 5 – пульт управління; 6 - теплова ізоляція; 7 – повітряний прошарок

Основними частинами стравоварильного котла є варильний постамент, посудина 2, парогенератор 3, пароводяна оболонка 1, контрольно-вимірвальна апаратура. Деякі котли, які завантажуються і розвантажуються через кришку, крім того, оснащуються механізмом перекидання. Зовні котли покриваються теплоізоляцією та облицьовуються кожухом.

Розглянуті нами стравоварильні котли з оболонками носять ще назву апаратів із непрямим обігрівом, тобто з теплоносієм. Використовуються і теплообмінні апарати, в яких є поверхневі нагрівачі, але немає теплоносія — стравоварильні котли з безпосереднім обігрівом.

За приклад наведемо котел, схему якого надано на рис. 6.2, д. Для обігрівання варильної посудини 3 використано гнучкі нагрівальні елементи 4, розташовані на її боковій поверхні, що дозволяє здійснити рівномірне підведення теплоти. Електронагрівальний елемент із зовнішнього боку покритий шаром теплової ізоляції 6. Котел має кришку 2, кожух 1, між кожухом і шаром теплоізоляції знаходиться повітряний прошарок 7. Пускорегульвальна апаратура розміщена під пультом управління 5.

У апаратів із безпосереднім обігріванням порівняно з котлами з непрямим обігріванням значно нижча питома витрата енергії (на 5%) і металоємність (на 40%).

На підприємствах ресторанного господарства для варення бульйонів, а також швидкого варення овочів і бобових використовуються автоклави (рис. 6.3) [14].

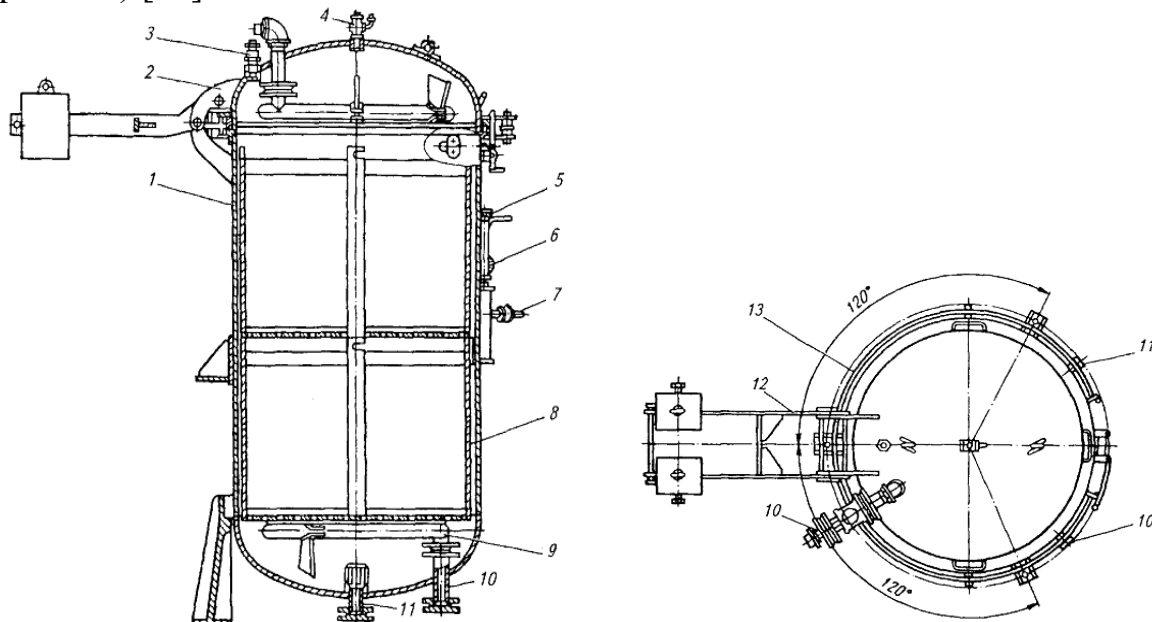


Рисунок 6.3 – Схема автоклава АВ-4: 1 – корпус; 2 – кришка; 3 – запобіжний клапан; 4 – пробковий кран; 5, 6, 7 – штуцери для підключення манометра, термометра та датчиків програмного регулятора; 8 – кошик; 9 – паровий барботер; 10 – патрубок для подачі пари, стисненої повітря та води; 11 – патрубок сливу конденсату; 12 – зрівнювальний пристрій; 13 – затискач

Автоклав являє собою стравоварильний котел із герметичною кришкою, що закривається. Завдяки цьому тиск у варильній посудині досягає 0,3 МПа, а температура варення — 130...135° С. Це сприяє швидкому прогріванню продуктів і значному прискоренню масообмінних процесів, що при цьому відбуваються.

Для варення м'яса, різноманітних м'ясних і ковбасних виробів, риби, овочів на парі застосовуються пароварильні шафи, різноманітні пароварки, камери і термоагрегати. У цих апаратах, що являють собою контактні теплообмінники, обігрівання продуктів здійснюється гострою парою, тобто під час безпосереднього співдотику насиченої пари з продуктами. При цьому пара, конденсуючись, віддає теплоту пароутворення продукту, який термічно обробляється. За конструкцією розрізняють пароварильні шафи з парогенератором (рис. 6.4, а, б) та без нього (рис. 6.4, в).

Пароварильна шафа з власним парогенератором 2 має робочу камеру 5, в якій на перфорованих полицях 6 встановлюється посуд із продуктами, які обробляються. Камера закривається дверцятами 7 з ручкою-засувом; ззовні вона покривається теплоізоляцією 4. У основі 1 розміщено

парогенератор 2 з нагрівальними елементами 3 і живильним бачком із поплавковим клапаном.

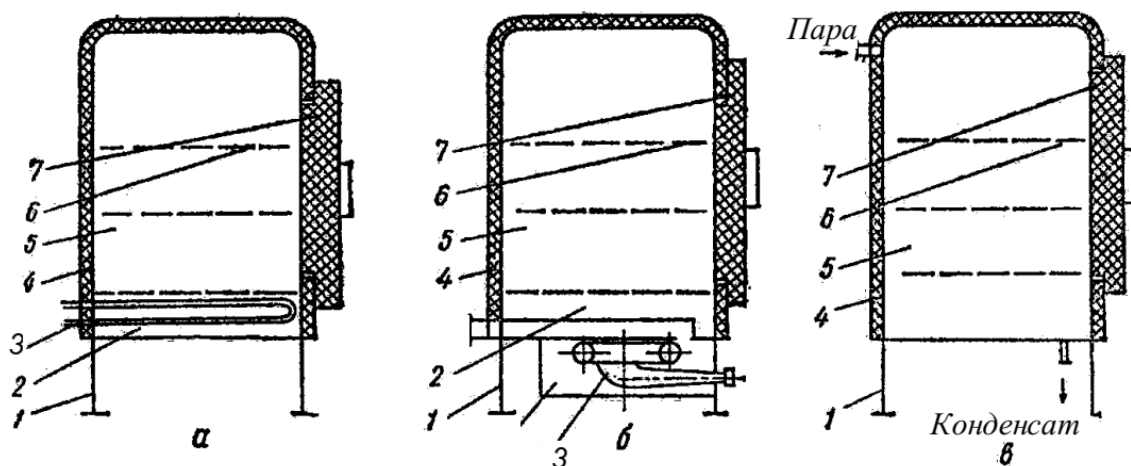


Рисунок 6.4 – Принципові схеми пароварильних шаф: 1 – основа; 2 – парогенератор; 3 – нагрівальні елементи; 4 – теплоізоляція; 5 – робоча камера; 6 – перфоровані полиці; 7 – дверцята

Пароварильні камери, що застосовуються в різних галузях харчової промисловості та термоагрегати мають таку ж принципову будову, як і пароварильні шафи, але більш високу продуктивність.

Серед піджарювальних апаратів найбільш поширені сковороди, фритюрниці, термічні шафи, спеціальне теплове обладнання тощо,

Сковороди призначені для піджарювання продуктів основним способом, а також консервування, тушення або припускання. За способом термообробки продукції та типом енергоносія розрізняють сковороди з безпосереднім та непрямим обігріванням, електричні та газові. В процесі обжарювання основним способом коефіцієнт тепловіддачі залежить, здебільшого, від товщини шару жиру, його в'язкості, різниці температур між поверхнею тепловіддачі та енергоносієм.

Фритюрниці призначені для підсмажування продукції за наявності значної кількості жиру. Процес підсмажування здійснюється при контакті поверхні продукту з нагрітим теплоносієм. При цьому одночасно з теплообміном відбувається процес масообміну між продуктом і жиром. Підсмажування у фритюрниці здійснюється пливальним або поглинальним способом. У зв'язку з цим температура жиру у початковий період може значно знижуватися, що збільшує час теплової обробки та витрати жиру. Степінь зниження температури залежить від співвідношення маси продукту та жиру. Подібна обробка забезпечує рівномірне утворення кірочки на всій поверхні продукту, проте має місце інтенсифікація та прискорення небажаних хімічних змін у жирі, що збільшує його витрати та погіршує якість готової продукції [2].

Принципову схему електричної сковороди з безпосереднім обігріванням наведено на рис. 6.5, а. Сковорода складається з чавунної

круглої або прямокутної чаші 2, встановленої на станині 1. Електронагрівальний елемент 4 змонтований під днищем сковороди. Чаша закривається кришкою 3, яка обертається на осі, або знімається. Сковорода має перекидаючий пристрій і оснащена автоматикою регулювання теплового режиму. Аналогічне обладнання мають фритюрниці (рис. 6.5, б), призначені для смаження продуктів у великій кількості жиру 2.

Ванна 1, що має більшу порівняно зі сковородою висоту, виконана з нержавіючої сталі. Відмінною особливістю фритюрниць є наявність у них «холодної зони» 4, куди потрапляють дрібні частинки продукту, а температура жиру в ній не перевищує 90° С. Обігрівання апарата може здійснюватися за допомогою ТЕНів 3 або газових пальників [11].

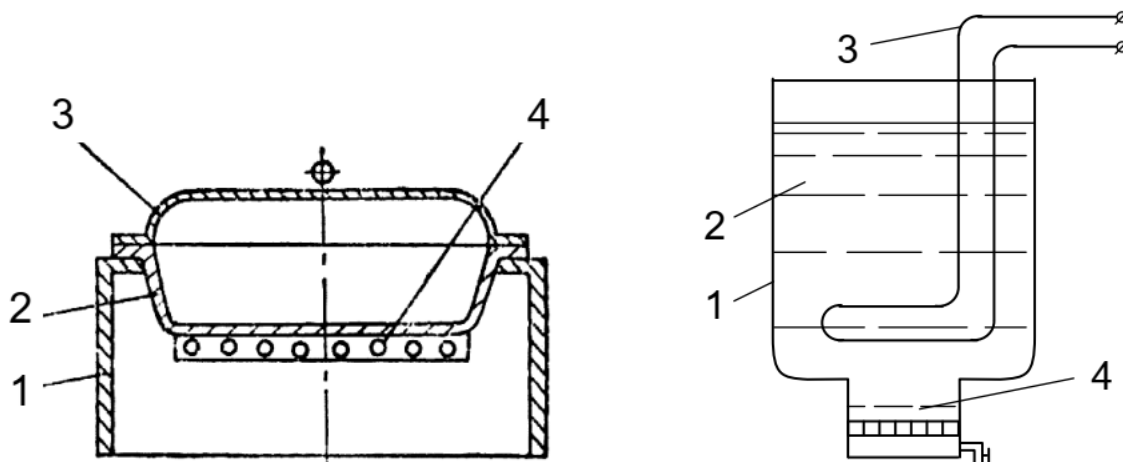


Рисунок 6.5 – Схеми обладнання для смаження: а – сковороди (1 – станина; 2 – прямокутна чаша; 3 – кришка; 4 – електронагрівальний елемент); б – фритюрниці (1 – ванна; 2 – жир; 3 – ТЕН; 4 – холодна зона)

Шпарінням називають теплову обробку внаслідок обробки продукції рідким енергоносієм (методом поглинання або розпилювання), парою або пароповітряною сумішшю з метою полегшення видалення елементів верхнього покриву. Даний метод доцільний при обробці тваринницької продукції, зокрема туш свиней, субпродуктів тощо. При цьому подібний тепловий процес обробки птиці називають напівшпарінням [30].

Теплове обладнання для шпаріння туш свиней або шпарильні чани являють собою резервуари, що виготовляють для обробки частини туші або всієї туші методом поглинання. Робочий резервуар шпарильного чану монтують на бетонній основі та виготовляють з листової сталі, чавунних плит або дерев'яних елементів. Останні використовуються в апаратах невеликої продуктивності. Чан на 75 – 80% об'єму заповнюється водою, яка підігривається гострою парою. Переміщення туш здійснюється за допомогою спеціального підвісного транспортеру, а вивантаження обробленої продукції – конвеєрним механізмом або механічними пристроями, зокрема, у вигляді грабель.

На рис. 6.6 показаний шпарильний чан (шпарчан) моделі WAMMA STAR 80-120 призначений для шпаріння свинячих туш масою до 450 кг. Туші ошпарюють повністю, шляхом безпосереднього занурення в воду. Барабан шпарильного чана розділений на 8 частин, що дозволяє одночасно обробити 4 свинячих туші. Температура води регулюється електронним контролером. Час шпаріння однієї туші близько 4 хвилин з можливістю регулювання. Робота шпарильного чана базується на циклічному обертанні барабана; 1 цикл займає близько хвилини [11].

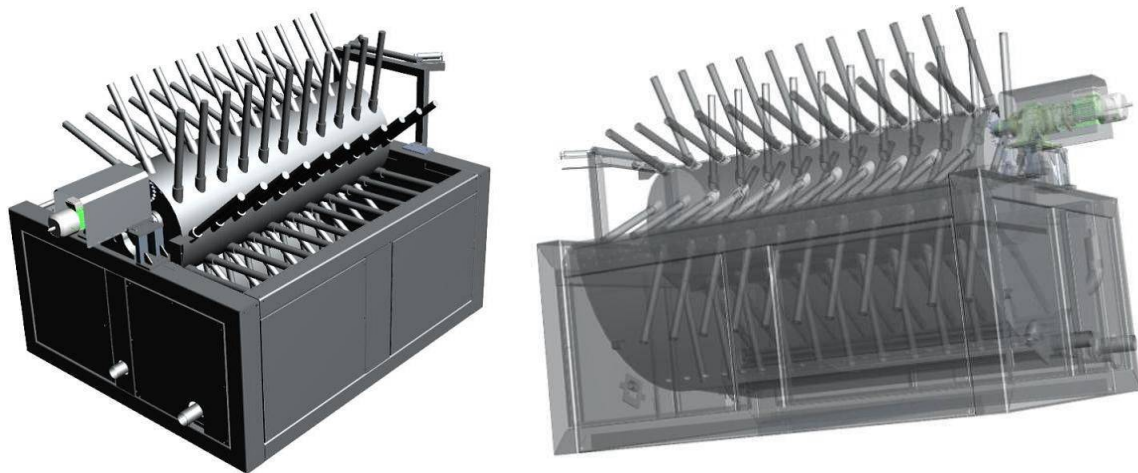


Рисунок 6.6 – Шпарильний чан (шпарчан) моделі WAMMA STAR 80-120

Розміри шпарильного чану визначаються розмірами продукції та необхідною пропускною здатністю апарату.

