

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Донецький національний університет економіки і торгівлі  
імені Михайла Туган-Барановського

Кафедра загальноінженерних дисциплін та обладнання

**О.В. Омельченко, Л.О. Цвіркун, В.В. Перекрест**

## **ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ**

**Навчальний посібник**

Кривий Ріг  
2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Донецький національний університет економіки і торгівлі  
імені Михайла Туган-Барановського

Кафедра загальноінженерних дисциплін та обладнання

**О.В. Омельченко, Л.О. Цвіркун, В.В. Перекрест**

## **ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ**

### **Навчальний посібник**

Затверджено на засіданні  
кафедри загальноінженерних  
дисциплін та обладнання  
Протокол № 7  
від «30» березня 2023 р.

Рекомендовано навчально-  
методичною радою ДонНУЕТ  
Протокол №8  
від «27» квітня 2023 р.

Кривий Ріг  
2023

Рекомендовано до видання Вченою радою Донецького національного університету економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського (протокол № \_\_ від \_\_ 2023 р.).

**Рецензенти:**

Хорольський В. П., д.т.н., професор кафедри загальноінженерних дисциплін та обладнання Донецького національного університету економіки та торгівлі ім. М. Туган-Барановського.

Андрусевич А.О., д.т.н., професор, начальник ВСП «Криворізький фаховий коледж НАУ.

Попов С.О., д.т.н., професор кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій Криворізького національного університету.

**Омельченко О.В., Цвіркун Л.О., Перекрест В.В.**

**О 46** Омельченко О.В., Цвіркун Л.О., Перекрест В.В. Процеси і апарати харчових виробництв: навч. посіб. Кривий Ріг: ДонНУЕТ, 2023. 133 с.

Пропонований навчальний посібник призначений для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» у процесі вивчення дисципліни «Процеси і апарати харчових виробництв». Навчальний посібник містить короткі теоретичні відомості з кожної теми, приклади розв'язування завдань, задачі для самостійного розв'язування, тестові завдання, що забезпечує ґрунтовне оволодіння навчальним матеріалом. Пояснення закономірностей процесу розв'язування задач дозволяє простежити теоретичні та практичні етапи виконання. Усвідомлення студентами мети та послідовності розв'язування запропонованої задачі сприятиме розвитку логічного мислення, професійних умінь, без яких неможлива подальша професійна діяльність. Наявність контрольних запитань із кожної теми надає студентам змогу самостійного контролю рівня засвоєння навчального матеріалу. Наведено список рекомендованої літератури.

**УДК 664-93(072)**

© Омельченко О.В., Цвіркун Л.О.,  
Перекрест В.В., 2023

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b>	7
<b>РОЗДІЛ I. ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ</b>	10
<b>Тема 1. Загальний огляд процесів і апаратів</b>	10
1.1 Загальні відомості про процеси і апарати	10
1.2 Конструкційні матеріали	10
1.3 Класифікація апаратів харчових виробництв	11
1.4 Класифікація технологічних процесів	12
<b>Тема 2. Моделювання процесів і апаратів. Критерії подібності</b>	13
2.1 Методи моделювання	13
2.2 Критерії подібності	14
2.3 Приклади розв'язування завдань	14
2.4 Завдання для самостійної роботи	17
<b>Тема 3. Охолодження: основи процесу</b>	19
3.1 Охолодження	19
3.2 Процес заморожування	20
3.3 Холодильні машини та агрегати в харчовій промисловості	21
3.4. Приклади розв'язування завдання	22
3.5 Завдання для самостійної роботи	27
<b>Тема 4. Основи теорії теплових процесів. Нагрівання. Випаровування. Кипіння</b>	30
4.1 Нагрівання	30
4.2 Випаровування	31
4.3 Кипіння	31
4.4 Завдання для самостійної роботи	32
<b>Тема 5. Випарювання: теорія процесу, конструкції випарних апаратів</b>	33
5.1. Загальна характеристика процесу випарювання	33
5.2 Конструкції випарних апаратів	34
5.3 Приклади розв'язування завдання	36
5.4. Завдання для самостійної роботи	38
<b>Тема 6. Теплообмінні апарати: класифікація, конструктивне оформлення, розрахунок</b>	41
6.1 Класифікація поверхневих теплообмінних апаратів	41
6.2 Конструкції теплообмінних апаратів	43
6.3 Приклади розв'язування завдання	45

6.4 Завдання для самостійного виконання	52
<b>Тема 7. Конденсація: типові конструкції конденсаторів та основи розрахунку</b>	<b>55</b>
7.1 Конденсація	55
7.2 Типові конструкції конденсаторів	55
7.3 Приклади розв'язування завдань	56
7.4. Завдання для самостійного виконання	60
<b>РОЗДІЛ 2. МАСООБМІННІ ПРОЦЕСИ</b>	<b>61</b>
<b>Тема 8. Основи процесу ректифікації. Ректифікаційні колони</b>	<b>61</b>
8.1 Ректифікація	61
8.2 Принцип дії ректифікаційної установки	61
8.3 Схеми ректифікаційних установок	62
8.4 Приклади розв'язування завдання	64
8.5 Завдання для самостійного виконання	67
<b>Тема 9. Електрофізичні методи обробки харчових продуктів: інфрачервоний нагрів</b>	<b>69</b>
9.1 Інфрачервоне випромінювання	69
9.2 Теплова обробка продуктів у електромагнітному полі НВЧ	70
9.3 Приклади розв'язування завдань	71
9.4. Завдання для самостійної роботи	72
<b>Тема 10. Електрофізичні методи обробки харчових продуктів: індукційний нагрів</b>	<b>74</b>
10.1 Обробка харчових продуктів у електростатичному полі	74
10.2 Приклади розв'язування завдань	75
10.3 Завдання для самостійного виконання	80
<b>Тема 11. Теоретичні основи масообмінних процесів</b>	<b>81</b>
11.1 Загальна характеристика масообмінних процесів	81
11.2. Масовіддача, масопередача, масопровідність	82
11.3 Завдання для самостійної роботи	83
<b>Тема 12. Сорбційні процеси: адсорбція та абсорбція</b>	<b>84</b>
12.1. Абсорбція	84
12.2 Абсорбційні апарати	84
12.3 Адсорбція	85
12.4 Приклади розв'язування завдань	86
12.5 Завдання для самостійної роботи	90

<b>Тема 13. Екстрагування: основи процесу, конструкції апаратів</b>	93
13.1 Загальна характеристика процесу екстракції	93
13.2. Екстракція у системі рідина-рідина	93
13.3 Екстрагування у системі тверде тіло – рідина	94
13.4 Конструкції апаратів	94
13.5 Приклади розв’язування завдань	96
13.6 Завдання для самостійного виконання	101
<b>Тема 14. Динаміка та кінетика сушіння</b>	105
14.1 Загальна характеристика процесу сушіння	105
14.2 Класифікація видів сушіння	105
14.3 Приклади розв’язування завдань	108
14.4 Завдання для самостійного виконання	109
<b>Тема 15. Сушильні установки: конструкції та особливості застосування</b>	111
15.1 Промислові сушарки	111
15.2 Конвективні сушарки	112
15.3 Приклади розв’язування завдань	116
15.4 Завдання для самостійного виконання	122
<b>Тема 16. Процес кристалізації. Апаратурне оформлення</b>	124
16.1 Методи кристалізації	124
16.2 Конструкції кристалізаторів	125
16.3 Приклади розв’язування завдань	127
16.4 Завдання для самостійного виконання	129
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	132

## ВСТУП

Пропонований навчальний посібник призначений для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» у процесі вивчення дисципліни «Процеси і апарати харчових виробництв». Навчальний посібник містить короткі теоретичні відомості з кожної теми, приклади розв'язування завдань, задачі для самостійного розв'язування, тестові завдання, що забезпечує ґрунтовне оволодіння навчальним матеріалом. Пояснення закономірностей процесу розв'язування задач дозволяє простежити теоретичні та практичні етапи виконання. Усвідомлення студентами мети та послідовності розв'язування запропонованої задачі сприятиме розвитку логічного мислення, професійних умінь, без яких неможлива подальша професійна діяльність. Наявність контрольних запитань із кожної теми надає студентам змогу самостійного контролю рівня засвоєння навчального матеріалу. Наведено список рекомендованої літератури.

**Мета:** формування у здобувачів ВО професійних компетентностей, пов'язаних з виробничо-технологічною діяльністю на харчових виробництвах; здобуття практичних навичок у процесі розв'язування інженерних завдань.

**Завдання** дисципліни полягає в теоретичній і практичній підготовці здобувачів ВО до інженерної діяльності, **формування вмінь та навичок:** оволодіння основними принципами організації проведення процесів харчових виробництв, їх закономірностями та з апаратним оформленням процесів; обґрунтування пропозицій з удосконалення технологічних процесів та апаратів.

**Предмет:** процеси в харчовій промисловості та їх реалізація.

**Опанування дисципліни дозволяє забезпечити:**

1) формування:

**- загальних програмних компетентностей:**

здатність до абстрактного мислення;

здатність генерувати нові ідеї (креативність);

здатність проведення досліджень на певному рівні.

**- фахових програмних компетентностей:**

здатність застосовувати типові аналітичні методи та комп'ютерні програмні засоби для розв'язування інженерних завдань галузевого машинобудування, ефективні кількісні методи математики, фізики, інженерних наук, а також відповідне комп'ютерне програмне забезпечення для розв'язування інженерних задач галузевого машинобудування;

здатність застосовувати фундаментальні наукові факти, концепції, теорії, принципи для розв'язування професійних задач і практичних проблем галузевого машинобудування;

здатність втілювати інженерні розробки у галузевому машинобудуванні з урахуванням технічних, організаційних, правових, економічних та екологічних аспектів за усім життєвим циклом машини: від проектування, конструювання, експлуатації, підтримання працездатності, діагностики та утилізації;

здатність удосконалювати процеси та апарати, обладнання переробних і харчових виробництв;

здатність оцінювати та аналізувати технічний стан устаткування для забезпечення надійності та працездатності обладнання переробної та харчової промисловості.

2) досягнення **програмних результатів навчання:**

здійснювати інженерні розрахунки для вирішення складних задач і практичних проблем у галузевому машинобудуванні;

аналізувати інженерні об'єкти, процеси та методи;

обирати і застосовувати потрібне обладнання, інструменти та методи;

застосовувати засоби технічного контролю для оцінювання параметрів об'єктів і процесів у галузевому машинобудуванні;

здійснювати модернізацію обладнання переробних і харчових виробництв.

3) набуття **результатів навчання** (згідно Дублінських дескрипторів):

**- знання:**

загальних принципів аналізу і розрахунку процесів і апаратів, основ конструювання апаратів; моделювання процесів і апаратів;

основ теорії теплових процесів (нагрівання, випаровування, кипіння); охолодження: основи процесу;

теплообмінних апаратів: класифікація, конструктивне оформлення, розрахунок; випарювання: теорія процесу, конструкції випарних апаратів; конденсація: типові конструкції конденсаторів та основи розрахунку;

електрофізичних методи обробки харчових продуктів: індукційний нагрів; електрофізичних методи обробки харчових продуктів: інфрачервоний нагрів;

теоретичних основ масообмінних процесів; сорбційних процесів: адсорбція та абсорбція; екстрагування: основи процесу, конструкції апаратів; динаміка та кінетика сушіння;

сушильних установок: конструкції та особливості застосування;

основ процесу ректифікації; процесів кристалізації та апаратного оформлення.

**- уміння/навички:**

оцінювати технічний стан технологічного обладнання та розробляти необхідну нормативно-технічну документацію;

проекувати та конструювати технологічне обладнання; аналізувати шляхи розробки конструкцій нового обладнання і бачити перспективні напрямки його удосконалення;

досліджувати основні характеристики газових пальників та здійснювати їх розрахунок.

**- комунікація:**

ефективно встановлювати і підтримувати комунікацію в навчальних ситуаціях, типових для майбутньої професійної діяльності, використовуючи ситуативну взаємодію в обмеженому колі осіб;

підтримувати розмову та аргументувати відносно тем, що обговорюються під час дискусій та семінарів, представляти та обґрунтовувати свої погляди на теми обговорення, використовуючи мовні форми, властиві для ведення



дискусій;

інтеграція до соціальних груп, здатність до ефективної роботи в команді, сприйняття критики, порад і вказівок;

пояснювати, комунікувати, передавати досвід колегам, керівникам тощо;

здатність ефективно формувати комунікативну стратегію;

**- відповідальність і автономія:**

демонструвати соціальну відповідальність за результати прийняття рішень;

належним чином поводити себе і реагувати у типових академічних, професійних, світських і повсякденного ситуаціях, а також знати правила взаємодії між людьми у різних ситуаціях.

## РОЗДІЛ 1. ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ

### Тема 1. Загальний огляд процесів і апаратів.

#### 1.1 Загальні відомості про процеси і апарати

*Апарат* – це пристрій або пристосування призначене щодо того чи іншого процесу. *Процес* – це послідовні закономірні зміни стану будь-якого тіла або явища, які відбуваються у природі. *Машина* – пристрій, що виконує механічні рухи з метою перетворення енергії чи матеріалів [1, 2, 4]. Технологічні машини перетворюють форму, властивості та положення оброблюваного матеріалу. *Виробничий процес* – це сукупність послідовних дій для досягнення певного результату. *Технологія* – це ряд прийомів, що проводяться спрямовано з метою отримання з вихідної сировини продукту із заданими раніше властивостями. *Рухаюча сила* – фізична величина, під впливом якої відбувається протікання процесу.

При оцінці конструкції апарату та машини вирішальне значення має їх техніко-економічна характеристика. Оптимальним є такий апарат (машина), який забезпечує кінцевий результат із найменшими витратами. До апаратів (машин) пред'являються такі вимоги, а саме: він має бути високоефективними (високопродуктивними), надійними, малоенерго- та металомісткими, задовольняти вимогам безпеки роботи та бути зручними в обслуговування.

Неодмінними умовами тривалої та безперебійної роботи обладнання є його механічна надійність та конструктивна досконалість. Механічну надійність характеризують міцність, жорсткість, стійкість, довговічність, герметичність. Конструктивна досконалість апаратури характеризують простота, мала металоємність, технологічність конструкції, високий коефіцієнт корисного дії.

#### 1.2 Конструкційні матеріали

Конструкційні матеріали відіграють важливу роль у процесі проектування та експлуатації обладнання, що використовується у сфері харчової промисловості. Так, у Законі України «Про вимоги до предметів та матеріалів, що контактують з харчовими продуктами» зазначено про необхідність дотримання вимог при контакті матеріалів з продуктами харчування, а саме не допускати перенесення їх складових на харчові продукти, з якими вони контактують, що може загрожувати здоров'ю людини або спричинити погіршення стану продуктів харчування [5, 6]. Відповідно, матеріали для контакту з виробом повинні відповідати низці вимог, а саме: бути інертними до виробу в умовах експлуатації, включаючи зміни температури та тиску, бути стійкими до корозії, нетоксичними, механічно стійкими, гладкими, легкими в очищенні, а умови не впливали на поверхню використання.

З-поміж, основних операцій переробної та харчової промисловості є очищення, сортування, сушіння, подрібнення, термічна обробка продуктів. При

контакті обладнання із зернами, фруктами, овочами вагому роль відіграють фізичні, механічні, фрикційні, аеро- і гідродинамічні, електричні та оптичні властивості матеріалів. Апарати харчової промисловості не повинно мати недоліки в конструкції та монтажу задля уникнення щілин та зазорів в стиках. Проте такі дефекти трапляються в машинах для виготовлення арахісового масла, соковижималках [6]. Залишки продуктів осідають, що сприяє розвитку мікроорганізмів, які згодом можуть розмножитися та забруднювати обладнання. Якщо поверхня покрита металевим сплавом або неметалевим (наприклад, кераміка, пластик, гума) кінцева поверхня повинна бути корозійностійкою та не мати на поверхні розшарувань, відколювань, утворення пухирів. На практиці вибір металів доступний для виготовлення обладнання в харчовій промисловості дуже обмежений.

Найчастіше у процесі проектування та виготовлення обладнання харчової промисловості застосовується нержавіюча сталь через корозійну стійкість й довговічність матеріалу. Проте, подібно будь-якій іншій групі матеріалів, важливо вибрати оптимальний тип сталі з урахуванням можливості застосування дезінфікуючих та миючих засобів. Залежно від передбачуваних умов експлуатації нержавіюча сталь для харчової промисловості виготовляється з наступних марок: AISI 304, AISI 304L, AISI 321, 08X18H10, 08X18H10T, 12X18H10T. Нержавіюча сталь отримує свою корозійну стійкість з тонкого, міцного шару, який утворюється на поверхні металу. Цей пасивний шар складається із суміші заліза, хрому та іноді оксидів молібдену. Він формується миттєво у повітрі або кисневій воді. Хімічна пасивація є важливою обробкою поверхні, яка можна покращити стійкість до корозії нержавіючої сталі, що використовується для виробу контактної поверхні [6]. Конструкційні матеріали відіграють важливу роль у процесі проектування та експлуатації обладнання, що використовується в сфері харчової промисловості. Їх властивості різняться з точки зору сумісності, технологічності та надійності. Багато матеріалів для харчового обладнання включають полімерні матеріали, еластомери, особливо для ущільнень, прокладок та стиків; мастильні матеріали, які не повинні контактувати з харчовими продуктами; теплоізоляційні матеріали тощо.

### **1.3 Класифікація апаратів харчових виробництв**

Класифікація обладнання може бути проведена за різними ознаками. При формуванні груп обладнання різних ліній основною об'єднувальною ознакою є спільність функцій, що виконуються у процесі переробки сировини та напівфабрикатів. За цією ознакою можна виділити три групи обладнання [1, 2, 5]:

- 1 – для підготовчих операцій;
- 2 – для основних операцій та обробки продукту;
- 3 – для виконання оздоблювальних та фінішних операцій.

За характером впливу на оброблюваний продукт можна виділити обладнання для механічної, теплової, а також групи обладнання для здійснення масообмінних, хімічних та біологічних процесів [1, 2, 5].

*Обладнання для здійснення механічних та гідромеханічних процесів*

- миття сировини: зерна, цукрових буряків, плодів та овочів, тари;
- очищення та сепарування (сепаратори, просіювачі);
- калібрування та сортування плодів та овочів (транспортери, калібрувальні та сортувальні машини);
- очищення рослинної та тваринної сировини від зовнішнього покриття (щіткові машини, машини для лушення, машини для очищення картоплі та коренеплодів тощо);
- подрібнення харчової сировини (вальцові верстати, дробарки, млини, різальні машини);
- сортування сипучих продуктів (ситовічкові та дробильно-сортувальні машини);
- поділу рідких неоднорідних харчових середовищ (центрифуги, сепаратори, фільтри, преси);
- змішування харчових середовищ (мішалки, місильні машини);
- формування (машини для формування штампуванням, виливкою та пресуванням).

*Обладнання для ведення тепло- та масообмінних процесів*

- підвищення концентрації харчових середовищ (випарні апарати);
- темперування середовищ (ошпарювачі та бланшувачі для фруктів та овочів, пастеризатори та стерилізатори);
- сушіння харчової сировини (сушильні агрегати, НВЧ – сушарки);
- випічки та обсмажування (печі з паровим та пароводяним обігрівом, жаровні, обладнання для ошпарювання та обпалювання, для варіння та запікання);
- охолодження та заморожування харчових середовищ (охолоджувачі, желатинізатори, камери охолодження та морозильні апарати, льодогенератори);
- ведення процесів дифузії та екстракції (екстрактори);
- ректифікації.

#### **1.4 Класифікація технологічних процесів**

*Періодичні процеси* здійснюються в апаратах, які через певні проміжки часу завантажуються вихідні матеріали, а після їх обробки протягом часу необхідного для процесу з цих апаратів вивантажують кінцевий продукт після розвантаження апарат знову завантажують і процес повторюється, бо періодичний процес характеризується тим, що всі його стадії протікають в одному місці, але в різному проміжок часу.

*Безперервний процес* здійснюється в проточних апаратах при цьому надходження вихідних продуктів та вивантаження готового продукту

відбувається одночасно. Процес характеризується тим, що всі його стадії протікають в один час, але роз'єднані в просторі.

Безперервний процес відрізняється від періодичного за розподілом часу перебування частинок в апараті. У періодичному апараті всі частки знаходяться однаковий час, у безперервному апараті – цей час може суттєво відрізнятись.

Для промислових виробництв найкращі безперервні процеси. Це і більш висока продуктивність відповідних апаратів, та зниження витрат на автоматизацію управління процесом та сталість якісних показників вихідної продукції. При періодичній роботі апарату виникають великі втрати теплоти та механічної енергії. Це пов'язано із зупинкою апарату для його завантаження, а потім з пуском його в роботу та виведенням на робочий режим.

## Тема 2. Моделювання процесів і апаратів. Критерії подібності

### 2.1. Методи моделювання

*Моделювання* називається метод вивчення реального або створюваного об'єкта (оригіналу), при якому замість нього використовується модель, а результати розповсюджуються на оригінал. Суть моделювання полягає у передбаченні поведінки оригіналу в робочих умовах виробництва за вимірними параметрами моделі.

Загальна задача моделювання як складної системи взаємопов'язаних елементів вимагає створення математичної моделі в якій будуть взаємопов'язані основні елементи цієї системи [7, 8] (рис. 2.1).

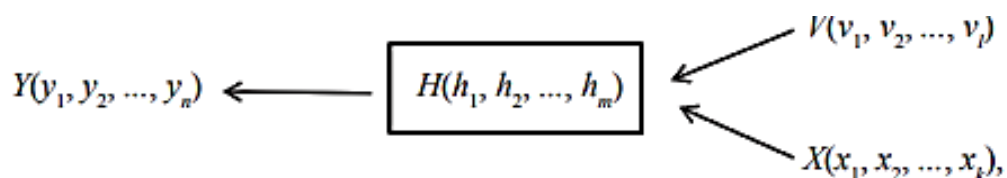


Рисунок 2.1 – Математична модель

де прямокутником позначено об'єкт (процес) моделювання;

$X(x_1, x_2, \dots, x_k)$  – безліч зовнішніх впливів на модельований об'єкт;

$V(v_1, v_2, \dots, v_k)$  – безліч впливів зовнішнього середовища;

$H(h_1, h_2, \dots, h_m)$  – безліч внутрішніх станів об'єкта;

$Y(y_1, y_2, \dots, y_n)$  – безліч вихідних параметрів модельованого об'єкту.

Наприклад, якщо розглядати як об'єкт моделювання холодильну машину то вхідними параметрами для неї буде температури джерел тепла – навколишнього середовища і охолоджуемого об'єкта, а вхідним фактором – холодопродуктивність для здійснення технологічного процесу. Загальна задача моделювання холодильної машини як складної системи взаємопов'язаних елементів вимагає створення математичної моделі в якій будуть взаємопов'язані зовнішні та внутрішні характеристики роботи холодильної

установки [8]. До основних зовнішніх характеристик відносяться параметри навколишнього середовища і теплопритоки в холодильній камері, до внутрішніх – геометричні та теплообмінні параметри апаратів, характеристики компресора і розширювального пристрою. Відповідно, математична модель має містити у собі основні характеристики елементів холодильної установки, які дозволять відтворювати відомі вхідні параметри (температура холодильної камери та охолоджуюче конденсаторне середовище, холодопродуктивність машин) за допомогою параметрів робочого циклу тощо.

## 2.2 Критерії подібності

*Геометрична подібність* дотримується при рівності співвідношень усіх подібних лінійних розмірів оригіналу та моделі.

*Тимчасова подібність* характеризується тим, що подібні частки в геометрично подібних системах, рухаючись по геометрично подібним траєкторіям, що проходять подібні шляхи за проміжки часу, відношення яких є постійною величиною.

*Подібність фізичних величин* передбачає для двох будь-яких подібних точок оригіналу та моделі, розміщених подібно до простору та часу, відносини фізичних властивостей величинами постійними.

*Подібність початкових та граничних умов* передбачає, відносини основних параметрів на початку і на межі оригіналу та моделі є відповідно величинами постійними.

## 2.3 Приклади розв'язування завдань [12, 13]

**Задача 1.** При випробуванні на воді моделі насадка, вихідний діаметр якого  $d_m = 30$  мм, під статичним натиском  $H_m = 50$  м отримані витрати  $Q_m = 18$  л/сек середня швидкість в стисненому перерізі струменя  $w_m = 30$  м/с. Який має бути вихідний діаметр і насадка в натурі та під яким напором  $H$  він повинен працювати на воді, щоб отримати  $Q = 100$  л/с та  $w = 60$  м/с? Вважати, що випробування моделі зроблено в зоні турбулентної автомодельності, тому коефіцієнти закінчення для моделі та натури однакові.

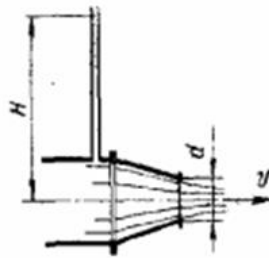


Рисунок 2.2 – Схема установки

Таблиця 2.1. Вихідні дані для розрахунку

№ вар.	$d_m$ , мм	$H_m$ , м	$Q_m$ , л/сек	$w_m$ , м/с
1	25	45	15	25
2	26	50	10	20
3	27	40	20	30
4	30	55	25	35
5	32	50	10	30
6	26	50	10	20
7	25	45	15	25
8	26	50	10	20
9	27	40	20	30
10	26	50	10	35

### Розв'язання

Витрата через отвір дорівнює

$$Q = S \times \mu \sqrt{2 \times g \times H} = w \times Sw = \mu \sqrt{2g \times H}$$

Коефіцієнт витрати

$$\mu = \frac{w}{\sqrt{2 \times g \times H}} = \frac{30}{\sqrt{2 \times 9,8 \times 50}} = 0,958$$

Тоді при швидкості струменя  $w = 60$  м/с тиск складе

$$H = \frac{w^2}{\mu^2 \times 2 \times g} = \frac{(60)^2}{(0,958)^2 \times 2 \times 9,8} \approx 200 \text{ м}$$

Вихідний діаметр насадка

$$D = \sqrt{\frac{4 \times Q}{w \times \pi}} = 0,05 \text{ м} \cdot \sqrt{\frac{4 \times 100 \times 10^{-3}}{60 \times 3,14}} = 0,046 \text{ м}$$

**Задача 2.** Тонка пластина довжиною  $l_0 = 2$  м та шириною  $a = 1,5$  м обтікається поздовжнім потоком повітря. Швидкість і температура потоку, що набігає, рівні відповідно  $w_0 = 3$  м/с;  $t_0 = 20$  °С. Температура поверхні пластини дорівнює  $t_c = 90$  °С. Визначити середній за довжиною коефіцієнт тепловіддачі та кількість тепла, що віддається пластиною повітря (табл. 2.2).

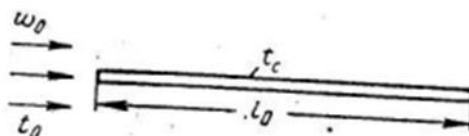


Рисунок 2.3 – Схема обтікання пластини повітрям

Таблиця 2.2. Вихідні дані для розрахунку

№ вар.	$l_0$ , м	$a$ , м	$w_0$ , м/с	$t_0$ , °C	$t_c$ , °C
1	1,5	1,0	2	18	88
2	2	1,3	2,5	19	89
3	2,5	1,5	3	20	90
4	1,0	1,7	4	21	92
5	2	1,0	5	25	85
6	1,5	1,0	2	19	89
7	2	1,3	2,5	20	90
8	2,5	1,5	3	21	92
9	1,0	1,7	4	18	88
10	2	1,0	5	19	89

### Розв'язання

Для повітря при  $t_0 \approx 20$  °C та  $\nu = 15,06 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\lambda = 2,23 \cdot 10^{-2}$  ккал/(м·год·град);  $Pr = 0,703$ , звідки

$$Re = \frac{w_0 \times l_0}{\nu} = \frac{3 \times 2}{15,06 \times 10^{-6}} = 3,98 \times 10^5$$

У цих умовах середня за довжиною тепловіддача може бути розрахована за формулою:

де  $Nu = 0,67 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}$

$$Nu = \frac{a \times l_0}{\lambda}; Re = \frac{w_0 \times l_0}{\nu}$$

та фізичні параметри вибираються при температурі  $t_0$ . У цьому випадку

$$Nu = 0,67 (3,98 \cdot 10^5)^{1/2} (0,703)^{1/3} = 375$$

та коефіцієнт тепловіддачі:

$$a = Nu \frac{\lambda}{l_0} = 375 \frac{2,23 \times 10^{-2}}{2} = 4,18 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{град)}.$$

Кількість тепла, що передається, з обох боків пластини

$$Q = \alpha (t_c - t_0) F = 4,18 (90 - 20) 3 = 1760 \text{ ккал/год.}$$



## 2.4 Завдання для самостійної роботи

### Тестові завдання

**Якість машини визначається за допомогою вибору**

- A. ціни
- B. головних властивостей (критеріїв ефективності)
- C. високого ККД
- D. критеріїв потужності

**Однією із важливих особливостей сучасного виробництва нової техніки є бажання до**

- A. мінімальної ціни
- B. високої надійності
- C. максимальної потужності
- D. максимальної уніфікації та стандартизації

**Додаткові показники технічного рівня включають**

- A. показники рівня автоматизації (коефіцієнт автоматизації);
- B. економічні показники
- C. показники стандартизації та уніфікації (коефіцієнт застосування, коефіцієнт повторності)
- D. всі відповіді вірні

**Основним критерієм оптимальності конструкції є**

- A. рівень собівартості
- B. рівень якості
- C. рівень оригінальності
- D. немає вірної відповіді

**Розрахунковий етап оцінки технічного рівня виробу**

- A.  $q_i = \frac{P_i}{P_{ai}}$
- B.  $q_i = k \frac{P_i}{P_{ai}}$
- C.  $q_i = \frac{P_i}{P_{ai}} + 1$
- D.  $q_i = \frac{P_i}{P_{ai}} - 1$

**Оцінка якості машини відбувається в два етапи**

- A. експертний та розрахунковий
- B. розрахунковий та корисний
- C. експертний та кошторисний
- D. немає вірної відповіді

**Експертний етап передбачає порівняння значень основних показників**

- A. швидкості
- B. тиску
- C. технічного рівня виробу
- D. надійності

**Величина, пропорційна відношенню сил тиску до сил інерції**

- A. число Авагадро
- B. число Ейлера
- C. число Нуссельта
- D. число Рейнольдса

**Величина, пропорційна відношенню сил інерції до сил тяжіння**

- A. число Фруда
- B. число Ейлера
- C. число Нуссельта
- D. число Рейнольдса

**Рівняння кривої подібних режимів**

- A.  $H=sQ$
- B.  $H=sQ^2$
- C.  $H=sQ^3$
- D.  $H=sQ^4$

### **Задачі для самостійного розв'язування**

1. Діафрагма розмірами  $d = 100$  м та  $D = 200$  мм, призначена для вимірювання витрати повітря, тарується шляхом випробування на воді. В результаті випробувань отримано, що мінімальна витрата води, починаючи з якої коефіцієнт витрати діафрагми залишається постійним  $Q_{\min} = 16$  л/с, і при цьому показання ртутного дифманометра, що вимірює перепад тисків на діафрагмі,  $h_{\text{рт}} = 45$  мм. Визначити  $Q_{\min}$  під час роботи діафрагми на повітрі. Знайти відповідне цій витраті повітря показання водяного дифманометра  $h_{\text{в}}$ , приєднаного до діафрагми у тих самих точках. Кінематична в'язкість води  $\nu = 10^{-2}$  Ст, динамічна в'язкість повітря  $\mu = 1,82 \cdot 10^{-4}$  Па·с та його щільність  $\rho = 1,166$  кг/м<sup>3</sup>. Вказівка. Значення витрати  $Q_{\min}$  при роботі діафрагми на різних рідинах відповідає однакоє число Рейнольдса.

2. Обчислити для умов задачі №2 товщину гідродинамічного прикордонного шару та значення місцевих коефіцієнтів тепловіддачі на відстані від передньої кромки пластини  $x = 0,1l_0$ ;  $x = 0,2l_0$ ;  $x = 0,5l_0$  та  $x = l_0$ . Побудувати графік залежності товщини гідродинамічного прикордонного шару  $\delta_{\text{л}}$  та коефіцієнта тепловіддачі на відстані  $x/l_0$

3. Запобіжний клапан діаметром  $D_0$  при відкритті  $h_{\text{м}} = 2$  мм пропускає витрату олії  $Q_0$  під перепадом тисків  $\Delta p_0 = p_1 - p_2 = 1$  МПа. При цьому сила

тиску на клапан  $P_0$ . Як слід змінити діаметр клапана, щоб при збільшенні витрати тієї ж рідини в 4 рази необхідний перепад тисків збільшився тільки в 2 рази? Знайти відкриття клапана  $h$  і на нього силу  $P$ . Скористатися співвідношенням  $h/h_0 = D/D_0$ . Вважати, що клапан працює у квадратичній зоні опору. Відповідно до варіанту значення  $D_0$ ,  $Q_0$  і  $P_0$  беруться з таблиці 2.3.