Для шпаріння туш тварин в безперервному циклі обробки доцільно застосовувати апарати розпилювального типу, в яких продукція зрошується гарячою водою. В даних апаратах безперервно здійснюється як обробка продукції, так і регенерація енергоносія: після зрошення вода збирається у піддоні, звідки спрямовується у відстійник, де фільтрується, підігрівається та відцентровим насосом знову подається до форсунок. Проте такі машини займають порівняно великий об'єм відзначаються значними витратами тепла та енергії.

На рис. 6.7 представлений тунель для шпаріння свинячих туш JWE CSM. Свинячі туші в автоматичному режимі транспортуються через тунель. Автоматичне регулювання температури в тунелі забезпечує оптимальне шпаріння туші.

Після шпаріння свинячі туші подаються транспортною системою з тунелю у машину для зневоложення, де вони, в першу чергу – піддаються попередньому миттю. Видалення щетини виконується за допомогою спеціальних бил фірми JWE-Baumann. Після цього туші транспортуються на приймальний стіл [31].

Для теплової обробки водоплаваючої птиці використовуються, здебільшого, установки камерного та конвеєрного типів. В камерній машині гостра пара подається у робочу камеру, куди за допомогою підвісного

конвеєра спрямовується і продукція. По закінченні обробки у робочу камеру вводиться нова партія продукції.

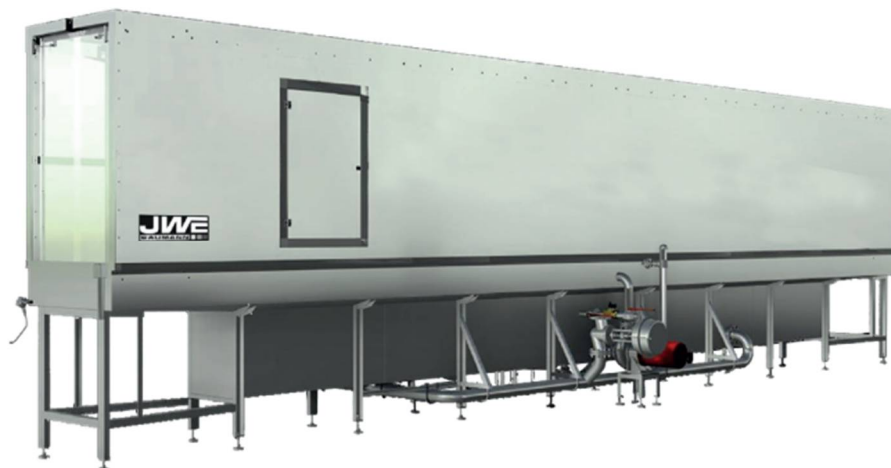


Рисунок 6.6 – Тунель для шпаріння свинячих туш JWE CSM

Серед шпарильних апаратів для обробки кускової продукції можна відзначити машини періодичної та безперервної дії. Машини періодичної дії використовують у виробництвах незначної потужності. В якості виконавчих елементів даних машин застосовують поворотні кошики, що опускають продукцію у резервуар з гарячою водою, а також центрифуги, в яких одночасно виконуються операції шпаріння та зневоднення.

В установках середньої та великої потужності використовують барабанні апарати безперервної дії. Для переміщення продукції в них застосовують похилі робочі камери, горизонтальні перфоровані барабани з напрямними полицями, спеціальні лопатеві та шнекові транспортні пристрої.

### 6.3 Обладнання для випарювання

#### 6.3.1 Характеристики та методи процесів випарювання

Випарювання – процес концентрування розчинів нелетких речовин після випаровуванням розчинника в процесі кипіння. Внаслідок випарювання із розчину видаляється розчинник, а нелеткі речовини залишаються в розчині в незмінній кількості, але в концентрованому стані. Випарювання дає змогу одержати не лише концентровані розчини, а й перенасичені, в яких відбувається кристалізація з метою виділення нелетких речовин у твердому вигляді (наприклад, кристалічного цукру, кухонної солі тощо). У ряді випадків випарювання використовують для одержання чистого розчинника (дистиляту).

Процес випарювання здійснюють у випарних апаратах (рис. 6.7), що складаються із двох основних елементів: нагрівальної камери та сепараційного простору (паросепаратора). У нагрівальній камері теплота передається від теплоносія до киплячого розчину, у паросепараторі з киплячого розчину відокремлюється пара.

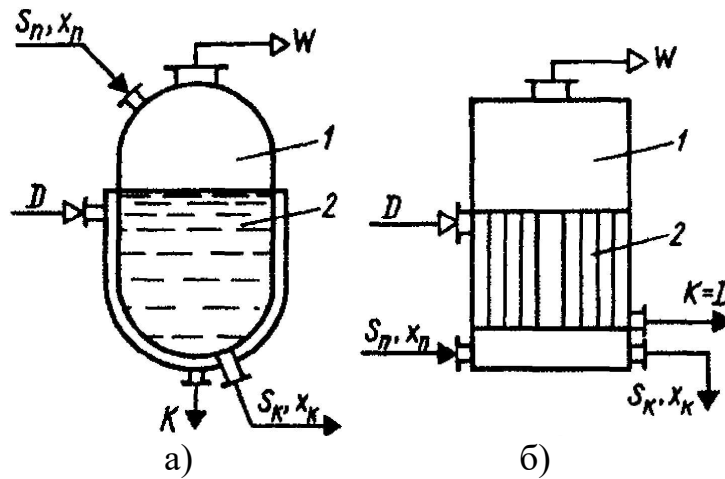


Рисунок 6.7 – Схеми випарного апарата з нагрівальними камерами: а – оболонковою; б – трубчастою; 1 – паросепараційний простір; 2 – нагрівальна камера;  $S_n$ ,  $S_k$  – витрати відповідно початкового і кінцевого розчинів;  $x_n$ ,  $x_k$  – концентрації сухих речовин відповідно у початковому і кінцевому розчинах;  $D$  – нагрівна пара;  $W$  – вторинна пара;  $K$  – конденсат нагрівної пари

На випарювання витрачається велика кількість теплоти. В якості теплоносія найчастіше використовують водяну пару, що конденсується, рідше – димові газы, високотемпературні теплоносії і дуже рідко – електричний струм [11].

У харчовій промисловості випарюванню найчастіше підлягають водні розчини, тому випарений розчинник являє собою практично чисту водяну пару, що має назву вторинної пари, яку доцільно використовувати повторно. Теплоносієм є, як правило, водяна пара, яку називають нагрівною або первинною парою.

У процесі випарювання в міру концентрування розчину змінюються його фізичні властивості розчину: зі збільшенням концентрації сухої речовини (СР) підвищуються густина, в'язкість, температура кипіння розчину, знижуються його теплоємність і теплопровідність, що призводить до зниження коефіцієнта тепловіддачі й суттєво впливає на температурний та гідродинамічний режими апарата. Концентрування розчину призводить до відкладання накипу (інкрустації поверхні теплопередачі) та виділення кристалів розчинених речовин.

Випарювання можна проводити при різному тиску, що дає змогу змінювати температуру кипіння розчину. Випарювання при пониженому тиску дає можливість знижувати температуру кипіння розчину. При підвищеному тиску зростає температура кипіння і з'являється можливість використовувати вторинну пару, але це може призвести до термічного розкладання ряду складових речовин розчину і кінцевий продукт може набути небажаного смаку, запаху, кольору або навіть змінити хімічний склад. Щоб зберегти якість термолабільних (термонестійких) продуктів (особливо концентрованих), випарювання слід проводити при найнижчих



температурах, що досягається застосуванням розрідження. Для цього вторинну пару потрібно або відсмоктувати вакуумним насосом, або подавати в конденсатор, де вона конденсується при тиску, нижчому за атмосферний.

Розглянемо матеріальний баланс процесу випарювання. Так, якщо на випарювання надходить  $G_n$ , кг / с, вихідного розчину концентрацією  $x_n$ , %, і видаляється  $G_k$ , кг / с, упареного розчину концентрацією  $x_k$ , %, тоді в апараті випаровується  $W$ , кг / с, розчинника (води) і загальний матеріальний баланс апарату виражається рівнянням [30]

$$G_n = G_k + W . \quad (6.1)$$

Матеріальний баланс по абсолютно сухій речовині, що знаходиться в розчині має вигляд

$$G_n x_n = G_k x_k . \quad (6.2)$$

До рівнянь (6.1) і (6.2) входять п'ять змінних, з яких будь-які три величини повинні бути задані. Найбільш часто бувають задані витрата вихідного розчину  $G_n$ , його концентрація  $x_n$  і необхідна кінцева концентрація  $x_k$  упареного розчину.

Тоді за рівнянням (6.1) і (6.2) визначають продуктивність апарату: за упареним розчином

$$G_k = G_n x_n / x_k \quad (6.3)$$

та за водою, що випаровується

$$W = G_n - G_k = G_n (1 - x_n / x_k) . \quad (6.4)$$

Рівняння теплового балансу для процесів випарювання має вигляд

$$G_n i_n + D I_2 = G_k i_k + W I + D c' \theta + Q_{\text{конц}} + Q_n , \quad (6.5)$$

де  $D$  – витрата нагрівальної пари;

$I, I_2, i_n, I_k$  – ентальпії вторинної та нагрівальної пари, вихідного і упареного розчинів відповідно;

$i' = c' \theta$  – ентальпія парового конденсату;

$c'$  – питома теплоємність конденсату;

$\theta$  – температура конденсату, °С;

$i_n = c_n t_n$  – ентальпія вихідного розчину ( $c_n$  та  $t_n$  – його питома теплоємність та температура);

$I_k = c_k t_k$  – ентальпія упареного розчину;

$c_k$  та  $t_k$  – його питома теплоємність і температура, рівна температурі кипіння розчину в апараті;

$Q_{\text{конц}}$  – теплота, що витрачається на концентрування розчину, кДж/с;

$Q_n$  – втрати теплоти в навколишнє середовище, кДж / с.

Підставляючи значення  $i_n, i_k, i'$  і  $G_k c_k$  в рівняння (6.5), отримуємо [2]

$$G_n i_n t_n + D I_2 = G_k i_k t_k + W I + D c' \theta + Q_{\text{конц}} + Q_n. \quad (6.6)$$

З рівняння (6.6) визначимо масову частку теплоти, що підводиться в одиницю часу нагрівальною парою (теплове навантаження  $Q$  випарного апарату)

$$Q = D(I_2 - c' \theta) = G_n i_n (t_k - t_n) + W(I - c' t_k) + Q_{\text{конц}} + Q_n. \quad (6.7)$$

Перший член правої частини рівняння (6.7) виражає витрату теплоти в апараті на нагрівання вихідного розчину до температури кипіння, другий член правої частини – витрату теплоти на випаровування вологи з матеріалу, третій – витрату теплоти на концентрування розчину (якщо тепловий ефект концентрування негативний), і четвертий – на компенсацію втрат теплоти в навколишнє середовище.

З рівняння (6.7) визначається витрата нагрівальної пари:

$$D = \frac{G_n c_n (t_k - t_n) + W(I - c' t_k) + Q_{\text{конц}} + Q_n}{(I_2 - c' \theta)}, \quad (6.8)$$

де  $(I_2 - c' \theta) = r$  (величина  $r$  – теплота конденсації нагрівальної пари).

Теплота концентрування  $Q_{\text{конц}}$ , що входить в рівняння (6.7) виражає тепловий ефект концентрування розчину. Вона дорівнює різниці інтегральної теплоти розчинення вихідного (розведеного) та концентрованого розчинів, взятої з протилежним знаком.

Оскільки при концентруванні розчину теплота може поглинатися або виділятися, то  $Q_{\text{конц}}$  може входити не тільки в видаткову, але і в прибуткову частину теплового балансу. Теплота концентрування враховується в тепловому балансі випарного апарату, якщо її величина значна і знехтувати нею не можна.

Величину  $Q_n$  зазвичай приймають у вигляді частки від теплового навантаження  $Q$  апарату; зазвичай задаються  $Q_n = (0,03 \dots 0,05) Q$ . Цю величину втрат тепла в навколишнє середовище забезпечують, розраховуючи необхідну товщину теплової ізоляції апарату. З рівняння (6.8) можна, нехтуючи величинами  $Q_{\text{конц}}$  та  $Q_n$ , визначити теоретичні витрати пари на випарювання 1 кг розчинника (води). Якщо прийняти, що вихідний

розчин надходить в апарат попередньо нагрітим до температури кипіння  $T_n = t_k$ , то

$$D = \frac{W(I - c' t_k)}{(I_2 - c' \theta)} = \frac{W(I - c' t_k)}{r} \approx W. \quad (6.9)$$

Це означає, що маса, кг нагрівальної пари, яка витрачається дорівнює масі частки, кг води, що випаровується, тобто в однокорпусному апараті на випарювання 1 кг води потрібно витратити 1 кг нагрівальної пари. Практично з урахуванням втрат теплоти питома витрата нагрівальної пари підвищується і становить 1,1 ... 1,2 кг / кг води.

Площа поверхні нагрівання безперервно діючого випарного апарату визначається на основі рівняння теплопередачі

$$F = Q / K \Delta t_{\text{пол}}, \quad (6.10)$$

де  $Q$  – теплове навантаження апарату (див. рівняння (6.7), кДж / с;

$K$  – коефіцієнт теплопередачі,

$\Delta t_{\text{пол}}$  – рушійна сила процесу (корисна різниця температур), К.

Корисна різниця температур у випарному апараті  $\Delta t_{\text{пол}}$  є різницею температури конденсації  $T$  нагрівальної пари та температури кипіння  $t_k$  розчину, що випаровується:

$$\Delta t_{\text{пол}} = T - t_k. \quad (6.11)$$

В апаратах з циркуляцією розчину, що забезпечує його досить повне перемішування,  $\Delta t_{\text{пол}}$  є величиною постійною. У випарних апаратах з природною циркуляцією концентрація маси розчину, що обертається в апараті близька до кінцевої, тому у розрахунку величину  $t_k$  приймають за кінцевою концентрацією розчину [14].

Випарювання можна здійснювати в окремих випарних апаратах (однокорпусних випарних установках) або в ряді послідовно з'єднаних випарних апаратах – багатокорпусних випарних установках (БВУ). За режимом проведення процесу розрізняють періодичне і безперервне випарювання. Періодичне випарювання здійснюють в окремих апаратах, безперервне – як в окремих, так і в БВУ. При періодичному випарюванні початковий розчин концентрують доводять до температури кипіння. Під час кипіння розчин концентрується до заданого вмісту СР.

Періодичне випарювання застосовують у малотоннажних виробництвах, коли потрібно досягти високих концентрацій розчинів, а також тоді, коли випарювання супроводжується іншими технологічними

процесами, що відбуваються в цьому самому апараті (наприклад, кристалізацією).

При безперервному випарюванні маємо усталений у часі процес, коли в установку безперервно в постійній кількості надходять початковий розчин і пара, а з установки також безперервно і в постійній кількості відводяться концентрований розчин (кінцевий продукт), вторинна пара і конденсат нагрівної пари.

Для випарювання 1 кг води в окремому апараті потрібно 1,03...1,1 кг нагрівної пари. З такою витратою її можна погодитися лише тоді, коли випарювання в однокорпусних апаратах зумовлене технологічними вимогами.

Економічність процесу випарювання можна підвищити, використовуючи теплову енергію вторинної пари, що виходить із випарного апарата. Енергію вторинної пари можливо використовувати в БВУ і в однокорпусних установках з тепловим насосом.

### 6.3.2 Багатокорпусні випарні установки

До складу багатокорпусної випарної установки (рис. 6.8) входять кілька випарних апаратів, з'єднаних послідовно за напрямком переміщення пари. Як нагрівну пару у кожному наступному корпусі використовують вторинну пару з попереднього корпусу. При цьому первинною парною обігривається лише перший корпус. Для здійснення процесу, температура кипіння розчину в кожному наступному корпусі має бути нижчою за температуру вторинної пари попереднього корпусу. Цю різницю температур створюють за рахунок зниження тиску в кожному наступному корпусі відносно попереднього [14].

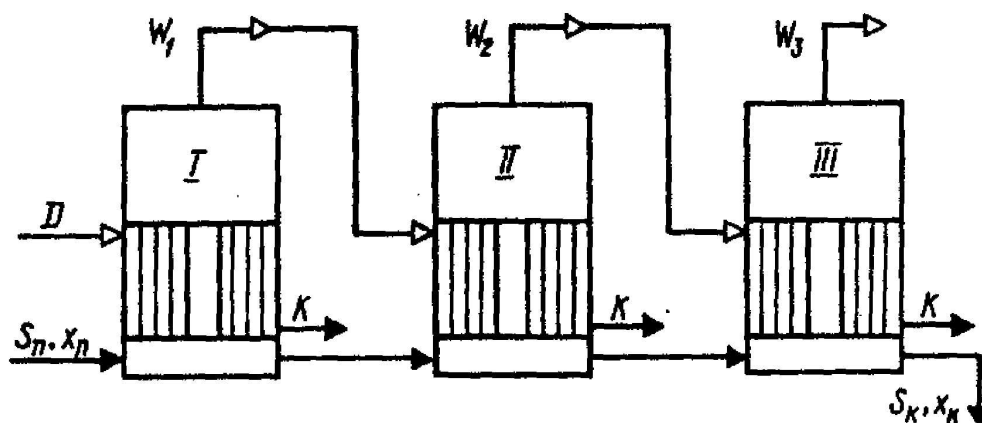


Рисунок 6.8 – Схема багатокорпусної випарної установки

За кількістю послідовно з'єднаних корпусів БВУ бувають дво-, три-, чотирьокорпусними. Є установки, які містять більше ніж чотири корпусів. Корпуси установки нумерують від головного корпусу, до якого подають первинну нагрівну пару.

Найнижчий тиск має бути в останньому корпусі установки. Цей тиск може бути вищим або нижчим за атмосферний. Створення розрідження в останніх випарних апаратах дає змогу збільшити кількість корпусів БВУ завдяки збільшенню діапазону температурного потенціалу (від температури нагрівної пари першого корпусу до температури вторинної пари останнього корпусу).

Багаторазове використання теплоти нагрівної пари може бути здійснене також завдяки застосуванню теплового насоса. При його використанні утворена вторинна пара (вся або її частина) стискається до тиску, який відповідає температурі нагрівної пари, і знову подається на обігрівання того самого апарата, в якому вона утворилася.

Розрізняють теплові насоси двох видів (рис. 6.9) [14]:

- 1) термокомпресорний з використанням парового інжектора 1 (рис. 6.9, а);
- 2) механокомпресорний з використанням турбокомпресора 2 або будь-якого іншого механічного компресора (наприклад, поршневого, рис. 6.9, б).

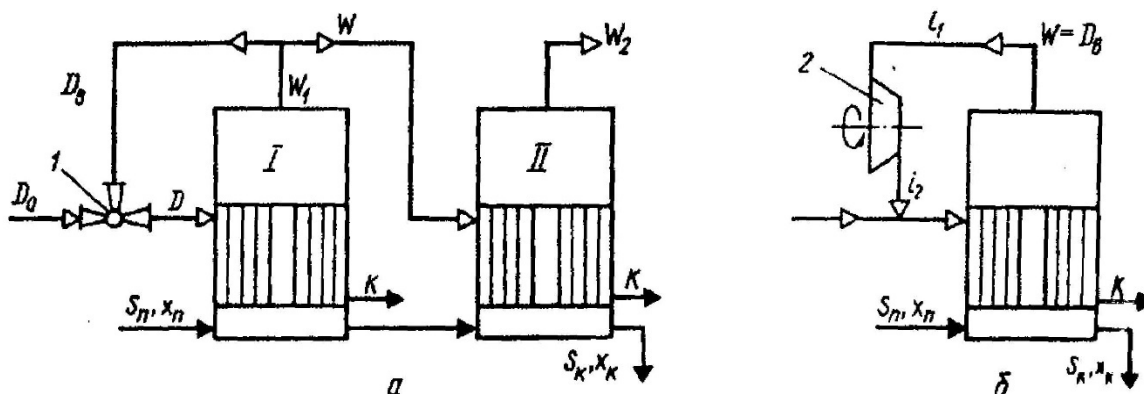


Рисунок 6.9 – Схеми випарних установок з тепловими насосами: а - термокомпресорного з паровим інжектором; б – механокомпресорного з турбокомпресором або механічним компресором; 1 – паровий інжектор; 2 – турбокомпресор або механічний компресор;  $i_1, i_2$  – ентальпії вторинної та стисненої пари, кДж/кг;  $D_0, D$  – витрати вторинної та первинної пари підвищеного тиску

Використовувати тепловий насос можна як в однокорпусних випарних апаратах, так і в окремих корпусах БВУ. На рис. 6.9, а показано принципову схему двокорпусної випарної установки з тепловим насосом (інжектором) у першому корпусі.

Необхідною умовою процесу випарювання є наявність перепаду температури. Тому на кожній наступній стадії процесу випарювання температура робочих середовищ у випарній установці послідовно знижується. Найвищу температуру має первинна нагрівна пара першого корпусу, нижчу – киплячий розчин, ще нижчу – вторинна пара, що виходить з цього корпусу і використовується, як нагрівна пара у наступному корпусі.

У кожному наступному корпусі відбувається аналогічне подальше зниження температури. Найнижчою є температура вторинної пари в кінці паропроводу, що відводить пару з установки.

За напрямком підведення і відведення розчину й пари багатокорпусні випарні установки можна поділити на прямотечійні, протитечійні та з паралельними потоками.

У найбільш поширеній прямотечійній схемі (рис. 6.10, а) розчин послідовно проходить через усі корпуси установки, з яких кожен наступний обігрівється вторинною парою попереднього корпусу; первинною парою обігрівється лише перший корпус [11].

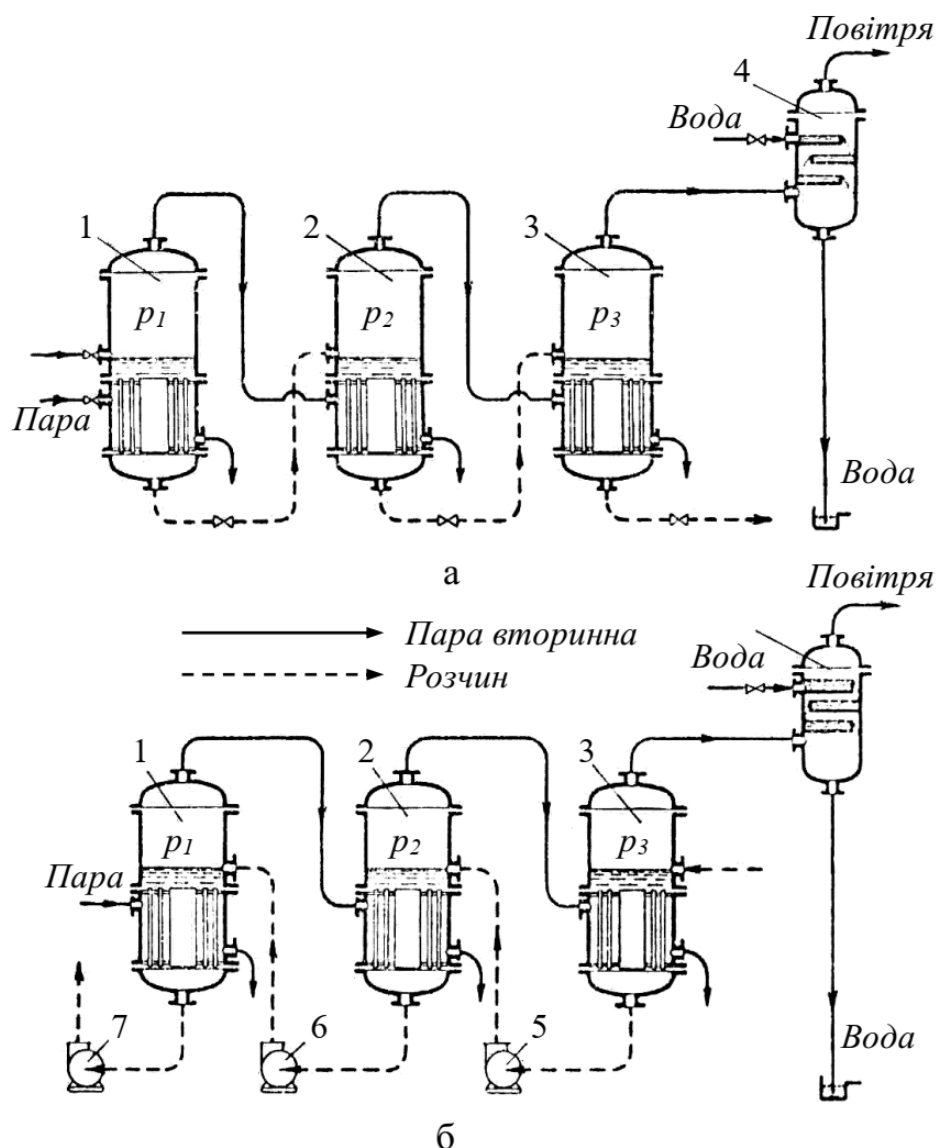


Рисунок 6.10 – Схеми прямотечійної (а) та протитечійної (б) БВУ: 1 – 3 – корпуси установок; 4 – барометричний конденсатор; 5 – 7 – насоси

Перевагами прямотечійної БВУ є найчастіше непримусовий (без витрати зовнішньої енергії) рух розчину через всю установку і мінімальні тепловтрати за випареним розчином, що відводиться при температурі

кипіння в останньому корпусі. Недоліком цієї схеми є несприятливі умови теплопередачі; найбільш концентрований розчин випарюється (кипить) при найнижчій температурі, коли в'язкість та концентрація СР є максимальними, а теплоємність і теплопровідність – мінімальними. Звідси випливає і мінімальне значення коефіцієнта тепловіддачі.

За умовами теплопередачі економічно вигідніші БВУ з протитечією розчину і пари (рис. 6.10, б). В них початковий розчин рухається в напрямку від останнього корпусу до першого, а первинна і вторинна пари – у протилежному напрямку, внаслідок чого розчин кінцевої концентрації (найбільш в'язкий) випарюється при найвищій температурі.

Суттєвим недоліком протитечійної схеми є необхідність примусового переміщення розчину в напрямку зростання тиску, що потребує встановлення насосів між корпусами. Крім того, концентрований розчин, виходячи із першого корпусу (з високою температурою), виносить більшу кількість теплоти, ніж у прямотечійних установках. Недоліки прямотечійних схем менш суттєві, ніж у протитечійних, тому вони є найбільш поширеними в харчовій промисловості.

У ряді випадків (наприклад, у разі кристалізації розчинів) у БВУ використовують паралельне живлення корпусів розчином. При такому живленні концентрація розчину в кожному корпусі змінюється від початкової до кінцевої, а пара, як і в попередніх схемах, рухається послідовно від першого корпусу до останнього. В цьому самому напрямку знижуються робочий тиск та температури кипіння розчинів у корпусах. Паралельне живлення застосовують при випарюванні розчинів, з яких видаляється невелика кількість розчинника.

Багатокорпусні випарні установки як концентратори розчинів одночасно можуть бути джерелом пари пониженого потенціалу для інших технологічних процесів. Вторинну пару, відібрану з одного або з кількох корпусів, можна постачати до інших споживачів, а також нагрівати її допомогою початкові розчини перед подаванням їх до випарних апаратів.

Виведену з установки для сторонніх потреб вторинну пару називають екстрапарою. Доцільність відбирання екстрапари очевидна, оскільки її одержують після одно- або багаторазового використання теплоти первинної пари для досягнення основної мети – концентрування розчину. Економічність відбирання екстрапари зростає у міру збільшення номера корпусу, з якого її відбирають. Із різних корпусів відводиться екстрапара різного потенціалу; кількість і температура відібраної пари зумовлюються потребами її споживачів.

### 6.3.3 Основні типи випарних апаратів

У харчовій промисловості набули поширення різноманітні випарні апарати, що пояснюється великим діапазоном властивостей початкових розчинів та кінцевих продуктів, різними умовами проведення процесу випарювання, широким інтервалом продуктивності. Випарні апарати можна

класифікувати за методами обігрівання, компонованням та конструкцією поверхні нагрівання, за розміщенням робочих середовищ, режимом роботи, кратністю циркуляції розчину тощо [11].

У харчовій промисловості випарні апарати обігриваються здебільшого водяною парою. Парове обігривання відрізняється гнучкістю регулювання, високими коефіцієнтами теплопередачі, а водяна пара – високою енергоємністю. В малих випарних апаратах і лабораторних установках практикують електрообігривання. Трубчаста поверхня теплообміну може бути: вертикальною, горизонтальною і, інколи, похилою; із вбудованою або з винесеною нагрівальною камерою.