Таблиця 2.3. Вихідні дані для розрахунку

№ вар.	Діаметр $D_m$ , мм	Витрата олії $Q_m$ , л/с	Сила тиску $P_0$ , Н
1	10	5	45
2	12	7	50
3	15	8	60
4	13	9	55
5	14	10	40
6	15	8	60
7	13	9	55
8	10	5	40
9	12	7	45
10	15	8	50

### Контрольні запитання

1. Яким загальним законом описуються процеси харчової технології? Як його можна записати?
2. Зміст та послідовність розрахунків апаратів харчових виробництв.
3. Якими показниками характеризуються періодичний та безперервний процеси? Їх переваги та недоліки.
4. Як розраховуються обсяги апаратів періодичного та безперервного дії?
5. Чим зумовлюється необхідність використання методу моделювання при дослідженні та розрахунку апаратів?
6. Як набувають критерії подібності? Які критерії гідродинамічного подоби Ви знаєте?
7. Що таке умови однозначності?

## Тема 3. Охолодження: основи процесу

### 3.1 Охолодження

*Охолодження* – процес зниження температури шляхом відведення від них теплоти. Для охолодження газів, парів та рідин до 15–20 °С у харчовій технології використовують воду та повітря. Для охолодження продуктів до низьких температур використовують низькотемпературні холодоагенти – холодильні розсоли, фреони, аміак, діоксид сірки, рідкий азот [1, 2, 3].

Охолодження водою здійснюється у теплообмінниках, у яких теплоносія розділені стінкою або обмінюються теплотою при змішуванні. Наприклад, газ

охолоджують розбризкуванням у них води. Для охолодження застосовується звичайна вода з температурою 15–20 °С чи артезіанська температурою 8–12 °С. Часто для охолодження використовують оборотну воду, охолоджену рахунок її випаровування в градирні.

Охолодження льодом застосовується для охолодження низки продуктів, наприклад, морозива до температури, близької до нуля. Лід нагрівається до 0 °С і плавиться, відбираючи теплоту від продукту, що охолоджується.

Охолодження повітрям проводиться природним та штучним способами:

1. При природному охолодженні гарячий продукт охолоджується рахунок втрати теплоти в навколишній простір. Найефективніше природне охолодження взимку при низькій температурі повітря [2].

2. Штучне охолодження повітрям застосовується для охолодження води в градирнях, в яких вода, що охолоджується, стікає зверху вниз назустріч поданому знизу повітря. При цьому охолодження повітря відбувається не лише за рахунок теплообміну, але значною мірою рахунок випаровування частини рідини [1, 2].

### 3.2 Процес заморожування

*Заморожування* – штучне охолодження до температури нижче температури довкілля (+4 °С до -40 °С). Заморожування застосовується у таких випадках:

- заморожування харчових продуктів з метою забезпечення тривалого зберігання їх поживної цінності;
- заморожування сумішей з метою одержання специфічних харчових продуктів (морозива, заморожених кремів тощо)
- заморожування харчових продуктів як підготовчий технологічної операції при їх сублімаційному сушінні (ліофілізація);
- заморожування рідких продуктів із метою їхньої концентрації, тобто здійснення процесу кріоконцентрації фруктових та овочевих соків, виноградного та пивного сусла, оцту, вина, кави, отримання питної води з морської води;
- заморожування води для одержання льоду.

Заморожування харчових продуктів у повітряному середовищі – старий та найбільш поширений метод, оскільки повітря є природним охолоджуючим середовищем. При цьому погані теплофізичні властивості повітря компенсуються високими робочими швидкостями повітряного потоку.

Заморожування в псевдозрідженому шарі є одним із перспективних промислових методів заморожування харчових продуктів розсипом. При заморожуванні зазначеним методом продукти, що піддаються холодильній обробці, утворюють «киплячий» шар при певній швидкості і тиску висхідного повітряного потоку. Висока ефективність апаратів, заснованих на такому принципі роботи, обумовлена, насамперед коефіцієнтом тепловіддачі матеріалу – від 75 до 186 Вт/(м<sup>2</sup>К). В апаратах, що працюють повністю на принципі псевдозрідження (флюїдизації), повітряний потік пронизує повністю шар

продукту, а також грає роль повітряної подушки для пересування товару камерою. Основні переваги флюїзального заморожування: висока інтенсивність та безперервність технологічного процесу та висока якість замороженого продукту.

Заморожування в рідких охолоджувачах і криогенних рідинах більше ефективно, ніж заморожування у повітряному середовищі, оскільки коефіцієнт тепловіддачі з продукту в рідке середовище значно інтенсивніше. Як холодоносії частіше всього використовуються водні розчини різних солей ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ), в які після їх охолодження до певної температури занурюють продукти, призначені для заморожування.

В апаратах для заморожування в криогенній рідині застосовують азот і повітря, мають низьку нормальну температуру кипіння ( $-195$  і  $-192^\circ\text{C}$ ). Для промислового заморожування харчових продуктів використовується чистий азот, отриманий як відхід на підприємствах, виробляють зріджений кисень.

Заморожування у рідкому азоті проводили методом занурення. На даному етапі є морозильні апарати, складної конструкції та великих об'ємів, де процес заморожування йде поетапно, при русі продукту по ґратчастому конвеєрі – виробляється обдув продукту рідким азотом (до  $-20^\circ\text{C}$  усередині продукту). Процес відбувається швидко, але дуже дорогий в 3-4 дорожче, ніж заморожування в повітряному середовищі, велика витрата азоту від 0,8 до 2 кг/кг.

Заморожування у криогенних (фреонних) морозильних апаратах. До криогенних морозильних апаратів відносять до апаратів, що працюють на зрідженому повітрі, а також на фреоні. Фреон багаторазово циркулює у системі. Заморожування в рідкому фреоні в 1,5-2 рази дорожче заморожування в повітродструмних морозильних апаратах та отже вдвічі дешевше заморожування в рідкому азоті. У разі застосування аміаку його тиск не перевищує 1,2–1,4 МПа.

### **3.3 Холодильні машини та агрегати в харчовій промисловості**

На рисунку 3.1 показано принципову схему холодильного циклу, що складається з компресора, конденсатора, розширювального клапана та випарника. Компресор управляє холодоагентом через конденсатор, клапан розширення і випарник. Зниження тиску знижує температуру насичення холодоагенту, що дозволяє йому закипіти у випарнику, коли це поглинає тепло з відсіку холодильної машини. Холодоагент повертається до компресора, щоб повторити цикл, а контролер включає й вимикає компресор, щоб забезпечити температуру відсіку холодильника в смузі навколо бажаної температури [3].

Холодильний цикл зображено на діаграмі p-h, рисунку 3.2. Перегріта пара надходить в компресор в стан 1 і стискається до стану 2. Зі стану 2 в стан 3, тепло відводиться від високотемпературного холодоагенту в навколишнє середовище, температура. Стиснутий рідкий холодоагент в стані 3 дроселює до тиску випарника в стан 4. У випарнику низькотемпературний холодоагент поглинає тепло з навколишнього середовища, що знаходиться при більш

високій температурі.

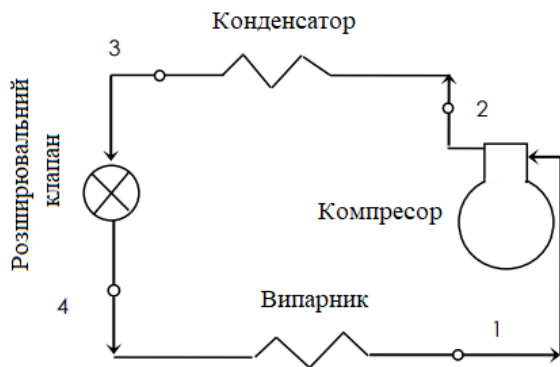


Рисунок 3.1 – Принципова схема холодильного циклу

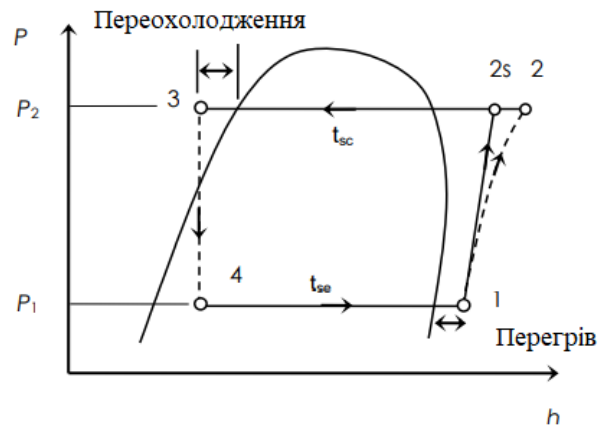
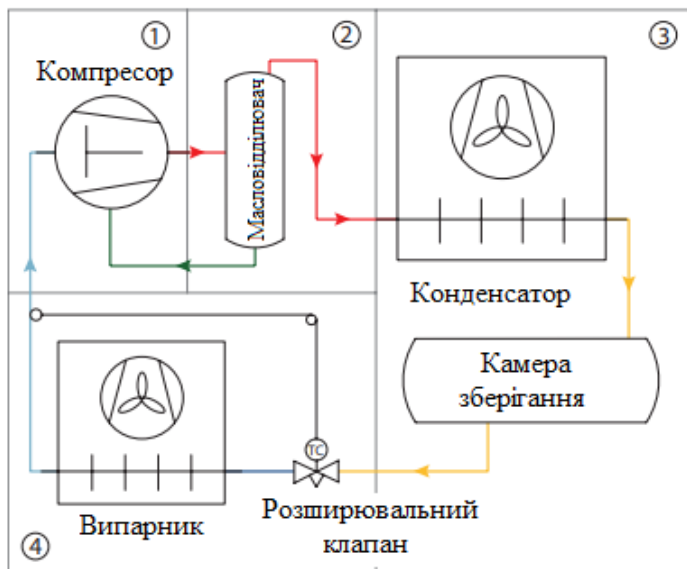


Рисунок 3.2 – Холодильний цикл на діаграмі p-h

Узагальнена модель [3] автоматичного керування холодильною машиною установкою наведена на рисунку 3.3.



- 1 – зона управління компресором;
- 2 – зона контролю масла;
- 3 – зона управління конденсатором;
- 4 – зона управління випарником.

Рисунок 3.3 – Узагальнена модель автоматичного керування режимами холодильної машини

### 3.4. Приклади розв'язування завдання [12, 13]

**Задача 1.** Визначити холодильний і ексергетичний ККД, потужності компресора і детандера повітряної холодильної машини (рис. 3.4), якщо відомо: витрата повітря  $V=7200 \text{ м}^3/\text{год.}$ ; параметри навколишнього середовища  $B=755 \text{ мм.рт.ст.}$ ;  $v_{nc}=0,833 \text{ м}^3/\text{кг}$ ; температура повітря в холодильній камері  $t_n = -13^\circ\text{C}$ ; величина недогріву в холодильній камері та газоохолоднику  $\theta = 5^\circ\text{C}$ ; холодовидатність  $Q_o = 120 \text{ кВт}$ ; ККД компресора і детандера 0,84 і 0,86, відповідно (табл. 3.1)

Таблиця 3.1. Вихідні дані для розрахунку

№, Вар.	V, м <sup>3</sup> /год.	B, мм.рт.ст.	v <sub>нс</sub> , м <sup>3</sup> /кг	t <sub>n</sub> , °C	Q <sub>o</sub> , кВт	θ, °C
1	7000	685	0,8	-15	100	4
2	7300	700	0,825	-18	110	5
3	7500	725	0,83	-15	115	6
4	8000	750	0,815	-21	120	5
5	7300	715	0,835	-18	125	4
6	7500	725	0,8	-15	100	4
7	8000	750	0,825	-18	110	5
8	7300	715	0,83	-15	115	6
9	7000	685	0,815	-21	120	5
10	7300	700	0,835	-18	125	4

**Розв'язування**

Атмосферний тиск, кПа

$$P_{\text{нс}} = (B/750) 100 = (755/750) 100 = 101$$

Температура навколишнього повітря, К

$$T_{\text{нс}} = P_{\text{нс}} v_{\text{нс}}/R = 101 \cdot 0,833/0,287 = 290$$

Масова витрата повітря, кг/с

$$G = V/(v_{\text{нс}} \cdot 3600) = 7200 / (0,833 \cdot 3600) = 2,4$$

Питома холодовидатність, кДж/кг

$$q_o = Q/(G C_p) = 120/(2,4 \cdot 1) = 50.$$

Температури повітря на виході з газоохолодника і холодильної камери відповідно, К

$$T_3 = T_{\text{нс}} + \theta = 290 + 5 = 295$$

$$T_1 = T_o - \theta = 260 - 5 = 255$$

Температура повітря на виході з детандера, К

$$T_4 = T_1 - q_o/C_p = 255 - 50/1 = 205$$

Питома робота в детандері, кДж/кг

$$\ell_d = C_p(T_3 - T_4) = 1 (295 - 205) = 90$$

Міра зменшення тиску в детандері

$$\lambda = (T_3/T_4)^{k/(k-1)} = (295/205)^{1,4/(1,4-1)} = 3,57$$

Температура повітря за компресором, К

$$T_2 = T_1[1 + (\lambda^{(k-1)/k} - 1)/\eta_k] = 255 [1 + (3,57^{(1,4-1)/1,4}) / 0,84] = 388$$

Питома робота компресора, кДж/кг

$$l_k = C_p (T_2 - T_1) = 1 (388 - 255) = 133$$

Потужність детандера і компресора, кВт

$$N_d = G l_d = 2,4 \cdot 90 = 216$$

$$N_k = G l_k = 2,4 \cdot 133 = 319$$

Питома робота циклу, кДж/кг

$$l_{\text{ц}} = l_k - l_d = 133 - 90 = 43$$

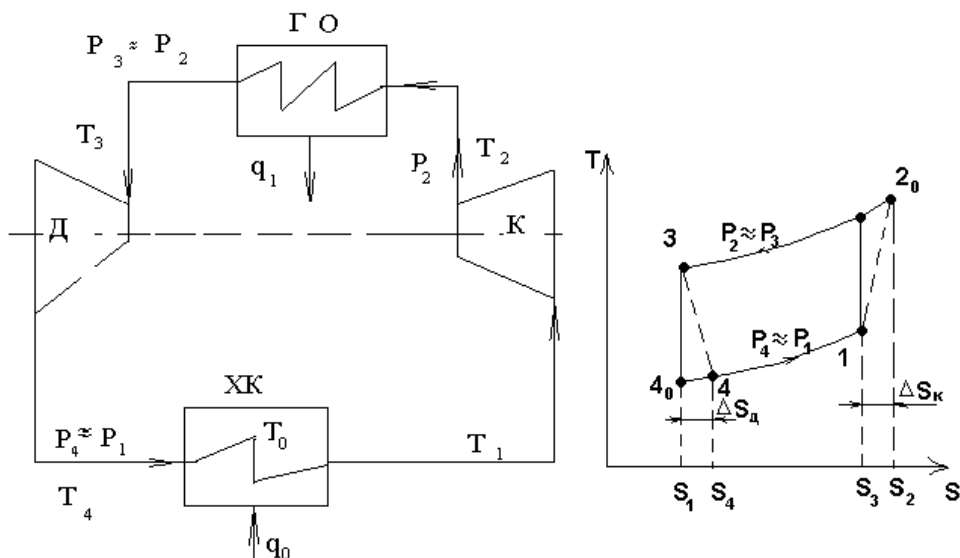


Рисунок 3.4 – Схема і цикл повітряної холодильної машини на T-S діаграмі: ХК – холодильна камера; К – компресор; ГО – газоохолодник; Д – детандер.

Холодильний коефіцієнт

$$\varepsilon = q_o / l_{\text{ц}} = 50 / 43 = 1,163$$

Питома теплота, яка відведена в газоохолоднику, кДж/кг

$$q_1 = q_o + l_{\text{ц}} = 50 + 43 = 93$$



Питома ексергія підведеної теплоти, кДж/кг

$$e_{xq_0} = q_0 (T_{nc} / T_0 - 1) = 50 (290 / 260 - 1) = 5,77$$

Ексергетичний ККД холодильної машини

$$\eta_e = e_{xq_0} / l_{ц} = 5,77 / 43 = 0,134.$$

**Задача 2.** Визначити потужність компресора, холодильний коефіцієнт, ексергетичні втрати і ексергетичний ККД холодильної машини, робочим тілом якої є хладон R12, якщо холодовидатність  $Q_0 = 214$  кВт; температура в холодильній камері  $t_x = -25^\circ\text{C}$ ; температура навколишнього середовища  $t_n = 25^\circ\text{C}$ ; величина недогріву в конденсаторі та випарнику  $\theta = 5^\circ\text{C}$ ; ефективний ККД компресора  $\eta = 0,8$  (рис. 3.5).

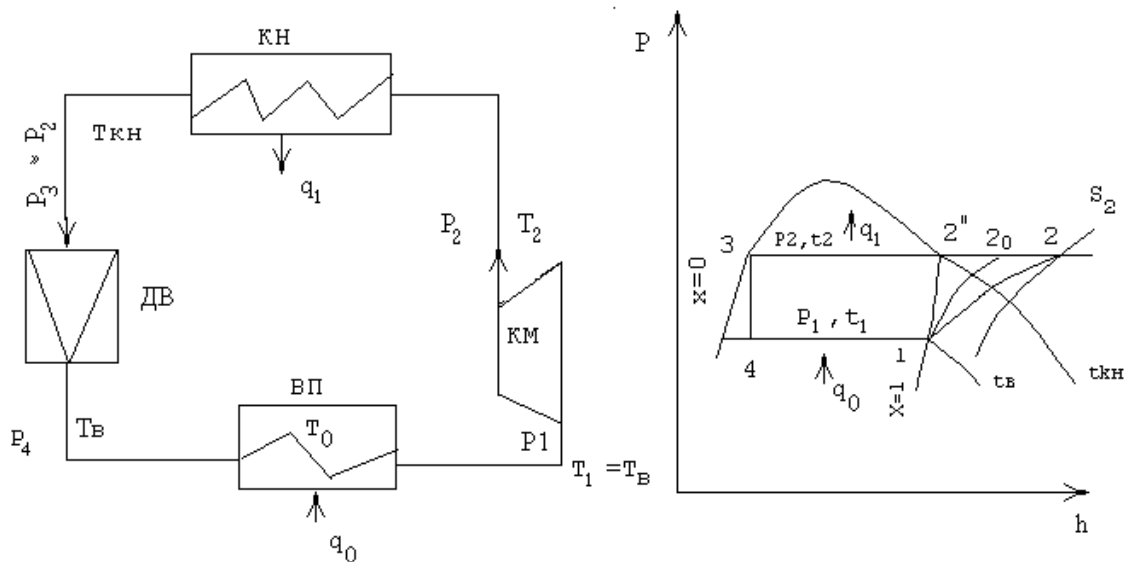


Рисунок 3.5 – Схема парокомпресійної холодильної машини та її цикл на P-h діаграмі: КМ – компресор; ВП – випарник; ДВ – дросельний вентиль; КН – конденсатор

### Розв'язування

Температура випаровування і конденсації відповідно,  $^\circ\text{C}$

$$t_b = t_o - \theta = -25 - 5 = -30$$

$$t_{кн} = t_{nc} + \theta = 25 + 5 = 30$$

Будуємо цикл холодильної машини на P-h діаграмі. На перетині ізотерм  $t_b$  і  $t_{кн}$  з лінією  $x = 1$  визначаємо точки 1 і 2''. Точку 3 визначаємо на перетині ізобари (ізотерми  $t_{кн}$ ) з лінією  $x = 0$ . Точку 4 визначаємо на перетині ізобари (ізотерми  $t_b$ ) з ізоентальпією  $h_4$ . Точку 2<sub>о</sub>, яка характеризує стан робочого тіла після стиску в теоретичному (адіабатному) компресорі визначаємо на перетині ізобари  $P_2$  з ізоентропою  $S_1$ . Запишемо параметри в характерних точках циклу:

$$\begin{array}{lll}
P_1 = 950 \text{ кПа}; & h_1 = 537 \text{ кДж/кг}; & S_1 = 4,48 \text{ кДж/(кг К)}; \\
P_2 = 0,75 \text{ МПа}; & h_{2o} = 575 \text{ кДж/кг}; & S_{2o} = 4,48 \text{ кДж/(кг К)}; \\
P_3 = 0,75 \text{ МПа}; & h_3 = 430 \text{ кДж/кг}; & S_3 = 4,1 \text{ кДж/(кг К)}; \\
P_4 = 950 \text{ кПа}; & h_4 = 430 \text{ кДж/кг}; & S_4 = 4,125 \text{ кДж/(кг К)}
\end{array}$$

Питома робота компресора, кДж/кг

$$\ell_{\text{км}} = (h_{2o} - h_1) / \eta_{\text{кн}} = (575 - 537) / 0,8 = 47,5$$

Ентальпія пари за компресором, кДж/кг

$$h_2 = h_1 + \ell_{\text{км}} = 537 + 47,5 = 584,5.$$

Точку 2 визначаємо на перетині ізобари  $P_2$  з ізоентальною  $h_2$ . Ентропія в точці 2:

$$S_2 = 4,51 \text{ кДж/(кг К)}$$

Питома холодовидатність машини, кДж/кг

$$q_o = h_1 - h_4 = 537 - 430 = 107$$

Масова витрата холодоагенту, кг/с

$$G = Q_o / q_o = 214 / 107 = 2$$

Потужність компресора, кВт

$$N_{\text{км}} = G \ell_{\text{км}} = 2 \cdot 47,5 = 95$$

Питома теплота, що відводиться з конденсатора

$$q_1 = h_2 - h_3 = q_o + \ell_{\text{км}} = 107 + 47,5 = 154,5$$

Холодильний коефіцієнт

$$\varepsilon = q_o / \ell_{\text{км}} = 107 / 47,5 = 2,25$$

Ексергетичний ККД циклу холодильної машини

$$\eta_e = (T_{\text{нс}} / T_{\text{в}} - 1) \varepsilon = (298 / 243 - 1) 2,25 = 0,509$$

Питомі втрати ексергії, кДж/кг:  
в компресорі

$$\Delta e_{\text{хкм}}^{\text{ет}} = T_{\text{нс}} (S_2 - S_1) = 298 (4,51 - 4,48) = 8,94$$

в конденсаторі

$$\Delta e_{xkn}^{em} = q_1 - T_{nc} (S_2 - S_3) = 145,5 - 298 (4,51 - 4,1) = 5,6$$

в процесі дроселювання

$$\Delta e_{x\partial p}^{em} = T_{nc} (S_4 - S_3) = 298 (4,125 - 4,1) = 7,46$$

в холодильній камері (випарнику)

$$\Delta e_{x\partial}^{em} = T_{nc} (S_1 - S_2) - q_0 = 298 (4,48 - 4,125) - 107 = 1,21$$

Загальні ексергетичні втрати

$$\Sigma \Delta e_x^{em} = \Delta e_{xkm}^{em} + \Delta e_{xkn}^{em} + \Delta e_{x\partial p}^{em} + \Delta e_{x\partial}^{em} = 8,94 + 5,6 + 7,45 + 1,21 = 23,21$$

Перевіряємо значення  $\eta_e$

$$\eta_e = 1 - \Sigma \Delta e_x^{em} / \ell_k = 1 - 23,21/47,5 = 0,51.$$

### 3.5 Завдання для самостійної роботи

#### Тестові завдання

**Найбільш розповсюджений засіб охолодження і заморожування харчових продуктів відбувається в**

- A. вакуумі
- B. повітряному середовищі
- C. рідкому середовищі
- D. крижаному

**Кріоскопічною температурою називають температуру**

- A. повне замерзання рідкої фази продуктів.
- B. початку замерзання рідкої фази продуктів.
- C. кінець замерзання рідкої фази продуктів.
- D. немає вірної відповіді

**Критерій подібності Ві (Біо)**

- A.  $Vi = \alpha R \lambda$
- B.  $Vi = \alpha R / \lambda$
- C.  $Vi = (\alpha + R) \lambda$
- D.  $Vi = (\alpha - R) / \lambda$

**Процес зменшення тиску у рухомому усталеному потоці газу або водяної пари при проходженні його через перешкоду у вигляді вентиля, засувки, шайби, крана, клапана, діафрагми тощо, називається**

- A. процес втрати енергії
- B. процес розширення
- C. дроселюванням
- D. процесів витікання водяної пари

**Дійсна холодопродуктивність компресора**

- A.  $Q_d = V_p \lambda q_v$
- B.  $Q_d = V_p \lambda q / v$
- C.  $Q_d = V_p (\lambda + q) v$
- D.  $Q_d = V_p \lambda - q v$

**Апарат для заморожування харчових продуктів із зануренням їх у ванну з рідким азотом називається**

- A. контактним апаратом
- B. імерсійним апаратом
- C. криогенним апаратом
- D. холодильним апаратом

**Теплове навантаження на конденсатор багато в чому залежить від**

- A. площі поверхні конденсатора
- B. різниці температур між охолоджуючим середовищем і пароподібним
- C. інтенсивності потоку охолоджуючого середовища, що протікає через конденсатор
- D. всі відповіді вірні

**В випарнику шар інею, володіючи термічним опором, знижує коефіцієнт теплопередачі на**

- A. 5...10%:
- B. 10...15%:
- C. 15...20%:
- D. 25...30%:

**Зменшити тривалість охолодження можна зниженням температури тепловідводного середовища нижче**

- A. критичної
- B. криоскопічної
- C. середньої
- D. максимальної

**Практика і техніко-економічні розрахунки систем охолодження свідчать, технічно і економічно не виправдана швидкість руху повітря поблизу поверхні продукту більше**

- A. 3...5 м/с
- B. 5...7 м/с
- C. 7...9 м/с
- D. 9...12 м/с

**Коли теплообмін на поверхні доповнюється випаровуванням вологи з поверхні продукту, коефіцієнт тепловіддачі**

- A. зростає
- B. зменшується
- C. не змінюється
- D. змінюється частково

**Двоступінчасті або триступінчасті машини застосовуються для одержання**

- A. економії
- B. низьких температур
- C. більшої потужності
- D. надійності

### **Задачі для самостійного розв'язування**

1. Потужність газоохолодника теоретичної повітряної ХМ становить 500 кВт. Визначити холодовидатність, потужності компресора і детандера, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД, якщо температура в холодильній камері ( $-12^{\circ}\text{C}$ ), температура навколишнього середовища  $17^{\circ}\text{C}$ , а стиск повітря здійснюється до збільшення густини в 3,8 рази.

2. В теоретичному циклі ХМ циркулює  $3600 \text{ м}^3/\text{год.}$  повітря, температура якого за детандером складає 192 К. Визначити холодовидатність, потужності детандера і компресора, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД, якщо: температура в холодильній камері та в навколишньому середовищі ( $-25$ ) і  $+20^{\circ}\text{C}$ , відповідно, а тиск перед компресором – 760 мм.рт.ст.

3. Потужність газоохолодника холодильної машини дорівнює 440 кВт, а витрата повітря  $74000 \text{ м}^3/\text{год.}$ ; параметри навколишнього середовища:  $P_{\text{нс}} = 765 \text{ мм.рт.ст.}$ ;  $\rho_{\text{нс}} = 1,25 \text{ кг/м}^3$ . Визначити холодовидатність, потужності компресора і детандера, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД, якщо температура повітря в холодильній камері складає ( $-10^{\circ}\text{C}$ ).

4. Холодовидатність теоретичної повітряної ХМ складає 185 кВт, а підігрів повітря в холодильній камері  $65^{\circ}\text{C}$ . Визначити потужності газоохолодника, компресора і детандера, холодильний коефіцієнт і ексергетичний ККД, якщо температура в холодильній камері ( $-12^{\circ}\text{C}$ ), а тиск в детандері зменшується в чотири рази.

## Тема 4. Основи теорії теплових процесів. Нагрівання. Випаровування. Кипіння

### 4.1 Нагрівання

*Нагрівання* – процес підвищення температури матеріалів шляхом підведення до них теплоти. Широко поширеними методами нагрівання у харчовій технології є:

1. Нагрівання гарячою водою. Застосовується для нагрівання та пастеризації харчових продуктів за температур нижче 100 °С. Для нагрівання до температури вище 100 °С застосовують воду, що перебуває під надмірним тиском та має високу теплоємність. Обігрів здійснюється через розділяючу теплоносій та продукт стінку апарату. При нагріванні гарячою водою чи іншими рідкими теплоносійми, наприклад, олією або іншими органічними теплоносійми, що часто застосовуються циркуляційний спосіб обігріву.

За цим способом гаряча вода циркулює між нагрівачем і теплообмінником, у якому він віддає теплоту. Циркуляція може бути природною чи примусовою. Природна циркуляція відбувається рахунок різниці щільностей гарячого та холодного теплоносійв.

2. Нагрівання насиченою водяною парою набуло широкого поширення. При цьому застосовують два способи:

- нагрівання «глухою» насиченою парою;
- нагрівання «гострою» насиченою парою.

При нагріванні «глухою» насиченою парою теплота від конденсуючої насиченої водяної пари передається до теплоносія, що нагрівається, через стінку, що розділяє. Гріюча «глуха» пара конденсується і виводиться з парового простору теплообмінника у вигляді конденсату. При цьому температура конденсату приймається рівною температурі насиченої водяної пари при нагріванні «гострою» насиченою парою. Водяна пара вводиться через барботер. Нагрівання «гострою» насиченою парою застосовується в тих випадках, коли допустимо розведення середовища, що нагрівається водою.

3. Нагрівання топковими газами, що утворюються при спалюванні палива в спеціальних печах, наприклад, для обігріву сушарок.

4. Нагрівання електричним струмом здійснюється в електричних печах опору прямої та непрямої дії.

У печах прямої нагрів здійснюється під час проходження через нього електричного струму. При впливі діелектрик змінного електричного струму молекули діелектрика приходять у коливальні рухи, при цьому частина енергії витрачається на подолання тертя між молекулами діелектрика і перетворюється на теплоту, нагріваючи тіло. Перевагами діелектричного нагрівання є:

- безпосередні виділення теплоти в тілі, що нагрівається;
- рівномірне швидке нагрівання всієї маси матеріалу до необхідної температури;
- простота регулювання процесу.

У печах непрямої дії теплота виділяється під час проходження електричного струму за нагрівальними елементами. Теплота, що при цьому виділяється передається матеріалу тепловим випромінюванням, теплопровідністю та конвекцією. Для нагрівання харчових продуктів застосовується два типи електронагріву: прямий та непрямий.

При прямому нагріванні продукт, що нагрівається, включається послідовно безпосередньо в електричний ланцюг. Односторонність температурного поля є важливою перевагою електроконтактного методу. Для запобігання небажаних явищ електролізу використовується змінний струм промислової частоти. Електроконтактне нагрівання використовується для розморожування напівфабрикатів, для нагрівання водно-борошняних сумішей.

Для обробки плодів, ягід та овочів перед пресуванням застосовується електроплазмоліз. Процес здійснюється в установках в яких зазор між валками-електродами, що обертаються, пропускають продукт. При цьому за допомогою струму руйнуються клітини продукту, що покращує виділення соку пресування.

На виноробних підприємствах використовують електропастеризаційні установки непрямого нагріву. Рідина, що знаходиться в апараті або прокачується через нього отримує теплоту нагрівальних елементів. Регулювання температури проводиться автоматично. Широке застосування в хлібопекарській та кондитерській промисловості отримали печі з електрообігрівом, настановна потужність яких досягає 150 кВт

## 4.2 Випаровування

*Випаровування* – фізичний процес переходу речовини з рідкого стану в газоподібний (пар). Процес випаровування є зворотним процесом конденсації (перехід з пароподібного стану в рідкий). Процес випаровування залежить від інтенсивності теплового руху молекул: що швидше рухаються молекули, то швидше відбувається випаровування. Важливим чинником, що впливає на процес випаровування, є швидкість зовнішньої дифузії і навіть властиві самої речовини. Наприклад, спирт випаровується набагато швидше за воду.

Розглянемо цей процес на молекулярному рівні: молекули, які мають достатньою енергією (швидкістю) для подолання тяжіння сусідніх молекул, вириваються за межі речовини (рідини). При цьому рідина втрачає частину своєї енергії (остигає). Наприклад, гарячий чай: ми дуємо на поверхню рідини, щоб остудити його, при цьому ми прискорюємо процес випаровування.

Найбільш ефективно випаровування рідин відбувається при кипінні. Випаровування в харчовій технології використовується для охолодження та опріснення води, концентрування розчинів (*n-p* цукрових). Відповідно використовуються апарати: випарники, опріснювачі, випарні апарати.

## 4.3 Кипіння

*Кипіння* – процес пароутворення всередині рідини (перехід речовини з рідкого у газоподібний стан). Оскільки при кипінні змінюється питомий обсяг

речовини, то кипіння – це фазовий перехід першого роду. Зазвичай кипіння інтенсивніше, ніж випаровування.

*Температура кипіння, точка кипіння* – температура при якій відбувається кипіння рідини, яка перебуває під постійним тиском. Температура кипіння відповідає температурі насиченої пари над плоскою поверхнею киплячої рідини, оскільки сама рідина завжди дещо перегріта відносно температури кипіння. Зі зростанням тиску температура кипіння збільшується.

При кипінні процес перенесення тепла складається з віддачі тепла рідини стінкою та передачі тепла внутрішньої поверхні газового пухиря у вигляді теплоти випаровування. При цьому долається термічний опір тонкого прикордонного шару на кордоні «бульбашка газу – рідина». При повільному кипінні рідини з'являються бульбашки, наповнені паром. Утворення бульбашок пари залежить від кількості підведеної теплоти, від шорсткості і поверхні, що змочується. У процесі утворення газових бульбашок, інтенсивність процесу зростає до певної межі, рівної різниці температур між стінкою апарату та рідиною, тобто зростає кількість тепла, що передається рідини з одиниці поверхні в одиницю часу. Починається перемішування середовища, що призводить до зростання коефіцієнта тепловіддачі. Цей процес та область його існування називається ядерним кипінням (пухирчастим).