За розміщенням робочих середовищ випарні апарати поділяють на апарати з подаванням нагрівної пари в труби (кипіння розчину у великому об'ємі навколо труб) та з подаванням пари в міжтрубний простір (кипіння розчину в трубах). За режимом руху киплячої рідини випарні апарати бувають з природною та з вимушеною, з одноразовою і багаторазовою циркуляцією рідини.

Кожний випарний апарат складається з двох основних елементів: нагрівальної камери – теплообмінника, що забезпечує передачу теплоти від теплоносія до випарюваного розчину скрізь поверхню теплопередачі, і паро-сепаратора – парового простору, в якому вторинна пара відокремлюється від киплячого розчину (рис. 6.11).

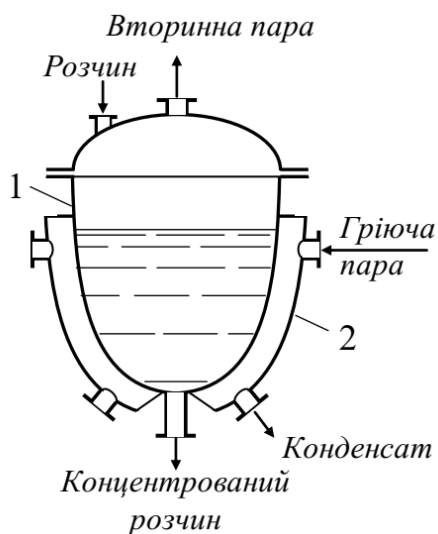


Рисунок 6.11 – Випарний апарат з паровою оболонкою: 1 – корпус; 2 – парова оболонка

Найпоширенішими є випарні апарати з вертикальними нагрівальними камерами. Вони відносно компактні, в них забезпечуються сприятливі умови теплопередачі. В апаратах цього типу випарюваний розчин міститься в трубах, а нагрівна пара – в міжтрубному просторі, що дає змогу порівняно легко видаляти відкладення (накип) з поверхні труб.

Нагрівальна камера може бути вбудована всередині циліндричного корпусу апарата або винесена за його межі. Апарати із вбудованою нагрівальною камерою відносно прості за конструкцією. Циркуляція розчину в них зумовлена різницею густин парорідинної суміші в центральній трубці та в кип'ятільних трубах.

Такі апарати працюють з багаторазовою природною циркуляцією розчину.

Внутрішню нагрівальну камеру звичайно виготовляють із труб діаметром 25...57 мм і завдовжки 0,8 – 3,5 м (залежно від продуктивності). За цих умов швидкість природної циркуляції не перевищує 1 м/с. Збільшення швидкості циркуляції розчину досягається збільшенням висоти



кип'ятильних труб, що спонукало до створення випарних апаратів з винесеними нагрівальними камерами.

Випарний апарат з центральною циркуляційною трубою (рис. 6.12) має нагрівальну камеру 1 з трубчатою поверхнею нагрівання, утворену пучком труб з двома трубними решітками, які знаходяться в кожусі обичайки. Вихідний розчин подають в апарат через штуцер 3. Нагрівальна пара надходить через штуцер 2 в міжтрубний простір, а конденсат відводиться через штуцер 9. Киплячий розчин разом із вторинною парою рухається в кип'ятильних трубах 8 вгору, а по центральній циркуляційній трубі 11 холодний розчин опускається вниз. Таким чином, за рахунок різниці густин розчину в циркуляційній трубі та парорідинної суміші в

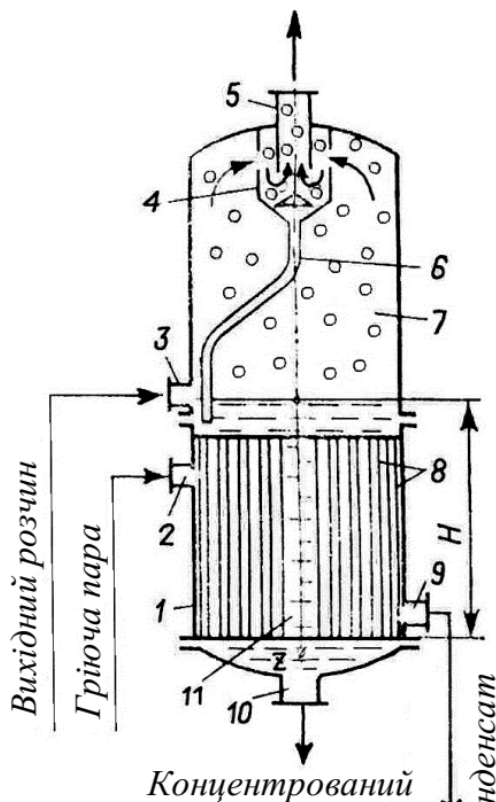


Рисунок 6.12 – Схема випарного апарату з центральною циркуляційною трубою: 1 – нагрівальна камера; 2, 3, 5, 9, 10 – штуцера; 4 – бризкоуловлювач; 6 – труба; 7 – сепараційний простір; 8 – кип'ятильні труби; 11 – циркуляційна труба

кип'ятильних трубах забезпечується природна організована циркуляція розчину. Вторинна пара у вигляді парорідинної суміші викидається у паровий сепараційний простір 7, з якого вона надходить до бризкоуловлювача 4. Бризкоуловлювач призначений для відокремлення піни і крапель розчину від вторинної пари. Це відбувається завдяки зміні швидкості та напрямку руху вторинної пари. Рідина, що при цьому виділилась, стікає по трубі 6 в нагрівальну камеру, а вторинна пара через штуцер 5 виходить із випарного апарата. Концентрований розчин, що є цільовим продуктом, витікає з нижньої частини нагрівальної камери через штуцер 10. Інколи циркуляційну трубу в апаратах з трубчатою поверхнею нагрівання розміщують ексцентрично або

вносять за межі нагрівальної камери.

Апарат з винесеною нагрівальною камерою (рис. 6.13) складається з нагрівальної камери 1, виготовленої з труб, сепаратора 2 з

бризкоуловлювачем 3 та циркуляційної труби 4, з'єднаної з нижньою камерою 5. Нагрівальна пара надходить у міжтрубний простір трубної камери і обігріває трубки, заповнені рідиною. Парорідинна суміш, що утворюється, розділяється у сепараторі на вторинну пару та рідину, що

надходить у циркуляційну трубу 4. За рахунок збільшення висоти трубок до 4...5 м створюється значна різниця тиску парорідинного стовпа в трубках 1 і стовпа рідини в циркуляційній трубі 4, що забезпечує інтенсивну природну циркуляцію. Цьому сприяє також те, що циркуляційна труба не обігривається. Для покращення відокремлення пари та рідини парорідинна суміш вводиться з нагрівальної камери в сепаратор тангенціально [14].

Перевага цих випарних апаратів полягає також у тому, що нагрівальна камера розміщена окремо; це дозволяє легко її оглядати і здійснювати очищення внутрішньої поверхні. В таких апаратах довжина кип'ятильних труб складає 5...7 м, а швидкість природної циркуляції збільшується до 1,5 м/с. Апарати з винесеною нагрівальною камерою зручно ремонтувати й

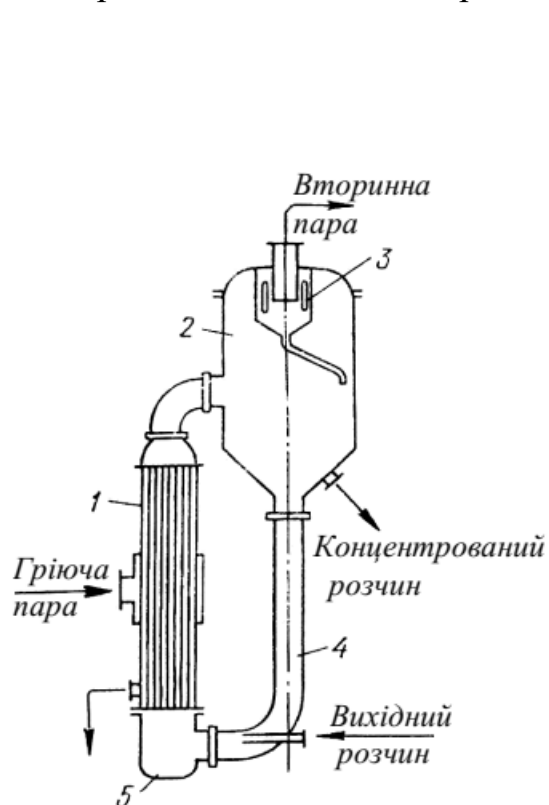


Рисунок 6.13 – Випарний апарат з винесеною нагрівальною камерою: 1 – трубки; 2 - нагрівальна камера; 3 – прохідні щілини; 4 – циркуляційна труба; 5 – нижня камера

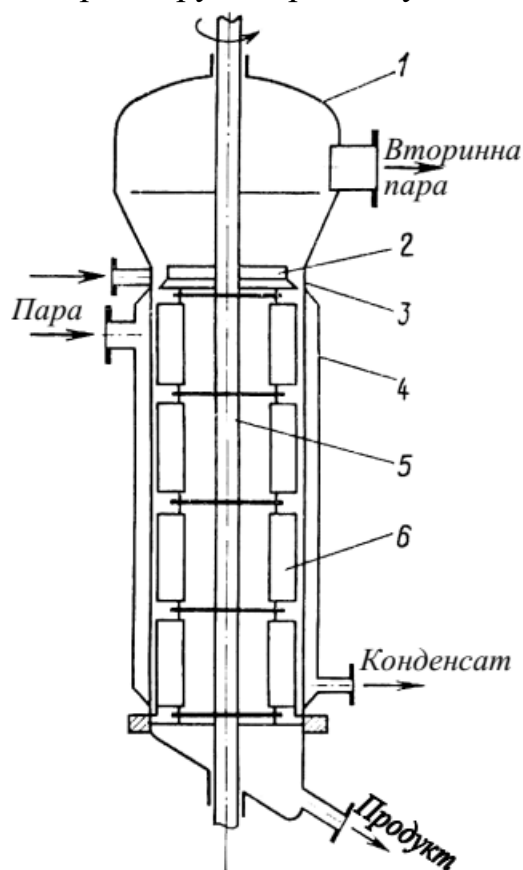


Рисунок 6.14 – Роторно-плівковий випарний апарат: 1 – сепаратор; 2 – розподільний пристрій; 3 – нагрівальна камера; 4 – нагрівальна парова оболонка; 5 – ротор; 6 – лопаті

очищати, їх часто виконують з двома-чотирма паралельно встановленими нагрівальними камерами при одному паросепараторі, що дає можливість у разі потреби відключати одну з камер для ремонту або очищення без зупинки апарата. Парорідинна суміш із нагрівальної камери підводиться в паросепаратор тангенціально, що створює сприятливі умови для відокремлення вторинної пари від краплинок рідини в ній.

Апарат з примусовою циркуляцією принципово відрізняється від апарата з винесеною нагрівальною камерою тим, що між циркуляційною трубою 4 і нижньою камерою 5 (див. рис. 6.13) встановлюється насос. Швидкість рідини в трубках за рахунок роботи насоса піднімається до 2...2,5 м/с, що забезпечує більш інтенсивну циркуляцію. Практика показує, що при швидкості руху рідини в кип'ятільних трубах 2,5...3,5 м/с ймовірність інкрустації поверхні труб повністю усувається [2]. Збільшення швидкості циркуляції розчину в нагрівальних трубах зумовлює зростання коефіцієнту теплопередачі і рекомендується при випарюванні в'язких концентрованих розчинів, що утворюють осади, але це пов'язано з додатковими витратами енергії на привод насоса.

Термолабільні розчини та розчини, що піняться, випаровують у апаратах, в яких робочий процес відбувається в основному в плівці розчину, що рухається по поверхні теплопередачі. Такі апарати дістали назву плівкових. Вони характеризуються високою інтенсивністю теплообміну при малих температурних напорах і можуть працювати при корисній різниці температур 2...3 К.

Для випарювання в'язких термолабільних рідин до високих концентрацій, застосовують плівкові роторні апарати. Плівка створюється на внутрішній поверхні нерухомого корпусу за допомогою ротора, що обертається. Останній являє собою вертикальний вал з насадженими на ньому лопатями. Обертаючись, лопаті ротора, які мають певну відстань до внутрішньої поверхні корпусу, розподіляють по ній рідину рівномірною плівкою.

Тривалість контакту розчину з поверхнею нагріву в роторних апаратах залежить від багатьох факторів (питомої продуктивності, в'язкості розчину, типу і частоти обертання ротора) і звичайно становить 5...25 с [11].

Плівкові роторні апарати дають змогу концентрувати розчини аж до одержання сухого залишку. Недоліком їх є мала потужність (поверхня нагріву не перевищує 25 м<sup>2</sup>), складність конструкції і висока вартість. Роторні апарати, як правило, працюють під розрідженням. Роторно-плівкові випарні апарати знаходять все більш широке застосування для випарювання високов'язких і пастоподібних термолабільних розчинів.

Такі апарати мають довготрубні (6...9 м) нагрівальні камери, співвісні з паросепаратором. Залежно від напрямку руху плівки їх поділяють на апарати з висхідною і з спадною плівками.

В апаратах з висхідною плівкою нагрівальні труби заповнюють розчином, який подають знизу, звичайно на 25 % їхньої висоти. Утворена в цій зоні вторинна пара переміщується вгору зі швидкістю до 20 м/с, захоплюючи з собою плівку рідини. На шляху руху плівки розчин випаровується. У плівковому режимі гідростатичної депресії практично немає. Це дає можливість при заданих температурних напорах збільшити кількість корпусів БВУ.

В апаратах із спадною плівкою початковий розчин подають зверху в нагрівальну камеру, де він розподіляється по трубах і, стікаючи у вигляді плівки, випаровується. Вторинна пара разом з рідиною рухається вниз, де в сепараторі відокремлюється від рідини. Застосування плівкових апаратів у молочній промисловості дало можливість ефективно експлуатувати БВУ з п'ятьма-сімома корпусами в поєднанні з термокомпресією і досягти кратності випаровування  $W/D = 10... 14$  [14].