За рахунок інтенсивного випаровування рідини всередину бульбашок, вони ростуть, спливають, і пара вивільняється у парову фазу над рідиною. При цьому сама рідина знаходиться в злегка перегрітому стані, тобто температура в товщі рідини перевищує номінальну температуру кипіння. У звичайних умовах ця різниця невелика (близько одного градуса), але факт перегрітості можна легко помітити, покинувши щось у таку воду і спостерігаючи її різке закипання. У лабораторних умовах ретельно очищені рідини можна перегріти на десятки градусів. Можливість перегріву рідини пояснюється тим, що для створення первинних бульбашок мінімального розміру, які вже далі можуть зростати самі по собі, потрібно витратити деяку енергію. Поки це не досягнуто, дрібні бульбашки виникатимуть і знову лопатися під впливом сил поверхневого натягу, і кипіння не буде.

При подальшому збільшенні температури інтенсивність теплового потоку зростає на стільки, що бульбашки перетворюються на суцільний прошарок газу між стінкою та рідиною, тобто якщо температура на дні судини значно перевищує температуру кипіння рідини, то швидкість утворення бульбашок на дні стає настільки великий, що вони об'єднуються разом, утворюючи суцільний паровий прошарок між дном судини та безпосередньо самою рідиною.

#### **4.4 Завдання для самостійної роботи**

##### **Контрольні запитання**

1. Які методи нагрівання застосовують у харчових виробництвах?
2. Коли можна застосовувати нагрівання гострою паром?
3. Які холодоагенти використовують для охолодження?
4. Що таке кипіння?



5. Які дві стадії кипіння ви знаєте?
6. Перерахуйте види заморожування.
7. Які хладагенти для заморожування застосовують у харчовій промисловості?

## **Тема 5. Випарювання: теорія процесу, конструкції випарних апаратів**

### **5.1 Загальна характеристика процесу випарювання**

*Випарюванням* називається процес згущення практично нелетких твердих речовин за рахунок випаровування летючого розчинника. При цьому часткове видалення розчинника з усього об'єму розчину здійснюється при температурі кипіння останнього, коли тиск парів розчинника дорівнює тиску в надрозчинному просторі.

Особливістю процесу випарювання є сталість температур кипіння при даному тиску та складі розчину. У ряді випадків випарений розчин піддають подальшій кристалізації. Тепло, необхідне для випарювання, зазвичай підводиться з насиченою водяною парою, яка називається гріючою (первинною), через стінку, що відокремлює теплоносій від розчину. Вторинним називається пара, що утворюється при випаровуванні киплячого розчину.

У харчопереробній промисловості, як правило, випарюють водні розчини – бурякові та томатні соки, сиропи, барду, пектиновий клей, молоко тощо. Процеси випарювання проводять у випарних апаратах під вакуумом, при підвищеному та атмосферному тисках залежно від властивостей розчину та можливості використання тепла вторинної пари.

При випарюванні під вакуумом останній створюється в апараті шляхом конденсації вторинної пари в конденсаторі та відсмоктуванні з неї газів, що не конденсуються за допомогою вакуум-насоса. Такий підхід дозволяє збільшити рушійну силу теплопередачі (різниця температур між гріючим паром і розчином) і, як наслідок, зменшити площу поверхні нагрівання випарного апарату і цим його матеріаломісткість.

Крім того, випарювання під вакуумом дозволяє проводити процес при нижчих температурах, що особливо важливо для харчових розчинів. Однак застосування вакууму викликає подорожчання випарної установки, зв'язку з додатковими витратами на пристрої для його створення (конденсатори, пастки, вакуум-насоси), та збільшення експлуатаційних видатків.

При випарюванні під надлишковим тиском вторинна пара може бути використаний як теплоносій у підігрівачах, для опалення теплиць та інших внутрішньозаводських потреб. Однак такий метод випарювання пов'язаний з підвищенням температури кипіння розчину. Тому його застосування в харчовій промисловості обмежено властивостями розчинів, які мають бути термічно стійкими.

При випарюванні під атмосферним тиском, що утворюється вторинна пара не використовується і зазвичай скидається в атмосферу. Такий Метод випарювання більш простий, але менш економічний.

## 5.2 Конструкції випарних апаратів

У харчовій промисловості широко використовують одноразове випарювання, здійснюване періодично або безперервно в однокорпусних випарних апаратах, і багаторазове, що проводиться безперервно в багатокорпусних випарних установках, складених із кількох однокорпусних апаратів.

Випарний апарат (рис. 5.1) складається з камери 1, що гріє, простір якої обмежено стінками апарату 2 міжтрубними решітками 6 та 7 простір камери, що гріє, подається насичена водяна пара, а конденсат відводиться із її нижньої частини. Випарюваний розчин, піднімаючись знизу вгору по кип'ятільним трубкам 5, нагрівається і кипить з утворенням вторинної пари. Частина рідини опускається центральною трубою 4 в нижню частину камери, що гріє, і направляється в кип'ятільні трубки. Таким чином, відбувається безперервна циркуляція по замкнутому контуру внаслідок різниці щільностей розчину в центральній трубці та парорідинної емульсії в кип'ятільних трубках. Випарений розчин видаляється через патрубок, розташований в днище 8 апарату.

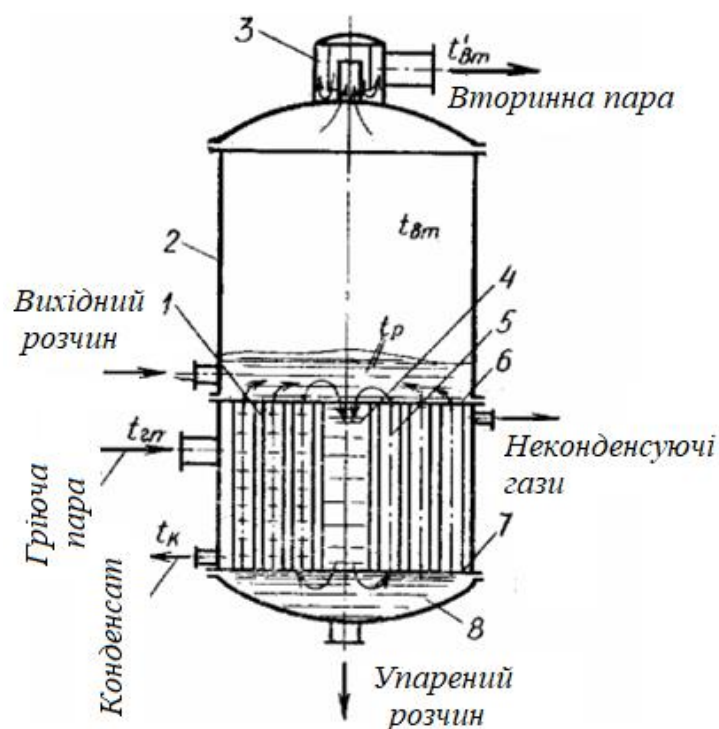


Рисунок 5.1 – Схема пристрою однокорпусного (однокорпусного) випарного апарату

Свіжий розчин подається над верхньою або нижньою трубною ґратами. Вторинна пара заповнює надрозчинний обсяг, звідки відводиться через пастки сепаратора 3, затримуючі бризки та крапельки рідини, через верхній патрубок у конденсатор.

В однокорпусній випарній установці витрата пари, що гріє становить понад 1 кг на 1 кг випареної води. Економічність процесу може бути підвищена тільки за рахунок раціонального використання вторинної пари, як це відбувається, наприклад, у багатокорпусних випарних установках.

Багатокорпусна випарна установка (рис. 5.2) складається з кількох послідовно з'єднаних однокорпусних випарних апаратів. Її принцип дії полягає у багаторазовому використанні тепла гріючої пари, що надходить у перший корпус, для обігріву наступних.

При цьому як гріюча пара наступного корпусу використовується вторинна пара попереднього.

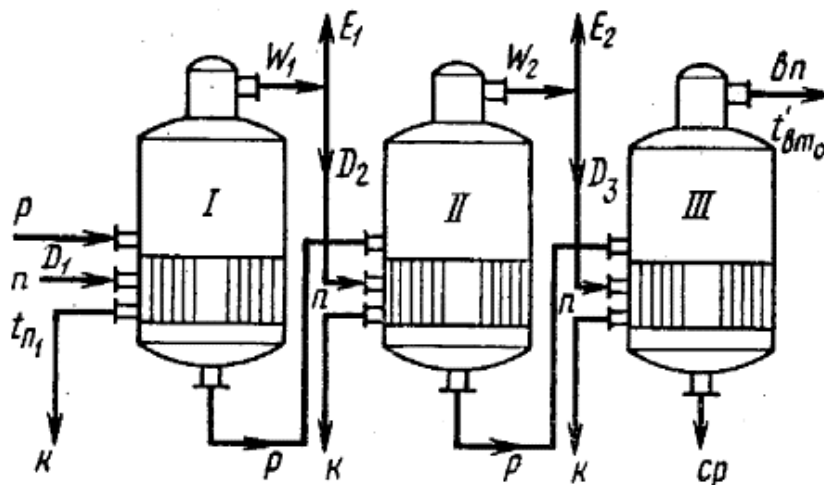


Рисунок 5.2 – Багатокорпусна прямоточна вакуум випарна установка

Початковий розчин, попередньо нагрітий до температури кипіння, надходить в I корпус, що обігрівается первинним паром. Вторинний пара, що утворюється в I корпусі, направляється у які гріючого в другий. Тут тиск більше низька. Тому розчин, випарений в I корпусі, переміщається в другий самоплив. Знижений тиск обумовлює і нижчу температуру кипіння розчину у II корпусі.

Тому розчин, що прийшов із I корпусу, частково охолоджується до температури кипіння у другому. При цьому виділяється тепло, що веде до утворенню додаткової кількості вторинної пари. Це явище називається самовипарюванням розчину і відбувається у всіх корпусах, крім першого. Аналогічна картина відбувається у III корпусі. Вторинна пара з останнього корпусу надходить у барометричний конденсатор, де з допомогою його конденсації, створюється необхідне розрідження. Несконденсовані гази і повітря відсмоктуються вакуум-насосом.

Переваги цієї схеми:

1. Рух розчину самопливом із корпусу в корпус за рахунок різниці тисків;
2. Можливість випарювання термічно нестійких розчинів, бо в останньому корпусі найбільш випарений розчин знаходиться в зоні найменших температур.

Недолік прямоточної схеми полягає в нижчому середньому коефіцієнт теплопередачі, порівняно з протиточними установками. Це тим, що з корпусу

до корпусу збільшується концентрація розчину та зменшується його тиск, що і знижує коефіцієнти тепловіддачі.

У багатокорпусну установку розчин може надходити протитечею. У цьому випадку схема руху пари здійснюється як при прямотоці, але вихідний розчин надходить в останній корпус, а в концентрованому вигляді виходить із першого. Таким чином, розчин, що випаровується, переміщується протитечею по відношенню до вторинної пари. Його рух забезпечується з допомогою відцентрових насосів, бо тиск від останнього корпусу до першого поступово зростає. Зазвичай її використовують для випарювання розчинів до високих кінцевих концентрацій, коли у I корпусі можливо випадання твердої речовини або в'язкість розчину різко зростає з збільшенням його концентрації.

Перевагою протиточних установок є вищий середній по встановленню коефіцієнт теплопередачі, а її серйозним недоліком - необхідність перекачування випаровується розчину, що пов'язано із значними експлуатаційними витратами. У Висновок зазначимо, що якщо витрата насиченої водяної пари, що гріє, для однокорпусної установки становить понад 1 кг на 1 кг випареної води, то для двокорпусних установок він менший у два, а для трикорпусних у три рази.

У харчовій промисловості широко застосовують трубчасті випарні апарати з природною та примусовою циркуляцією з площею поверхні нагріву від 10 до 1800 м<sup>2</sup> і різним розташуванням гріючої камери. У ряді випадків для інтенсифікації процесу випарювання використовують різні конструкції плівкових випарних апаратів.

Самостійно вивчити конструкції наступного обладнання:

1. Випарні апарати із природною циркуляцією.
2. Випарні апарати із примусовою циркуляцією розчину.
3. Плівкові випарні апарати.
4. Роторно-плівкові випарні апарати.

### 5.3. Приклади розв'язування завдання [12, 13]

**Задача 1.** Розрахувати трикорпусну випарну установку для упарювання S т/год технологічного розчину за таких заданих величин: початкова концентрація розчину  $B_n$ , мас.%; кінцева концентрація розчину  $B_k$ , мас.%; відбір пари з корпусів  $E_1$  і  $E_2$  (у відсотках від кількості випареної води на випарній установці); тиск нагрівної пари –  $P_n, P_a$ ; температура вторинної пари –  $t_{вт}, ^\circ C$ ; коефіцієнти теплопередачі по корпусах –  $K, Вт/(м^2 \cdot K)$

#### *Розв'язування*

1. Визначення навантажень корпусів випарної установки.

Перед початком розрахунку креслять принципову схему випарної установки з позначенням матеріальних і теплових потоків.

Розрахунок навантаження корпусів зводиться до розподілу по корпусах загальної кількості випареної води,

$$W = S ( 1 - B_{\text{п}}/B_{\text{к}})$$

При приблизному розрахунку установки приймаємо, що за рахунок 1 кг гріючої пари випарується 1 кг води, тобто для кожного із корпусів  $W_i = D_i$ .

Кількість води, що випаровується в кожному корпусі, становить: 3-й корпус –  $W_3 = D_3 = X$ ;

2-й корпус –  $W_2 = D_2 = X + E'_2$ ;

1-й корпус –  $W_1 = D_1 = X + E'_2 + E'_1$ .

Звідси  $\Sigma W = 3X + 2E'_2 + E'_1$

$$X = W/3 = \frac{W - 2E'_2 - E'_1}{3},$$

де  $D_1, D_2, D_3$  – кількість пари, яка йде на нагрівання кожного корпусу;  $E'_1$  і  $E'_2$  – паровідбір,  $E' = W \frac{E}{100}$ .

## 2. Розрахунок концентрації розчину в корпусах.

При визначенні концентрації розчину після кожного корпусу випарної установки користуються таким співвідношенням:

$$B_i = \frac{S \times B_{\text{п}}}{S - \sum_1^i W}$$

## 3. Розрахунок температурного режиму випарних апаратів.

Основна мета розрахунку температурного режиму випарної установки – розподілити сумарну корисну різницю температур по окремих корпусах:

$$\sum \Delta t = t_{\text{п}} - t_{\text{к}} - \sum_1^n \Delta$$

де  $t_{\text{п}}$  – температура гріючої пари, яка йде на 1-й корпус;  $t_{\text{к}}$  – температура вторинної пари при вході в конденсатор;  $\Sigma \Delta$  – сумарні температурні втрати.

Температурні втрати при випарюванні складаються з температурних втрат від фізико-хімічної температурної депресії  $\Delta_{\text{ф}}$ , втрат від гідростатичної депресії  $\Delta_{\text{г}}$  та втрат температур у паропроводах між корпусами  $\Delta_{\text{с}}$ , спричинених гідравлічними опорами.

При розрахунках випарної установки можна користуватися такими значеннями фізико-хімічної депресії з включенням втрат внаслідок гідростатичної депресії:

1-й корпус –  $\Delta_{\text{ф1}} + \Delta_{\text{г1}} = 0,5^{\circ}\text{C}$ ;

2-й корпус –  $\Delta_{\text{ф2}} + \Delta_{\text{г2}} = 1,5^{\circ}\text{C}$ ;

3-й корпус –  $\Delta_{\text{ф3}} + \Delta_{\text{г3}} = 3,0^{\circ}\text{C}$ .

Втрати температур в паропроводах становлять  $\Delta_c = 0,5 \dots 2^\circ\text{C}$ .

Сумарна корисна різниця температур розподіляється виходячи із заданих температур вторинної пари. Для визначення температурного режиму випарної установки знаходять:

температуру гріючої пари в  $i$ -му корпусі

$$t_{\text{пi}} = t_{\text{вт } i-1} - \Delta_{c i-1}$$

температуру кипіння розчину в  $i$ -му корпусі

$$t_{\text{рi}} = t_{\text{втi}} + (\Delta_{\text{фi}} + \Delta_{\text{Гi}})$$

корисну різницю температур

$$\Delta t_i = t_{\text{пi}} - t_{\text{рi}}$$

За температурами гріючої і вторинної пари знаходять їх ентальпію  $I_i$  і теплоту конденсації (пароутворення)  $r_i$

4. Визначення площі поверхні нагріву в  $i$ -му корпус

$$F_i = \frac{Q_i}{K_i \Delta t_{\text{ки}}}$$

де  $Q_{ii}$  — теплове навантаження корпуса, Вт;  $Q_i = W_i r_i$ .

10	14	30	0.45	7	14	85	18
----	----	----	------	---	----	----	----

#### 5.4. Завдання для самостійної роботи

##### Тестові завдання

**Швидкість видалення вологи с поверхні залежить від:**

- А. коефіцієнта теплопередачі:
- В. коефіцієнта динамічної в'язкості
- С. коефіцієнта тепловіддачі
- Д. коефіцієнта пружності

**Підвищеному тискові при нагріві викликає:**

- А. підвищення температури кипінню розчину
- В. зменшення температури кипінню розчину
- С. зменшення часу процесу
- Д. збільшення енергозатрат

**Кінцева концентрація розчину:**

- A.  $B_k = GB_H(G-W)$
- B.  $B_k = GB_H/(G-W)$
- C.  $B_k = GB_H(G+W)$
- D.  $B_k = GB_H/(G+W)$

**Мінімальне підвищення температури вторинної пари в разі стискування:**

- A. 5–10°C
- B. 8–12°C
- C. 10–15°C
- D. 12–17°C

**Найбільше поширення в промисловості отримали випарні апарати, які зігрівають:**

- A. водяною парою
- B. топочним газом
- C. електричним струмом
- D. немає вірної відповіді

**Відкладення кристалів солі на поверхнях випарного апарата знижує його продуктивність:**

- A. на 10 – 30 %
- B. на 20 – 40 %
- C. на 30 – 50 %
- D. на 40 – 60 %

**Швидкість відкладення солей на внутрішній поверхнях випарного апарату можливо зменшити наступними методами:**

- A. створення високої швидкості циркуляції розчину
- B. внесенням зони кипіння розчину за межі поверхні нагріву
- C. підбором температурного режиму процесу випарювання
- D. всі відповіді вірні

**Продуктивність випарювального апарату:**

- A.  $S_k = S_n \frac{CP_n}{CP_k}$
- B.  $S_k = S_n + \frac{CP_n}{CP_k}$
- C.  $S_k = S_n - \frac{CP_n}{CP_k}$
- D.  $S_k = S_n / \frac{CP_n}{CP_k}$

**Коефіцієнт випару:**

A.  $\alpha = \frac{i_{\text{ГП}} - i_{\text{К}}}{i_{\text{ВП}} - c_{\text{ГП}} i_{\text{К}}}$

B.  $\alpha = \frac{i_{\text{ГП}} + i_{\text{К}}}{i_{\text{ВП}} - c_{\text{ГП}} i_{\text{К}}}$

C.  $\alpha = \frac{i_{\text{ГП}} - i_{\text{К}}}{i_{\text{ВП}} + c_{\text{ГП}} i_{\text{К}}}$

D.  $\alpha = \frac{i_{\text{ГП}} + i_{\text{К}}}{i_{\text{ВП}} + c_{\text{ГП}} i_{\text{К}}}$

**Збільшення числа корпусів установки обмежене:**

- A. витратами корисної різниці температур
- B. витратами корисної різниці тисків
- C. витратами корисної різниці швидкостей
- D. всі відповіді вірні

**Задачі для самостійного розв'язування**

1. Визначити витрату водяної пари у випарному апараті при безперервному концентруванні розчину цукру. Витрата початкового розчину 5.6 т/год його концентрація 17 %, кінцева концентрація 35 %. Температура гріючої пари 125 °С. Тиск вторинної пари в апараті атмосферний. Теплові втрати випарного апарату 24 кВт. Розрахунок провести для трьох варіантів: а) розчин надходить на випарювання з початковою температурою 20 °С; розчин надходить на випарювання при температурі кипіння в апараті; в) розчин надходить у випарний апарат перегрітим до 130 °С.

2. У випарному апараті упарюється під атмосферним тиском 3,7 т/год 7 % водного розчину. Початкова температура розчину 90 °С, кінцева 110 °С. Середня температура кипіння в апараті 105 °С. Надлишковий тиск гріючої насиченої водяної пари 2,5 кгс/см<sup>2</sup>. Площа поверхні теплообміну в апараті 48 м<sup>2</sup>, коефіцієнт теплопередачі 1065 Вт/(м<sup>2</sup> К). Теплові втрати апарату в навколишнє середовище 110 кВт. Визначити; а) кінцеву концентрацію розчину; б) витрату гріючої пари при вологості 5 %.

3. У випарний апарат надходить 2,4 т/год 9% розчину, який упарюється під атмосферним тиском до кінцевої концентрації 32 %. Розбавлений розчин надходить на випарку з температурою 18 °С. Упарений розчин виводиться з апарату при 105 °С. Питома теплоємність початкового розчину 3850 Дж/(кг·К). Витрата грійної насиченої водяної пари з надлишковим тиском  $R_{\text{надл}}=2,5$  кгс/см<sup>2</sup> складає 1850 кг/год. Міра сухості пари 0,98. Визначити втрати теплоти в навколишнє середовище.

4. Розрахувати однокорпусну випарну установку для концентрування розчину цукрового сиропу з початковою концентрацією  $X_{\text{п}}$  % мас, до кінцевої концентрації  $X_{\text{к}}$  % мас. Продуктивність установки  $S$  т/год. Тиск гріючої пари першого корпусу  $P_{\text{п}}$  МПа. Початковий розчин підігривається у підігрівачі від  $t_{\text{н}}, ^{\circ}\text{C}$  до  $t_{\text{в}}, ^{\circ}\text{C}$  за рахунок тепла вторинної пари, яка виходить з випарного апарата і подається в підігрівач як гріюча. Початкова температура охолоджуючої води в конденсаторі  $t_{\text{по}}, ^{\circ}\text{C}$  (табл. 5.1).



Таблиця 5.1. Вихідні дані для розрахунку

№ вар.	Xп % мас	Xк % мас	P <sub>п</sub> , МПа	S, т/год	t <sub>п</sub> , °C	t <sub>в</sub> , °C	t <sub>по</sub> , °C
1	15	28	0,35	5	14	85	18
2	14	30	0,4	4	15	87	19
3	16	32	0.45	4.5	16	90	20
4	17	35	0.5	5.5	17	91	21
5	14	30	0.45	6	20	89	22
6	15	28	0,35	4	15	87	19
7	14	30	0,4	4.5	16	90	20
8	16	32	0.45	5.5	17	91	21
9	17	35	0.5	6	20	89	22

### Контрольні запитання

1. Призначення та сутність процесу випарювання. Його практичне використання у харчовій промисловості.
2. Як змінюються властивості розчину при випаровуванні?
3. Які методи випаровування Ви знаєте? Їх переваги та недоліки.
4. Що таке корисна різниця температур і як вона розподіляється в процесі випарювання?
5. З чого складаються температурні втрати при випаровуванні?
6. Способи економії пари, що гріє при випаровуванні?
7. У чому полягає розрахунок випарних установок та порядок його проведення?
8. Конструкції випарних установок. Їх переваги та недоліки.

## Тема 6. Теплообмінні апарати: класифікація, конструктивне оформлення, розрахунок

### 6.1 Класифікація поверхневих теплообмінних апаратів

*Теплообмінні апарати* – пристрої, призначені для передачі тепла від одного теплоносія до іншого для здійснення різних теплових процесів, наприклад, нагрівання, охолодження, кипіння, конденсації або найбільш складних фізико-хімічних процесів - випарювання та ректифікації.

Через різноманітність вимог, що пред'являються до теплообмінних апаратів, пов'язаних з умовами їх експлуатації, застосовують апарати найрізноманітніших конструкцій та типів, причому для апарату кожного типу розроблено широкий розмірний ряд поверхні теплообміну. Широка номенклатура теплообмінників за типами, розмірами, параметрами та матеріалам дозволяє вибрати для конкретних умов теплообміну апарат, оптимальний за розмірами та матеріалами.

Як прямі джерела тепла в хімічній технології використовують головним

чином топкові гази, що являють собою газоподібні продукти згоряння палива, та електричну енергію. Речовини, які отримують тепло від цих джерел і віддають його через стінку теплообмінника середовищі, що нагрівається, носять назва проміжних теплоносіїв. У харчовій промисловості числу поширених теплоносіїв відносяться водяна пара і гаряча вода, а також так звані високотемпературні теплоносія – перегріта вода, мінеральні олії, органічні рідини (та їх пари), розплавлені солі, рідкі метали та їх сплави.

Як охолоджувальні агенти для охолодження до звичайних температур (10-30<sup>0</sup>С) застосовують в основному воду та повітря. За основним призначенням ТА ділять на власне теплообмінники, де тепловий процес є основним і реактори, де тепловий процес є допоміжним, а основний процес може бути або фізико-хімічний або біохімічний.

Усі теплообмінні апарати за способом передачі тепла поділяються на дві великі групи: поверхневі теплообмінні апарати та апарати змішування.

У поверхневих апаратах передача тепла від одного теплоносія до іншого здійснюється за участю твердої стінки. Процес теплопередачі в змішувальних теплообмінних апаратах здійснюється шляхом безпосереднього контакту та змішування рідких та газоподібних теплоносіїв.

Поверхневі теплообмінні апарати в свою чергу поділяють на рекуперативні та регенеративні. У рекуперативних апаратах тепло від одного теплоносія до іншого передається через стінку, що розділяє їх, з теплопровідного матеріалу. У регенеративних теплообмінних апаратах теплоносія поперемінно стикаються з однією і тією ж поверхнею нагріву, яка в один період нагрівається, акумулюючи тепло «гарячого» теплоносія, а на другий період охолоджується, віддаючи тепло холодному теплоносію.

Рекуперативні теплообмінні апарати класифікуються за таким ознаками:

за родом теплоносіїв залежно від їхнього агрегатного стану: паро-рідинні; рідинно-рідинні; газо-рідинні; газо-газові; паро-газові;

по конфігурації поверхні теплообміну: трубчасті апарати із прямими трубками; спіральні; пластинчасті; змійникові;

з компонування поверхні нагріву: типу «труба в трубі»; кожухотрубчасті; зрошувальні апарати.

Теплообмінні апарати поверхневого типу, крім того, класифікуються по призначенню (підігрівачі, холодильники тощо); за взаємним напрямком теплоносіїв (прямотік, протитечії, змішаний струм); за матеріалом поверхні теплообміну; за кількістю ходів тощо.

Класифікація поверхневих теплообмінних апаратів за окремими груп (рис. 6.1).

*I* – с відкритою гріючою поверхнею: 1 – нагрівальний елемент; 2 – гріюча поверхню; 3 – об'єкт, що нагрівається;

*II* – із сорочкою: 1 – патрубок для введення гріючого агента; 2 – сорочка; 3 – корпус апарату; 4 – патрубок для виходу;

*III* – з внутрішньо лежачою поверхнею нагріву: *a* – з електронагрівачем: 1 – корпус апарату; 2 – електронагрівач; *b* – з трубчастим нагрівачем: 1 – корпус, 2 – нагрівач, 3, 4 – патрубки для входу та виходу;

IV – з поверхневими теплоносіями: а – циліндричний: 1 – гнучкі нагрівачі, 2 – корпус, б – трубчастий: 1 – труба для рідини, що нагрівається, 2 – гнучкі нагрівачі; в – з вогневим обігрівом: 1 – пальник, 2 – корпус.

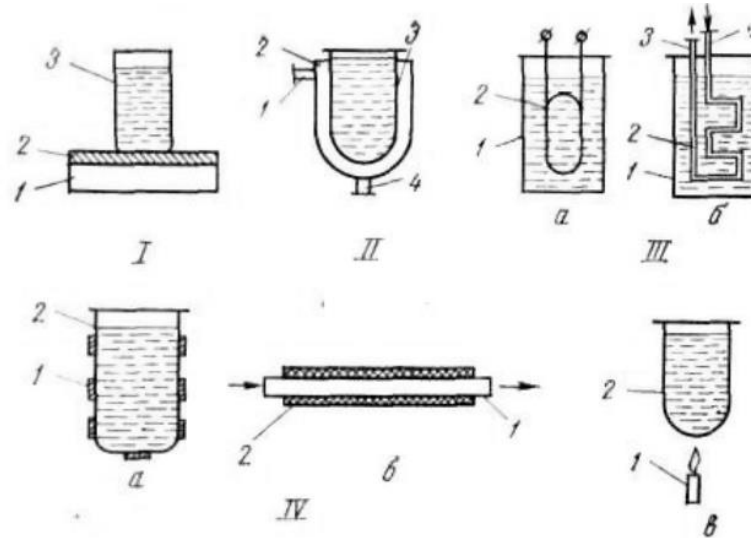


Рисунок 6.1 – Класифікація теплообмінних апаратів

## 6.2 Конструкції теплообмінних апаратів

Кожухотрубчасті теплообмінники є апаратами, виконаними з пучків труб, скріплених за допомогою трубних ґрат та обмежених кожухами та кришками з патрубками. На виробництві застосовуються апарати одно та багатоходові (рис. 6.2.)

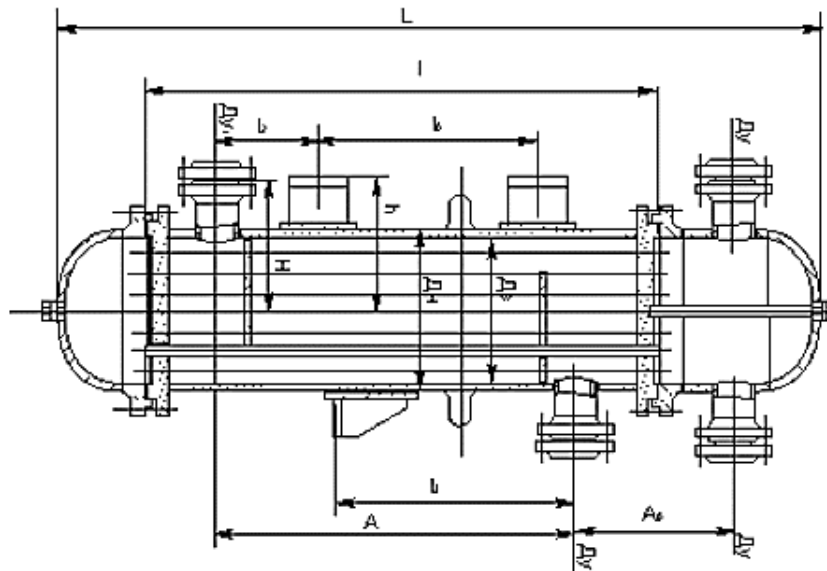


Рисунок 6.2 а – Апарати кожухотрубчасті з нерухомими трубними решітками багатоходові

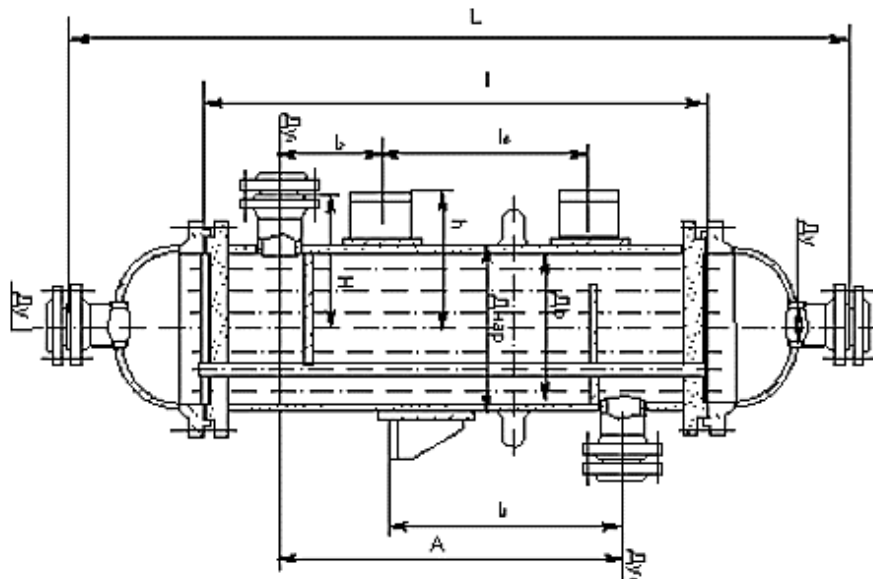


Рисунок 6.2 б – Апарати кожухотрубчасті з нерухомими трубними решітками одноходові

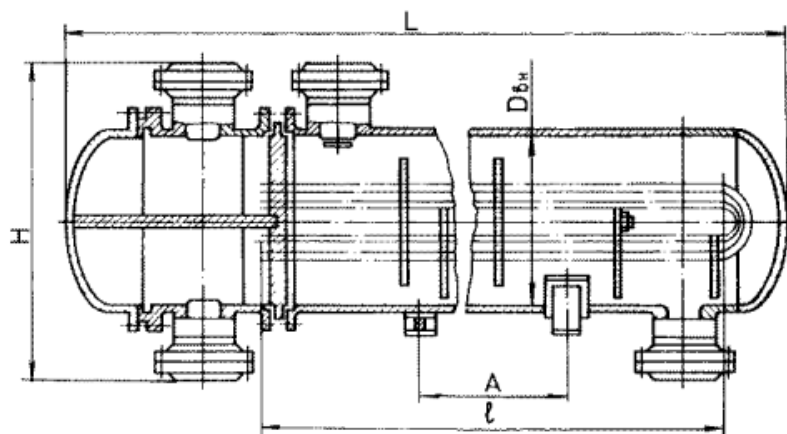


Рисунок 6.2 в – Апарати кожухотрубчасті U-подібні

Трубний і міжтрубний простір в апараті роз'єднані, а кожен з них може бути поділено перегородками на кілька ходів. Перегородки призначені збільшення швидкості і, отже, коефіцієнта тепловіддачі теплоносіїв.