На рис. 6.14 показана схема роторно-плівкового випарного апарата, нагрівальна камера 3 якого оточена нагрівальною паровою оболонкою 4 і містить ротор 5 з лопатями 6. Ротор приводиться в обертання з частотою  $1...3 \text{ с}^{-1}$ . Надходячи в апарат, розчин розподіляється за допомогою пристрою 2, що обертається разом із валом ротора, по стінці корпусу і стікає у вигляді тонкої плівки під дією сили тяжіння. Під час течії розчин концентрується за рахунок випаровування розчинника. Вторинна пара виходить з апарату через сепаратор 1. У міру випарювання розчинника на стінці корпусу утворюється пастоподібний або навіть сухий залишок розчиненої речовини, що знімається з поверхні, що обігрівається, лопатями 6. Проміжок між лопаттю і стінкою апарата складає від 0,4 до 1,5 мм. Час перебування рідини в апараті (залежно від продуктивності, фізичних властивостей розчину, частоти обертання ротора) становить 10...30 с, що обумовлює головну перевагу апарата. Апарати мають площу робочої поверхні до  $40 \text{ м}^2$  і рекомендуються для проведення процесів випарювання широкої номенклатури харчових продуктів – молока, цукрових розчинів, екстрактів кави та цикорію, м'ясних бульйонів, соків, томатної пасти тощо.

Незалежно від тиску випарного апарата, наявність у нагрівній парі газів, що не конденсуються призводить до зниження коефіцієнту тепловіддачі з боку пари. Щоб відвести ці газы, у верхній частині нагрівальних камер встановлюють газовідвідні патрубкі діаметром 10...20 мм – газові відтяжки.

Накопичення конденсату в нагрівальній камері обумовлює зменшення активної поверхні теплообміну, тобто продуктивності апарата. Тому нагрівальні камери розділяють на секції. Конденсат відводять з найнижчої точки парового простору кожної нагрівальної камери за допомогою конденсатовідвідників, що дозволяє усунути ймовірність виходу нагрівної пари [30].

Сепараційний простір випарних апаратів (паросепаратор) призначений для відокремлення вторинної пари від крапель випарюваного розчину. Паровий простір має бути таким, щоб не допустити ймовірність потрапляння продукту у вторинну пару. У сучасних випарних апаратах із внутрішньою нагрівальною камерою при спокійному кипінні розчину висоту сепараційного простору приймають рівною  $H = 1,6 \text{ м}$ , а для розчинів, що піняться та для апаратів з винесеною поверхнею нагріву  $H = 2,5...3,5 \text{ м}$ .

На рис. 6.15 показана однокорпусна вакуум-випарна установка циркуляційного типу періодичної дії, яку використовують для виробництва

згущеного молока з цукром або для попереднього згущення молока перед сушінням [14].

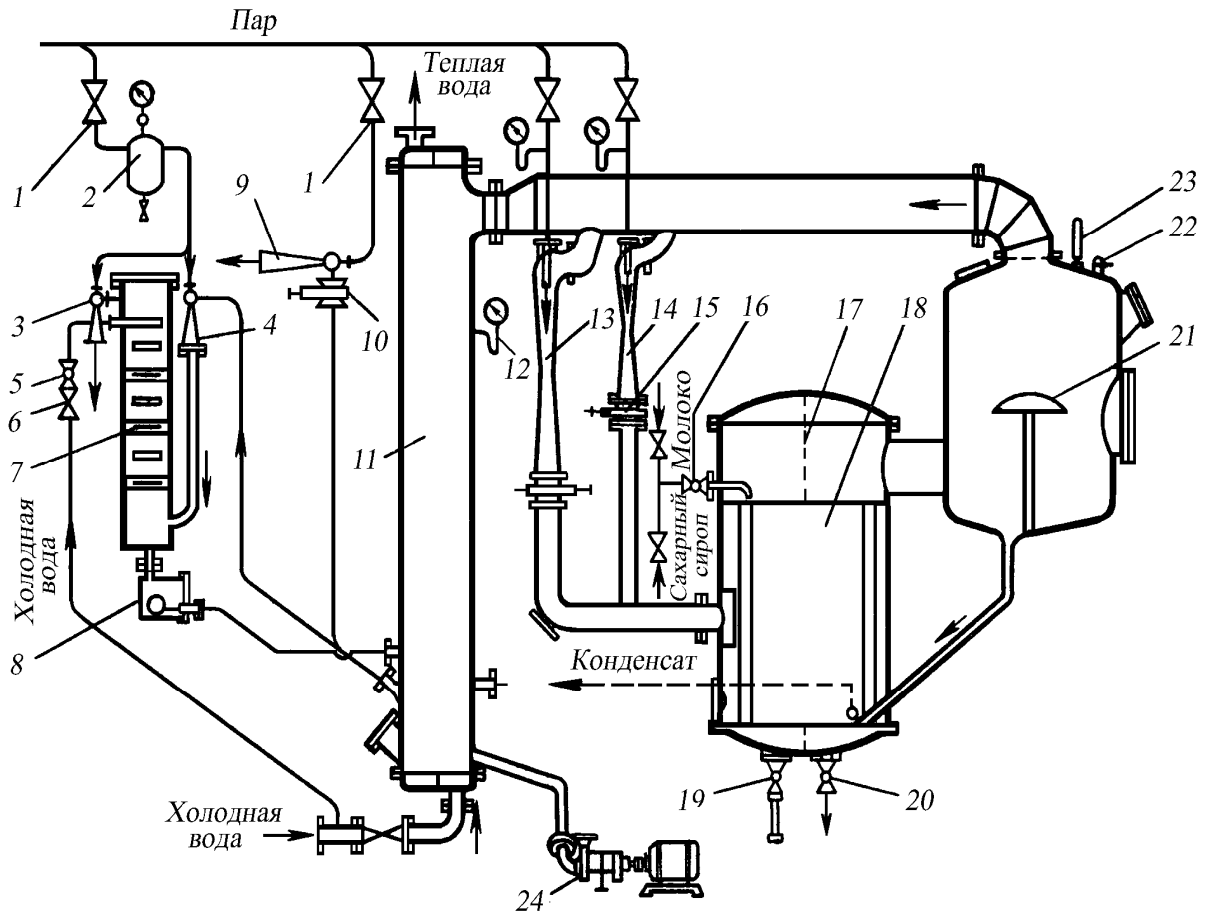


Рисунок 6.15 – Схема однокорпусної вакуум-випарної установки: 1 – парові вентилі; 2 – відокремлювач води; 3 – ежектор другого ступеня; 4 – ежектор першого ступеня; 5 – регулювальний кран для холодної води; 6 – вентиль для холодної води; 7 – конденсатор змішування ежекторного блоку; 8 – поплавкова камера; 9 – пусковий ежектор; 10 – шибер; 11 – головний конденсатор поверхневого типу; 12 – вакуумметр; 13 – термокомпресор I; 14 – термокомпресор II; 15 – шибери; 16 – регулювальний кран для впуску в калоризатор молочно-цукрової суміші; 17 – перегородки; 18 – калоризатор; 19 – пробник; 20 – кран для випуску згущеного молока; 21 – відбивач; 22 – повітряний кран; 23 – термометр; 24 – відцентровий конденсатний насос

Установка складається з калоризатора (нагрівальної камери) 18, поверхня нагріву якого виконана з кип'ятильних трубок, завальцьованих в трубні решітки. Калоризатор двома циркуляційними трубами з'єднаний з сепаратором пари. Також установка містить: два термокомпресори 13 і 14; конденсатор поверхневого типу 11; двоступеневий парострумінний вакуум-насос з ежектором першого ступеня 4, ежектором другого ступеня 3 та проміжним конденсатором змішування 7 між ступенями; пусковий ежектор 9; відцентровий насос для відкачування конденсату. У калоризатора є

верхня і нижня перегородки 17, тому він працює як двоходовий пристрій. У разі реалізації процесу згущення молока з цукром ці перегородки знімаються.

Пастеризоване молоко температурою не нижчою 75 °С подається через кран 16 і широку трубу калоризатора в простір під нижньою трубною решіткою, де моментально закипає і спрямовується в кип'ятильні трубки.

Парорідинна суміш з кип'ятильних трубок надходить до збірника над верхньою трубною решіткою і прямує з великою швидкістю по верхній циркуляційній трубі великого діаметру в сепаратор пари, набуваючи обертального руху. Завдяки виникненню при цьому відцентрової сили відбувається поділ крапельок рідини та вторинної пари. Молоко по нижній циркуляційній трубі малого діаметра повертається до калоризатора, а вторинна пара із сепаратора пари відводиться у поверхневий конденсатор. Частина вторинної пари, що йде через термокомпресори використовують в якості нагрівального робочого тіла в калоризаторі. Зазвичай другий термокомпресор вводять в роботу в другій половині процесу згущення, коли кількість вторинної пари починає зменшуватися.

Повітря та інші неконденсовані гази видаляються з системи вакуум-апарату пароежекторним агрегатом. Однокорпусні вакуум-апарати широко використовуються в нашій молочній промисловості. Однак останнім часом їх починають замінювати більш прогресивними трикорпусними вакуум-випарними установками безперервної дії [14].

## 6.4 Обладнання для охолодження та заморожування

### 6.4.1 Основні означення та положення

Для запобігання псування продуктів застосовують консервування. З існуючих методів консервування (пастеризація, стерилізація, сушка, копчення, соління тощо) найбільш ефективною є обробка холодом, оскільки вона в найменшій мірі змінює первинні властивості продуктів.

Зниження температури значно знижує життєдіяльність мікроорганізмів і активність тканинних ферментів, в результаті чого сповільнюються реакції, що природно протікають в деяких продуктах (автоліз м'яса, дихання і дозрівання плодів тощо), а також реакції, що обумовлюються діяльністю мікроорганізмів [14].

Залежно від температури і характеру холодильної обробки харчові продукти умовно поділяють на охоложені – з температурою в середніх шарах продукту від 0 до 4 °С і заморожені (мають температуру нижчу мінус 6 °С). При охолодженні продуктів головним дійовим чинником є низька температура; при заморожуванні продуктів, крім того, має значення перехід води в твердий стан – зневоднення тканини. Однак вода, що є найважливішим фактором існування та розвитку мікроорганізмів, при заморожуванні повністю не замерзає. Частина її, яка міститься в харчових продуктах, виявляється настільки міцно пов'язаною з твердою речовиною, що не замерзає навіть при дуже низьких температурах [14].

Охолоджувальним називається середовище, що має більш низьку температуру, ніж тіло, яке віддає або сприймає теплоту. Охолоджувальні середовища бувають газоподібними (повітря, вуглекислий газ, азот), рідкими (холодна вода, розсіл, водні розчини етиленгліколю або пропіленгліколю) і твердими (лід, сніг). Іноді холодильна обробка і зберігання відбуваються в неоднорідному середовищі (лід, що тане, льодосоляна суміш).

Речовини, що застосовуються в якості робочого тіла при здійсненні холодильних циклів, називають холодильними агентами.

Холодильні агенти повинні відповідати таким вимогам: володіти хімічною стійкістю та інертністю по відношенню до металів і мастил, добре розчиняти воду, бути недорогими та нешкідливими для здоров'я людини, володіти певними фізичними і термодинамічними властивостями (температура кипіння, критична температура та температура замерзання, густина і теплопередавальні властивості тощо), не повинні бути горючими та вибухонебезпечними.

При нормальному атмосферному тиску холодильний агент повинен мати досить низьку температуру кипіння, щоб при роботі холодильної машини не було розрідження у випарнику. Робоча речовина при температурах конденсації не повинна мати високого тиску, оскільки це вимагає великої міцності машини, призводить до збільшення її маси та підвищення вартості.

Критична температура холодильного агента повинна бути вищою температури охолоджуючої води або повітря в конденсаторах холодильних машин. Чим вища критична температура холодильного агента, тим менше утворюється пари при дроселюванні його в регульовальному вентилі. Температура замерзання холодильного агента, навпаки, повинна бути якомога нижчою, щоб усунути небезпеку його замерзання у випарнику при заданих температурах кипіння.

Від густини холодильного агента залежить гідравлічний опір його руху. Чим вищою є густина речовини, тим більшим є гідравлічний опір.

Теплопередавальні властивості холодильного агента характеризуються коефіцієнтами тепловіддачі і теплопровідності, від яких залежить ефективність роботи теплообмінних апаратів. Цим вимогам в більшій мірі відповідають аміак  $\text{NH}_3$  і фреони.

Фреони – це велика група речовин, що являють собою фтористі та хлористі похідні граничних (насичених) вуглеводнів. Особливо багато існує похідних метану та етану, до яких відносяться діфтордіхлорметан  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ , тріфтормонохлорметан  $\text{CF}_3\text{Cl}$ , діфтормонохлорметан  $\text{CHF}_2\text{Cl}$ , діфтормонохлоретан  $\text{C}_2\text{H}_3\text{F}_2\text{Cl}$  тощо [2].

В останні роки в якості робочих речовин холодильних машин почали застосовувати також азеотропні суміші, що складаються з двох різних компонентів. За своїми властивостями ці суміші відрізняються від властивостей компонентів, що входять до їх складу. Азеотропну суміш, що

складається з 48,8% фреону-22 за масою та 51,2% фреону-115, називають фреон-502. Суміш невибухонебезпечна, нешкідлива для здоров'я людини, за ступенем токсичності рівноцінна фреону-12, має хороші термодинамічні властивості і енергетичні показники. Нормальна температура кипіння суміші дорівнює мінус 45,6 ° С, в той час як її окремі компоненти киплять при більш високих температурах [11].

#### 6.4.2 Теоретичні основи процесів охолодження продукції тваринництва

Охолодженням називають процес зниження температури охолоджуваного тіла за допомогою теплообміну з навколишнім середовищем, несупроводжуваний льодоутворенням. Кінцева температура охолоджених продуктів знаходиться зазвичай в межах 0 ... – 4 ° С, таким чином, в середніх шарах охолоджених продуктів температура повинна бути близькою до точки замерзання, але не нижчою її.

Процес охолодження повинен відбуватися якомога швидше для забезпечення ефективного гальмування біохімічних, мікробіологічних та інших змін. Інтенсифікація процесів охолодження сприяє подовженню термінів зберігання, зниження природного убутку харчових продуктів та зменшенню виробничих площ холодильних камер.

На умови охолодження харчових продуктів впливає внутрішня неоднорідність продукту, складність форми, екзотермічність біохімічних процесів в продукті, зміна теплофізичних властивостей, випаровування вологи тощо.

Складність форми м'ясних туш та напівтуш великої рогатої худоби і свиней враховується емпіричними залежностями, що зв'язують масу тіла з його основними розмірами і площею всієї його поверхні [31]

$$\delta = A\sqrt[3]{G}, \quad l = B\sqrt[3]{G}, \quad F = CG + D, \quad (6.12)$$

де  $G$  – маса туші, кг;

$\delta$  - товщина стегна, м;

$l$  – довжина туші, м;

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

$A, B, C$  і  $D$  – емпіричні коефіцієнти, чисельні значення яких можна визначити за таблицею:

Види туш	$A$	$B$	$C$	$D$
Яловича масою 100 ... 300 кг	0,047	0,518	0,017	2,150
Свиняча масою 50 ... 100 кг	0,048	0,480	0,015	1,200
Свиняча масою 50 ... 100 кг	0,044	0,480	0,011	1,600
Бараняча масою 10 ... 30 кг	-	-	0,037	0,636



Характер зміни температур на поверхні тіла і всередині його показаний на діаграмі (рис. 6.16).

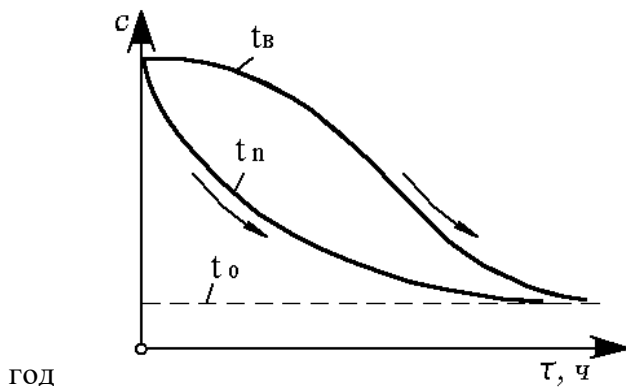


Рисунок 6.16 – Динаміка зміни температури всередині і на поверхні продукту при охолодженні:  $t_o$  – температура середовища, °С;  $t_n$  – температура поверхні продукту, °С;  $t_c$  – температура всередині продукту, °С

Якщо ж врахувати внутрішні тепловиділення продукту та тепловий ефект випаровування – конденсації при охолодженні продуктів, то загальну кількість теплоти при охолодженні продуктів у повітрі можна виразити формулою [30]

$$Q = G[c(t_n - t_c) + q + g(L_k - L_u)], \quad (6.13)$$

де  $q$  – внутрішнє тепловиділення одиниці маси продукту за весь період охолодження, кДж / кг;

$g$  – відносна втрата вологи продуктом (усушка), кг;

$L_k, L_u$  – питома теплота конденсації та випаровування, кДж / кг.

Загальна тривалість охолодження продуктів, год, дорівнює [14]

$$\tau = \frac{1}{m} \ln \frac{t_n - t_o}{t - t_o} + \tau', \quad (6.14)$$

де  $m$  – коефіцієнт пропорційності (темп охолодження), год<sup>-1</sup>;

$t_o$  – температура середовища, °С;

$t_o, t$  – початкова температура продукту в будь-якій точці та температура тієї ж точки за час  $\tau$  від початку регулярного режиму охолодження, °С;  $\tau'$  – тривалість стадії неупорядкованого режиму охолодження продукту, год.

Охолодження м'яса, м'ясних та молочних продуктів здійснюється в основному у повітряному середовищі, оскільки повітря практично не здійснює негативного впливу на оброблювані продукти.

Поширене також охолодження продуктів у рідких середовищах шляхом занурення (консерви) або зрошення (варені ковбасні вироби). Часто перед зануренням в рідкі середовища продукти упаковують у вологонепроникну оболонку для недопущення контакту з водою та розсолами.

Останнім часом починає знаходити практичне застосування охолодження продуктів у регульованій газовій атмосфері (фрукти, овочі, м'ясо та м'ясні продукти), вакуумне охолодження (зелень, овочі, м'ясний

фарш), а також охолодження із застосуванням надлишкового тиску (м'ясо, овочі).

Зазвичай м'ясо і м'ясопродукти охолоджують у повітряному середовищі у одну, дві, три стадії або з програмним керуванням, знижуючи температуру в середніх шарах продукту до 0 °С. Іноді кінцева температура напівтуш в центрі їх стегнової частини складає 4 °С.

Загалом, чим швидше температура продукту буде доведена до рівня, несприятливого для розвитку мікробіологічних та автолітичних процесів, тим краще він буде зберігатися. Крім того, швидке охолодження є економічним, оскільки збільшується коефіцієнт використання холодильних ємностей.

М'ясо та м'ясопродукти охолоджують в камерах охолодження, обладнаних підвісними шляхами чи стелажми. На 1 м підвісного шляху розміщують 2 ... 3 напівтуші великої рогатої худоби або 3 ... 4 свинячих туші. Баранячі тушки розвішують на рамах в один або два яруси по 10 ... 20 тушок. В середньому навантаження на 1 м підвісного шляху становить: для яловичини – близько 280, для свинини – 225, для баранини – 180 кг.

Субпродукти та м'ясні напівфабрикати укладають на листи та розміщують на стелажках. Крім звичайних камер для охолодження м'яса і м'ясопродуктів, застосовують камери тунельного типу, по ширині яких уздовж тунелю розташовані 3 ... 4 підвісні шляхи або два ряди пересувних стелажів [2].

Одностадійне охолодження м'ясних напівтуш здійснюють у повітряному середовищі при температурі 0 °С і нижче (для яловичих напівтуш температура повітря має бути знижена до мінус 2 °С, а для свинячих – до мінус 5 °С), при одночасній примусовій циркуляції середовища зі швидкістю 0,5 ... 0,8, м / с. Тривалість процесу охолодження яловичих та свинячих напівтуш в середньому становить 14 ... 24 год.

Більш поширені способи дво- та тристадійного охолодження, а також програмного охолодження м'ясних напівтуш, які передбачають використання змінних параметрів повітряного середовища. На першій стадії свинячі напівтуші охолоджують у повітряному середовищі при температурі –10 ... –12 °С протягом 1,5 год, на другій стадії – при температурі –5 ... –7 °С протягом 2 год і при доохолодженні (з метою рівномірного розподілення температури за товщиною напівтуш) температура 0 °С підтримується протягом 6 ... 8 год. На першій і другій стадіях швидкість руху повітря становить 1 ... 2 м / с, а при доохолодженні вона не перевищує 0,5 м / с [11].

При охолодженні яловичих напівтуш температуру на першій стадії підтримують не нижче –8 °С, а при доохолодженні – 0 °С. Швидкість руху повітря дорівнює 1 ... 2 м / с, а при охолодженні – не більше 0,5 м / с.

При дво- і тристадійному охолодженні м'ясних напівтуш втрати маси зменшуються на 20 ... 30% внаслідок скорочення тривалості процесу в порівнянні з одностадійним способом охолодження.

При програмному охолодженні яловичі напівтуші спочатку обробляють при температурі  $-4 \dots -5 \text{ }^\circ\text{C}$  і швидкості руху повітряного середовища  $4 \dots 5 \text{ м/с}$ , а потім при змінній або постійній температурі ( $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) та швидкості руху, що змінюється за заданою програмою від початкової до  $0,5 \text{ м/с}$ .

Відомий спосіб охолодження м'ясних напівтуш у повітряному середовищі, перенасиченому водяною парою. При цьому повітря, що подається до камери охолодження, змішується з внутрішнім середовищем, утворюючи туман. Крапельки вологи при зіткненні з теплою поверхнею напівтуш випаровуються. Коефіцієнт тепловіддачі зростає у  $2 \dots 3$  рази внаслідок використання ефекту випарного охолодження поверхні м'ясних напівтуш. Досягається скорочення тривалості процесу на  $6 \dots 8$  год в порівнянні з одностадійним охолодженням, а втрати маси зменшуються на  $0,5 \dots 0,6\%$ .

Застосовується також спосіб охолодження м'яса і м'ясопродуктів під надлишковим тиском охолодженого повітря. Під час його реалізації температуру повітря підтримують у межах  $0 \dots 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , а надлишковий тиск – на рівні  $0,10 \dots 0,35 \text{ МПа}$ . Встановлено, що при охолодженні м'яса, м'ясних та інших продуктів під надлишковим тиском охолодженого повітря в зазначених межах втрати їх маси зменшуються до  $40\%$  і більше.

Варені ковбаси, сосиски та сардельки охолоджують в дві стадії. Першу стадію обробки проводять за допомогою тонко розпорошеної водопровідної води з використанням випарного ефекту охолодження, другу – повітряним потоком, що інтенсивно рухається і має температуру  $0 \dots 8 \text{ }^\circ\text{C}$  за швидкості руху до  $4 \text{ м/с}$ . Температура продукту до охолодження  $65 \dots 70 \text{ }^\circ\text{C}$ , після охолодження водою –  $40 \dots 45 \text{ }^\circ\text{C}$ , після охолодження повітрям –  $8 \dots 15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Тривалість охолодження продукту водою дорівнює  $5 \dots 30$  хв, повітрям –  $1 \dots 10$  год і залежить від діаметра ковбасних батонів, виду ковбас та параметрів охолоджувального середовища. Варено-копчені ковбаси охолоджують тільки повітрям при температурі  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  і швидкості руху до  $2 \text{ м/с}$ . Кінцева температура охолоджених варено-копчених ковбас становить  $35 \dots 45 \text{ }^\circ\text{C}$  і залежить від режиму подальшої обробки [14].

Пастеризовані м'ясні консерви охолоджують водою, а далі в умовах інтенсивної циркуляції повітря при температурі  $0 \dots 2 \text{ }^\circ\text{C}$  та швидкості руху до  $3 \text{ м/с}$ . Кінцева температура охолоджених консервів повинна бути не вищою  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ . При цьому тривалість процесу охолодження не перевищує  $24$  год [11].

Для інтенсифікації процесу охолодження розроблена система струменевої подачі холодного повітря на напівтуші з таким розрахунком, щоб найбільш низька температура (близько  $-5 \dots -8 \text{ }^\circ\text{C}$ ) і найбільша швидкість руху повітря (до  $3,5 \text{ м/с}$ ) підтримувалися поблизу найбільш товстої частини напівтуші – стегна. Тривалість охолодження при цьому знижується приблизно в  $2 \dots 2,5$  рази, а природні втрати ваги м'яса

зменшуються в середньому в порівнянні зі звичайним способом на 25 ... 30%.

Для того щоб зберегти охолоджене м'ясо без значних змін більше 8 ... 10 діб або навіть збільшити ці терміни вдвічі, доцільно підморожувати зовнішній шар м'яса до  $-4 \dots -5$  °С зі збереженням у середніх шарах температури  $0 \dots 1$  °С. Підвищення швидкості руху та ступеня сухості повітря сприяє збільшенню втрат маси, які також зростають залежно від тривалості процесу охолодження.

#### 6.4.3 Теоретичні основи процесів заморожування продукції тваринництва

Заморожування харчових продуктів – це процес повного або часткового перетворення у лід вологи, що в них міститься в результаті відведення теплоти при зниженні температури нижче криоскопічної.

При заморожуванні зберігаються корисні властивості та якості харчових продуктів, зводяться до мінімуму фізичні, біохімічні та мікробіологічні зміни, які відбуваються в продукті, за рахунок зниження його температури та перетворенню більшої частини води у лід. При цьому сповільнюється ріст і життєдіяльність багатьох мікроорганізмів. Хімічні реакції також сповільнюються при зниженні температури, однак вони продовжують протікати навіть при дуже низьких температурах зберігання.

Заморожування застосовують, якщо необхідно зберегти продукти протягом більш тривалого часу, ніж це можливо для охолоджених продуктів, а також для підготовки їх до тривалого зберігання. При льодоутворенні дифузне переміщення розчинних у воді речовин припиняється, отже, припиняється харчування мікроорганізмів та протікання біохімічних реакцій.

Сукупність двох явищ, що протікають спільно – льодоутворення та зниження температури – в основному визначає фізичну картину заморожування харчових продуктів [2].

Динаміка змін співвідношення між кількістю вимороженої води та її повним вмістом у продукті під час заморожування є головним фактором, що визначає інтенсивність процесу заморожування. Воду, перетворену у харчових продуктах на лід, називають вимороженою. Про її кількість судять за величиною  $\omega$ , що представляє собою відношення вологи, перетвореної на лід, до всієї її кількості (в рідкому та твердому станах), що міститься у продукті при даній температурі

$$\omega = \frac{G_l}{G_l + G_\omega}, \quad (6.15)$$

де  $G_l$  – маса вологи, перетвореної в лід, кг;

$G_\omega$  – маса незамороженої вологи, що міститься в харчовому продукті, кг.

До початку заморожування масова частка вимороженої води дорівнює нулю ( $\omega = 0$ ), при евтектичній температурі кількість її досягає 100% ( $\omega = 1$ ). Для проміжних температур  $\omega$  визначається за формулою, виведеною Г.Б. Чижовим [14]

$$\omega = \frac{A_\omega}{1 + \frac{B_\omega}{\lg [t + (1 - t_3)]}}, \quad (6.16)$$

де  $A_\omega$  та  $B_\omega$  – постійні, числові значення яких дорівнюють відповідно 11,05 і 0,31;

$t$  – температура, для якої визначається кількість вимороженої води, °С;

$t_3$  – точка замерзання даного продукту, °С.

Значення  $t$  та  $t_3$  підставляють у формулу в абсолютному числовому вираженні, тобто якщо температура від’ємна, то вона береться без знака мінус. Точка замерзання багатьох харчових продуктів, наприклад, м’яса, риби, молока, яєць і деяких інших, близька до мінус 1 °С. Тому для цих продуктів формулу (6.16) застосовують в такому спрощеному вигляді:

$$\omega = A_\omega / \left( 1 + \frac{B_\omega}{\lg t} \right). \quad (6.17)$$

За формулою Рауля-Чижова [14]

$$\omega_e = 1 - \frac{t_{kp}}{t_e}, \quad (6.18)$$

де  $\omega_e$  – відносний вміст води, вимороженої при температурі  $t_e$ ;

$t_e$  – середня кінцева температура продукту, °С.

Масова частка вимороженої води є тільки функцією температури та властивостей продукту і не залежить від способу, швидкості та умов заморожування.

Середню кінцеву температуру продукту, °С, можна розрахувати за формулами, отриманими Алямовським [14]:

для пластини

$$t_{cp} = \frac{2t_c + t_s}{2}, \quad (6.19)$$

циліндра

$$t_{cp} = \frac{t_c + t_s}{2}, \quad (6.20)$$

сфери

$$t_{cp} = \frac{2t_c + 3t_s}{5}, \quad (6.21)$$

де  $t_c$  – температура в термічному центрі тіла, °С;

$t_s$  – температура на поверхні тіла, °С.

Отже, масова частка вимороженої води залежить не від тривалості процесу, а тільки від кінцевої температури продукту (рис. 6.17) [14].