Теплообмінники цього типу призначаються для теплообміну: між різними рідинами, між рідинами та парою, між рідинами та газами. Вони застосовуються у випадках, коли потрібна велика поверхня теплообміну.

При нагріванні рідини парою в більшості випадків пара вводиться в міжтрубний простір, а рідина, що нагрівається, протікає по трубках. У кожухотрубчастих теплообмінниках прохідний переріз міжтрубного простору в 2-3 рази більший прохідного перерізу усередині труб. Тому при однакових витратах теплоносіїв, мають однаковий агрегатний стан, швидкості теплоносія в міжтрубному просторі нижчі та коефіцієнти тепловіддачі на поверхні міжтрубного простору невисокі, що знижує коефіцієнт теплопередачі в апараті.

Теплопередавальна поверхня апаратів може становити від кількох сотень квадратних сантиметрів до кількох тисяч квадратних метрів.

Корпус (кожух) кожухотрубчастого теплообмінника являє собою циліндр, зварений з одного або кількох сталевих листів. Кожухи відрізняються основним способом з'єднання з трубними решітками та кришками. Товщина стінки кожуха визначається максимальним тиском робочого середовища та діаметром апарату, але робиться тонше 4 мм. До циліндричних кромek кожуха приварюються фланці для з'єднання з кришками чи днищами. На зовнішній поверхні кожуха приварюються патрубки та опори апарату. Трубки кожухотрубчастих апаратів виготовляють прямими або вигнутими (*U*-подібними) (рис. 6.2 в), діаметром від 12 до 57 мм. Матеріал трубок вибирається в залежності від середовища, що омиває її поверхню. Застосовуються трубки зі сталі, латуні та зі спеціальних сплавів. Кришки кожухотрубчастих апаратів мають форму плоских плит, конусів, сфер, а найчастіше опуклих чи увігнутих еліпсів.

Секційні теплообмінники є різновидом трубчастих апаратів, складаються з декількох послідовно з'єднаних секцій, кожна з яких є кожухотрубчастий теплообмінник з малим числом труб і кожухом невеликого діаметра.

У секційних теплообмінниках за однакових витрат рідин швидкості руху теплоносіїв у трубах і міжтрубному просторі майже рівновеликі, що забезпечує підвищені коефіцієнти теплопередачі порівняно з звичайними трубчастими теплообмінниками. Найпростішим із цього типу теплообмінників є теплообмінник «труба в трубі»: у зовнішню трубу вставлено трубу меншого діаметра. Усі елементи апарату з'єднані зварюванням.

Недоліки секційних теплообмінників: висока вартість одиниці поверхні нагрівання, так як розподіл її на секції викликає збільшення кількості найбільш дорогих елементів апарату – трубних грат, фланцевих з'єднань, перехідних камер, компенсаторів тощо; значні гідравлічні опори внаслідок різних поворотів і переходів викликають підвищену витрату електроенергії на привід насоса, що прокачує теплоносіїв.

### 6.3 Приклади розв'язування завдання [12, 13]

**Задача.** Розрахувати та накреслити схему вертикального кожухотрубного теплообмінника для нагрівання рідини за таких даних: кількість рідини, яку потрібно нагріти  $G$ , т/год; початкова температура  $t_n$ , °C; кінцева температура  $t_k$ , °C; тиск нагрівної пари  $P$ , МПа; концентрація розчину  $B$ , мас.%; швидкість руху рідини  $w$ , м/с.

Визначити поверхню теплопередачі теплообмінника та витрату пари, кількість ходів трубного простору, діаметр апарату, діаметри патрубків для підведення робочих середовищ, гідравлічний опір, енерговитрати для проведення процесу та товщину теплової ізоляції.

#### *Розв'язання*

Внутрішній діаметр  $d_b$  трубок приймається в межах 20...50 мм за товщини стінки  $\delta = 1,5...3$  мм; довжина (висота) трубок  $H = 1...4$  м.

Матеріал трубок і коефіцієнт його теплопровідності  $\lambda_{ст}$ , Вт/(м К) приймається студентом: мідь  $\lambda_{ст} = 380$ ; латунь  $\lambda_{ст} = 93$ ; алюміній  $\lambda_{ст} = 200$ ; сталь  $\lambda_{ст} = 46$ ; нержавіюча сталь  $\lambda_{ст} = 17,5$ .

Коефіцієнт використання поверхні нагріву  $\phi = 0,7 \dots 0,9$ .

Таблиця 6.1. Вихідні дані для розрахунку

№ вар.	G	Б	w	$t_n$	$t_k$	P
1	60	16	0,9	70	90	0,15
2	70	16	1,0	80	96	0,17
3	80	17	1,1	85	100	0,20
4	90	17	1,2	90	110	0,24
5	100	18	1,3	105	120	0,32
6	75	18	1,4	55	85	0,12
7	85	20	1,5	100	115	0,28
8	95	20	1,15	60	90	0,15
9	65	16	1,25	40	80	0,11
10	55	16	0,8	35	75	0,095

1. Визначення температурних умов нагріву.

Середню різницю температур між парою і рідиною, що нагрівається, визначають як середньологарифмічну різницю:

$$\Delta t_c = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_m}{\ln(\Delta t_{\delta}/\Delta t_m)} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_m}{2,31g(\Delta t_{\delta}/\Delta t_m)},$$

де  $\Delta t_{\delta}$ ,  $\Delta t_m$  – різниці температур між теплоносіями на кінцях теплообмінника;

$$\Delta t_{\delta} = t_p - t_n ; \quad \Delta t_m = t_p - t_k$$

$t_p$  – температура насиченої пари за тиску  $p$ .

Якщо  $\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_m} > 2$ , то середньологарифмічну різницю можна замінити середньоарифметичною різницею:

$$\Delta t_c = \frac{\Delta t_{\delta} + \Delta t_m}{2}$$

Середня температура рідини, яку нагрівають:

$$t_c = t_p - \Delta t_c$$

2. Теплофізичні властивості рідини, що нагрівається.

При середній температурі  $t_c$  і концентрації Б теплофізичні параметри розчину або води визначаються за допомогою рівнянь або таблиць. З таблиць і

формул знаходять: в'язкість  $\mu$  [Па · с]; густину  $\rho$  [кг/м<sup>3</sup>]; теплоємність  $c$  [Дж/(кг·К)]; коефіцієнт теплопровідності рідини  $\lambda$  [Вт/(м·К)].

3. Теплове навантаження і витрати пари. Теплове навантаження з урахуванням теплових втрат, Дж/с або Вт,

$$Q = xG_c(t_k - t_n)$$

де  $x$  – коефіцієнт, що враховує втрати теплоти в навколишнє середовище;  $x = 1,02 \dots 1,05$ ;  $G$  – витрата рідини, кг/с;  $c$  – теплоємність рідини, Дж/(кг·К).

Витрати пари, кг/с,

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

де  $I, i$  – ентальпія гріючої пари і конденсату, Дж/кг

Ентальпія конденсату

$$i = ct_k = 4190t_k,$$

де  $t_k$  – температура конденсату, що дорівнює  $t_n - (2 \dots 3)$  °С.

4. Розрахунок коефіцієнта теплопередачі.

Загальний коефіцієнт теплопередачі визначають за такою формулою:

$$K_0 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

де  $\alpha_1$  – коефіцієнт тепловіддачі від конденсуючої пари до стінки, Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$\delta$  – товщина стінки, м;

$\lambda_{ст}$  – теплопровідність стінки, Вт/(м·К);

$\alpha_2$  – коефіцієнт тепловіддачі від стінки до рідини, Вт/(м<sup>2</sup> · К).

Коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_2$  визначається залежно від режиму руху рідини.  
При  $Re < 2300$

$$Nu = 0,15Re^{0,33}Pr^{0,43}Gr^{0,1}\left(\frac{Pr}{Pr_{ст}}\right)^{0,25}$$

де  $Nu, Re, Pr, Gr$  – відповідно критерії Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля, Грасгофа;  $Pr_{ст}$  – критерії Прандтля при температурі стінки.

При  $2300 < Re < 10000$

$$Nu = 0,008Re^{0,9}Pr^{0,43}.$$

При  $Re > 10000$

$$Nu = 0,021Re^{0,8}Pr^{0,43}\left(\frac{Pr}{Pr_{ст}}\right)^{0,25}$$

Визначальний геометричний розмір – внутрішній діаметр трубки  $d_B$ , м. За знайденою величиною Nu:

$$\alpha = Nu \cdot \lambda / d_B .$$

Розрахункове рівняння для обчислення коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_1$ :

$$\alpha_1 = 2,04A^4 \sqrt{\frac{r}{H\Delta t_{ст1}}}$$

де  $A$  – розрахунковий коефіцієнт, який залежить від фізичних властивостей плівки конденсату;

$r$  – теплота конденсації, Дж/кг;

$H$  – висота (довжина) вертикальної трубки, м;

$\Delta t_1$  – різниця температур,  $t_p - t_{ст1}$ , °C;

$t_p$  – температура пари;

$t_{ст1}$  – температура стінки, на якій конденсується пара

$$t_{ст} = \frac{t_p + t_{ст1}}{2}$$

Значення  $A$  залежно від температури плівки конденсату  $t_{пл}$  такі:

$t_{пл}$	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
$A$	120	139	155	169	179	188	194	197	199	199

У зв'язку з тим, що температура стінки зі сторони пари  $t_{ст1}$  невідома, її визначають методом послідовного наближення. Для цього задаються значенням  $t_{ст1}$ , яке знаходиться між  $t_p$  і  $t_c$ ; при цьому  $t_{ст1}$  буде ближче до  $t_p$ .

Задану температуру перевіряють за таким рівнянням:

$$t_{ст1} = t_p - \frac{K\Delta t_c}{\alpha_1}$$

де  $K = K_0\phi$  – розрахунковий коефіцієнт теплопередачі.

Різниця між заданою і розрахунковою температурами повинна бути не вища 1°C.

*Визначення площі поверхні теплопередачі.*

Площа поверхні нагрівання теплообмінника визначається за такою формулою:



$$F = \frac{Q}{K\Delta t_c}$$

*Конструктивний розрахунок кожухотрубного теплообмінника.* Для кожухотрубних теплообмінників важливою частиною конструктивного розрахунку є розрахунок проточної частини трубного простору. Виходячи із заданої продуктивності апарата і швидкості руху рідини з рівняння витрат визначають площу прохідного перерізу трубок одного ходу, м<sup>2</sup>:

$$f_1 = \frac{G}{\rho w}$$

де  $G$  – витрата рідини, кг/с;

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

$w$  – швидкість руху рідини всередині трубок, м/с.

Звідси число трубок одного ходу:

$$n_1 = \frac{f_1}{0,785d_B^2}$$

де  $d_B$  – внутрішній діаметр трубки, м.

Розрахункова довжина всіх ходів, м

$$L = \frac{F}{\pi d_p n_1}$$

де  $d_p$  – розрахунковий діаметр трубки, який визначають залежно від співвідношення  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  (при  $\alpha_1 \approx \alpha_2 - d_p = 0,5 (d_B + d_3)$ ; при  $\alpha_1 \gg \alpha_2 - d_p = d_B$ ; при  $\alpha_1 \ll \alpha_2 d_p = d_3$ );

$d_3$  – зовнішній діаметр трубки, м.

Кількість ходів трубного простору  $Z=L/H$

Загальна кількість трубок, які розміщуються на трубних решітках  $n=zn_1$

Для рідин у кожухотрубних теплообмінниках звичайно користуються трубами діаметром 16 ... 38 мм, а для газів, в'язких і забруднених рідин — до 76 мм. Труби в трубних решітках найчастіше розміщують по периметрах правильних шестикутників. Для даного випадку при визначенні в теплообміннику за гальної кількості труб  $n$  виходять з кількості труб  $a$ , розміщених на стороні найбільшого шестикутника:  $n = 3a(a - 1) + 1$ .

Кількість труб, розміщених по діагоналі найбільшого шестикутника,  
 $b = 2a - 1$ ,

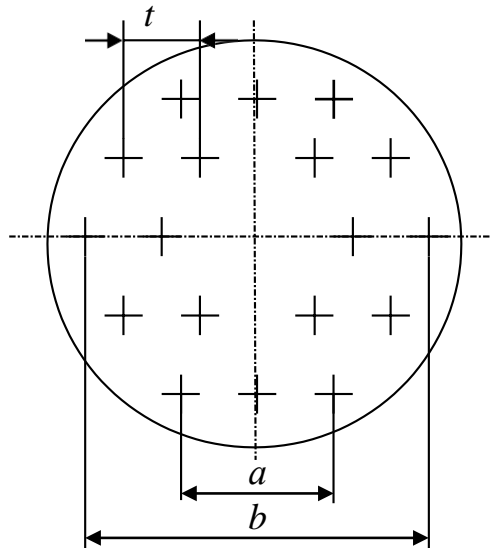


Рисунок 6.3 – Схема розміщення труб

При закріпленні труб у трубних решітках розвальцьовуванням крок  $t$  розміщення труб вибирають залежно від їхнього зовнішнього діаметра в межах

$$t = (1,3 \dots 1,5) d_3$$

При закріпленні труб зварюванням крок розміщення труб вибирають меншим ( $t = 1,25d_3$ ). Іноді труби розміщують по периметрах квадратів або по концентричних колах.

Діаметр теплообмінника:

$$D = t(b - 1) + 4 d_3$$

Діаметр патрубків визначають за рівнянням об'ємних витрат, м<sup>3</sup>/с:

$$V = \frac{G}{\rho}$$

звідки діаметр патрубка, м

$$d_n = 1,13 \sqrt{\frac{G}{\rho w}}$$

Вибираючи швидкість руху теплоносіїв, можна керуватися такими рекомендаціями: для рідин  $w = 0,5 \dots 1,5$  м/с, для пари  $w = 20 \dots 40$  м/с, для газів  $w = 5 \dots 15$  м/с.

Гідравлічний розрахунок теплообмінника потрібний для визначення потужності насосів і вентиляторів та встановлення оптимального режиму роботи апарата.

Потужність, потрібну для переміщення теплоносія через апарат, Вт,

$$N = \frac{V\Delta p}{\eta}$$

де  $V$  – об'ємні витрати рідини, м<sup>3</sup>/с;  
 $\Delta p$  – перепад тисків в апараті, Па;  
 $\eta$  – ККД насоса або вентилятора.

Гідравлічний опір апарата складається з опору тертя  $\Delta p_{\text{тер}}$  і місцевих опорів  $\Delta p_{\text{м}}$ . Отже, повний гідравлічний опір

$$\Delta p = \Delta p_{\text{тер}} + \Delta p_{\text{м}} = \left(\lambda \frac{L}{d} + \sum \zeta\right) \frac{w^2 \rho}{2}$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного тертя;  
 $L$  – загальна довжина труби, м;  
 $d$  – діаметр труби, м;  
 $\zeta$  – коефіцієнт місцевого опору;  
 $w$  – швидкість руху теплоносія, м/с;  
 $\rho$  – густина теплоносія, кг/м<sup>3</sup>.

Для ізотермічного ламінарного руху ( $Re < 2300$ ) в круглих трубах коефіцієнт тертя

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

Для ізотермічного турбулентного руху в гладеньких трубах ( $Re = (4 \cdot 10^3 \dots 10^5)$ )

$$\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}}$$

Значення коефіцієнтів місцевих опорів беруть з таблиць відповідних літературних джерел.

*Визначення товщини теплової ізоляції.* Теплова ізоляція – один із основних факторів, які зменшують втрати теплоти і зберігають паливо.

Товщина ізоляції повинна бути такою, щоб температура на її поверхні була не більшою за 50°C.

Товщина ізоляції:

$$\delta = \frac{\lambda(t_a - t_i)}{\alpha(t_i - t_n)}$$

де  $\lambda$  – теплопровідність ізоляційного матеріалу, Вт/(м · К);

$t_a$ ,  $t_i$ ,  $t_n$  – температура відповідно в апараті, на поверхні ізоляції та повітря, що оточує апарат, °С;

$\alpha$  – сумарний коефіцієнт тепловіддачі від стінки до повітря, Вт/(м<sup>2</sup> · К),  $\alpha = 9,76 + 0,07 (t_i - t_n)$ .

Для апаратів, що працюють у закритих приміщеннях,  $t_i$  береться в інтервалі 35...45 °С, а на відкритому повітрі в зимовий час — в інтервалі 0...10 °С.

#### **6.4 Завдання для самостійного виконання**

##### **Тестові завдання**

**Рухомою силою теплових процесів є:**

- A. різниця температур середовищ
- B. різниця тиску середовищ
- C. різниця щільності середовищ
- D. всі відповіді вірні

**Вхід та вихід теплообмінного апарата визначається:**

- A. за рухом гарячого теплоносія.
- B. за рухом холодного теплоносія.
- C. за рухом основного теплоносія.
- D. немає вірної відповіді

**Рівняння теплопередачі:**

- A.  $Q=K\Delta tF$
- B.  $Q=K-\Delta tF$
- C.  $Q=K+\Delta tF$
- D.  $Q=K/\Delta tF$

**Повна теплоємність масового видатку відповідного теплоносія або його водяний еквівалент:**

- A.  $W=1/Gc_p$
- B.  $W=1-Gc_p$
- C.  $W=1+Gc_p$
- D.  $W=Gc_p$

**Якщо на окремих ділянках значення коефіцієнта тепловіддачі змінюється суттєво, його:**

- A. усереднюють по поверхні
- B. усереднюють по об'єму
- C. усереднюють по довжині
- D. немає вірної відповіді

**В теплотехнічному відношенні більш вигідна:**

- A. прототечія
- B. протитечія
- C. все одно
- D. немає вірної відповіді

**Більше розповсюдження отримали такі теплообмінні апарати:**

- A. кожухотрубчасті
- B. двотрубчасті
- C. змійовики
- D. спіральні

**Теплообмінники з жорстким закріпленням труб у трубчастій голівці надійно працюють при різницях температур:**

- A. 20-30 °C
- B. 25-30 °C
- C. 30-35 °C
- D. 30-40 °C

**Оптимальні швидкості рідких теплоносіїв:**

- A. 0,1-2 м/с
- B. 0,3-2 м/с
- C. 0,5-2 м/с
- D. 0,7-2 м/с

**Переважне розповсюдження має розміщення труб:**

- A. по сторонах і вершинах правильного трикутника
- B. по сторонах і вершинах квадратів
- C. по концентричних колах
- D. всі відповіді вірні

**Рівняння подібності тепловіддачі при вільному руці:**

- A.  $Nu = c(Gr \cdot Pr)^n$
- B.  $Nu = c(Gr - Pr)^n$
- C.  $Nu = c(Gr + Pr)^n$
- D.  $Nu = c(Gr/Pr)^n$

**Коефіцієнт тепловіддачі:**

- A.  $\alpha = (Nu \lambda) / l$
- B.  $\alpha = (Nu \lambda) \cdot l$
- C.  $\alpha = (Nu / \lambda) / l$
- D.  $\alpha = (Nu + \lambda) / l$

## Задачі для самостійного розв'язування

1. Ємний підігрівник здійснює відпускання до системи гарячого водопостачання споруди  $0,7 \text{ кг/с}$  нагрітої води. В той самий час до нього надходить  $0,6 \text{ кг/с}$  холодної води з температурою  $23^\circ \text{C}$ , прийнявши розрахунковий інтервал часу  $\Delta T=600 \text{ с}$ , обчислити температуру води на виході з апарата. Маса і температура води у момент часу  $T=0$  дорівнюють відповідно  $1830 \text{ кг}$  і  $60^\circ \text{C}$ . Площу встановленої всередині поверхні теплопередачі прийняти рівною  $F=6,8 \text{ м}^2$ . Трубний пучок теплообмінної поверхні складено з 10 труб діаметром  $32 \text{ мм}$ . Коефіцієнт теплопровідності матеріалу труб поверхні теплопередачі прийняти рівним  $\lambda=32 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$ . Температура нагрівної (мережної) води на вході до апарату та її витрати дорівнюють  $95^\circ \text{C}$  та  $0,8 \text{ кг/с}$ , відповідно. Втрати теплоти в оточуюче середовище через бокову поверхню апарата не враховувати.

2. У ємному теплообмінному апараті, призначеному для роботи у системі гарячого водопостачання, у початковий момент часу знаходиться  $1500 \text{ кг}$  води з температурою  $55^\circ \text{C}$ . Обчислити зміну температури води на виході з апарату впродовж часу, якщо витрати води на виході з апарату дорівнюють  $G_2=0,15 \text{ кг/с}$ , а надходження до нього холодної води з температурою  $15^\circ \text{C}$  становить  $G_1=0,25 \text{ кг/с}$ . Тепловий потік від теплообмінної поверхні, що розміщена всередині ємності, дорівнюють  $Q_T=12 \text{ кВт}$ , а втрати теплоти в оточуюче середовище через бокову поверхню апарату становлять  $Q_B=0,8 \text{ кВт}$ .

3. Розрахувати і трубчастий теплообмінник (нагрівач) жорсткої конструкції, якщо відома необхідна для теплопередачі площа  $A=17 \text{ м}^2$ ; пропускна спроможність апарата  $V=16 \text{ дм}^3/\text{с}$  швидкість руху продукту по трубопроводах  $v=0,35 \text{ м/с}$ . Крім того задається тиск в трубах  $p_{\text{тр}}=0,15 \text{ Па}$  і тиск в корпусі  $p_{\text{к}}=0,45 \text{ Па}$ . Прийняти зовнішній, внутрішній та розрахунковий діаметр труб  $d_z=38 \text{ мм}$ ,  $d_b=34 \text{ мм}$  і  $d_p=38 \text{ мм}$ . Робоча температура труб  $t_m=100^\circ \text{C}$ , корпуса  $t_k=60^\circ \text{C}$ , температура навколишнього середовища  $t_c=20^\circ \text{C}$ .

## Контрольні запитання

1. Які типи теплообмінників найбільш широко застосовуються в харчовій промисловості?
2. Принцип роботи одноходового кожухотрубного теплообмінника.
3. З якою метою використовуються багатоходові кожухотрубні теплообмінники?
4. У яких випадках використовують теплообмінники типу «труба у труб»?
5. Пристрій та принцип роботи спіральних та пластинчастих теплообмінників. Їх переваги та недоліки.
6. У яких випадках використовують теплообмінники з ребристими поверхнями?
7. У чому полягають основні способи збільшення інтенсивності теплообміну?

8. Опишіть конструкцію теплообмінного кожухотрубного апарату
9. Опишіть принцип дії кожухотрубного теплообмінного апарату.
10. Принцип розрахунку теплової апаратури.

## **Тема 7. Конденсація: типові конструкції конденсаторів та основи розрахунку**

### **7.1. Конденсація**

*Конденсація* – перехід речовини з паро- або газоподібної стану в рідке, що проводиться шляхом охолодження його водою або холодним повітрям.

Конденсація парів широко застосовується в харчовій промисловості при проведенні процесів випарювання, вакуум-сушіння, для створення розрідження. При цьому пари, що підлягають конденсації, зазвичай відводять в інший апарат – конденсатор, де вони охолоджуються водою чи повітрям. Об'єм одержуваного конденсату в тисячу і більше разів менше обсягу пари, з якої він утворився. Тому у конденсаторі створюється розрідження, що збільшується при зменшенні температури конденсації для підтримки вакууму на необхідному рівні із конденсатора безперервно відводяться за допомогою вакуум-насоса неконденсуючі гази.

За способом охолодження розрізняють два типи конденсаторів: змішування та поверхневі.

Конденсатори змішування – апарати де пар безпосередньо змішується з охолодною водою. За способом відведення води, неконденсованих газів і конденсату розрізняють сухі та мокрі конденсатори змішування.

Поверхневі конденсатори більш металоемні та вимагають більшої витрати води. У промисловості як поверхневих конденсаторів використовують різні теплообмінники, наприклад, трубчасті та зрошувальні холодильники-конденсатори.

### **7.2 Типові конструкції конденсаторів**

У сухих (барометричних) конденсаторах (рис. 7.1) вода та конденсат видаляються спільно, а гази окремо за допомогою вакуум-насоса. У середині корпусу 1 взаємодія пари та води відбувається в протитоці. Вода подається через штуцер у вигляді тонких струменів перетікає з тарілки 2 на тарілку через отвори та борти. Пара надходить знизу через штуцер і при зіткненні з водою конденсується. Суміш конденсату та води потрапляє барометричну трубу 3 висотою близько 10 м і далі в колодязь 4. Труба 3 і колодязь відіграють роль гідравлічного затвора, що перешкоджає проникненню зовнішнього повітря на апарат. Несконденсовані гази відсмоктуються через штуцер 8 вакуум-насосом. Процес конденсації пари протікає під вакуумом (0,01...0,02 Мн/м<sup>2</sup>).

Для врівноваження різниці тисків у конденсаторі та атмосферного використовується стовп рідини, що знаходиться у трубці 3. Перевагою протиточного барометричного конденсатора є найбільш простий і дешевий

спосіб відведення води, видаляється в каналізацію. У мокрих конденсаторах змішування вода, що охолоджується розпорошується всередині апарату через сопла.

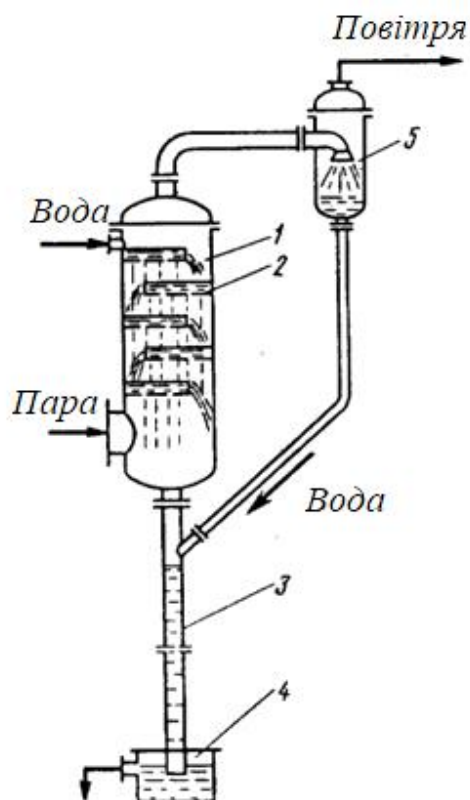


Рисунок 7.1 – Барометричний конденсатор: 1 – корпус, 2 – тарілка, 3 – барометрична труба, 4 – криниця, 5 – пастка

Тому з'являється можливість окремого відведення конденсату та охолоджувальної води. Наприклад, якщо зрідження та охолодження кінцевого продукту одержано у вигляді перегрітої пари – це є завершальною операцією технологічного процесу.

### 7.3 Приклади розв'язування завдань [12, 13]

**Завдання.** Розрахунок оболонки для трубчастого конденсатора з сумішшю пари фреону R12 та водяної пари.

Питома теплота конденсації  $q_1 = 176480 \text{ Дж/кг}$ ,  $G_1 = 1,832 \text{ кг/с}$  температура конденсації становить  $19 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Фізичні та хімічні властивості конденсату при температурі конденсації:



$$\lambda_1 = 0,0710 \text{ Вт / мК}$$

$$\rho_1 = 1550 + \frac{20 - (-10)}{50 - (-10)} (1420 - 1550) = 1480 \text{ кг / м}^3$$

$$\mu_1 = 611 + \frac{20 - (-10)}{50 - (-10)} (347 - 611) = 479 * 10^{-6} \text{ Пас}$$

$$\nu_1 = 0,149 * 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}$$

Тепло конденсації забирає вода з початковою температурою  $t_{2н} = 10^\circ\text{C}$ . Візьмемо для прикладу температуру води, що виходить з конденсатора  $t_2 = 0,5(10+15) = 12,5^\circ\text{C}$ . Вода має такі фізико-хімічні властивості:

$$\lambda_2 = 0,581 \text{ Вт / мК}$$

$$\rho_2 = 999,5 \text{ кг / м}^3$$

$$c_2 = 4190 \text{ Дж / кгК}$$

$$\mu_2 = 0,0012325 \text{ Пас}$$

$$\text{Pr}_2 = \frac{c_2 \mu_2}{\lambda_2} = 8,888$$

Теплове навантаження апарату:

$$Q = q_1 G_1 = 176480 * 1,832 = 323311 \text{ Вт}$$

Витрата води:

$$G_2 = \frac{Q}{c_2 (t_{2ек} - t_{2н})} = \frac{323311}{4190(15 - 10)} = 15,43 \text{ кг / с}$$

Середня різниця температур

$$\Delta t_{cp} = \frac{(t_1 - t_{2н}) - (t_1 - t_{2к})}{\ln \frac{t_1 - t_{2н}}{t_1 - t_{2к}}} = \frac{(19 - 10) - (19 - 15)}{\ln \frac{19 - 10}{19 - 15}} = 7,2 \text{ град}$$

Приймаємо  $K_{op} = 500 \text{ Вт / м}^2$ .

Орієнтовне значення поверхні теплопередачі:

$$F_{op} = \frac{Q}{k \Delta t_{cp}} = \frac{323311}{500 * 7,2} = 89,8 \text{ м}^2$$

Обираємо конденсатор типу КГР-85:  $D_k = 500 \text{ мм}$ ;  $d_{mp} = 2063 \text{ мм}$ ; кількість

ходів  $z=4$ ; загальна кількість труб  $n=210$ ; довжина труб  $L=3\text{м}$ ; площа теплопередачі  $F=98,5\text{м}^2$ .

Точний розрахунок поверхні теплообміну.

Коефіцієнт тепловіддачі ми знаходимо за такою формулою:

$$k = \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \sum \frac{\delta}{\lambda} \right)^{-1}$$

де  $\alpha_1$  – коефіцієнт тепловіддачі конденсації пари на зовнішній поверхні горизонтального пучка труб;

$\alpha_2$  – коефіцієнт тепловіддачі до води;

$\sum \frac{\delta}{\lambda}$  – сума теплового опору стінки мідної труби та домішок води та пари.

$$\alpha_1 = 2,02\varepsilon\lambda_1^3 \sqrt[3]{\frac{\rho_1^2 Ln}{\mu_1 G_1}} = 2,02 * 0,6 * 0,071^3 \sqrt[3]{\frac{1480^2 * 3 * 210}{479 * 10^{-6} * 1,832}} = 911,3 \text{Вт} / \text{м}^2 \text{К}$$

де  $\varepsilon$  – поправочний коефіцієнт ( $\varepsilon = 0,6$  при  $n > 100$ ).

$$\alpha_2 = \frac{Nu\lambda}{d_{ен}}$$

$Nu$  – критерій Нуссельта, який визначається числом Рейнольдса.

$$Re = \frac{4G_2 z}{\pi d_{ен} n \mu_2} = \frac{4 * 15,43 * 4}{3,14 * 0,014 * 210 * 0,0012325} = 21698$$

Режим течії турбулентний, значить

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \left( \frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,625}$$

Перепишемо останню формулу з урахуванням  $\alpha_2$ :

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_2}{d_{ен}} * 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4}$$

Для газів поправкою  $\left( \frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,625}$  можна знехтувати,

Тоді

$$\alpha_2 = \frac{0,581}{0,014} * 0,023 * 21698^{0,8} * 8,888^{0,4} = 6736 \text{ Bm} / \text{m}^2 \text{ K}$$

Суму термічних опорів знайдемо за формулою:

$$\sum \frac{\delta}{\lambda} = \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{r_{31}} + \frac{1}{r_{32}}$$

де  $\delta_{cm}$  – товща стінок труб (  $\delta_{cm} = 3 \text{ мм}$  );

$\lambda_{cm}$  – теплопровідність стінових матеріалів (  $\lambda_{cm} = 384 \text{ Bm} / \text{m}^2 \text{ K}$  );

$r_{31}$ ;  $r_{32}$  – термостійкість шару бруду по обидві сторони стіни  $r_{31} = 1860 \text{ Bm} / \text{m}^2 \text{ K}$  ;  
 $r_{32} = 1860 \text{ Bm} / \text{m}^2 \text{ K}$  .

$$\sum \frac{\delta}{\lambda} = \frac{3 * 10^{-3}}{384} + \frac{1}{1860} + \frac{1}{2900} = 0,0008903 \text{ m}^2 \text{ K} / \text{Bm} ,$$

Тоді

$$k = \left( \frac{1}{911,3} + \frac{1}{6736} + 0,0008903 \right)^{-1} = 468 \text{ Bm} / \text{m}^2 \text{ K}$$

Необхідна поверхня теплообміну:

$$F = \frac{Q}{k \Delta t_{cp}} = \frac{323311}{468 * 7,2} = 95,5 \text{ m}^2$$

Для теплопередачі

$$\Delta = \frac{98,5 - 95,9}{95,9} = 3\%$$

Гідрравлічний опір розраховується за такою формулою:

$$\Delta p = \lambda \frac{Lz}{d} \frac{\omega_{mp}^2 \rho_{mp}}{2} + [2,5(7-1) + 2z] \frac{\omega_{mp}^2 \rho_{mp}}{2} + 3 \frac{\rho_{mp} \omega_{mp}^2}{2}$$

Швидкість потоку води в трубопроводі:

$$\omega_{mp} = \frac{4G_i z}{\pi d^2 n \rho_2} = \frac{4 * 15,34 * 4}{3,14 * 0,014^2 * 999,5 * 210} = 1,9 \text{ м/с}$$

$$\chi_m = 0,25 \left\{ \lg \left[ \frac{l}{3,7} + \left( \frac{6,81}{\text{Re}} \right)^{0,9} \right] \right\}^{-2}$$

$l = \frac{\Delta}{d}$  – відношення шорсткості труб.

Прийmemo  $\Delta = 0,2 \text{ мм}$ :

$$\lambda = 0,25 \left\{ \lg \left[ \frac{0,2 \omega^{-3}}{0,014 * 3,7} + \left( \frac{6,81}{21698} \right)^{0,9} \right] \right\}^{-2} = 0,045 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$$

Швидкість води в аксесуарах:

$$\omega_{трут} = \frac{4G_2}{\pi d_{ин}^2 \rho_2} = \frac{4 * 15,43}{3,14 * 0,065^2 * 999,5} = 4,65 \text{ м/с}$$

де  $d_{ин}$  – діаметр для умовного проходу арматури труб ( $d_{ин} = 0,065$ )

$$\Delta p = 0,045 \frac{3 * 4}{0,014} \frac{1,9^2 * 999,5}{2} + [2,5(7-1) + 24] \frac{1,9^2 * 999,5}{2} + 3 \frac{999,5 * 1,9^2}{2} = 12947 \text{ Па}$$

#### 7.4. Завдання для самостійного виконання

##### Контрольні запитання

1. За яких умов відбувається конденсація парів та газів? Які види конденсації Ви знаєте?
2. Що таке поверхнева конденсація та в яких апаратах вона здійснюється?
3. У чому різниця між мокрими та сухими конденсаторами?
4. Які типи теплообмінників найбільш широко застосовуються в харчовій промисловості?
5. Принцип роботи одноходового кожухотрубного теплообмінника.
6. З якою метою використовуються багатоходові кожухотрубні теплообмінники?
7. У яких випадках використовують теплообмінники типу «труба у трубі»?
8. Пристрій та принцип роботи спіральних та пластинчастих теплообмінників. Їх переваги та недоліки.
9. У яких випадках використовують теплообмінники з ребристими поверхнями?
10. У чому полягають основні способи збільшення інтенсивності теплообміну.

## РОЗДІЛ 2. МАСООБМІННІ ПРОЦЕСИ

### Тема 8. Основи процесу ректифікації. Ректифікаційні колони

#### 8.1 Ректифікація

*Ректифікація* являє собою поділ суміші на її складові компоненти в результаті багаторазового часткового випаровування рідини та конденсації пари.

Проводять ректифікацію в колонних апаратах, забезпечених контактними пристроями (тарілками різної конструкції) чи заповнених насадкою, виготовленою із різних матеріалів (кераміка, метал, дерево). Процес взаємодія пари з рідиною відбувається в протитоці і в кожному контактному пристрої пари конденсуються, а рідина частково випаровується за рахунок теплоти конденсації пари. Таким чином, пара збагачується легколетучим компонентом, а рідина, що стікає вниз колони – важколетким компонентом. В результаті багаторазової взаємодії пари та рідини дистилят містить майже чистий легколетючий компонент, а кубовий залишок – важколетючий.

Процес ректифікації здійснюється шляхом багаторазового контакту між нерівноважними рідкою або паровою фазами, що рухаються щодо один одного. При взаємодії фаз між ними відбувається масо- та теплообмін. Внаслідок кожного контакту компоненти перерозподіляються між фазами: пара збагачується низькокиплячим компонентом НК, а рідина – висококиплячим компонентом ВК.

Багаторазове контактування призводить до практично повного поділу вихідної суміші. Процеси ректифікації здійснюються періодично або безперервно при різних тисках: при атмосферному тиску, під вакуумом (для поділу сумішей висококиплячих речовин), а також під тиском вищій за атмосферний.

Будь-яка установка ректифікації складається з колонної частини в якій розташовані тарілки або насадки, та кип'ятильника (куба), являє собою кожухотрубчастий або змійниковий теплообмінник, який може бути вбудованим у нижню частину або винесеним за межі колони. У харчовій промисловості застосовують, головним чином, тарілчасті та насадочні колони.

#### 8.2 Принцип дії ректифікаційної установки

Розглянемо будову та принцип дії ректифікаційної установки безперервної дії з обігрівом гострою парою (рис. 8.1). Початкова суміш подається до центральної частини колони, яка знизу обігрівається гріючою парою, що подається в куб 1. Підведення тепла сприяє інтенсивному кипінню рідини, що знаходиться на тарілках, при цьому парова фаза рухається вгору, збагачуючись (низькокиплячим компонентом НК), а рідка вниз, насичуючи (висококиплячим компонентом ВК). Пара, що входить у контакт з рідиною, що знаходиться на тарілці, конденсується і віддає їй своє тепло, що сприяє кипінню

рідини та утворенню вторинної пари, містить у собі більшу кількість НК. Пара, що виходить з колони в кількості  $G$  і що складається в основному з ПК, надходить у дефлегматор 4, де піддається частковій конденсації, тобто дефлегмації. При дефлегмації з пара в рідину переходить в основному ВК, тому концентрація НК у парі до мінімуму. Далі пар прямує в холодильник 5 для отримання конденсату з подальшим охолодженням.

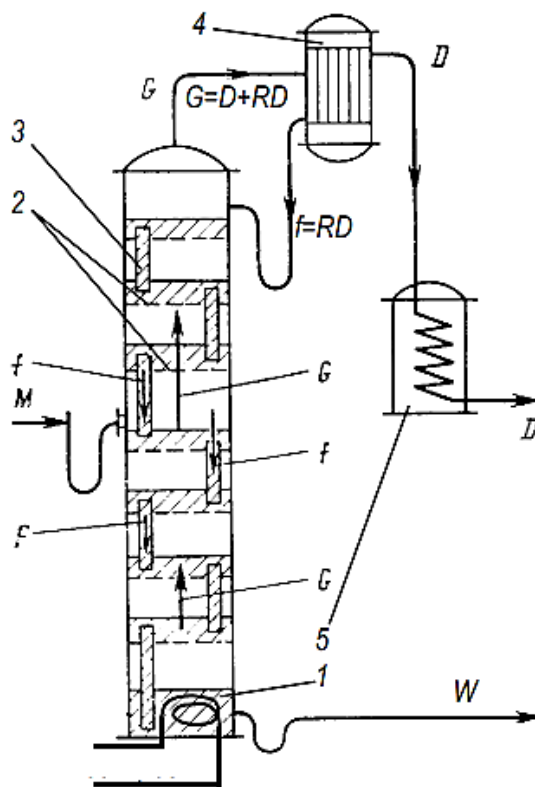


Рисунок 8.1 – Принципова схема ректифікаційної установки безперервної дії: 1 – куб, 2 – тарілки, 3 – переливні патрубки, 4 – дефлегматор, 5 – холодильник дистилляту.

Незалежно від конструкції тарілок вони призначені для створення тісного контакту між парою та рідиною та для забезпечення як можна більшої поверхні масообміну. Пара, що надходить на тарілку знизу, барботує через рідину, що знаходиться на ній, у вигляді бульбашок.

При цьому, як зазначалося вище, відбувається конденсація пари, а теплота, що виділяється, підтримує на тарілці процес кипіння. Над зоною барботажу знаходиться зона піни (бульбашки пари, оточені плівкою рідини), яка утворюється через наявність у розчині, що переганяється поверхнево-активних речовин.

### 8.3 Схеми ректифікаційних установок

Будь-яка установка ректифікації складається з колонної частини в якій розташовані тарілки або насадка та кип'ятильник (куб), що представляє собою кожухотрубчастий або змійниковий теплообмінник [1, 2, 4]. Кип'ятильник

може бути вбудованим у нижню колонну частину чи винесеним межі колони. Ректифікаційна установка безперервної дії показана на рисунку 8.2.

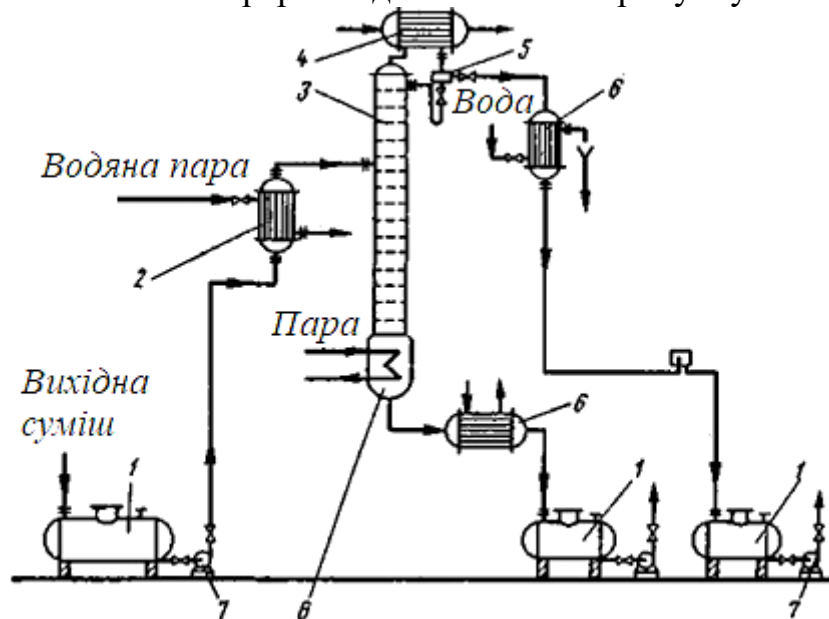


Рисунок 8.2 – Ректифікаційна установка безперервної дії: 1 – збірники, 2 – підігрівач, 3 – ректифікаційна колона, 4 – дефлегматор, 5 – роздільний посуд, 6 – холодильники, 7 – насоси, 8 – кип'ятильник.

Вихідна суміш, нагріта в підігрівачі, подається на тарілку живлення ректифікаційної колони та за рахунок теплоти, що надходить з кип'ятильника, поділяється в результаті ректифікації на дистилят та кубовий залишок. Пари, що виходять із колони, конденсуються повністю або частково в дефлегматорі. У разі повної конденсації парів отриманий дистилят у розділі поділяється на дві частини [1, 2, 4]. Одна частина – флегма через гідрозатвор надходить на зрошення колони на верхню тарілку, друга частина – дистилят охолоджується в холодильник і направляється до збірки. У разі неповної конденсації парів у дефлегматорі вони надходять у конденсатор-холодильник де конденсуються та охолоджуються. Кубовий залишок у залежності від його цінності або збирається в ємності, або як стічні води прямує на утилізацію.

Насправді часто трапляються випадки поділу вихідної суміші на три і більше частини. Так у спиртовому виробництві з бражки виділяють етиловий спирт, ефіроальдегідну фракцію та сивушні олії.

Ректифікаційна установка для поділу багатокомпонентної суміші показано на рисунку 8.3. Установка багатоколонна, призначена для безперервного поділу вихідної суміші на три частини: А, В та С.

Перша колона забезпечує розподіл суміші на А+ВС або АВ+С. Для подальшого поділу суміші на  $n$  частин потрібно ректифікаційна установка, що складається з  $n - 1$  ректифікаційних колон.

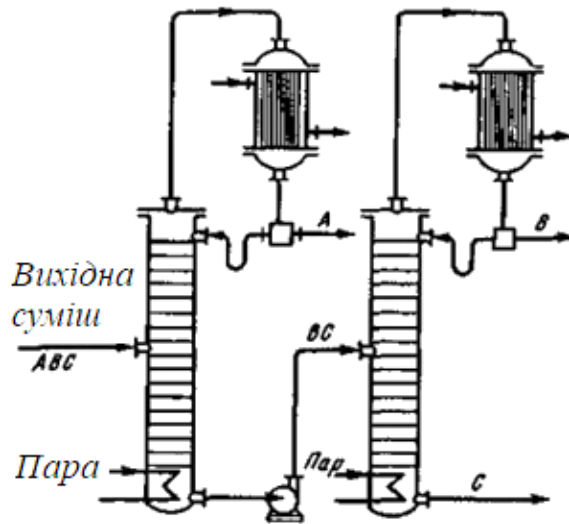


Рисунок 8.3 – Ректифікаційна установка для поділу багатокомпонентної суміші

Ректифікаційна установка періодичної дії, яка використовується в малотоннажних виробництвах (рис. 8.4). Вихідна суміш завантажується в кип'ятильник, який обігривається насиченою водяною парою. Після нагрівання суміші до температури кипіння її пари надходять у нижню частину ректифікаційної колони [1, 2, 4]. Піднімаючись колоною, пари збагачуються легко летким компонентом і надходять у дефлегматор, у якому конденсуються. Як і при безперервній ректифікації, конденсат поділяється на флегму та продукт, який після охолодження у холодильнику збирається у збірнику. Після вилучення продукту кубовий залишок зливають та завантажують у куб нову порцію вихідної суміші.

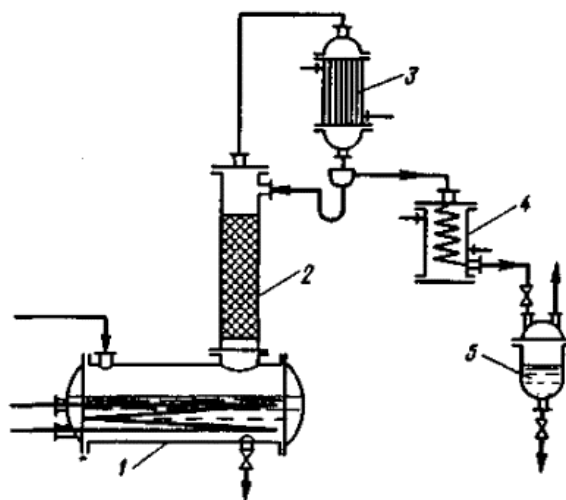


Рисунок 8.4 – Ректифікаційна установка періодичної дії: 1 – кип'ятильник; 2 – колона; 3 – дефлегматор; 4 – холодильник; 5 – збірник.

#### 8.4 Приклади розв'язування завдання [12, 13]

**Задача 1.** Визначити мінімальне та робоче флегмове число для колони ректифікації, призначеної для поділу водно-спиртової суміші з вмістом



етилового спирту  $X_{сп}=7,2 \text{ \%}=3,03 \text{ мол. \%}$ . Вміст спирту в дистилляті  $X_D=82,11 \text{ мас. \%}=66,0 \text{ мол \%}$ . Прийнявши коефіцієнт надлишку флегми  $\beta=1,4$ . (табл. 8.1).

Таблиця 8.1. Вихідні дані для розрахунку

№ вар.	$X_{сп}$ , мол. %.	$X_D$ , мол %.	$\beta$
1	3,0	65,0	1,25
2	3,01	65,5	1,3
3	3,03	66,0	1,35
4	3,05	66,5	1,45
5	3,08	67	1,4
6	3,0	65,0	1,3
7	3,01	65,5	1,35
8	3,03	66,0	1,45
9	3,05	66,5	1,4
10	3,08	67	1,25

### Розв'язання

Згідно з довідковими даними: рівноважний вміст спирту в парах, отриманих з рідини складу  $X_M=3,03 \text{ мол. \%}$ ,  $Y_M=24,5 \text{ мол. \%}$ .

Тоді мінімальне флегмове число:

$$V_{\min}=(X_D-Y_M)(Y_M-X_M)=1,65$$

Робоче флегмове число:

$$V=\beta V_{\min}=2,31$$

**Задача 2.** Визначити діаметр бражної колони продуктивністю  $V_{бр}=10 \text{ м}^3/\text{год}$  браги концентрацією  $X_M=8,5 \text{ об. \%}$  Колона працює під середнім вакуумом  $p_{в,ср}=0,79 \text{ ат}$  (середній залишковий тиск  $p_{ср}=20,6 \text{ кПа}$ ). Тарілки в колоні гратчасті провального типу із живим перетином  $F=0,15 \text{ м}^2/\text{м}^2$ . Витрата пари на перегонку за масою браги  $P=19 \text{ \%}$ . Брага надходить до колони нагрітої до температури кипіння. Середня температура перегонки  $t_{ср}=61^\circ\text{C}$  (табл. 8.2).

Таблиця 8.2. Вихідні дані для розрахунку

№ вар.	$V_{бр}$ , $\text{м}^3/\text{год}$	$X_M$ , об. %	$p_{ср}$ , кПа	$F$ , $\text{м}^2/\text{м}^2$	$P$ , %.	$t_{ср}$ , $^\circ\text{C}$
1	8	8	20	0,12	17	60
2	9	8,2	20,4	0,13	18	61
3	10	8,3	20,5	0,15	19	62
4	11	8,5	21	0,16	21	61
5	12	9	22	0,14	20	60
6	8	8	20,4	0,13	18	61
7	9	8,2	20,5	0,15	19	62
8	10	8,3	21	0,16	21	61
9	11	8,5	22	0,14	20	60
10	12	9	20	0,12	17	60

### Розв'язання

При  $p = 20,6 \text{ кПа}$  вміст спирту у бразі  $X_M = 8,5 \text{ об. \%} = 6,8 \text{ мас. \%}$  відповідає рівноважний вміст їх у парах  $Y = 43 \text{ мас. \%}$ . при коефіцієнті надлишку пари, що гріє, в колоні  $\beta = 1,05$  дійсна концентрація бражного дистиляту складе:

$$X = Y / \beta = 41$$

Молекулярна маса бражного дистиляту складе:

$$M = M_{\text{сп}} X_{\text{сп}} + M_{\text{в}} X_{\text{в}} = 29,48$$

При щільності браги  $\rho_{\text{бр}} = 1020 \text{ кг/м}^3$  її секундна витрата станове:

$$G_{\text{бр}} = V_{\text{бр}} \rho_{\text{бр}} \tau = 2,83 \text{ кг/с}$$

З цієї кількості браги отримаємо бражного дистилята концентрацією 41%:

$$G_{\text{д}} = G_{\text{бр}} X_{\text{бр}} / Y = 0,47 \text{ кг/с}$$

Середню щільність водноспиртивої пари, які рухаються в колоні:

$$\rho_{\text{сер}} = p_{\text{п}} / (M R T_{\text{сер}}) = 0,176 \text{ кг/м}^3$$

Молекулярна маса цієї пари:

$$M = M_{\text{сп}} Y_{\text{сер. сп.}} + M_{\text{в}} Y_{\text{сер. в.}} = 23,74$$
$$t_{\text{сер}} = 61^{\circ}\text{C}, p_{\text{сер}} = 20,6 \text{ кПа.}$$

Об'єм пари бражного дистиляту:

$$V_{\text{п}} = G_{\text{д}} / \rho_{\text{сер}} = 2,67 \text{ м}^3/\text{с}$$

Величина парового потоку:

$$G = P * i_1 * G_{\text{бр}} / i_2 * 100 = 0,54 \text{ кг/с}$$

де  $i_1 = 2624,4 \text{ Дж/кг}$  інтальпія грючої пари;

$i_2 = 2610,5 \text{ Дж/кг}$  інтальпія пари в колоні.

Гранично допустима швидкість водно-спиртових пар

$$\omega_{\text{д}} = \frac{7,6 F^3 \sqrt{G/L}}{\sqrt{\rho_{\text{п}}}} = 1,58 \text{ м/с}$$

де  $L = G_{\text{бр}}$  так як брага доведена тільки до кипіння.

Діаметр бражної колони:

$$d = \sqrt{V_{\Pi}(0,785\omega)} = 1,5 \text{ м}$$

## 8.5 Завдання для самостійного виконання

### Тестові завдання

**Якщо сили значення між молекулами обох компонентів такі ж як і між молекулами кожного з компонентів, то такі суміші зветься:**

- A. ідеальними
- B. нормальними
- C. звичайними
- D. простими

**Склад парової фази, яка знаходиться в рівновазі з рідиною:**

- A.  $y_a = \frac{P_a^* x_a}{\Pi}$
- B.  $y_a = \frac{P_a^* + x_a}{\Pi}$
- C.  $y_a = \frac{P_a^* - x_a}{\Pi}$
- D.  $y_a = \frac{P_a^* x_a}{\Pi} + 1$

**Перевага безперервної ректифікації порівняно з періодичною:**

- A. умови роботи установки не змінюються в ході процесу, що дозволяє встановити точний режим, спрощує обслуговування і полегшує автоматизацію процесу
- B. відсутні простой між операціями, що призводить до підвищення продуктивності установки
- C. витрата тепла менша, але, можливе використання тепла залишку на підігрівання вихідної суміші в теплообміннику
- D. всі відповіді вірні

**Матеріальний баланс колони безперервної ректифікації:**

- A.  $P+RP=P(R+1)$
- B.  $P+RP=P(R-1)$
- C.  $P+RP=P/(R+1)$
- D.  $P+RP=P/(R-1)$

**Флегма подається в апарат для підтримки різниці:**

- A. тиску
- B. концентрації
- C. температур
- D. об'ємів

**Значення коефіцієнта  $\beta$  (надлишку флегми) коливається в межах:**

- A. 1,1-1,3
- B. 1,25-1,35
- C. 1,3-1,5
- D. 1,35-1,7

**Діаметр колони визначається з рівняння:**

- A.  $D = \sqrt{V/0,585w_d}$
- B.  $D = \sqrt{V/0,685w_d}$
- C.  $D = \sqrt{V/0,785w_d}$
- D.  $D = \sqrt{V/0,885w_d}$

**Висота тарілкової колони:**

- A.  $H=(n-1)h+2h+3h$
- B.  $H=(n+1)h+2h+3h$
- C.  $H=(n-1)h-2h-3h$
- D.  $H=(n-1)h-2h+3h$

**Швидкість в ректифікаційній колоні:**

- A.  $w = c\sqrt{(\rho_p - \rho_{\Pi})/\rho_{\Pi}}$
- B.  $w = c\sqrt{(\rho_p + \rho_{\Pi})/\rho_{\Pi}}$
- C.  $w = c\sqrt{(\rho_p - \rho_{\Pi}) * \rho_{\Pi}}$
- D.  $w = c\sqrt{(\rho_p + \rho_{\Pi}) * \rho_{\Pi}}$

**Пара, що знаходиться в рівновазі з розчином, завжди містить у надлишку той компонент, додаток якого до рідини підвищує загальний тиск парів над нею або знижує температуру кипіння:**

- A. Перший закон Коновалова
- B. Перший закон Менделєєва
- C. Перший закон Павлова
- D. Перший закон Карно

**Найбільшого поширення в харчових виробництвах набули:**

- A. Тарілкові колони
- B. Насадкові колони.
- C. Плівкові колони
- D. Ротаційні колони

### **Задачі для самостійного розв'язування**

1. Визначити середній коефіцієнт дифузії етилового спирту у воді у процесі ректифікації, якщо середня концентрація спирту у розчині  $x=35$  мас. %,

середня температура в колоні  $t = 92 \text{ }^{\circ}\text{C}$  і середня динамічна в'язкість  $\mu = 0,4 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ .

2. Продуктивність ректифікаційної колони для розділення суміші метиловий спирт – вода становить 2700 кг/год дистилляту. Колона працює під атмосферним тиском. Поверхня теплообміну дефлегматора  $74 \text{ м}^2$ , коефіцієнт теплопередачі в ньому  $840 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ . Визначити число флегми і витрату охолоджувальної води в дефлегматорі, якщо вона нагрівається від  $14$  до  $38^{\circ}\text{C}$ .

3. Визначити число діючих тарілок у колоні, що працює з флегмовим числом  $v=3,5$  та призначеною для збільшення вмісту спирту в рідині з  $8$  до  $78$  мол. %.

### **Контрольні запитання**

1. Які методи застосовують для поділу рідких однорідних сумішей? На яких властивості рідких сумішей засновані на ці методи поділу?

2. У чому полягають відмінності у поведінці ідеальних і реальних рідких сумішей?

3. У чому полягає процес ректифікації?

4. Які припущення приймають під час розрахунку процесів ректифікації?

5. Як визначають робоче флегмове число?

6. Які конструкції ректифікаційних колон застосовують у харчовій технології? У чому полягає відмінність у роботі.

## **Тема 9. Електрофізичні методи обробки харчових продуктів: інфрачервоний нагрів**

### **9.1 Інфрачервоне випромінювання**

Останній час у харчову технологію широко впроваджуються електрофізичні способи обробки харчових продуктів – електростатичне поле, струми промислової частоти, струми ВЧ і НВЧ, інфрачервоне випромінювання, ультразвук тощо. Використання цих способів у технологічних процесах дозволяє знизити питомі витрати енергії, скоротити тривалість теплової обробки, забезпечити раціональні температурні режими, що в свою чергу підвищує якість продукції та дає значний економічний ефект [4].

Найбільш актуальною та перспективною на даний момент є сушіння продуктів харчування із застосуванням інфрачервоного випромінювання. Інфрачервоне випромінювання твердих тіл обумовлено збудженням молекул і атомів тіла внаслідок їх теплового руху. При поглинанні інфрачервоного випромінювання опромінюваним тілом ньому збільшується тепловий рух атомів та молекул, що викликає його нагрівання [1, 2, 4]. Сушіння продуктів за даною технологією дозволяє зберегти зміст вітамінів та інших біологічно активних речовин у сухому продукті на рівні  $80-90\%$  вихідної сировини. При нетривалому замочуванні ( $10-20$  хв.) пройшов сушку продукт відновлює всі свої натуральні органолептичні, фізичні та хімічні властивості і може

вживатися у свіжому вигляді або піддаватися будь-яким видам кулінарної обробки. Сушіння продуктів (сушіння овочів та фруктів, сушіння риби, м'яса, круп тощо) у такий спосіб дає можливість виробництва різноманітних харчових концентратів швидкого приготування: перші, другі, треті страви, закуски, каші, крупи, овочеві та фруктові порошки, які використовуються у хлібопекарській, кондитерській промисловості, як компонент сухих сумішей дитячого харчування. Порівняно з традиційним сушінням, овочі, оброблені інфрачервоним сушінням після відновлення володіють смаковими якостями, максимально наближеними до свіжих.

## **9.2 Теплова обробка продуктів у електромагнітному полі НВЧ**

За допомогою мікрохвильового обладнання можна вирішувати актуальні завдання у харчовій промисловості – сушити рибу, м'ясо, зерно, фрукти та овочі, трави тощо. Мікрохвильова технологія та створене на її основі мікрохвильове обладнання для сушіння фруктів, обладнання для сушіння овочів дозволяє не тільки висушувати продукцію, а й отримувати харчові барвники, розморожувати рибу, м'ясо, овочі, ягоди та інші продукти харчування, проводити безтемпературне консервування тощо [1, 2, 4]. Мікрохвильовий метод сушіння заснований на тому, що на зневоднений продукт діє інтенсивні електромагнітні поля надвисоких частот (НВЧ). Під дією НВЧ поля молекули води (диполі) починають здійснювати коливальні та обертальні рухи, орієнтуючись із частотою поля його електричними лініями.

Рух молекул і є тепловою енергією. Чим більше води в заданому обсязі, чим більше молекул бере участь у цьому русі, тим більше теплової енергії виділяється. Таким чином, розігрів відбувається у всьому обсязі продукту, причому більше вологі ділянки отримують більше енергії. За рахунок цього відбувається вилучення вологи, сушіння продукту, і, одночасно вирівнювання вологості обсягом продукту. При зниженні вологості сировини процес сушіння продукту не сповільнюється, оскільки механізм теплопровідності тут не грає ключової ролі [1, 2, 4]. Мікрохвильова сушіння риби, м'яса, грибів, круп, овочів та фруктів характеризується малим часом і щодо низькою температурою процесу, що стосується харчових продуктам зумовлює дуже високу збереження корисних речовин та вітамінів. Застосування натуральних сушених інгредієнтів, виготовлених мікрохвильовим способом сушіння дозволяє виробникам харчових продуктів збагатити продукцію, що піддається сушінню вітамінами, біологічно активними речовинами, мікроелементами та іншими корисними речовинами. Надати продукцію смаку, кольору та аромату натурального продукту. Застосовувати сухопродукт час відсутності свіжих овочів, що гарантуватиме виготовлення продукції високої якості та значно зменшити відходи виробництва, здешевити зберігання та транспортування продукту, значно скоротити час приготування, енерго- та трудовитрати, пов'язані з обробкою сирих овочів.

### 9.3 Приклади розв'язування завдань [12, 13]

**Задача 1.** Продукти опромінюються потоком НВЧ-випромінювача, що виходить у вільний простір із відкритого корпусу хвилеводу  $a_{xb}=72 \times 34$  мм. Потужність живильного хвилевід генератора  $P_0 = 50$  кВт. Оцінити ккд виходу НВЧ-опромінення з такого опромінювача, якщо частота генератора  $f= 3$  Гц (табл. 9.1).

Таблиця 9.1. Вихідні дані для розрахунку

№ вар.	$a_{xb}$ , мм	$P_0$ , кВт	$f$ , ГГц
1	72x34	40	2,8
2	76x34	45	2,9
3	72x36	35	2,8
4	78x36	55	3,2
5	72x32	40	3
6	72x32	40	2,7
7	72x34	45	2,8
8	76x34	35	2,9
9	72x36	55	2,8
10	78x336	40	3,2

#### Розв'язання

Навантаженням відкритого кінця хвилеводу служить вільний простір із хвильовим опором  $Z_0=377$  Ом.

Коефіцієнт відображення:

$$\Gamma = \frac{Z_H - Z_{\Pi}}{Z_H + Z_{\Pi}}$$

Еквівалентний опір прямокутного хвилеводу на хвилі  $H_{10}$ :

$$Z_{\Pi} = \frac{a}{b} \frac{Z_0}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}}$$

$$\text{Або } \frac{Z_{\Pi}}{Z_0} = \frac{a}{b} \frac{1}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}} = \frac{34}{72} \frac{1}{\sqrt{1 - (100/144)^2}} = 0,656$$

$$\Gamma = \frac{1 - Z_{\Pi}/Z_0}{1 + Z_{\Pi}/Z_0} = \frac{1 - 0,656}{1 + 0,656} = 0,208$$

$$P_{\text{випр}} = P_0(1 - \Gamma^2) = 0,95P_0 = 47,5 \text{ кВт}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{випр}}}{P_0} = \frac{47,5}{50} = 0,95$$

**Задача. 2.** НВЧ-зерносушка живиться від генератора з частотою  $f=915$  МГц. Визначити гранично допустиму товщину шару рису на транспортері, якщо його комплексна діелектрична проникність  $\epsilon' = 2,8 - 0,18i$  (табл. 9.2).

Таблиця 9.2. Вихідні дані для розрахунку

№ вар.	F, МГц.	сировина	$\epsilon' = 2,8 - 0,18i$ .
1	910	гречка	2,75-0,185i.
2	920	просо	2,8-0,19i.
3	925	рис	2,9-0,175i.
4	930	пшениця	2,85-0,19i.
5	950	горох	2,9-0,18i.
6	910	кукурудза	2,7-0,18i.
7	920	гречка	2,75-0,185i.
8	925	просо	2,8-0,19i.
9	930	рис	2,9-0,175i.
10	950	пшениця	2,85-0,19i.

### *Розв'язання*

Гранично допустима товщина зерна – не більше товщини скін-шару, де напруженість електричного поля зменшується в  $e$  раз, а потік потужності в  $e^2 = 7,4$  рази.

При  $\lambda = c/f = 32,78$  см товщина скін-шару

$$\delta = \frac{\lambda}{\pi \sqrt{\epsilon_1} \operatorname{tg} \delta} = \frac{\lambda \sqrt{\epsilon_1}}{\pi \epsilon_2} = \frac{32,78 \sqrt{2,8}}{\pi * 0,18} = 0,97 \text{ м}$$

Товщина шару зерна  $t_{\text{зерна}} \leq 0,97$  м

### **9.4. Завдання для самостійної роботи**

#### **Тестові завдання**

**1. Який вид нагріву застосовується в НВЧ-апаратах:**

- A. поверхневий
- B. об'ємний
- C. традиційний
- D. загальний

**Глибина проникнення електромагнітного поля:**



$$\begin{aligned} \text{A. } \Delta &= \frac{9,55 \cdot 10^3}{f + \sqrt{\varepsilon_{\text{сум}}} \operatorname{tg} \delta} \\ \text{B. } \Delta &= \frac{9,55 \cdot 10^3}{f - \sqrt{\varepsilon_{\text{сум}}} \operatorname{tg} \delta} \\ \text{C. } \Delta &= \frac{9,55 \cdot 10^3}{f \sqrt{\varepsilon_{\text{сум}}} \operatorname{tg} \delta} \\ \text{D. } \Delta &= \frac{9,55 \cdot 10^3}{f \sqrt{\varepsilon_{\text{сум}}} - \operatorname{tg} \delta} \end{aligned}$$

**Яким є призначення системи блокування у НВЧ-печі:**

- А. підтримування скляної тарілки для приготування їжі
- В. вимикання роботи апарата при відкриванні дверцят
- С. охолодження магнетрона
- Д. немає вірної відповіді

**Підключений до електромережі НВЧ-апарат не працює. Що може бути причиною:**

- А. відсутність напруги в електромережі
- В. не встановлено тривалість приготування
- С. не щільно закриті дверцята
- Д. усе, що було перелічено вище

**НВЧ-апарат має тип конструкції «соло». Якими функціями він оснащений:**

- А. НВЧ-нагрів
- В. НВЧ-нагрів; режим «гриль»;
- С. НВЧ-нагрів; режим «гриль»; режим «конвекція»
- Д. немає вірної відповіді

**Як називають основний теплогенеруючий пристрій НВЧ-апарата:**

- А. кварцовий випромінювач
- В. трубчастий електронагрівач
- С. магнетрон
- Д. квазітрон

**Коефіцієнт потужності  $\cos \varphi$ :**

$$\begin{aligned} \text{A. } \cos \varphi &= \frac{P}{3U/I} \\ \text{B. } \cos \varphi &= \frac{P}{3UI} \\ \text{C. } \cos \varphi &= \frac{P}{3U-I} \\ \text{D. } \cos \varphi &= \frac{P}{3U+I} \end{aligned}$$

**Яким є значення коефіцієнта корисної дії НВЧ-апаратів:**

- A. близько 25%;
- B. близько 50%;
- C. близько 75%?
- D. близько 85%?