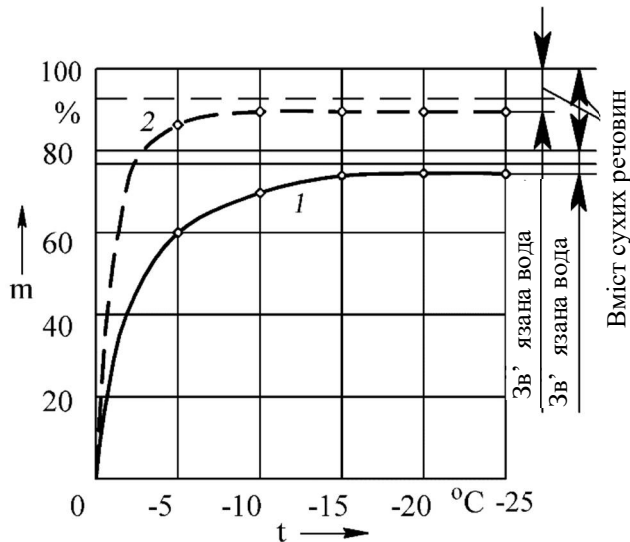


Рисунок 6.17 – Залежність кількості вимороженої води від температури: 1 – в яловичині; 2 – в шпинаті

циркулює;

- флюїдизаційні та флюїдизаційно-стрічкові морозильні апарати, в яких продукт заморожується в охолоджувальній рідині;

- імерсійні холодильні апарати, в яких продукт, попередньо упакований в полімерну плівку, заморожується у псевдозрідженому шарі, створюваним потоком охолоджувальної рідини;

- морозильні апарати для заморожування напіврідких продуктів у рідкому азоті або фреоні.

Морозильні апарати з примусовою циркуляцією повітря є найбільш поширеними. Їх переваги: простота конструкції, легкість експлуатації, універсальність застосування, а також великі можливості пристосування розмірів морозильника до умов холодильника. Цикл заморожування залежить від типу тунельних апаратів, розмірів продуктів, що заморожуються, виду упаковки та температури випаровування. Тривалість циклу коливається від 2 год для розфасованих продуктів до 12 ... 18 год для м'яса в напівтушах і до 24 ... 40 год для птиці в коробках. Однак термодинамічні та технологічні показники у них набагато гірші, ніж у інших типів морозильних апаратів: питомі витрати енергії є відносно високими,

#### 6.4.4 Основні типи морозильних апаратів

Класифікація морозильних апаратів. Для заморожування харчових продуктів застосовують такі види морозильних апаратів:

- апарати з примусовою циркуляцією повітря: тунельні і спеціальні апарати;

- контактні морозильні апарати, в яких продукт заморожується між порожніми металевими плитами, охолоджуваними киплячим в них холодильним агентом або холодним розсоллом, що

необхідна також дуже низька температура випаровування холодоагенту ( $-40 \dots -45^\circ \text{C}$ ) [11].

Тунельний візковий апарат являє собою теплоізолюваний корпус 3, всередині якого знаходяться аміачні ребристі батареї 5, змонтовані трьома групами (рис. 6.18). Між окремими групами батарей утворюються два тунелі 4 для розміщення продуктів, що заморожуються. Продукти в листах встановлюють в кілька ярусів на спеціальні візки і ввозять в тунелі 4. Кожен тунель розрахований на три візки розмірами  $1070 \times 780 \times 1645$  мм. На одному візку розміщують 26 листів розмірами  $750 \times 480 \times 60$  мм. Ввозять візки в тунель з одного боку, а вивозять з іншого.

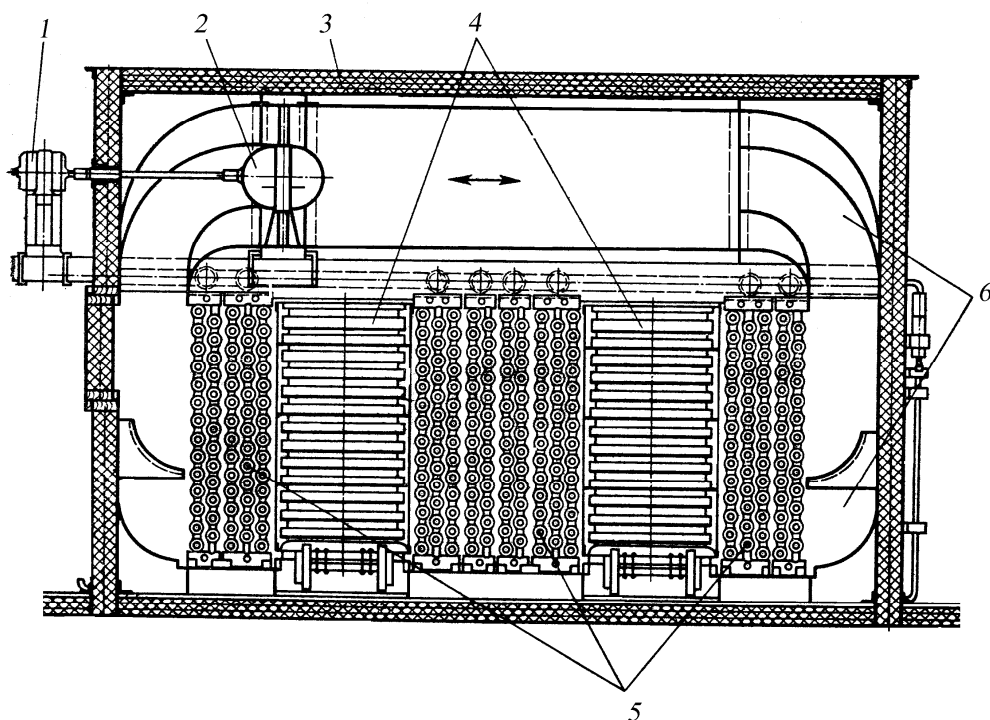


Рисунок 6.18 – Тунельний візковий морозильний апарат: 1 – електродвигун вентилятора; 2 – реверсивний вентилятор; 3 – теплоізолюваний корпус; 4 – тунелі з розміщеними візками; 5 – охолоджувальні батареї; 6 – канали для повітря

У верхній частині апарату змонтовані три вентилятора 2 реверсивної дії, оснащені виносними електродвигунами 1 потужністю по 2,8 кВт. До вентиляторів приєднані циліндричні канали 6 такого ж діаметру, як їх колеса. Під час роботи апарату по цих каналах циркулює повітря, що продувається вентилятором через батареї та візки із замороженими продуктами. Батареї обдуваються повітрям поперек труб. При цьому оборотність вентиляторів дозволяє періодично змінювати напрямок руху повітря. Завдяки цьому усувається нерівномірне покриття охолоджувальних батарей сніговою шубою, у зв'язку із цим її можна рідше видаляти.

Практично очищення апаратів від снігової шуби здійснюють один раз на тиждень. Відтаюють сніг гарячими парами аміаку у продовж не більше ніж 40 хв [11].

Під час заморожування продуктів температура повітря в апараті підтримується близько мінус 30 ° С. Середня швидкість повітря в живому перерізі тунелів, заповнених візками з продуктами, становить 4 ... 5 м / с.

Тунельні візкові апарати застосовують для заморожування різноманітних продуктів в рибної, м'ясний, птахопереробної, консервної та інших галузях промисловості.

Швидкоморозильні апарати з інтенсивним рухом повітря візкового типу поряд з перевагами мають і недоліки. Найбільш істотний з них – велика трудомісткість робіт із завантаження апарату продуктами та вивантаження їх з нього. Більш досконаліми в цьому відношенні є конвеєрні апарати.

Стрічково-спіральный морозильний апарат «Жиро-Фриз» (фірма «Фрігоскандія») представлений на рис. 6.19. Навколо циліндра 1 діаметром 2 ... 4 м змонтована спіраль з двох стрічок 3, розташованих паралельно в горизонтальній площині на відстані 300 ... 900 мм в залежності від ширини стрічки (рис. 6.20).

На верхню кромку стрічок встановлена спеціальна накладка з тефлону з низьким коефіцієнтом тертя. З цієї траєкторії 2 ковзає стрічка 3 з продуктом. Циліндр 1 виготовлений з листового заліза товщиною 3 ... 5 мм (в залежності від діаметра циліндра). Кожух циліндра додатково покритий тефлоновими листами. У перших конструкціях апаратів циліндр був змонтований на двох підшипниках - верхньому і нижньому. В останніх конструкціях циліндр спочиває на одному верхньому підшипнику (в середині циліндра), а нижня частина циліндра центрируется системою, що складається з трьох роликів, що пересуваються по борту циліндра [2].

Частота обертання циліндра 0,20 ... 0,15 хв-1. Привід циліндра здійснюється двома способами: за допомогою гідравлічного двигуна 9, сполученого з насосом змінної продуктивності, або за допомогою трифазного регульованого електродвигуна. Зміни довжини стрічки (близько 150 мм), обумовлені коливаннями температури, усуваються натяжна системою 5 з рухомим роликом, навантаженим противагою. Крім цього, в системі передбачений спеціальний поворотний ролик 4 для перевертання стрічки після кожного циклу з метою досягнення однаковою мірою зносу обох сторін стрічки і привід 6.

Механізм пересування стрічки працює наступним чином (рис. 6.20). Приводним елементом є кожух циліндра, що взаємодіє з внутрішньою кромкою стрічки. Стрічка 3 з продуктом приводиться в рух по напрямних спіралі за допомогою натяжного механізму 5. Автоматично підтримується такий натяг стрічки, при якому сила тертя між її кромкою та кожухом циліндра перевищує опір руху стрічки. Продукт, навантажений на стрічку на ділянці завантаження, переміщається уздовж всіх спіралей до місця вивантаження, де падає зі стрічки в приймальний бункер. Повітря нагнітається вентилятором 8 в охолоджувач 7. Холодним повітрям здійснюється охолодження продукту. Стрічка направляється через натягну



систему, перекидний пристрій та мийну установку 11 до ділянки завантаження. Управління роботою апарату здійснюється з пульта 10 [14].

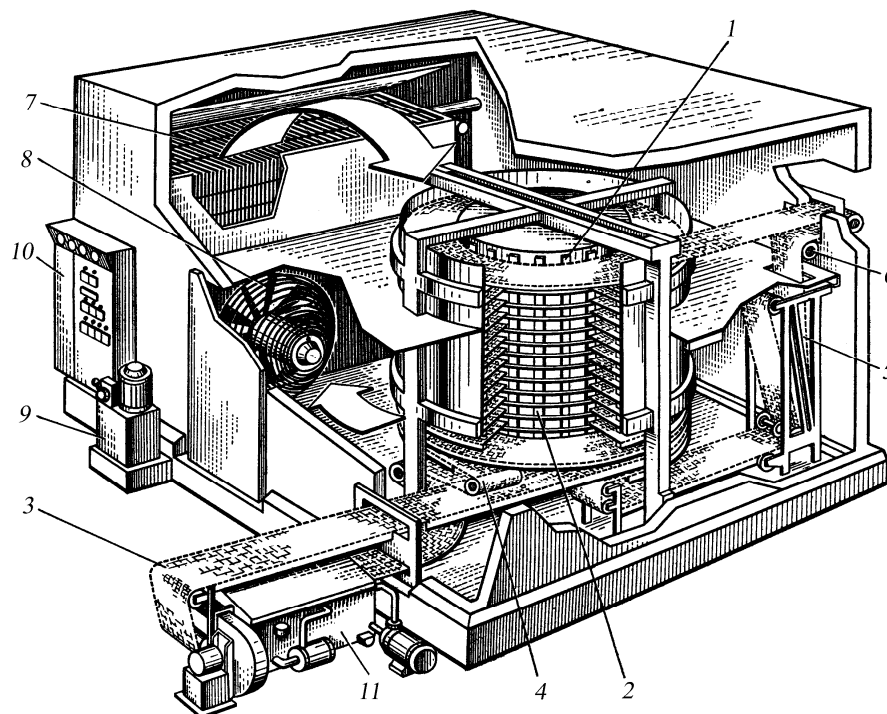


Рисунок 6.19 – Стрічково-спіральний морозильний апарат «Жиро-Фриз» (фірма «Фрігоскандія»): 1 – приводний циліндр; 2 – траєкторія руху стрічки; 3 – стрічка; 4 – ролик для перевертання стрічки; 5 – натяжна система; 6 – привод для натягування стрічки; 7 – охолоджувач; 8 – вентилятори; 9 – гідравлічний агрегат; 10 – пульт управління; 11 – установка для миття стрічки

В системі флюїдизаційного заморожування неможливо уникнути міграції цих частинок; вони проникають в усі щілини апарату. Цього недоліку позбавлений тунельний апарат «Фло-Фриз-W» (фірми «Фрігоскандія») з безперервним видаленням снігової шуби водою (рис. 6.21) в окремих секціях випарника (на цьому етапі дана секція закривається кришками, що приводяться в рух гідравлічними серводвигунами). До складу тунельного апарату входять охолоджувачі 1, охолоджувач видалення снігової шуби 2, флюїдизаційний жолоб 3 та збірник 4 води з насосом для видалення снігової шуби [14].

Флюїдизаційний жолоб 3 виконаний у вигляді ванни з перфорованим дном. Три бокові стінки її мають висоту близько 0,5 м, четверта, на виході має вигляд похилого порога зі змінною висотою – 0,1 ... 0,3 м [14].

Висота цього порога визначає товщину шару продукту у ванні в результаті «переливання» його надлишку. Дно ванни виготовлено у вигляді подвійного сита. Верхнє сито (рухоме) має однакову перфорацію по всій поверхні, а нижнє (нерухоме) має диференційовану за розмірами перфорацію, що забезпечує для кожної зони заморожування достатню силу

продування повітря. Піддув є найсильнішим на вході, на ділянці, де засипають сировину, далі зменшується і підтримується на постійному рівні до самого виходу, де він знову різко збільшується. Піддув повітря створюється відцентровими вентиляторами, які установлюють в кількості від 4 до 6 шт. Характерним для цих тунелів є відносно мала кількість повітря в замкненому циклі та високе значення ступеня стискання, що забезпечується вентиляторами. Найбільш придатними виявляються радіальні вентилятори.