**Частота коливань, що найчастіше використовується в НВЧ-апаратах, складає:**

- A. 925 МГц
- B. 2450 МГц
- C. 3550 МГц
- D. 5200 МГц

### **Задачі для самостійного розв'язування**

1. Камера НВЧ-печі запитана від магнетрона потужністю = 600 Вт і має ккд  $\eta = 0,8$ . Визначити час роботи печі, протягом якого концентрація розчину солі  $\rho$  зросте до 25% за рахунок випаровування води.

2. Розрахувати індукційну установку для нагріву замороженого брикету фаршу., довжиною  $l=850$  мм, ширина і висота  $a=b=350$  мм. Температура нагріву  $t_{\text{пов}}^{\text{кон}}=8^{\circ}\text{C}$ , допустимий перепад температур по перерізу брикету  $\Delta t=3^{\circ}\text{C}$ .

3. Робоча камера НВЧ-установки для сушіння макаронних виробів розміром  $2 \times 2 \times 8$  м виконана із сталевого листа завтовшки 2 мм. Камера продувається повітрям, нагрітим до  $80^{\circ}\text{C}$ , зі швидкістю 10 м/с. Зовнішні стінки камери охолоджуються вільною конвекцією повітря, температура якого  $20^{\circ}\text{C}$ . З коефіцієнтом теплопередачі  $\alpha_{\tau}=10\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{град})$ . Визначити теплові втрати втрати установки, якщо підлога та торцеві стінки теплоізовані.

## **Тема 10. Електрофізичні методи обробки харчових продуктів: індукційний нагрів**

### **10.1 Обробка харчових продуктів у електростатичному полі**

Обробка харчових продуктів у електростатичному полі застосовується для електрогазоочищення, електрокопчення та паніровки м'яса та риби, сепарації зерна, чаю, олійного насіння тощо. Установки являють собою камеру з електродами, до яких підводиться постійний струм високої напруги (до 9 000 В). Частилки пилу, туману або коптільного диму, які входять у електростатичне поле, заряджаються і під впливом поля одержують направлений рух до осаджувальних електродів [4]. При електрокопченні компоненти коптільного диму осаджуються на поверхні продукту, а після цього дифундують у нього, в результаті чого відбувається зміна кольору, аромату, смаку продукту, а також досягається бактерицидний та антиокислювальний ефекти. Процес електрокопчення протікає 2...5 хвилин на відміну від декількох годин із використанням звичайних засобів.

Сутність електроконтактного методу обробки полягає у тому, що

електричний струм промислової частоти (220 В, 50 Гц), проходячи через продукт, що має опір, викликає його нагрівання, за рахунок якого досягається значна інтенсифікація процесу [4]. Електроконтактне нагрівання використовується для розморожування (дефростації) риби, випікання бісквітного тіста, сушіння тютюну, варення сосисок. До процесів електроконтактної обробки харчових продуктів належить і електроплазмоліз, під час якого відбувається пошкодження протоплазматичних оболонок клітин рослинної сировини, що дає збільшення виходу соку на 8...10% порівняно зі звичайними методами.

## 10.2 Приклади розв'язування завдань [12, 13]

**Задача.** Необхідно розрахувати інжекційний пальник середнього тиску, призначений для спалювання газу з  $\rho=0,82$  кг/м<sup>3</sup>,  $Q_H=36855$  кДж/м<sup>3</sup>. Витрата газу дорівнює  $V_K=136,2$  м<sup>3</sup>/год. Розрахунок зводиться до вибору необхідного типу пальника, перевірки можливості її роботи за даних умов та знаходження необхідного тиску газу перед пальником (табл. 10.1).

Таблиця 10.1. Вихідні дані для розрахунку

№ вар	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$Q_H$ , кДж/м <sup>3</sup>	$V_K$ , м <sup>3</sup> /год
1	0,81	36800	135
2	0,82	37000	136
3	0,815	37100	134
4	0,825	36900	137
5	0,82	36850	138
6	0,81	36800	136
7	0,82	37000	134
8	0,815	37100	137
9	0,825	36900	138
10	0,82	36850	135

Приймаємо до встановлення інжекційний пальник типу В 205/дсіз тепловим навантаженням  $Q_T=1700$  кВт. Основні дані наведено в таблиці 10.2.

Таблиця 10.2. Основні дані інжекційного пальника

Типорозмір	Розмір у мм							
	$D_1$ *	$d_c$	$d_r$	$d_H$	$D$	$K$	$L$	$h$
205/15	2	15	166	205	490	555	2130	220

\* - розмір дано у дюймах.

В основу розрахунку інжекційних пальників покладено закон збереження енергії. Перевіряємо баланс енергії у пальнику. Повинна виконуватись умова:

$$E > E_B + E_T + E_D + E_H + E_{\text{пот}}, \text{ Дж/м}^3$$

Знайдемо витрати енергії:

1. На інжекцію повітря, тобто створення швидкості ежектуемого повітря:

$$E_{\text{пов}} = \frac{W_{\Gamma} \rho \alpha V_0}{2}, \text{ Дж/м}^3$$

де  $W_{\Gamma}$  – швидкість газоповітряної суміші в горловині:

$$W_{\Gamma} = \frac{V_{\Gamma}(1 + V_0)}{3600 * 0,785 d_{\Gamma}^2} \frac{273 + t_{\text{сум}}}{273}, \text{ м/с}$$

де  $t_{\text{сум}}$  приймається рівною температурі повітря у приміщенні,  $t_{\text{сум}}=18^{\circ}\text{C}$

$$W_{\Gamma} = \frac{136,2 \cdot (1 + 11,4)}{3600 \cdot 0,785 \cdot 0,166^2} \cdot \frac{273 + 20}{273} = 23,28 \text{ м/с};$$

$$E_{\text{пов}} = \frac{23,28^2 \cdot 1,293 \cdot 1,1 \cdot 10,38}{2} = 4000,6 \text{ Дж/м}^3$$

2. На зміну швидкості струменя газу від  $W_c$  до  $W_{\Gamma}$ :

$$E_{\Gamma} = \frac{(W_c - W_{\Gamma})^2 \cdot \rho_0}{2}, \text{ Дж / м}^3;$$

де  $W_c$  – швидкість виходу газу із сопла.

Знайдемо цю швидкість, виходячи із закону збереження кількості руху при змішуванні газу та повітря. Кількість повітря  $1 \text{ м}^3$ , що виходить із сопла дорівнює  $W_c \cdot \rho$ , а інжекційного з атмосфери повітря можна приймати рівним нулю, оскільки воно не має початкової швидкості. У горловині змішувача суміш газу повітря приймає швидкість  $W_{\Gamma}$  і відповідну їй  $W_{\Gamma}(\rho_{\Gamma} + \alpha \cdot V_0 \cdot \rho_{\text{пов}})$ . Тоді рівність збереження кількості руху

$$W_c \cdot \rho_{\Gamma} = W_{\Gamma} \cdot (\rho_{\Gamma} + \alpha \cdot V_0 \cdot \rho_{\text{пов}})$$

Звідси:

$$W_c = W_{\Gamma} \cdot (1 + V_0 \cdot \rho_{\text{пов}} / \rho_{\Gamma}), \text{ м/с}$$

Швидкість виходу газу з сопла не повинна перевищувати  $300 \text{ м/с}$ , інакше необхідно зробити перерахунок і вибрати пальник більшої потужності

$$W_c = 23,28 \cdot (1 + 11,4 \cdot 1,293 / 0,82) = 441,76 \text{ м / с}$$

$$E_z = \frac{(441,76 - 23,28)^2 \cdot 0,82}{2} = 71801,5 \text{ Дж} / \text{м}^3.$$

3. Витрати енергії в дифузорі при зміні швидкості газоповітряної суміші.

$$E_o = \frac{W_z^2 - W_o^2}{2} \cdot (1 + \alpha \cdot V_o) \cdot \rho_{см} \cdot (1 - \eta), \text{ Дж} / \text{м}^3;$$

де  $\eta$  – ККД дифузора, який залежить від  $d_r/d_d$

$W_d$  – швидкість суміші у вихідній частині дифузора:

$$W_o = \frac{V_z \cdot (1 + \alpha \cdot V_o)}{3600 \cdot 0,785 \cdot d_o^2} \cdot \frac{273 + t_{см}}{273}, \text{ м} / \text{с};$$

де  $d_d = (1,5 \div 1,8)d_r = 1,8 \cdot 166 = 298,8$  мм,  $d_r/d_d = 0,55$ ,  $\eta = 0,8$

$$W_o = \frac{136,2 \cdot (1 + 11,4)}{3600 \cdot 0,07} \cdot \frac{273 + 20}{273} = 7,19 \text{ м} / \text{с};$$

де  $\rho_{сум}$  – щільність газоповітряної суміші з вихідною частиною дифузора:

$$\rho_{см} = \frac{\rho_o + \alpha \cdot V_o \cdot \rho_v}{1 + \alpha \cdot V_o} \cdot \frac{273}{273 + t_{см}}, \text{ кг} / \text{м}^3;$$

$$\rho_{см} = \frac{0,82 + 1,1 \cdot 10,38 \cdot 1,293}{1 + 11,4} \cdot \frac{273}{273 + 20} = 1,17 \text{ кг} / \text{м}^3;$$

$$E_o = \frac{23,28^2 - 7,19^2}{2} \cdot (1 + 11,4) \cdot 1,17 \cdot (1 - 0,8) = 711,3 \text{ Дж} / \text{м}^3;$$

4. Витрати енергії у насадці пальника:

$$E_n = \frac{1,5 \cdot (W_o - W_n)^2 \cdot \rho_{см}}{2} \cdot (1 + \alpha \cdot V_o), \text{ Дж} / \text{м}^3;$$

де  $W_n$  – знаходиться за формулою:

$$W_n = \frac{V_z \cdot (1 + V_c)}{3600 \cdot 0,785 \cdot d_n^2} \cdot \frac{273 + t_{см}}{273}, \text{ м} / \text{с};$$

$$W_n = \frac{136,2 \cdot (1+11,4)}{3600 \cdot 0,785 \cdot 0,205^2} \cdot \frac{273+50}{273} = 16,8 \text{ м/с};$$

$$E_n = \frac{1,5 \cdot (7,19 - 16,8)^2 \cdot 1,17}{2} \cdot (1+11,4) \cdot 1,17 = 1004,9 \text{ Дж/м}^3;$$

Швидкість виходу газоповітряної суміші з насадка пальника не повинна бути меншою за швидкість поширення полум'я для суміші даного газу при мінімальному витраті газу пальником.

5. Витрати енергії з вихідною швидкістю газоповітряної суміші з насадка пальника:

$$E_{\text{ном}} = \frac{W_n^2}{2} \cdot \rho_{\text{сум}} \cdot (1 + \alpha \cdot V_o), \text{ Дж/м}^3;$$

де  $\rho_{\text{сум}}$  – щільність газоповітряної суміші у вихідному перерізі дифузора,  $\text{кг/м}^3$ ;

$$\rho_{\text{см}} = \frac{\rho_o + \alpha \cdot V_o \cdot \rho_g}{1 + \alpha \cdot V_o} \cdot \frac{273}{273 + t_n}, \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{\text{см}} = \frac{0,82 + 11,4 \cdot 1,293}{1 + 11,4} \cdot \frac{273}{273 + 50} = 1,06 \text{ кг/м}^3;$$

$$E_{\text{ном}} = \frac{16,8^2}{2} \cdot 1,06 \cdot (1 + 11,4) = 1854,9 \text{ Дж/м}^3.$$

6. Загальні витрати енергії:

$$E = E_{\text{пов}} + E_{\text{Г}} + O_{\text{д}} + E_n + E_{\text{пот}} = 4000,6 + 71801,5 + 711,3 + 1004,9 + 1854,9 = 79373,2 \text{ Дж/м}^3.$$

7. Джерелом енергії в пальнику є кінетична енергія струменя газу, що випливає із сопла:

$$E_c = \frac{W_c^2}{2} \cdot \rho_o, \text{ Дж/м}^3;$$

$$E_c = \frac{441,76^2}{2} \cdot 0,82 = 80012,3 \text{ Дж/м}^3.$$

$$E_r > E$$

8. Знайдемо необхідний тиск газу перед пальником

$$P_{гор} = E_r / \mu_0^2, \text{ Па}$$

де  $\mu_0$  – коефіцієнт витрати отворів головки пальника, що враховує втрати при закінченні. Оскільки виходи насадок – це канал довжиною від 2 до 4 діаметрів отворів, то  $\mu_0 = 0,75 \div 0,82$ .

$$P_{гор} = 80012.3 / 0,82 = 125019.2 \text{ Па.}$$

Необхідно врахувати, що максимальний тиск газу перед пальником не повинен перевищувати критичного тиску, що дорівнює природному газу 90000 Па. При більшому тиску порушується режим витікання газу із сопла, змінюється склад газоповітряної суміші.

Як відомо, нормальна стійка робота більшості промислових пальників при коефіцієнті надлишку повітря  $\alpha > 1$  забезпечується лише за наявності стабілізаторів фронту горіння (керамічні тунелі пластинчасті стабілізатори тощо).

Для визначення швидкості, при якій настає відрив полум'я для пальників з керамічними тунелями, використовують формулу:

$$W_{отр} = C_1 \cdot \alpha^{-2} \cdot W_{норм}^{1,5} \cdot \left( \frac{d_m}{a} \right)^{0,5}, \text{ м/с};$$

де  $C_1$  – емпіричний коефіцієнт,  $C_1 = 57,5$ ;

$W_{норм}$  – нормальна швидкість поширення полум'я, м/с,  $W_{норм} = 0,38$  м/с;

$\alpha$  – коефіцієнт теплопровідності суміші, м<sup>2</sup>/с, рівний  $\alpha = 0,213 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с.

Тоді

$$W_{отр} = 57,5 \cdot 1,1^{-2} \cdot 0,38^{1,5} \cdot \left( \frac{0,155}{0,213 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,5} = 1042 \text{ м/с} \approx W_n.$$

Для визначення швидкості, при якій надходить проскок полум'я, користуються формулою:

$$W_{пр}^{max} = C_2 \cdot W_{норм}^2 \cdot \frac{d_n}{a}, \text{ м/с};$$

де  $C_2$  – емпіричний коефіцієнт, рівний  $7,75 \cdot 10^{-3}$ ;

$$W_{пр}^{max} = 7,75 \cdot 10^{-3} \cdot 0,38^2 \cdot \frac{0,205}{0,213 \cdot 10^{-4}} = 10,8 м/с < W_n.$$

Таким чином, стабілізація полум'я при використанні керамічного тунелю буде забезпечена.

### 10.3 Завдання для самостійного виконання

#### Тестові завдання

**Різновидом якого хімічного процесу є реакція горіння газоподібного палива:**

- A. сполучення
- B. розклад
- C. окислення
- D. немає вірної відповіді

**Дифузійні пальники не використовуються в сучасних теплових апаратах закладів ресторанного господарства, тому що вони:**

- A. мають велику довжину факелу полум'я, що потребує високих камер згоряння
- B. мають високу температуру згоряння палива
- C. не забезпечують підведення до зони горіння визначеної кількості газу
- D. всі відповіді вірні

**В пальниках якого типу відбувається зовнішнє змішування газу з повітрям:**

- A. дифузійних
- B. інжекційних
- C. безполумєневих
- D. немає вірної відповіді

**Теплота, що виділяється за повного згоряння 1 кг палива, без врахування теплоти, що витрачається на випаровування вологи це:**

- A. вища теплота згоряння
- B. нижча теплота згоряння
- C. швидкість розповсюдження полум'я
- D. всі відповіді вірні

**За способом подання повітря газовий пальник може бути:**

- A. зовнішнього змішування
- B. внутрішнього змішування
- C. низького тиску
- D. немає вірної відповіді



**Яка частина газового пальника призначена для підсмоктування повітря за рахунок розрідження:**

- A. конфузор
- B. горловина
- C. дифузор
- D. немає вірної відповіді

**Як називається пристрій, який забезпечує стійке згоряння пального газу та регулювання процесу горіння:**

- A. конфузор
- B. дифузор
- C. пальник
- D. немає вірної відповіді

**В газових пальниках якого типу може відбуватися явище «відриву полум'я»:**

- A. дифузійних
- B. інжекційних
- C. безполумєневих
- D. немає вірної відповіді

### **Задачі для самостійного розв'язування**

1. Розрахувати конструктивні розміри дутьової дифузійного газового пальника ( $d_B, d_G, d, h, d_{СТР}, n, L_{СМ}$ ) та її технічні характеристики ( $Q_G, V_G, V_B, w_B, w_G, w_{СМ}, P_B$ ). Пальники в кількості двох встановлені на котлі ті продуктивністю 1 МВт. Визначити тиск повітря на вході в пальник, якщо надлишковий тиск димових газів у топковій камері  $P_{КС} = -20$  Па. Привести ескіз розрахованої пальники в масштабі. Вихідні дані для вирішення задачі  $t_B=10^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta P_G=150$  Па,  $\eta=0,8$ .

2. Розрахувати конструктивні розміри газової інжекційного пальника з повним попереднім змішуванням, якщо відомі: витрати газу через пальник  $V_G=0,05$  м<sup>3</sup>/с; газопровід, звідки береться газ; ККД теплосилового агрегату  $\eta=0,78$ . Температуру газу та повітря прийняти  $0^{\circ}\text{C}$ . Визначити теплову потужність агрегату та необхідний тиск газу перед пальником. При розрахунку прийняти коефіцієнт надлишку повітря  $T = 1,05$ . Привести ескіз розрахованого пальника масштабу.

## **Тема 11. Теоретичні основи масообмінних процесів**

### **11.1 Загальна характеристика масообмінних процесів**

*Масообмінні процеси* – такі технологічні процеси, швидкість перебігу яких визначається швидкістю перенесення речовини (маси) з однієї фази в іншу конвективною та молекулярною дифузією. Рухаючою силою масообмінних

процесів є різниця концентрацій розподільної речовини в взаємодіючі фази [1, 2, 4]. Масообмінні процеси класифікують за трьома основними ознаками: агрегатний стан речовини, спосіб контакту фаз та характер їх взаємодії.

Перенесення речовини, що розподіляється відбувається завжди з фази в якій його вміст вище рівноважного, у фазу, в якій концентрація цієї речовини нижче рівноважний.

Масообмінні процеси широко використовуються в промисловості:

- для поділу рідких та газових гомогенних сумішей;
- для їх концентрування;
- для захисту навколишнього природного середовища (передусім для очищення стічних вод та відхідних газів) [1, 2, 4]. Найбільшого поширення отримали такі масообмінні процеси: абсорбція, перегонка та ректифікація, екстракція (рідинна), адсорбція, іонний обмін, сушіння, розчинення та екстрагування із твердих тіл, кристалізація, мембранні процеси. У всіх перерахованих вище процесах загальним є перехід речовини (або речовин) з однієї фази в іншу.

## 11.2 Масовіддача, масопередача, масопровідність

Процес переходу речовини (або декількох речовин) з однієї фази в напрямку досягнення рівноваги називають *масопередачею*. Перенесення речовини всередині фази – з фази до межі поділу фаз або навпаки – від межі розділу у фазу називають *масовіддачею* (за аналогією з процесом перенесення теплоти всередині фази – *тепловіддачею*) [1, 2, 4]. Процеси масопередачі зазвичай оборотні. Причому напрямок переходу речовини визначається концентраціями речовини у фазах та умовами рівноваги. Найбільшого поширення набули розглянуті нижче масообмінні процеси.

*Абсорбція* – вибіркове поглинання газів або парів рідким поглиначем. Цей процес являє собою перехід речовини з газової (або парової) фази рідку. Найбільш широко використовується для поділу технологічних газів та очищення газових викидів. Процес, зворотний абсорбції, тобто виділення розчиненого газу з рідини, називають *десорбцією*. *Перегонка та ректифікація* – поділ рідких гомогенних сумішей на компоненти при взаємодії потоків рідини і пари, отриманої випаровуванням суміші. Цей процес являє собою перехід компонентів з рідкої фази парову та з парової в рідку. Процес ректифікації використовується для поділу рідких сумішей на складові їх компоненти та одержання надчистих рідин [1, 2, 4]. *Екстракція (рідинна)* – вилучення розчиненої в одній рідині речовини іншою рідиною, що практично не змішується або частково змішується з першою. Цей процес являє собою перехід речовини, що видобувається з однієї рідкої фази до іншої. Процес застосовують для вилучення розчиненої речовини чи групи речовин порівняно невисоких концентрацій. *Адсорбція* – вибіркове поглинання газів, парів або розчинених у рідині речовин твердим поглиначем, здатним поглинати одну або кілька речовин з суміші. Цей процес являє собою перехід речовин з газової, парової або рідкої фази у тверду. Адсорбцію застосовують для отримання

речовини (або речовин) досить низької концентрації. Процес, зворотний адсорбції, тобто виділення сорбованої речовини з твердого поглинача називають *десорбцією*.

*Іонний обмін* – вибіркове вилучення іонів з розчинів електролітів. Цей процес являє собою перехід видобутої речовини з рідкої фази в тверду. Процес застосовують для вилучення речовин із розчинів у яких ці речовини перебувають у низьких концентраціях. *Сушіння* – видалення вологи з твердих вологих матеріалів в основному шляхом випаровування. Цей процес полягає в переході вологи з твердого вологого матеріалу в газову чи парову фази. Сушіння широко застосовують у техніці для попереднього зневоднення перероблюваних речовин або зневоднення готового продукту. *Розчинення та екстрагування з твердих тіл* – це процеси переходу твердої фази в рідку (розчинник). Вилучення на основі вибіркової розчинності будь-якої речовини (або речовин) з твердого пористого матеріалу називають *екстракцією*. Застосовують її для вилучення цінних чи токсичних компонентів із твердих матеріалів [9, 10, 11]. *Кристалізація* – виділення твердої фази у вигляді кристалів з розчинів або розплавів. Цей процес являє собою перехід речовини з рідкої фази в тверду. Застосовується, зокрема, для отримання речовин підвищеної чистоти. *Мембранні процеси* – вибіркове вилучення компонентів суміші або їх концентрування за допомогою напівпроникної перегородки-мембрани. Ці процеси являють собою перехід речовини (або речовин) з однієї фази в іншу через розділяє їхню мембрану. Застосовуються для поділу газових та рідких сумішей.

У всіх перерахованих вище процесах загальним є перехід речовини (або речовин) з однієї фази в іншу. Процес переходу речовини (або кількох речовин) з однієї фази в іншу у напрямку досягнення рівноваги називають *масопередачею* [1, 2, 4]. На відміну від теплопередачі, яка відбувається зазвичай через стінку, масопередача здійснюється, як правило, при безпосередньому зіткненні фаз (крім мембранних процесів). При цьому межа зіткнення, тобто поверхня контакту фаз може бути рухомою (система газ-рідина, пар-рідина, рідина-рідина) або нерухомий (газ-тверде тіло, пар-тверде тіло, рідина-тверде тіло).

### 11.3 Завдання для самостійної роботи

#### Контрольні запитання

1. Які масообмінні процеси ви знаєте?
2. Які ознаки поєднують усі масообмінні процеси?
3. Який фізичний зміст коефіцієнтів масовіддачі та масопередачі?
4. Що таке молекулярна дифузія?
5. Що є рушійною силою масообмінних процесів?
6. Наведіть приклади устаткування реалізації масообмінних процесів.

## Тема 12. Сорбційні процеси: адсорбція та абсорбція

### 12.1. Абсорбція

*Абсорбцією* називається процес поглинання газів або пари з газових чи парогазових сумішей рідкими поглиначами (абсорбентами). При фізичній абсорбції поглинаючий газ (абсорбтив) не взаємодіє хімічно з абсорбентом. Якщо ж абсорбтив утворює з абсорбентом хімічна сполука то процес називається *хемосорбцією*.

Фізична абсорбція в більшості випадків оборотна. На цьому властивості абсорбційних процесів засноване на виділенні поглиненого газу із розчину – *десорбція*. Поєднання абсорбції з десорбцією дозволяє багаторазово використовувати поглинач і виділяти поглинений компонент чистому вигляді.

У промисловості процеси абсорбції застосовуються головним чином для вилучення цінних компонентів із газових сумішей або для очищення цих сумішей від шкідливих домішок. Для проведення процесів абсорбції застосовують абсорбенти, які мають вибірккову, селективну здатність. Абсорбційні процеси зазвичай супроводжуються тепловими процесами. При цьому у більшості з них спостерігається виділення теплоти. Фізична сутність процесу полягає в розчиненні газів у рідині.

### 12.2 Абсорбційні апарати

Абсорбція протікає на поверхні розділу фаз. Тому абсорбери повинні мати розвинену поверхню контакту фаз між рідиною та газом. За способом утворення цієї поверхні абсорбери можна розділити на наступні чотири групи:

- поверхневі та плівкові (газ пропускається над поверхнею рідини, що рухається, поверхнею контакту у плівкових абсорберах є поверхня стікаючої плівки рідини);
- насадочні, в яких поверхнею контакту фаз є поверхня рідини, що розтікається по спеціальній насадці;
- барботажні абсорбери, в яких поверхня контакту фаз створюється потоками газу (пара) та рідини;
- розпилюючі абсорбери, в яких поверхня контакту фаз створюється внаслідок розбризкування рідини.

Найбільшого застосування отримали насадкові абсорбери (рис. 12.1) являє собою циліндричну колону, яка заповнена насадкою (кільця або інші тверді тіла), що укладається на опорні ґрати, що мають отвори для проходження газу та стоку рідини.

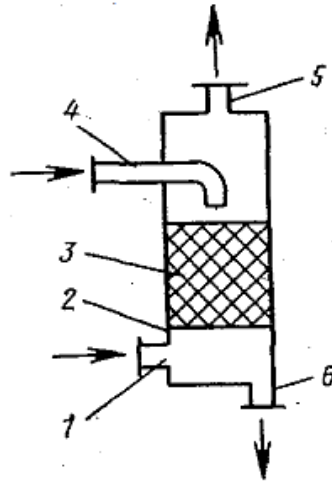


Рисунок 12.1 – Абсорбер насадочного типу: 1 – патрубок для входу газу; 2 – корпус; 3 – насадка; 4,6 – патрубки для входу та виходу абсорбенту; 5 – патрубок для виходу газу.

Абсорбуюча рідина з розбризкувача надходить у шар насадки покриваючи її рідкою плівкою та стікаючи донизу. Газ, що підлягає поділу, піднімається нагору, а абсорбтив поглинається рідиною.

У поверхневих абсорберах збільшення поверхні контакту фаз встановлюються кілька послідовно з'єднаних апаратів у яких газ і рідина рухаються протитечією один до одного. Зрошувальний абсорбер (рис. 12.2) складається з горизонтальних труб, усередині яких протікає рідина, рівень якої підтримується за допомогою порога. Охолодження абсорбера походить з поверхні зрошуваної рідини. Використовуються такі апарати для поглинання добре розчинних газів.

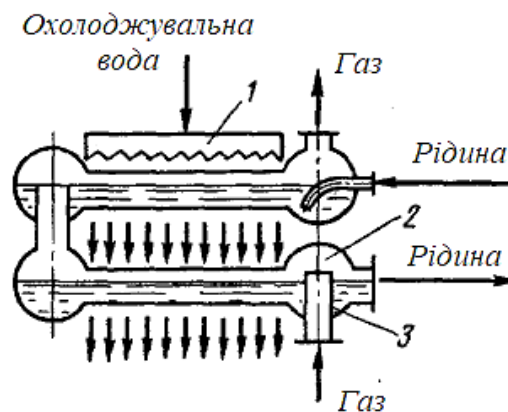


Рисунок 12.2 – Поверхневий абсорбер: 1 – розподільник; 2 – труба; 3 – поріг.

### 12.3 Адсорбція

Під *адсорбцією* розуміють процес поглинання одного чи кількох компонентів із газової суміші або розчину твердою речовиною – адсорбентом. Поглинається речовина носить назву адсорбату або адсорбтиву.

Процеси адсорбції вибіркові та зазвичай оборотні. Завдяки їх оборотності стає можливим виділення поглинених речовин з адсорбенту або проведення десорбції. Механізм процесу адсорбції відрізняється від механізму процесу абсорбції, внаслідок того, що вилучення речовин здійснюється твердим поглиначем.

Процеси адсорбції широко застосовуються в промисловості при очищення та осушування газів, очищенні та освітленні розчинів, поділу сумішей газів чи пари, зокрема при вилученні летких розчинників із суміші з повітрям чи іншими газами.

Адсорбенти, що застосовуються у промислових умовах повинні відповідати таким основним вимогам:

- мати вибірковість (селективність) – здатність поглинати лише той компонент (компоненти), які необхідно виділити чи видалити із суміші;
- мати максимальну адсорбційну ємність (активність) – кількість адсорбтиву поглиненого одиницею маси або обсягу адсорбенту;
- володіти здатністю гранично десорбуватися, необхідною для регенерації адсорбенту;
- мати достатню міцність гранул адсорбенту, оскільки їх руйнування погіршує гідродинаміку процесу;
- володіти хімічною інертністю по відношенню до поглинається речовин;
- мати низьку вартість.

У спиртовому та лікєро-горілочному виробництвях використовуються активоване вугілля рослинного походження для вилучення з сортування (суміш спирту з водою) та спирту ректифікату альдегідів, кетонів, складних ефірів, карбонових кислот та високомолекулярних речовин (сивушних олій). Вугілля витягує глюкозу і фруктозу, що містяться у деяких сортах горілки. Активоване вугілля застосовується для освітлення пива та фруктових соків. Для знебарвлення цукрових сиропів застосовується активоване вугілля, отримане на базі кістяного вугілля [1, 2, 4]. Типовим дрібнозернистим вугіллям для знебарвлення цукрових сиропів, коньяків, вин, фруктових соків, ефірних олій, желатину є вугілля деколар. У ряді випадків одночасно з знебарвленням відбувається видалення запаху, присмаку, колоїдних та інших домішок.

#### 12.4 Приклади розв'язування завдань [12, 13]

**Задача.** У ферментері для культивування мікроорганізмів діаметром  $D$  за тиску  $p$ , кПа і температури  $t$ , °C потрібно абсорбувати з повітря, що подається через барботер,  $M$ , кг кисню за годину при ступені поглинання кисню  $x$ , %. Визначити питому витрату повітря на барботер у  $\text{м}^3 / (\text{м}^2 \text{ год})$ . (Вміст кисню у повітрі  $y = 0,21$ ) (табл. 12.1).

Таблиця 12.1. Вихідні дані для розрахунку

№ вар.	D, м	p, кПа	t, °C	M, кг	x, %.
1	0,85	100	20	0,45	50
2	0,9	110	22	0,5	52
3	0,95	120	23	0,55	53
4	1,0	125	25	0,6	55
5	1,05	130	26	0,7	57
6	0,85	100	22	0,6	52
7	0,9	110	23	0,65	53
8	0,95	120	25	0,45	55
9	1,0	125	20	0,5	56
10	1,05	130	22	0,55	50

### Розв'язання

Перерахуємо початкову мольну частку кисню у повітрі у відносну масову:

$$\bar{Y}_n = \frac{M_{O_2} y}{M_{N_2} (1 - y)} = 0,304 \text{ кг}$$

Кінцева відносна масова концентрація кисню:

$$\bar{Y}_k = \bar{Y}_n (1 - x)$$

Масова витрата повітря

$$G = \frac{M}{\bar{Y}_n - \bar{Y}_k}$$

Об'ємна витрата повітря:

$$V = G / \rho_y$$

де  $\rho_y$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>.

Площа перерізу ферментера:

$$S = \pi D^2 / 4$$

Питома витрата повітря на барботер:

$$V_{\text{пит}} = V / S$$

**Задача 2.** Визначити коефіцієнт масопередачі у водяному скрубєрі при поглинанні з газу двоокису вуглецю. В скрубєр поступає 500 м<sup>3</sup> /год. газової суміші при атмосферному тиску. На скрубєр подається 650 м<sup>3</sup> /год. чистої води. Початковий вміст СО<sub>2</sub> в газі 28,4% (об'ємних), кінцевий вміст (в верху скрубєра) 0,2% (об'ємних). Тиск у скрубєрі Р<sub>абс.</sub> = 16,5 ат. Температура 15°С. В нижню частину скрубєра завантажено 3т керамічних кілець 50х50х5 мм. Вище завантажено 17 т кілець 35х35х4 мм. Коефіцієнт змоченості рахувати рівним одиниці.

### *Розв'язання*

Сумарна поверхня усіх кілець: Поверхня кілець 50х50х5 мм:

$$f_1 = \frac{G_1}{\rho_1} \sigma_1 = \frac{3000}{530} 87,5 = 495 \text{ м}^3$$

де  $\rho_1 = 530 \text{ кг/м}^3$  – насипна щільність насадки з кілець 50х50х5мм  $\sigma_1 = 87,5 \text{ м}^2 / \text{м}^3$  – питома поверхня насадки.