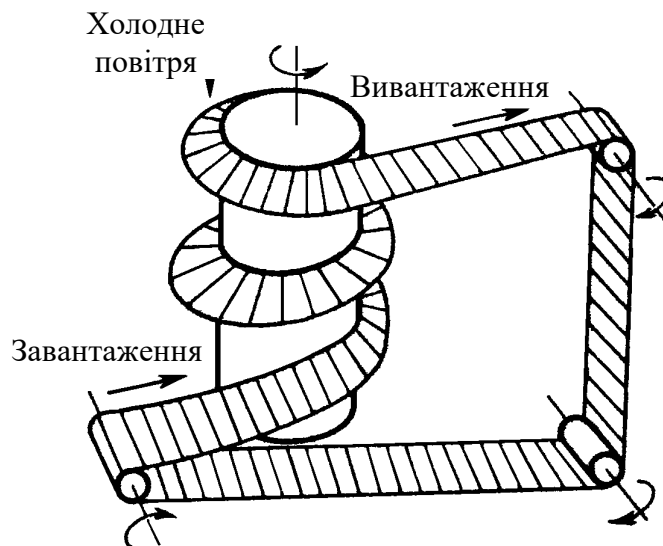


Рисунок 6.20 – Схема руху спірального конвеєра морозильного апарату «Жиро-Фриз» (фірма «Фрігоскандія»)

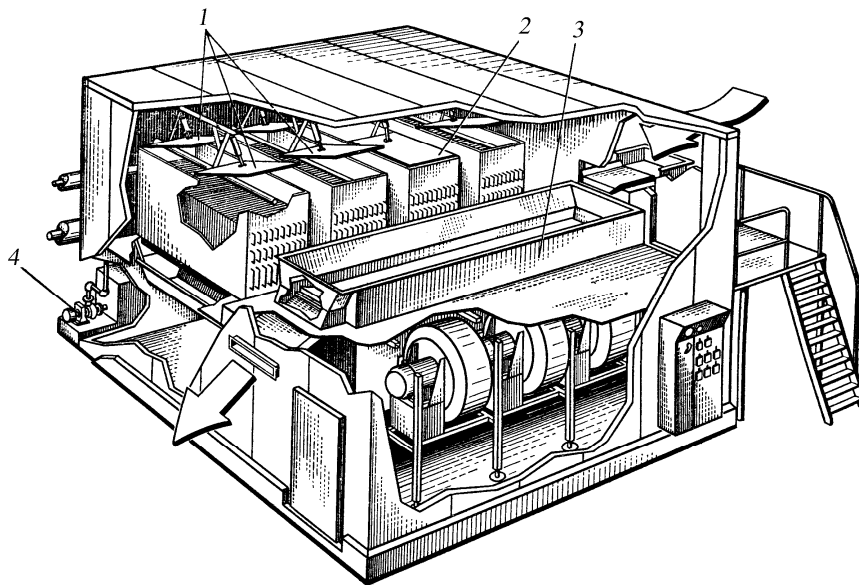


Рисунок 6.21 – Тунельний апарат «Фло-фриз-В» (фірма «Фрігоскандія») з безперервним видаленням снігової шуби: 1 – охолоджувачі; 2 – охолоджувач для видалення снігової шуби (кришки закриті); 3 – флюїдизаційний жолоб; 4 – збірник води з насосом для видалення снігової шуби

Кількість повітря, що циркулює в системі є в 4 рази меншою, ніж у флюїдизаційно-конвеєрному тунельному апараті такої самої продуктивності, а ступінь стиснення вищий приблизно в 1,7 рази.

Останнім часом імерсійні морозильні апарати знаходять широке застосування у зв'язку із розвитком сучасної техніки упаковки, особливо вакуумної. При застосуванні пакувальних матеріалів з полімерних плівок абсолютно герметичних і таких, що щільно прилягають до продукту, який заморожується, умови теплообміну погіршуються незначно. У той же час можна вибрати охолоджувальне середовище і підтримувати належні санітарно-гігієнічні умови.

В результаті інтенсивних процесів теплообміну між середовищами, що охолоджує і заморожується, (за високих значень коефіцієнта теплообміну) досягається відносно невелика тривалість заморожування при температурах випаровування холодоагенту мінус 20 °С, що створюється при роботі одноступінчастої холодильної установки.

Імерсійні морозильні апарати мають такі недоліки: заморожені продукти, які перебувають тривалий час в розчині повареної солі, втрачають товарний вигляд і набувають солоного смаку; сіль викликає посилену корозію установки; важко підтримувати відповідні санітарно-гігієнічні умови процесу; застосування інших розчинів (гліколю, метанолу) в даний час заборонено [14].

## ЗАКЛЮЧЕННЯ

У даному посібнику розглянуті лише самі основні загальні відомості про обладнання цехів переробки продукції тваринництва: класифікації, найбільш поширені схеми, залежності для визначення деяких робочих та конструктивних параметрів.

Але на даний момент накопичений значно більш значний обсяг інформації про дане обладнання, створений складний науковий апарат для його дослідження та удосконалення.

В останні десятиліття спостерігається значний прогрес у галузі харчових та переробних виробництв, в тому числі удосконалюються технології та обладнання для цехів переробки продукції тваринництва. Не рідкістю є використання в галузі техніки високих тиску та вакууму, глибокого охолодження, ультразвуку, струмів надвисокої частоти, мембранного розділення, вібраційного та віброударного навантаження. Все це висуває необхідність наукового підходу до розв'язання різноманітних проблем, пов'язаних з виробництвом харчових продуктів. Ці завдання успішно вирішуються на базі даних науки про обладнання цехів переробки продукції тваринництва.

Даний курс є спеціальним перехідним курсом від загальноінженерного циклу дисциплін до спеціального для інженерів технологів харчових підприємств. Завдання курсу полягає в тому, щоб ознайомити студентів з тими процесами та апаратами, які є найбільш важливими для цехів перероблення продукції тваринництва.

Сучасні знання про процеси та апарати спираються на міцний фундамент базисних дисциплін: хімії, біології, математики, гідравліки, механіки, теплотехніки, електротехніки. Проте як наука, вчення про обладнання цехів перероблення продукції тваринництва має свій чітко окреслений предмет, свої експериментальні та розрахункові методи, а також теоретичні закономірності.

Будь-який технологічний процес, не дивлячись на різницю методів, становить низку взаємопов'язаних типових технологічних стадій, які відбуваються в апаратах певного класу. Але високі вимоги до якості продукції та ефективності виробництва визначили специфіку, яка відрізняє ці технологічні стадії одержання харчових продуктів та апаратурно-технологічне забезпечення від подібних процесів у інших галузях економіки держави.

Процеси цехів переробки продукції тваринництва переважно складні та часто поєднують у собі гідродинамічні, теплові, масообмінні, біохімічні та механічні процеси. Курс є теоретичною основою харчової технології, яка дозволяє проаналізувати та розрахувати процес, визначити оптимальні параметри, розробити та розрахувати апаратуру для його здійснення.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Антипов С.Т. Машины и аппараты пищевых производств. В 2 кн. Кн. 1: Учеб. для вузов / С. Т. Антипов, И.Т. Кретов, А. Н. Остриков и др.; Под ред. акад. РАСХН В. А. Панфилова. – М.: Высш. шк., 2001. – 703 с.
2. Антипов С.Т. Машины и аппараты пищевых производств. В 2 кн. Кн. 2: Учеб. для вузов / С. Т. Антипов, И.Т. Кретов, А. Н. Остриков и др.; Под ред. акад. РАСХН В. А. Панфилова. – М.: Высш. шк., 2001. – 680 с.
3. Берник І. М. Методичні вказівки до виконання курсового проекту для студентів напрямку підготовки: 6.051701 – Харчові технології та інженерія з дисципліни «Процеси та апарати харчових виробництв»: / ВНАУ; уклад. І.М. Берник. – Вінниця: ВНАУ, 2017. – 34 с.
4. Берник І.М., Зозуляк О.В. Методичні вказівки для виконання практичних робіт та самостійної роботи з дисципліни «Процеси та апарати харчових виробництв» для студентів напряму підготовки 6.051701 «Харчові технології та інженерія» заочної форми навчання. – Вінниця: 2017. – 47 с.
5. Берник І.М., Зозуляк О.В., Зозуляк І.А. Методичні вказівки для виконання лабораторних з дисципліни «Процеси та апарати харчових виробництв» для студентів напряму підготовки 6.051701 «Харчові технології та інженерія» денної форми навчання. – Вінниця: 2017. – 106 с.
6. Берник П.С. Механічні процеси і обладнання переробного сільськогосподарського виробництва: Навч. посібник / П.С. Берник, З.А. Стоцько, І.П. Паламарчук, В.В.Яськов, І.А.Зозуляк. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 336 с.
7. Гунько І. В. Дослідження напрямків удосконалення пластинчастих теплообмінників / І. В. Гунько, І. В. Севостьянов, Ю. Т. Орлюк // Техніка, енергетика, транспорт АПК, 2019. - №2 (105). – С. 59 – 65.
8. Іскович-Лотоцький Р. Д. Обґрунтування ефективності застосування віброударних та вібраційних процесів в харчовій переробній промисловості/ Іскович-Лотоцький Р. Д., Поліщук О. В., Севостьянов І. В. // Вібрації в техніці та технологіях, 2008. – №3. – С. 78 – 82.
9. Іскович-Лотоцький Р. Д. Процеси та машини вібраційних і віброударних технологій. Монографія/ Іскович-Лотоцький Р. Д., Обертюх Р. Р., Севостьянов І. В. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2006. – 291 с.
10. Купчук І.М. Компромісна оптимізація режимних параметрів процесу подрібнення зернової сировини при виробництві етилового спирту / І.М. Купчук // Вібрації в техніці та технологіях. – 2017. - №4(87). – С.91-100
11. Малезик І. Ф. Процеси і апарати харчових виробництв: підручник / за ред. проф. І. Ф. Малезика. — К.: НУХТ, 2003. — 400 с.
12. Омелянов О.М. Аналіз приводних механізмів сепаратора комбікормів» / О.М. Омелянов // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях», 2017. - Випуск №2(85). - С. 123 - 128.

13. Остриков А. Н. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник для вузов. В 2 кн. Кн. I / А. Н. Остриков [и др.]. — СПб: ГИОРД, 2007. — 704 с.

14. Остриков А. Н. Процессы и аппараты пищевых производств: учебник для вузов. В 2 кн. Кн. II / А. Н. Остриков [и др.]. — СПб: ГИОРД, 2007. — 608 с.

15. Паламарчук І.П. Теплообмінні процеси та обладнання переробного та харчового виробництва. Навчальний посібник / І.П. Паламарчук, П.С. Берник, З.А. Стоцько, В.В. Яськов, І.А. Зозуляк – Львів: Видавництво «Бескид Біт», 2006. – 368 с.

16. Севостьянов І. В. Процессы и оборудование для виброударного разделения пищевых отходов. Монография/ И. В. Севостьянов. - Saarbrücken: LAV LAMBERT Academic Publishing, 2013. - 417 с.

17. Севостьянов И. В. Теоретические исследования процессов потокового виброударного фильтрования влажных дисперсных сред в пищевой промышленности/ И. В. Севостьянов, Я. В. Иванчук// MOTROL commission of motorization and energetics in agriculture. – Lublin, 2013. – Vol. 15/ - No. 4. – P. 90 – 96.

18. Севостьянов І. В. Високоєфективні технологічні комплекси для зневоднення та фільтрування дисперсних харчових відходів/ І. В. Севостьянов // Технологический аудит и резервы производства, 2013. - №3/2(11). - С. 14 – 19.

19. Севостьянов І. В. Експериментальні дослідження процесів потокового віброударного фільтрування вологих дисперсних матеріалів/ Севостьянов І. В., Іскович-Лотоцький Р. Д., Любин В.С. // Промислова гідраліка та пневматика, 2010. – №4. – С. 89 – 92.

20. Севостьянов І. В. Експлуатація та обслуговування машин. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2006. – 127 с.

21. Севостьянов И. В. Методика расчета параметров гидроимпульсной установки для потокового виброударного фильтрования дисперсных пищевых отходов/ И. В. Севостьянов// Вісник національного технічного університету «ХП», 2013. - №26. - С. 164 – 169.

22. Севостьянов І. В. Моделювання гідроімпульсної установки для потокового віброударного очищення вологих дисперсних матеріалів/ Севостьянов І. В., Іскович-Лотоцький Р. Д., Любин В. С.// Промислова гідраліка і пневматика, 2012. – №2 (36). – С. 10 – 15.

23. Севостьянов І. В. Моделювання процесів потокового віброударного фільтрування вологих дисперсних матеріалів/ Севостьянов І. В., Іскович-Лотоцький Р. Д., Любин В.С. // Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету. Серія: Технічні науки, 2010. – Випуск 4. – С. 13 – 23.

24. Севостьянов І. В. Обладнання для високоєфективного очищення стічних вод на підприємствах АПК / І. В. Севостьянов, А. В. Грицун, І. А. Бабін // Техніка, енергетика, транспорт АПК, 2019. - №1 (104). – С. 29 – 39.

25. Севостьянов І. В. Підвищення ефективності роботи машин для розмелювання дисперсних матеріалів/ І. В. Севостьянов, Р. Д. Іскович-Лотоцький// Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2008. – №3. – С. 88 – 93.

26. Севостьянов І. В. Підвищення продуктивного потенціалу земель за рахунок удосконалення технології та обладнання для розчинення мінеральних речовин у біологічних добривах / І. В. Севостьянов // Техніка, енергетика, транспорт АПК, 2019. - №3 (106). – С. 26 – 34.

27. Севостьянов І. В. Теоретичні основи процесів фільтрування вологих дисперсних матеріалів під впливом ударних хвиль напруг та деформацій / Севостьянов І. В., Іскович-Лотоцький Р. Д., Обертюх Р. Р. // Промислова гідравліка та пневматика. – №2, 2008. – С. 40 – 43.

28. Севостьянов І. В. Теорія технічних систем : підручник [Рекомендовано МОНУ]/ І. В. Севостьянов. - Вінниця : ВНТУ, 2014. - 181 с. - ISBN 978-966-641-592-2.

29. Солоня О.В. Обґрунтування параметрів поєднаних процесів мікронізації і подрібнення із застосуванням вібраційних технологій при переробці зерна на корм /. О.В. Солоня, Б.І. Котов, А.В. Спірін, Р.А. Калініченко // Вібрації в техніці та технологіях. – Вінниця, 2016. – №3(83) – с. 213 - 217.

30. Черевко О. І. Процеси і апарати харчових виробництв: підручник / О. І. Черевко, А. М. Поперечний. — 2-е видання, доп. та випр. — Х.: Світ Книг, 2014. — 495 с.

31. Черевко О. І. Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум: навч. Посібник / О. І. Черевко [та ін.]; Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. — Х.: Світ Книг, 2013. — 168 с.

32. Sevostyanov I. The analysis of methods and the equipment for clearing of the damp disperse waste of food productions / I. Sevostyanov // Tehnomus. New technologies and products in machine manufacturing technologies, 2013. – No. 20. – P. 44 – 49.

Навчальне видання

**І. В. Севостьянов,**

**І. А. Зозуляк**

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ЦЕХІВ  
ПЕРЕБКИ ПРОДУКЦІЇ ТВАРИННИЦТВА**

**Навчальний посібник**

Викладено в авторській редакції

Підписано до друку 29.04.2020. Формат 60x84/16  
Папір офсетний. Друк лазерний  
Ум. друк. арк.7,38. Тираж 100 прим. Зам. №267

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі  
Вінницького національного аграрного університету  
м. Вінниця, вул. Сонячна,3, 21008  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців,  
виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції  
ДК № 5009 від 10.11.2015