Поверхня кілець 35х35х4 мм:

$$f_2 = \frac{G_2}{\rho_2} 2 = \frac{1700}{505} 140 = 4717 \text{ м}^3$$

Сумарна площа поверхні усіх кілець:

$$F = f_1 + f_2 = 495 + 4717 = 5212 \text{ м}^2.$$

Кількість СО<sub>2</sub>, поглиненого водою:

- початкова кількість СО<sub>2</sub> в газі:

$$V_{n \text{ CO}_2} = V_{n \text{ сум.}} \cdot y_n = 5000 \cdot 0,284 = 1420 \text{ м}^3 / \text{Год.}$$

- кількість СО<sub>2</sub> у вихідному газі:

$$V_{B \text{ CO}_2} = V_{B \text{ сум.}} y_B = \frac{V_n - V_{n \text{ CO}_2}}{1 - y_B} y_B = \frac{540 - 273}{273 + 15} 0,002 = 7,2 \text{ м}^3 / \text{Год}$$

Поглинається водою:

$$V_{\text{погл.}} = V_{n \text{ CO}_2} - V_{B \text{ CO}_2} = 1420 - 7,2 = 1412,8 \text{ м}^3$$

(при  $p=0,1 \text{ МПа}$  та  $t=15^\circ\text{C}$ )



Або

$$G_{\text{погл}} = \frac{V_n T_0}{T} \rho_0 = \frac{1412,8 * 273}{273 + 15} 1,976 = 2630 \text{ кг/год}$$

тобто  $2630/44 = 60$  кмоль/год.

Тут  $1,976 \text{ кг/м}^3$  – щільність  $\text{CO}_2$  при нормальних умовах;  $44 \text{ кг/кмоль}$  – мольна маса  $\text{CO}_2$ . Рушійна сила процесу абсорбції в низу скрубера. Парціальний тиск  $\text{CO}_2$  на вході в скрубера:  $P_{\text{п}} = P_{\text{уп}} = 0,284 \cdot 1620 = 460 \text{ кПа}$ , де  $1620 = 16,5 \cdot 98,1 \text{ кПа}$  – загальний тиск в скрубери. Мольна доля  $\text{CO}_2$  у воді, яка витікає зі скрубера:

$$X_{\text{п}} = \frac{\frac{G_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CO}_2}}}{\frac{G_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CO}_2}} + \frac{G_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}}} = \frac{\frac{2630}{44}}{\frac{2630}{44} + \frac{650000}{18}} = 0,00166$$

Константа Генрі Е для  $\text{CO}_2$  при  $15^\circ\text{C}$  дорівнює  $0,93 \cdot 106 \text{ мм.рт.ст}$  або  $0,124 \cdot 106 \text{ кПа}$ , звідси парціальний тиск  $\text{CO}_2$  в газі, рівноважнім з рідиною, яка витікає зі скрубера:  $P_{\text{п}} = E \cdot x_{\text{п}} = 0,00166 \cdot 0,124 \cdot 106 = 206 \text{ кПа}$ . Рушійна сила процесу абсорбції на верху скрубера:

$$P_{\text{в}} = P \cdot y_{\text{в}} = 1620 \cdot 0,002 = 3,24 \text{ кПа.}$$

Так як вода на зрошення скрубера подається чиста, то парціальний тиск  $\text{CO}_2$  у рівноважнім з водою газі дорівнює нулю, звідси рушійна сила процесу абсорбції на верху скрубера:

$$\Delta P_{\text{в}} = P_{\text{в}} - P_{\text{в}}^* = 3,24 - 0 = 3,24 \text{ кПа.}$$

Середня рушійна сила для всього процесу:

$$\Delta P_{\text{сер}} = \frac{254 - 3,24}{2,3 \lg \frac{254}{3,24}} = 57,4 \text{ кПа}$$

Коефіцієнт масопередачі:

$$K_{\Delta P} = \frac{M}{F \Delta P_{\text{сер}}} = \frac{2630}{5212 * 57,4} = 0,0088 \text{ кг/м}^2 \text{ год кПа}$$

**Задача.** Визначити коефіцієнт масопередачі у водяному скрубери при поглинанні з газу  $\text{CO}_2$ . В скрубера поступає  $V_{\text{п.сум.}}$ ,  $\text{м}^3 / \text{год}$ . газової суміші при

атмосферному тиску і подається  $W$ , м<sup>3</sup>/год. чистої води. Початковий вміст CO<sub>2</sub> в газі  $u_{п. CO_2}$ , % (об'ємних), кінцевий вміст (в верху скрубера)  $u_{к. CO_2}$ , % (об'ємних). Тиск у скрубери  $P_{абс.}$ , ат. Температура,  $t$ , °C. В нижню частину скрубера завантажено  $G_1$ , т керамічних кілець 50x50x5 мм. Вище завантажено  $G_2$ , т кілець 35x35x4 мм. Коефіцієнт змоченості рахувати рівним одиниці.

Таблиця 12.1. Вихідні дані для розрахунку

Задані параметри	№ варіанту									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{сум}$ , М <sup>3</sup> /год.	4500	4200	5100	5000	4800	5300	4900	4750	5350	5400
$W$ , М <sup>3</sup> /год.	630	600	650	640	620	670	625	610	670	675
$u_{п. CO_2}$ , %	29.0	28.9	28.7	29.2	29.1	30.2	28.8	28.5	29.4	29.6
$u_{к. CO_2}$ , %	0.15	0.22	0.20	0.21	0.18	0.19	0.28	0.26	0.24	0.25
$P_{абс.}$ , ат	15.0	16.0	15.8	15.7	16.2	15.5	15.75	16.1	16.3	16.4
$t$ , °C	16.0	14.0	15.0	17.0	16.5	15.3	14.8	14.5	17.2	17.0
$G_1$ , т	2.80	2.50	2.60	3.10	3.20	3.30	3.00	2.70	2.90	2.75
$G_2$ , т	16.5	16.6	16.8	17.1	17.5	17.25	16.9	16.75	18.1	17.4

## 12.5 Завдання для самостійної роботи

### Тестові завдання

#### Основне рівняння масопередачі при абсорбції:

- A.  $M = KF \Delta C \tau$
- B.  $M = KF - \Delta C \tau$
- C.  $M = KF + \Delta C \tau$
- D.  $M = KF / \Delta C \tau$

#### Абсорбція протікає:

- A. на поверхні розділу фаз.
- B. в глибині
- C. над поверхнею
- D. скрізь

**Розчинність газу за даної температури прямо пропорційна парціальному тиску газу над рідиною:**

- A. Закон Генрі
- B. Закон Мона
- C. Закон Клайперона
- D. Закон Рауля

**Витрати рідкого сорбенту:**

A.  $L = \frac{G(y_{\Pi} - y_{\text{K}})}{(x_{\text{K}} - x_{\Pi})}$

B.  $L = \frac{G(y_{\Pi} + y_{\text{K}})}{(x_{\text{K}} - x_{\Pi})}$

C.  $L = \frac{G(y_{\Pi} - y_{\text{K}})}{(x_{\text{K}} + x_{\Pi})}$

D.  $L = \frac{G(y_{\Pi} + y_{\text{K}})}{(x_{\text{K}} + x_{\Pi})}$

**Лінія фазової рівноваги для ідеальних розчинів описується рівнянням:**

A.  $y = A_p x$

B.  $y = A_p x + c$

C.  $y = A_p x - c$

D.  $y = A_p / x$

**Коефіцієнт змоченості знаходиться в межах від:**

A. 0 до 0,1

B. 0 до 0,3

C. 0 до 0,5

D. 0 до 1,0

**Критерій Прандтля (масообмінний) для рідини:**

A.  $Pr_p = \frac{\mu_p}{\rho_p - D_p}$

B.  $Pr_p = \frac{\mu_p}{\rho_p + D_p}$

C.  $Pr_p = \frac{\mu_p}{\rho_p D_p}$

D.  $Pr_p = \frac{\mu_p}{\rho_p / D_p}$

**Закон Рауля:**

A.  $P_{a6} = P_{a6}^0 (1 - x)$

B.  $P_{a6} = P_{a6}^0 (1 + x)$

C.  $P_{a6} = P_{a6}^0 (1 - x)$

D.  $P_{a6} = P_{a6}^0 / (1 - x)$

**Десорбцію газу проводять:**

A. відгоном його в струмені інертного газу

B. шляхом підвода тепла до абсорбенту

C. шляхом зниження тиску над абсорбенту

D. всі відповіді вірні

### Активність адсорбенту:

- A.  $\alpha = G/g_a$
- B.  $\alpha = Gg_a$
- C.  $\alpha = G - g_a$
- D.  $\alpha = G + g_a$

### Задачі для самостійного розв'язування

1. Визначити опір керамічної кільцевої насадки, якщо її височина  $H=10$  м, щільність зрошення  $U=6 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{год.}$ , масова швидкість газу  $W=3 \text{ кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с.}$  Кільця складені правильними рядами і мають розмір  $50 \times 50 \times 5$  мм. Щільність газу  $\rho=1,32 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; в'язкість газу  $\mu=0,23 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с.}$

2. Розрахувати насадковий абсорбер для поглинання газу  $\text{SO}_2$  водою з повітря при заданій температурі процесу. Масова витрата повітря становить  $G_m=0,64 \text{ кг}/\text{с.}$  початкова концентрація  $\text{SO}_2$  в повітрі  $y_{\text{п}}=12\%$ , кінцева  $y_{\text{к}}=0,25\%$ . Початкова концентрація  $\text{SO}_2$  у воді становить  $x_{\text{п}}=0,025\%$ , кінцева  $x_{\text{к}}=0,62\%$ . Процес відбувається в умовах протитоку при температурі  $t=20^\circ\text{C}$  атмосферному тиску.

3. Визначити опір шару безпорядково засипаної в абсорбер насадки при щільності зрошення  $U=6,4 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{год.}$ , масової швидкості газу  $W=1,63 \text{ кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с.}$  височині шару насадки  $H=8,6$  м. Щільність газу  $\rho=1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ , в'язкість газу  $\mu=0,23 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с.}$  питома поверхня насадки  $f_{\text{н}}=145 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , вільний об'єм насадки,  $V_{\text{в}}=0,78 \text{ м}^3/\text{м}^3$ .

### Контрольні запитання

1. Яка сутність абсорбції?
2. Що є рушійною силою абсорбції?
3. Як впливає витрата абсорбенту на розміри абсорбера? Чи може абсорбер працювати за мінімальної витрати абсорбенту?
4. Які конструкції абсорберів застосовують у промисловості?
5. Які застосовуються насадки в абсорберах? Яким вимогам повинні задовольняти насадки?
6. У чому полягає суть процесу адсорбції?
7. Які адсорбенти застосовують у харчовій промисловості. Які їх області застосування?
8. Які вимоги висуваються до адсорбентів?
9. Які конструкції адсорбентів застосовують у харчовій промисловості?

## Тема 13. Екстрагування: основи процесу, конструкції апаратів

### 13.1 Загальна характеристика процесу екстракції

*Екстракція* метод вилучення речовини з розчину або сухої суміші одного або кількох компонентів за допомогою відповідного розчинника (екстрагента), що має вибірково розчинність [1, 2, 3]. Рушійною силою процесу є різниця концентрацій. Для вилучення з розчину застосовуються розчинники, які не змішуються з цим розчином, але у яких речовина розчиняється краще, ніж у першому розчиннику. Це один із масообмінних процесів харчової промисловості. Використовується для вилучення, поділу та концентрування розчинених речовин. Під вибірковою розчинністю розуміється здатність рідини розчинити тільки той компонент, який слід витягти.

Найпростіший спосіб екстракції з розчину – одноразова або багаторазове промивання екстрагентом у ділильній воронці. Ділильна воронка є посудиною з пробкою і краном для зливу нижнього шару рідини. Для безперервної екстракції використовуються спеціальні апарати, а саме екстрактори або перколятори.

До основних стадій екстракції рідини відносяться:

1. Приведення в контакт та диспергування фаз.
2. Поділ або розшаровування фаз на екстракт (витягаюча фаза) та рафінат (вичерпна фаза).
3. Виділення цільових компонентів з екстракту та регенерація екстрагента, для чого поряд з дистиляцією найчастіше застосовують реекстракцію (процес, зворотний екстракції рідини), обробляючи екстракт водними розчинами речовин, що забезпечують повний переклад цільових компонентів у розчин або осад та їх концентрування.
4. Промивання екстракту для зменшення вмісту та видалення механічно захопленого вихідного розчину.

### 13.2. Екстракція у системі рідина-рідина

Екстрагенти забезпечують перехід цільових компонентів із вичерпної (важкої) фази, яка найчастіше являє собою водний розчин, витягує (легку) фазу (зазвичай органічна рідина). Дві контактуючі рідкі фази і розподілений між ними цільовий компонент утворюють екстракційну систему. Видобувальна фаза включає тільки екстрагент (або суміш екстрагентів) або є розчином одного або декількох екстрагентів у розріджувачі, що служить для покращення фізична (в'язкість, щільність) та екстракційних властивостей екстрагентів.

Основні вимоги до промислових екстрагентів: висока вибірковість; висока екстракційна ємність за цільовим компонентом; низька розчинність у рафінаті; сумісність із розріджувачами; легкість регенерації; висока хімічна, а часом і радіаційна стійкість; негорючість або досить висока температура спалаху (понад 60 °С); невисока леткість та низька токсичність; доступність та невисока вартість.

### 13.3 Екстрагування у системі тверде тіло – рідина

Під екстрагуванням у системі тверде тіло – рідина розуміються процеси розчинення, вилуговування, а також безпосередньо процес екстрагування, внаслідок проведення яких витягується один або кілька цільових компонентів з твердої фази на основі їх вибіркової розчинності у рідкому розчиннику.

Процес проходить через наступні стадії:

1. Підведення екстрагента (розчинника) до поверхні розділу твердої та рідкої фаз.
2. Перенесення екстрагента до цільового компонента, що знаходиться у твердому матеріалі.
3. Взаємодія розчинника в результаті проведення хімічної реакції або фізичного розчинення з компонентом, що видобувається;
4. Перенесення вилученого компонента до межі розділу твердої та рідкої фаз.
5. Відведення цільового компонента в ядро потоку розчинника (екстрагента).

При екстрагуванні розчинних речовин із тканини рослинної сировини зазвичай не всі перелічені вище стадії мають місце, або не всі грають істотну роль.

Механізм екстрагування залежить від того, у якому фазовому стані знаходиться видобутий цінний компонент у твердому теплоносії, наприклад, якщо цільовий компонент знаходиться у твердому тілі у вигляді розчину, то процес екстрагування зводиться до внутрішньої дифузії молекул цільового компонента зовнішньої поверхні частинок, а потім до переходу в ядро потоку рідини внаслідок зовнішньої дифузії [1, 2, 3]. Якщо ж цільовий компонент міститься у твердих частинках у вигляді твердих включень, попередньо відбувається розчинення цих частинок, а потім перенесення розчиненого компонента до поверхні частинки та ядро потоку рідини. Так у самому багатотоннажному з харчових виробництв, пов'язаних з екстрагуванням – цукробуряковим, екстрагування відбувається з рослинної тканини, в якій речовина, що екстрагується, знаходиться в рідкій фазі вже в розчиненому стані).

### 13.4 Конструкції апаратів

Апаратне оформлення процесу екстрагування в системах тверде тіло рідина визначається фізичними властивостями твердого перероблюваного матеріалу та екстрагента – розмірами частинок, їх механічною міцністю, розмірами пір і характером розподілу в них видобутої речовини, щільністю рідкої та твердої фази. Має значення облік вимог до ступеня обробки матеріалу, вихідний концентрації екстракту.

До конструкцій апаратів висувають такі вимоги:

- висока продуктивність на одиницю робочої місткості апарату;
- висока концентрація розчину, що утворюється;

– низька витрата енергії.

Апарати можна класифікувати за напрямом руху екстрагента та твердої фази (протиструмові, прямоточні та комбіновані), характеру циркуляції розчинника (з одноразовим проходженням, з рециркуляцією та зрошувальні), параметрами процесу (працюючі під атмосферним тиском, під вакуумом або під надлишковим тиском), властивостям оброблюваного твердого матеріалу (для тонко дисперсних, дрібнодисперсних, крупнозернистих, пастоподібних, волокнистих), гідродинамічного характеру процесу (з нерухомим, рухомим, зваженим або псевдозрідженим шаром твердої фази).

Найбільш поширені конструкції наведено на рисунку 13.1.

Екстрактор періодичної дії є ємністю з помилковим дном, що грає роль фільтруючої перегородки, в яку одночасно завантажується матеріал, що переробляється та екстрагент. Апарат забезпечується мішалкою. Після закінчення екстрагування екстракт через хибне дно зливається з апарату, а тверда фаза вивантажується. У таких апаратах одержують настоянки, морси, проводять знежирення кісток, екстракцію желатину.

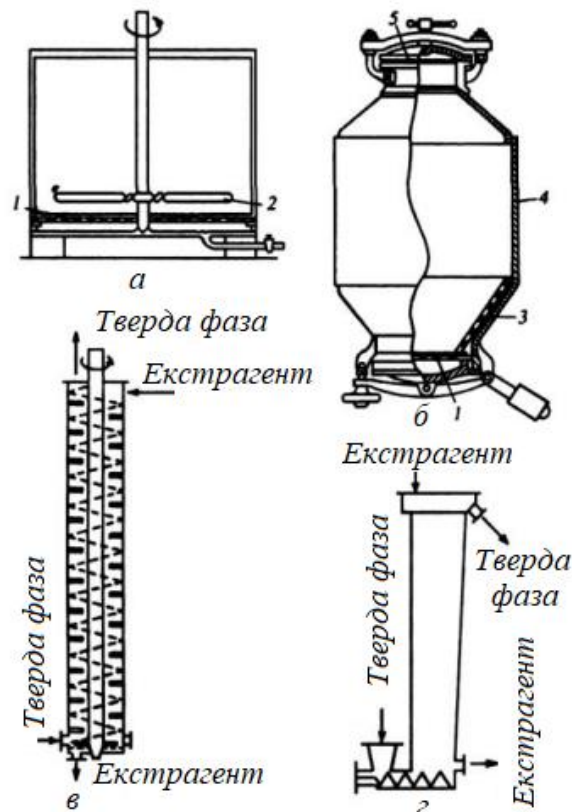


Рисунок 13.1 – Екстракційні апарати: а – екстрактор періодичної дії з мішалкою; б – дифузор (перколятор); в – колонний апарат із шнековим транспортером; г – колонний апарат без транспортного пристрою; 1, 3 – хибне дно; 2 – мішалка; 4 – корпус; 5 – кришка.

В апаратах напівбезперервної дії (перколяторах) частки твердого матеріалу утворюють нерухомий зернистий шар, що спирається на хибне дно, покрите фільтруючим матеріалом, а розчинник безперервно пропускають через шар. Зазвичай процес ведеться в батареї, що складається з 10-15 апаратів, з'єднаних послідовно. У міру збіднення твердого матеріалу, апарати

відключаються від загальної схеми для видалення відпрацьованої сировини та завантаження нової порції твердої фази, що підлягає екстрагуванню. Ці апарати прості за конструкцією, але низько продуктивні. У них забезпечує легкість відділення рідкої фази від твердої, зберігається початковий розмір частинок, виключається їх стирання.

Широкого поширення набули колонні апарати. На вигляд розташованого в них транспортного пристрою на лопатеві, шнекові та ланцюгові. Одноколонний екстрактор (рис. 13.1, в). Переміщення твердого матеріалу виконується знизу нагору за рахунок шнека або лопатевого транспортера. Якщо щільність твердої фази значно перевершує щільність рідини, то колонний апарат може працювати без транспортного пристрою та подача матеріалу здійснюється з допомогою шнека.

За аналогічним принципом працюють екстрактори з ланцюговим лопатевим транспортером (рис. 13.2). Перевагою цих апаратів і те, що матеріал розташовується найбільшими порціями на кожній перфорованій лопаті, завдяки чому під час руху він не деформується. У цих апаратах легко здійснювати заданий температурний режим. Недоліком є складність в експлуатації, займає великий обсяг та площі.

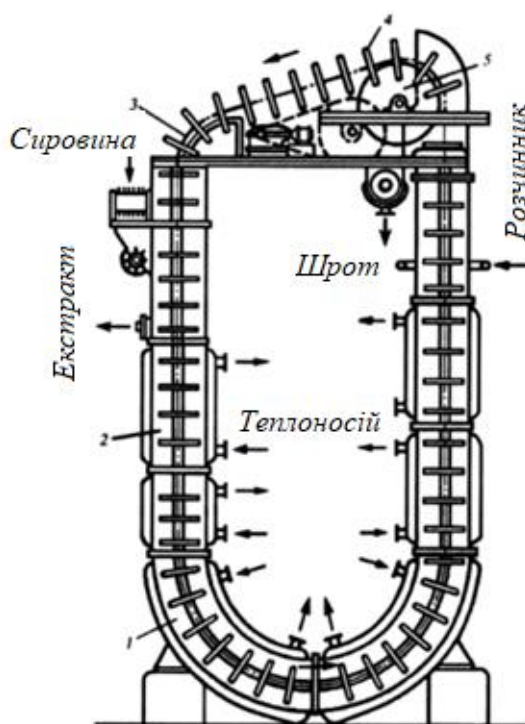


Рисунок 13.2 – Дифузійний апарат безперервної дії: 1 – кругла ділянка; 2 – вертикальна колона; 3 – роликівий ланцюг; 4 – рамки; 5 – приводний барабан.

### 13.5 Приклади розв'язування завдань [12, 13]

**Задача 1.** Визначити вихід сивушної олії, підсивушної рідини і витрати води на екстрагування стандартної сивушної олії при температурі 20<sup>0</sup>С зі 100 кг



суміші складу (в %): сивушної олії-65, етанолу-15, води-20 згідно точці М'' на рисунку 13.3.

### Розв'язання

З'єднавши точку R'' з вершиною С трикутника, отримаємо лінію зміщення R''С. Точка М на перетині з конодою R'E' характеризує утворення нової суміші. Точка R' характеризує состав стандартної сивушної олії: сивушної олії -80%, етилового спирту 5,6%, води-14,4%. Склад під сивушної рідини характеризується точкою E': сивушної олії-3,6%, спирту- 8,6%, води-86,7%.

Необхідну кількість води на промивку 100 кг сивушної суміші складу R'' для отримання стандартної сивушної олії R' згідно формулі буде:

$$G_B = G_{CM} R'' M' / M' C = 100 * 26 / 27 = 96,3 \text{ кг}$$

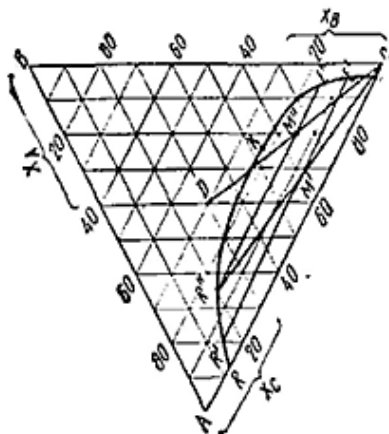


Рисунок 13.3 – Зображення процесу екстракції на трикутній діаграмі.

Маса отриманої суміші:

$$G_{CM} = G_{CM} + G_B = 100 + 96,3 = 196,3 \text{ кг}$$

Кількість підсивушної рідини:

$$G_E = \frac{G_{CM} R' M'}{R' E'} = \frac{196,7}{33,5} = 119,7 \text{ кг}$$

Кількість стандартної сивушної олії:

$$G_R = G_{CM} - G_E = 196,3 - 119,7 = 76,3 \text{ кг}$$

**Задача 2.** Визначити лімітуючу стадію процесу проточного вилучення цільового компонента чистим екстрагентом, визначивши критерій Біо для часток сферичної форми R, м. Об'ємні витрати твердої фази та рідини

$V_T, V_p, \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \text{ с})$ . Густина та в'язкість екстрагенту  $\rho, \text{ кг/м}^3, \mu, \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Поруватість часток  $\varepsilon_T = 0,45$  і порозність шару дисперсної фази  $\varepsilon = 0,5$ . Коефіцієнт дифузії цільового компонента в екстрагенті  $D = 5,33 \cdot 10^{-9} \cdot \text{ м}^2 / \text{с}$ . (табл. 13.1).

Таблиця 13.1. Вихідні дані для розрахунку

№ вар.	R, $10^{-3}\text{м}$ .	$V_T, \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \text{ с})$ .	$V_p, \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \text{ с})$ .	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$\mu, 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ .
1	0,75	0,0025	0,004	1050	1,10
2	0,8	0,0023	0,0035	1100	1,15
3	0,85	0,0035	0,003	1150	1,2
4	0,7	0,004	0,0025	1200	1,25
5	0,65	0,002	0,0023	1250	1,3
6	0,75	0,0025	0,004	1050	1,10
7	0,8	0,0023	0,0035	1100	1,15
8	0,85	0,0035	0,003	1150	1,2
9	0,7	0,004	0,0025	1250	1,25
10	0,65	0,002	0,0023	1200	1,3

### Розв'язання

1. Визначимо значення критерію Прандтля:

$$\text{Pr}_d = \mu / \rho D$$

2. Швидкість руху рідини в зазорах між частинками:
- 3.

$$w = V_p / \varepsilon, \text{ м/с}$$

Лінійна швидкість дисперсного матеріалу:

$$v = V_T / (1 - \varepsilon) \text{ м/с}$$

4. Розраховуємо значення критерію Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{(w - v) 2R\rho}{\mu}$$

5. Розраховуємо значення критерію Нуссельта за критеріальним рівнянням:

$$\text{Nu} = 0,8 \text{Pr}^{1/3} \text{Re}^{1/2}$$

5. Коефіцієнт масовіддачі:

$$\beta = Nu D / 2R \text{ м/с}$$

6. Розраховуємо значення дифузійного критерію Біо:

$$Bi_d = \beta R / D_c$$

де  $D_c = \varepsilon_T D$  – еквівалентний коефіцієнт дифузії у пористому матеріалі.

**Задача 3.** Визначити діаметр безперервно діючого насадкового екстрактора для вилучення оцтової кислоти з бензолу водою (дисперсна фаза – вода, суцільна фаза – бензол). Продуктивність екстрактора  $V_c = 13 \text{ м}^3/\text{год}$ . Бензолу, початкова концентрація оцтової кислоти у бензолі  $x' = 110 \text{ кг/м}^3$ , кінцева концентрація  $x'' = 1,5 \text{ кг/м}^3$ . Концентрація оцтової кислоти на виході в екстрагенті (воді) на виході з колони  $y'' = 250 \text{ кг/м}^3$ . Температура  $t = 20^\circ\text{C}$ .

### *Розв'язування*

Визначаємо співвідношення об'ємів суцільної та дисперсної фаз, приймаючи, що вихідний екстрагент не вміщує оцтової кислоти ( $y' = 0$ ).

За рівнянням матеріального балансу:

$$\frac{V_c}{V_d} = \frac{y'' - y'}{x' - x''} = \frac{250 - 0}{110 - 1,5} = 2,3$$

В якості насадки обираємо керамічні кільця розміром  $25 \times 25 \times 3 \text{ мм}$ , питома поверхня яких  $f = 200 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , вільний об'єм  $\xi = 0,74$ .

Для визначення об'ємної швидкості суцільної фази при екстрактора знаходимо:

$\rho_d$  – густина дисперсної фази ( $1000 \text{ кг/м}^3$ );

$\rho_c$  – густина суцільної фази ( $879 \text{ кг/м}^3$ );

$\sigma$  – граничний натяг між фазами ( $\sim 34 \text{ дин/см} = 34 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$ ).

Об'ємну швидкість суцільної фази при заглиблення екстрактора обчислюємо за рівнянням:

$$\begin{aligned} 1 + 0,875(\rho_d/\rho_c)^{1/4}(V_d/V_c)^{1/2} &= 0,894(V_c^2 f/g \xi^3)^{-1/4}(\rho_c/\Delta\rho)^{-1/4}(f \xi \sigma/\rho_c V_c^2)^{-0,078}; \\ 1 + 0,875(1000/879)^{1/4}(1/2,3)^{1/2} &= 0,894(V_c^2 200/9,81 \cdot 0,74^3)^{-1/4} \times \\ &\times (879/1000 - 879)^{-1/4} (200 \cdot 0,74 \cdot 34 \cdot 10^{-3}/879 V_c^2)^{-0,078}; \\ 1,596 &= V_c^{-0,344} \cdot 0,894 \cdot 0,375 \cdot 0,61 \cdot 1,5; \end{aligned}$$

Звідки:

$$\begin{aligned} V_c^{0,344} &= 0,1922; \\ V_c &= 0,008277 (\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}); \end{aligned}$$

Приймаємо швидкість суцільної фази на 20% нижче швидкості, яка відповідає захлинанню:

$$V_c = 0,8 \cdot 0,008277 = 0,0066216 (\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с})$$

Визначаємо площу розрізу екстрактора:

$$S = 15 / (3600 \cdot 0,0066) = 0,629 (\text{м}^2)$$

Звідки знаходимо діаметр екстрактора:

$$D = \sqrt{0,629 \cdot 4 / 3,14} = 0,801274 (\text{м})$$

Приймаємо округлено  $D = 0,8 (\text{м})$ .

Відповідь: діаметр безперервно діючого насадкового екстрактора для вилучення оцтової кислоти з бензолу водою дорівнює 0,8м.

**Задача 4.** Визначити діаметр безперервно діючого насадкового екстрактора для вилучення кислоти з бензолу водою (дисперсна фаза – вода, суцільна фаза – бензол). Продуктивність екстрактора  $V_c$ ,  $\text{м}^3/\text{год}$ . Бензолу, початкова концентрація оцтової кислоти у бензолі  $x'$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , кінцева концентрація  $x''$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ . Концентрація оцтової кислоти на виході в екстрагенті (воді) на виході з колони  $y''$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ . Температура  $t, ^\circ\text{C}$ .

Таблиця 13.2. Вихідні дані для розрахунку

№ вар.	кислота	$V_c$ , $\text{м}^3/\text{год}$ .	$x'=110$ $\text{кг}/\text{м}^3$	$x''=1,5$ $\text{кг}/\text{м}^3$	$y''=250$ $\text{кг}/\text{м}^3$	$t=20^\circ\text{C}$
1	лимонна	10	100	1,4	240	18
2	щавельна	12	110	1,5	250	19
3	оцтова	14	120	1,6	260	20
4	лимонна	10	100	1,4	220	21
5	щавельна	12	110	1,5	240	18
6	оцтова	14	120	1,6	250	19
7	лимонна	10	100	1,4	260	20
8	щавельна	12	110	1,5	220	21
9	оцтова	14	120	1,6	240	18
10	лимонна	10	100	1,4	250	19

### 13.6 Завдання для самостійного виконання [12, 13]

#### Тестові завдання

**Крива зміни концентрацій компонентів у екстрагенті залежно від їх концентрацій у вихідному розчині за рівноважних умов:**

- A. ізотерма екстракції
- B. ізобара екстракції
- C. адіабата екстракції
- D. немає вірної відповіді

**Коефіцієнт розподілу екстракції:**

- A.  $D=y^*/x^*$
- B.  $D=y^*-x^*$
- C.  $D=y^*+x^*$
- D.  $D=y^*\cdot x^*$

**Цей спосіб екстрагування знаходить достатньо широке застосування в промисловості:**

- A. багаторазова екстракція з перехресним потоком розчинника.
- B. багаторазова екстракція з протитечійним рухом розчинника
- C. одноразова (одноступенева) екстракція
- D. протиточна екстракція з флегмою.

**За принципом взаємодії або способом контакту фаз екстрактори поділяють на групи:**

- A. ступінчасті
- B. диференціально-контактні
- C. А і В
- D. немає вірної відповіді

**До недоліків пульсаційних колон відносять:**

- A. великі динамічні навантаження на фундамент
- B. підвищені експлуатаційні витрати
- C. труднощі обробки років легкоемувльгованих систем.
- D. всі відповіді вірні

**В екстракційній системі гранично припустимий вміст цільового компонента в екстракті й рафінаді:**

- A. фазова рівновага
- B. фазова насиченість
- C. фазова домінанта
- D. немає вірної відповіді

**Час повного розчинення частинки  $\tau$  обчислюється за формулою:**

A.  $\tau = \frac{d_0 \rho_m}{a(c^* - c) + \beta_c}$

B.  $\tau = \frac{d_0 \rho_m}{a(c^* - c) - \beta_c}$

C.  $\tau = \frac{d_0 \rho_m}{a(c^* - c) \beta_c}$

D.  $\tau = \frac{d_0 \rho_m}{a(c^* - c) / \beta_c}$

**При роботі сітчастих тарілок на струменевому режимі швидкість дисперсної фази в отворах повинна складати:**

A. 0,1-0,2 м/с

B. 0,15-0,3 м/с

C. 0,2-0,4 м/с

D. 0,3-0,5 м/с

**Кількість речовини, перенесеної з фази у фазу складає:**

A.  $M = \beta \Delta y_m F$

B.  $M = \beta \Delta / y_m F$

C.  $M = \beta \Delta + y_m F$

D.  $M = \beta \Delta - y_m F$

**Який найбільше поширений отримав спосіб екстрагування у харчовій промисловості:**

A. Безперервний протитечійний

B. періодичний протитечійний

C. безперервний сталий

D. періодичний сталий

**Швидкість Екстракції визначається:**

A. рушійною силою процесу

B. сумарним опором на всіх стадіях

C. співвідношенням маси екстрагенту і рідини у твердій фазі

D. всі відповіді вірні

**Витрати екстрагенту для проведення процесу екстракції:**

A.  $G = L(x_k - x_n) / (y_k - y_n)$

B.  $G = L(x_n + x_k) / (y_k - y_n)$

C.  $G = L(x_n - x_k) (y_k + y_n)$

D.  $G = L(x_n + x_k) (y_k + y_n)$

**За агрегатним станом розрізняють екстрагування в системі:**

- A. тверде тіло-тверде тіло
- B. тверде тіло-рідина
- C. рідина-рідина
- D. вірні B і C

**Коефіцієнт розподілу екстракції:**

- A.  $D=y^*/x^*$
- B.  $D=y^*-x^*$
- C.  $D=y^*+x^*$
- D.  $D=y^* \cdot x^*$

**В екстракційній системі гранично припустимий вміст цільового компонента в екстракті й рафінаді:**

- A. фазова насиченість
- B. фазова рівновага
- C. фазова домінанта
- D. немає вірної відповіді

**Для проведення процесу екстрагування в системі «тверде тіло – рідина» застосовують такий спосіб взаємодії фаз:**

- A. контакт у замкненому об'ємі
- B. фільтрування рідини через шар пористих частинок (перколяція)
- C. протитечійна взаємодія твердих частинок з рідиною
- D. всі відповіді вірні

**Швидкість дисперсної фази на струменевому режимі в отворах сітчастих тарілок складає:**

- A. 0,1-0,2 м/с
- B. 0,15-0,3 м/с
- C. 0,2-0,4 м/с
- D. 0,3-0,5 м/с

**Час повного розчинення частинки  $\tau$  обчислюється за формулою:**

- A.  $\tau = \frac{d_0 \rho_m}{a(c^*-c)+\beta_c}$
- B.  $\tau = \frac{d_0 \rho_m}{a(c^*-c)-\beta_c}$
- C.  $\tau = \frac{d_0 \rho_m}{a(c^*-c)\beta_c}$
- D.  $\tau = \frac{d_0 \rho_m}{a(c^*-c)/\beta_c}$

### Температура кипіння більшості ефірних олій ароматичних корінців:

- A. 110-130° С
- B. 120-140° С
- C. 130-150° С
- D. 140-160° С

### Задачі для самостійного розв'язування

1. Розрахувати об'єм екстрактора, якщо кількість отриманої пульпи при екстракції фосфатної кислоти з апатитового концентрату складає 385,8 т/год; щільність пульпи  $\rho=1580 \text{ кг/м}^3$ , а час перебування пульпи в екстракторах дорівнює 6 год.

2. Константа розподілу йоду між водою і етиловим спиртом при 20 ° С дорівнює 0,00435. Скільки грамів йоду залишиться в чотирьох літрах водного розчину ( $C = 1,3 \text{ г / л}$ ) після двократної екстракції етиловим спиртом, якщо всього витрачено 600 мл спирту?

3. Визначити діаметр безперервно діючого насадкового екстрактора для вилучення оцтової кислоти з бензолу водою (дисперсна фаза – вода, суцільна фаза – бензол). Продуктивність екстрактора  $V_c=18 \text{ м}^3/\text{год}$ . Бензолу, початкова концентрація оцтової кислоти у бензолі  $x'=120 \text{ кг/м}^3$ , кінцева концентрація  $x''=1,55 \text{ кг/м}^3$ . Концентрація оцтової кислоти на виході в екстрагенті (воді) на виході з колони  $y''=260 \text{ кг/м}^3$ . Температура  $t=21^\circ\text{C}$ .

4. Розрахувати об'єм і число екстракторів, якщо кількість отриманої пульпи при екстракції фосфатної кислоти з апатитового концентрату складає 285,6 т/год; щільність пульпи  $\rho=1480 \text{ кг/м}^3$ , а час перебування пульпи в екстракторах дорівнює 5 год.

5. При 25 °С константа розподілу йоду між водою і етиловим спиртом дорівнює 0,00435. Скільки грамів йоду залишиться в трьох літрах водного розчину ( $C = 1,3 \text{ г/л}$ ) після двократної екстракції етилового спирту, якщо всього витрачено 400 мл спирту?

6. Коефіцієнт розподілу йоду між:
- водою і чотирьоххлористим вуглецем - 0,0117;
  - водою і сірковуглецем – 0,0017;
  - водою і хлороформом – 0,0074.

Яким з перерахованих екстрагентів найбільш ефективно видобувати йод з водного розчину?

7. Визначити коефіцієнт розподілу бензойної кислоти між водою та хлороформом, якщо на кількаразове титрування  $5 \text{ см}^3$  початкового водного розчину пішло  $9,07 \text{ см}^3$ ,  $0,05 \text{ М}$  розчину. Після екстракції кислоти хлороформом водний шар знову тричі протитровано і на  $10 \text{ см}^3$  його затрачено в середньому  $1,27 \text{ см}^3$  цього ж титранта.

### Контрольні запитання

- 1. Що таке екстракція?
- 2. Якими властивостями повинні мати екстрагенти?



3. Опишіть процес екстракції у системі «рідина-рідина».
4. З яких стадій складається процес екстракції в системі тверде тіло-рідина».
5. Яка апаратура застосовується щодо процесу екстракції?
6. Опишіть схему процесу екстракції шляхом одноразового контакту.
7. Опишіть схему процесу екстракції шляхом багаторазового контакту.
8. Вимоги до органічних розчинників для екстракції.

## Тема 14. Динаміка та кінетика сушіння

### 14.1 Загальна характеристика процесу сушіння

*Сушка* – видалення рідини (найчастіше вологи-води, рідше інших рідин, наприклад, летких органічних розчинників) з речовин та матеріалів тепловими способами [1, 2, 3]. Здійснюється шляхом випаровування рідини і відведення утвореної пари при підведенні до матеріалу, що висушується теплотою, найчастіше за допомогою так званих сушильних агентів (нагріте повітря, топкові гази та їх суміші з повітрям, інертні гази, перегріта пара). Сушці піддають вологі тіла: тверді-колоїдні, зернисті, порошкоподібні, шматкові, гранульовані, листові, ткані та ін. група висушуваних матеріалів найбільш поширена); пастоподібні; рідкі суспензії, емульсії, розчини.

За способом підведення теплоти до вологого тіла розрізняють такі види сушки [9, 10, 11]: *конвективну* (у потоці нагрітого сушильного агента, що виконує одночасно функції теплоносія та вологоносія, тобто транспортує середовища в яке переходить волога; *контактну* (при зіткненні тіла з нагрітою поверхнею); *діелектричну* (струмами високої частоти); *сублімаційну* (виморожуванням у вакуумі); *радіаційну* (ГЧ випромінюванням); *акустичну* (за допомогою ультразвуку).

### 14.2 Класифікація видів сушіння

*Інфрачервоне сушіння* найбільш актуальною та перспективною на даний момент є сушіння продуктів харчування із застосуванням інфрачервоного випромінювання. Інфрачервоне випромінювання твердих тіл обумовлено збудженням молекул і атомів тіла внаслідок їх теплового руху. При поглинанні інфрачервоного випромінювання опромінюваним тілом ньому збільшується тепловий рух атомів та молекул, що викликає його нагрівання. Сушіння продуктів за даною технологією дозволяє зберегти зміст вітамінів та інших біологічно активних речовин у сухому продукті на рівні 80-90% вихідної сировини [1, 2, 3]. Сушіння продуктів (овочів та фруктів, сушіння риби, м'яса, круп) у такий спосіб дає можливість виробництва різноманітних харчових концентратів швидкого приготування: закуски, каші, крупи, овочеві та фруктові порошки, які використовуються у хлібопекарській, кондитерській промисловості.

*Мікрохвильовий метод сушіння.* За допомогою мікрохвильового обладнання можна вирішувати актуальні завдання багатьох виробництв, а саме сушити рибу, м'ясо, зерно, фрукти та овочі. Мікрохвильова технологія та створене на її основі мікрохвильове обладнання для сушіння фруктів, обладнання для сушіння овочів дозволяє не тільки висушувати продукцію, а й отримувати харчові барвники, розморожувати рибу, м'ясо, овочі, ягоди та інші продукти харчування, проводити безтемпературне консервування та багато іншого [9, 10, 11]. Мікрохвильовий метод сушіння заснований на дії на зневоднений продукт інтенсивного електромагнітного поля надвисоких частот (НВЧ). Під дією НВЧ поля молекули води (диполі) починають здійснювати коливальні та обертальні рухи, орієнтуючись із частотою поля його електричними лініями.

Рух молекул і є тепла енергія. Чим більше води в заданому обсязі, чим більше молекул бере участь у цьому русі, тим більше теплової енергії виділяється. Таким чином, розігрів відбувається у всьому обсязі продукту, причому більше вологі ділянки отримують більше енергії. За рахунок цього відбувається вилучення вологи, сушіння продукту, і, одночасно вирівнювання вологості обсягом продукту [1, 2, 3]. Застосування натуральних сушених інгредієнтів, виготовлених мікрохвильовим способом сушіння дозволяє виробникам харчових продуктів збагатити продукцію, що піддається сушінню, вітамінами, біологічно активними речовинами, мікроелементами та іншими корисними речовинами. Надати продукцію смак, колір та аромат натурального продукту. Застосовувати сухопродукт в час відсутності свіжих овочів.

*Сублімаційна сушка* продуктів (сублімаційна вакуумна сушка, також відома як сублімація) – це видалення вологи зі свіжозаморожених продуктів за умов вакууму [9, 10, 11]. Процес сублімаційного сушіння продуктів фізично складається з двох основних етапів (заморожування та сушіння продукту) та етапу досушування. Перший етап – заморожування продукту при температурі нижче за його точку затвердіння. Другий етап – сублімування, видалення льоду або кристалів розчинника за дуже низької температурі, тобто безпосередньо сушіння продукту. При цьому значний вплив на якість сухопродукту та на час, що потрібний для сушіння, має етап заморожування. Чим швидше та глибше заморожується продукт, тим менші великі кристали льоду утворюються в продукті, тим швидше вони випаровуються на другому етапі сушіння продукту та тим вище якість одержуваного продукту.

Видалення основної маси вологи з об'єктів сушіння відбувається за температур (-20...-30 °С), а їх досушування здійснюється при температурі не вище +40°С то в результаті досягається високий ступінь безпеки всіх найбільш біологічно цінних компонентів вихідної сировини [1, 2, 3]. Сублімаційне сушіння продукту є одним із найсучасніших методів оборотного консервування мікроорганізмів та біопрепаратів, який забезпечує найкращу якість сухопродукту та високу відновлюваність лактобактерій при мінімальній тривалості процесу і, відповідно, мінімальні витрати.

*Кондуктивний спосіб* сушіння харчових продуктів ґрунтується на передачі тепла продукту, що висушується шляхом безпосереднього контакту з

нагрітою поверхнею сушильного обладнання. Для сушіння продуктів цей спосіб використовується не часто [9, 10, 11]. Високої якості кінцевого сухопродукту досягти не вдається внаслідок нерівномірності вологості кінцевого продукту; продукт, що контактує з нагрітою поверхнею в період сушіння, що пересушується, що призводить до незворотності процесів відновлення, а через високу температуру (320-340 °C) у камері сушильного обладнання, кінцевий сухопродукт втрачає 30-40% вітамінів і біологічно активних речовин і стає ламким. При кондуктивному сушінні продукту тепло передається вологому матеріалу тільки від гріючої поверхні і передається до відкритої поверхні продукту з наступною віддачею їх у довкілля. Кількість тепла, отримана від гріючої поверхні, витрачається на випаровування вологи на втрати тепла та конвекцією відкритою поверхнею сухопродукту в навколишню середу. Частка цих втрат у загальних витратах тепла невелика і становить максимально 3-5%, що робить сушильне обладнання досить ефективним.

Одним із найпоширеніших способів сушіння продуктів в даний час є *конвективний* спосіб сушіння. Цей спосіб сушіння продуктів заснований на передачі тепла, що висушується продукту за рахунок енергії нагрітого сушильного агента – повітря або парогазової суміші [9, 10, 11]. Сушіння продуктів при цьому способі відбувається при омиванні продукту нагрітим газом, повітрям, топковими газами, перегрітою парою та іншими теплоносіями. При цьому способі сушіння за рахунок сполученої продукту теплової енергії йде випаровування вологи, що знаходиться в продукті, а винесення парів вологи здійснюється сушильним агентом

Розрізняють конвективне сушіння матеріалів у шарі, при якій застосовуються сушарки з омиванням матеріалу у шарі або тунельні, камерні, петлеві, валкові, турбінні, стрічкові, шахтні сушарки, а також конвективне сушіння з сопловим обдуванням плоскі матеріали. Крім цього розрізняють конвективне сушіння матеріалів або виробів у зваженому та напівзваженому стані, яка може здійснюватися в барабанних установках, установках з киплячим шаром, в пневматичних трубах сушарках, вихровому потоці, а також за допомогою сушіння розпиленням [1, 2, 3]. Устаткування для сушіння овочів, обладнання для сушіння фруктів та будь-яке сушильне обладнання, засноване на цьому способі, має простий пристрій. Висока температура та висока тривалість сушіння сприяють розвитку окислювальних процесів і призводять до втрат вітамінів та біологічно активних речовин у сухопродукті, та не сприяє пригніченню первинної мікрофлори.

*Акустичний метод* сушіння продуктів заснований на вплив на продукт, що зневоднюється, інтенсивних ультразвукових хвиль. Цей процес сушіння носить циклічний характер, хвиля вибиває вологу, що знаходиться на поверхні продукту, потім волога, що залишилася, рівномірно розподіляється по капілярах і процес повторюється знову. Це відбувається до тих пір, поки продукт не досягне заданої вологості [1, 2, 3]. При акустичному сушінні волога екстрагується з продукту, що піддається сушінню під впливом звуку з відповідними характеристиками. Принципова особливість способу: сушіння продуктів протікає без підвищення температури продуктів («холодне»

сушіння). Саме тому це єдиний спосіб сушіння, придатний для сушіння термочутливих і легко матеріалів, що окислюються. Обробка продуктів акустичними коливаннями високою інтенсивності сприятливо позначається на фізико-хімічних та споживчих властивості сухопродукту (наприклад, збільшує схожість насіння). Сушіння продуктів акустичним способом відрізняється від звичайних методів і швидкості сушіння. Наприклад, при сушінні ферментів (що руйнуються при температурі 40 °С) в акустичному полі швидкість сушіння продуктів у порівнянні з вакуумним методом підвищується у 3-4 рази.

### 14.3 Приклади розв'язування завдань [12, 13]

**Приклад 1.** Визначити витрати повітря на сушіння, якщо в сушарку поступає 1,95 кг/с вологого матеріалу. Вологість матеріалу змінюється від 14% мас. до 0,5% мас. Стан повітря характеризується наступними параметрами: до сушарки  $t_1 = 70^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_1=5\%$ ; на виході з сушарки  $t_2 = 60^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_2=50\%$ .

#### *Розв'язування*

Кількість вилученої вологості із рівняння матеріального балансу сушарки:

$$W = \frac{G_1(W_1 - W_2)}{100 - W_2} = \frac{1,95(14 - 0,5)}{100 - 0,5} = 0,265 \text{ кг/с}$$

Витрати повітря на сушіння:

$$L = \frac{W}{X_1 - X_2}$$

де  $X_1$  та  $X_2$  – вологовміщення повітря, кг/кг.

$X_1 = 0,01$  кг/кг та  $X_2 = 0,07$  кг/кг визначаємо по діаграмам вологого повітря.

$$L = \frac{0,265}{0,07 - 0,01} = 4,41 \text{ кг/с}$$

**Приклад 2.** Визначити витрати повітря та витрати теплоти в теоретичній сушарці для вилучення 0,28 кг/с вологості із твердого вологого матеріалу. Стан повітря характеризується наступними параметрами: на вході в калорифер  $t_0 = 30^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_0 = 70\%$ ; на виході із сушарки  $t_2 = 60^\circ\text{C}$   $\varphi_2 = 50\%$ .

#### *Розв'язування*

Витрати повітря на сушіння в теоретичній сушарці:

$$L = \frac{W}{X_2 - X_0}$$

де  $X_0$  – вологовміст повітря на вході в калорифер = 0,020 кг/кг;

$X_2$  – вологовміст повітря на виході із сушарки = 0,070 кг/кг.

$$L = \frac{0,28}{0,07 - 0,02} = 5,5 \text{ кг/с}$$

Витрати теплоти на висушування матеріалу:

$$Q = L (I_2 - I_0)$$

де  $I_0$ ,  $I_2$  – ентальпія повітря на вході в калорифер та на виході із сушарки визначаємо по діаграмі “I-x”:

$I_0 = 82$  кДж/кг;

$I_2 = 245$  кДж/кг.

$Q = 5,6 (245 - 82) = 912,8$  кВт

**Задача.** Скласти матеріальний баланс процесу сушіння, якщо в сушарку поступає  $G_1$  (кг/с) матеріалу з початковою вологістю  $W_1$  (% мас), а кінцева вологість матеріалу  $W_2$  (% мас). Дані в таблиці 14.1.

Таблиця 14.1. Вихідні дані для розрахунку

№ вар.	$G_1$ (кг/с)	$W_1$ (% мас)	$W_2$ (% мас).
1	1,28	12	1,0
2	1,84	18	0,8
3	1,56	13	0,9
4	1,82	14	1,0
5	1,60	19	0,6
6	1,64	12	0,8
7	1,68	10	0,9
8	1,7	9,4	1,0
9	1,72	8,6	0,8
10	1,78	10	0,9

#### 14.4 Завдання для самостійного виконання [12, 13]

##### Тестові завдання

**В процесі сушіння з овочів і фруктів в першу чергу виділяється:**

- A. капілярна волога
- B. адсорбційна волога
- C. мікрокапілярна волога
- D. осмотична волога

**Вологе повітря характеризується основними параметрами:**

- A. барометричним тиском
- B. абсолютною і відносною вологістю
- C. парціальним тиском водяної пари
- D. всі відповіді вірні

**Після періоду прогріву матеріалу до температури сушіння наступає період:**

- A. постійної швидкості сушіння
- B. постійного тиску сушіння
- C. постійної температури сушіння
- D. всі відповіді вірні

**Швидкість сушіння залежить від:**

- A. швидкості руху повітря в сушарці,
- B. температури повітря в сушарці.
- C. фізико-хімічних властивостей матеріалу
- D. всі відповіді вірні

**Найчисленніша група сушарних апаратів:**

- A. конвективні сушарки
- B. кондуктивні сушарки
- C. сублимаційні сушарки
- D. СВЧ сушарки

**Кількість висушеного матеріалу:**

- A.  $G_2 = G_1 - \frac{100-\omega_1}{100-\omega_2}$
- B.  $G_2 = G_1 + \frac{100-\omega_1}{100-\omega_2}$
- C.  $G_2 = G_1 \frac{100-\omega_1}{100-\omega_2}$
- D.  $G_2 = G_1 \frac{100+\omega_1}{100+\omega_2}$

**Витрата пари  $G_{\Pi}$  на сушіння:**

- A.  $G_{\Pi} = \frac{Q}{(i-t_{\text{кон}})\eta}$
- B.  $G_{\Pi} = \frac{Q}{(i+t_{\text{кон}})\eta}$
- C.  $G_{\Pi} = \frac{Q}{(i*t_{\text{кон}})\eta}$
- D.  $G_{\Pi} = \frac{Q}{(i-t_{\text{кон}})/\eta}$

### **Перевага сушіння продуктів у спіненому стані:**

- A. простота
- B. відсутність скребків та ножів
- C. невеликі габаритні розміри
- D. всі відповіді вірні

### **Продуктивність вакуумних насосів в сублімаційному апараті повинна забезпечувати створення в системі залишкового тиску:**

- A. 46,7 Па.
- B. 56,7 Па.
- C. 66,7 Па.
- D. 76,7 Па.

### **Задачі для самостійного розв'язування**

1. Стрічкова теоретична сушарка працює з рециркуляцією повітря, причому коефіцієнт рециркуляції 1,8. Визначити потенціал сушіння, витрату повітря і теплоти, якщо подача сировини становить 200 кг/год з початковою вологістю  $w_{\text{п}} = 82\%$ , параметри вхідного і вихідного повітря відповідно:  $t_0 = 15$  °С;  $t_2 = 50$  °С;  $\varphi_2 = 40\%$ , а кінцева вологість продукту становить  $w_{\text{к}} = 19\%$ .

2. Сировина сушиться за наступних параметрів повітря:  $t_0 = 20$  °С;  $\varphi_0 = 70\%$ ;  $t_2 = 60$  °С;  $\varphi_2 = 40\%$  в сушарках на продув і з частковою рециркуляцією ( $n = 1,5$ ). Порівняйте потенціали сушіння, якщо потужність калорифера 300 кВт.

3. Порівняйте потенціали сушіння за різними режимами, якщо потужність калорифера сушарки 300 кВт. Сировина сушиться за наступних параметрів повітря:  $t_0 = 20$  °С;  $\varphi_0 = 70\%$ ;  $t_2 = 60$  °С;  $\varphi_2 = 40\%$  в сушарках з проміжним підігрівом ( $t_{\text{пром}} = 70$  °С і з частковою рециркуляцією ( $n = 1,5$ ).

4. Сировина сушиться за наступних параметрів повітря:  $t_0 = 25$  °С;  $\varphi_0 = 60\%$ ;  $t_2 = 50$  °С;  $\varphi_2 = 40\%$  в сушарках на продув і з повною циркуляцією. Порівняйте потенціали сушіння, якщо потужність калорифера 300 кВт, а кількість випарованої води 300 кг.

## **Тема 15. Сушильні установки: конструкції та особливості застосування**

### **15.1 Промислові сушарки**

Конструкції сушарок дуже різноманітні та відрізняються: за способом підведення теплоти (конвективні, контактні, спеціальні); використанням сушильного агента (повітряні, газові, парові); за тиском у сушильній камері (атмосферні, вакуумні); за способом організації процесу (періодичної або безперервної дії) [1, 2, 3]; за взаємним напрямком руху висушувального матеріалу та сушильного агента (у конвективних апаратах – прямоток, протитік,

перехресний струм); станом шару вологого матеріалу в апараті (з нерухомим, рухомим або зваженим шаром).

## 15.2 Конвективні сушарки

*Камерні сушарки.* У них матеріал, що висушується, знаходиться нерухомо на полицях, встановлених в одній або кількох сушильних камерах. Засмоктується вентилятором і нагріте в калориферах повітря проходить між полицями над матеріалом. Сушарки працюють періодично при атм. тиск і застосовуються в малотоннажних виробництвах для матеріалів з невисокою температурою сушіння (наприклад, барвники) [1, 2, 3].

*Тунельні сушарки* – камерні сушарки безперервної дії. Є довгі (типу коридору) камери, всередині яких по рейках переміщуються візки (вагонетки) з лежачими на лотках або деках матеріалом, що висушується [9, 10, 11]. Нагріте повітря обтікає лотки прямо- або протитечією, можлива рециркуляція повітря. Ці сушарки використовують для сушіння харчових продуктів тощо (рис. 15.1).

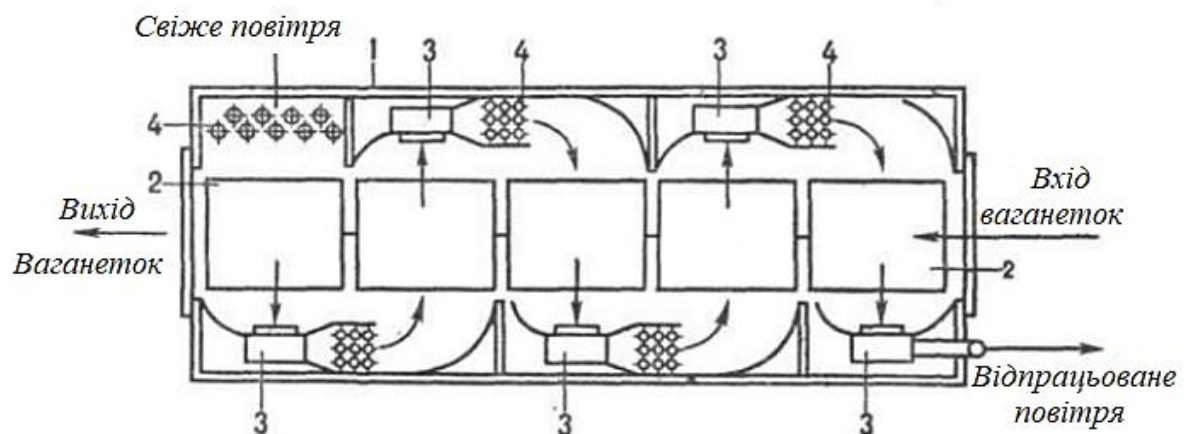


Рисунок 15.1 – Тунельна сушарка: 1 – камера (коридор), 2 – вагонетки, 3 – вентилятори, 4 – калорифери.

*Стрічкові сушарки* зазвичай виконують у вигляді багатоярусного стрічкового транспортера, по якому в камері, що діє при атм. тиск, безперервно переміщається матеріал, поступово пересипаючись з верхньої стрічки на нижчі (швидкість кожної стрічки 0,1-1 м/хв) (рис. 15.2) [1, 2, 3]. Сушильний агент може рухатися зі швидкістю не більше 1,5 м/с прямо- або протитечією, а також крізь шар матеріалу за наявності перфорованої стрічки. Ці сушарки компактніші, ніж камерні та тунельні та відрізняються більшою інтенсивністю сушіння, проте також складні в обслуговування через необхідність ручної праці, перекосів та розтягувань стрічок.



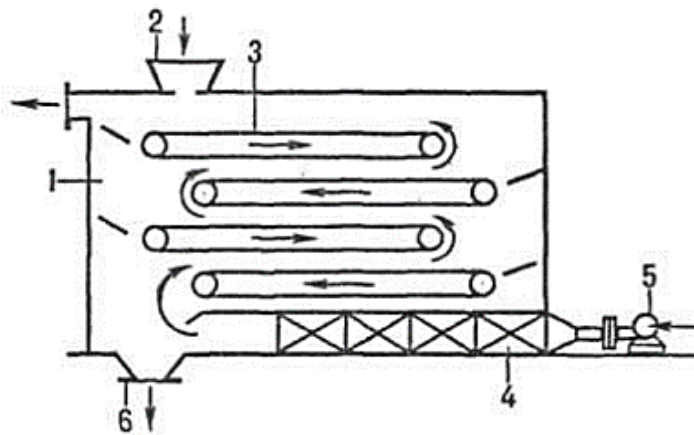


Рисунок 15.2 – Стрічкова сушарка: 1 – камера; 2, 6 – завантажувальний та розвантажувальний бункери; 3 – стрічковий транспортер; 4 – калорифер; 5 – вентилятор.

*Петльові сушарки* є різновидом стрічкових сушарок (рис. 15.3). Вологий матеріал за допомогою живильника подається на нескінченну сітчасту стрічку, що вдавлюється в її комірки, проходячи через обігриваючі порю валки, після чого надходить у сушильну камеру, де сітка, що рухається утворює ряд петель. За допомогою автоматичного ударного пристрою висушений матеріал скидається у розвантажувальний шнек [9, 10, 11]. Гарячий сушильний агент рухається уперек стрічки. Такі сушарки зазвичай працюють із проміжним підігрівом повітря, частковою рециркуляцією його за зонами та забезпечують велику швидкість сушіння в порівнянні з камерними сушарками, але конструктивно складніші.

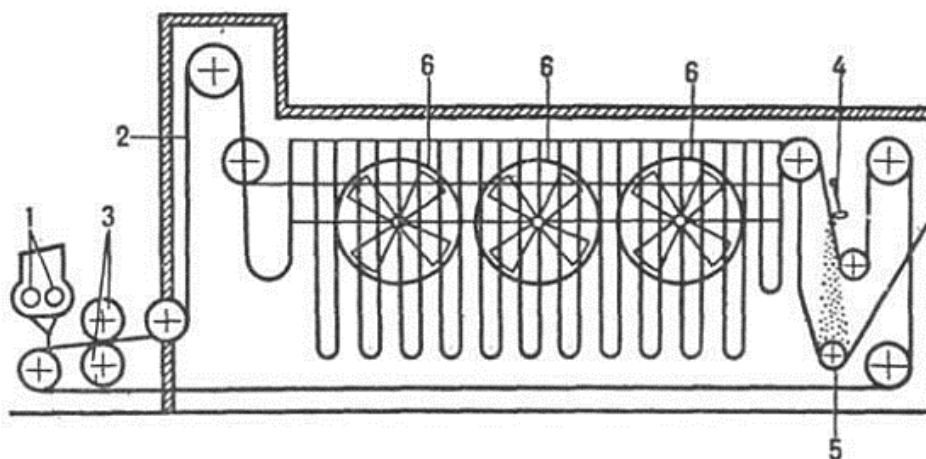


Рисунок 15.3 – Петльова сушарка: 1 – живильник; 2 – стрічка; 3 – валки; 4 – автоматичний ударний пристрій; 5 – розвантажувальний шнек; 6 – вентилятори.

*Барабанні сушарки* поширені завдяки високій продуктивності, простоті конструкції та можливості безперервно сушити при атм. тиску дрібнокускові та сипучі матеріали (рис. 15.4). Така сушарка є пристроєм з невеликим нахилом до горизонту (кут до  $4^\circ$ ) циліндричний барабан із бандажами. Вологий матеріал

через живильник надходить у барабан і рівномірно розподіляється за його перерізами розміщеними в середині насадок [1, 2, 3]. Тісно стикаючись при пересипанні із сушильним агентом, матеріал висушується і рухається до розвантажувального отвору в приймальному бункер. Гази надходять з топки, що примикає до барабана та просмоктуються прямострумом через нього вентилятором зі швидкістю 0,5-4,5 м/с. Для уловлювання з газів пилу між барабаном та вентилятором встановлений циклон.

*Сушарки зі зваженим шаром* характеризуються високими відносними швидкостями руху фаз та розвиненою поверхнею контакту. Основний гідродинамічні режими роботи: псевдозрідження та фонтанування. При суттєвому зменшенні в процесі сушіння маси частинок дисперсного матеріалу застосовуються режими вільного фонтанування і киплячого шару, що проходить. Серед цих сушарок найбільш поширені пневматичні, вихрові камери, апарати з киплячим та фонтануючим шаром, вібраційні [1, 2, 3].

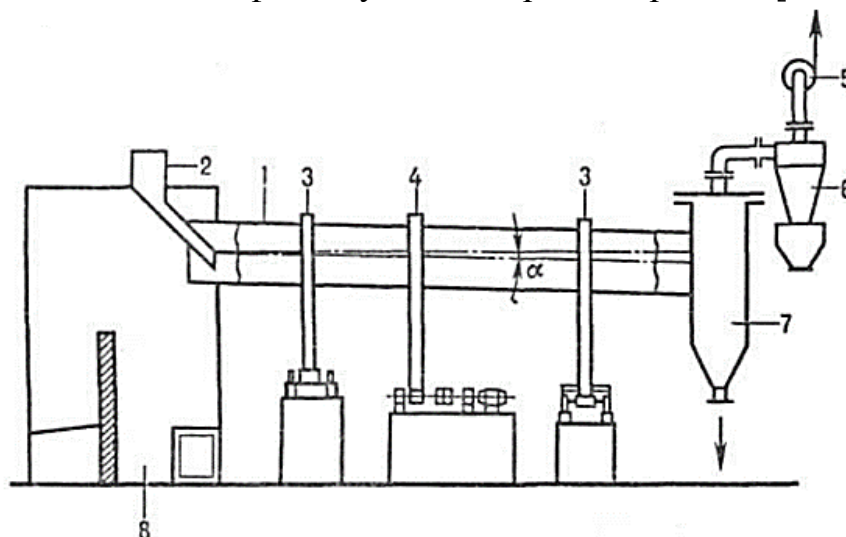


Рисунок 15.4 – Барабанна сушарка: 1 – барабан, 2 – живильник, 3 – бандажі, 4 – зубчасте колесо, 5 – вентилятор, 6 – циклон, 7 – приймальний бункер, 8 – топка.

*Вихрові сушильні камери* – представники апаратів з закрученими потоками сушильного агента. Ці камери є дисковими, а апарати нагадують відцентровий вентилятор з тангенціальним підведенням теплоносія. Вологий сипкий або волокнистий матеріал завантажується живильником через бічну частину камери і під дією газових струменів закручується, утворюючи в апараті кільцевий шар, що обертається. Швидкість витікання газу 50-80 м/с, час перебування в камері матеріалу 10-20 с та 2-3 хв. для частинок розміром. 0,1-0,2 та 3-4 мм.

*Сушарки з киплячим шаром* бувають постійного, розширювального, прямокутного, а також круглого перерізу (рис. 15.5). Робота таких апаратів суттєво залежить від конструкції газорозподільних ґрат до яких переміщається матеріал і які можуть бути плоскими, вигнутими, опуклими, з різними отворами конфігурації. Через них знизу продувається попередньо нагрітий сушильний агент. Використовують одно- та багатосекційні сушарки [9, 10, 11].

На рисунку 15.5 зображено: *a, б* – односекційні з неспрямованим та спрямованим рухом матеріалів (у першому випадку термостійких, у другому важко висихаючих для яких брало необхідна висока рівномірність сушіння); *в, г* – багатосекційні з розташуванням секцій одна над іншою і поділом їх перегородками; пунктирні лінії – газорозподільні ґрати.

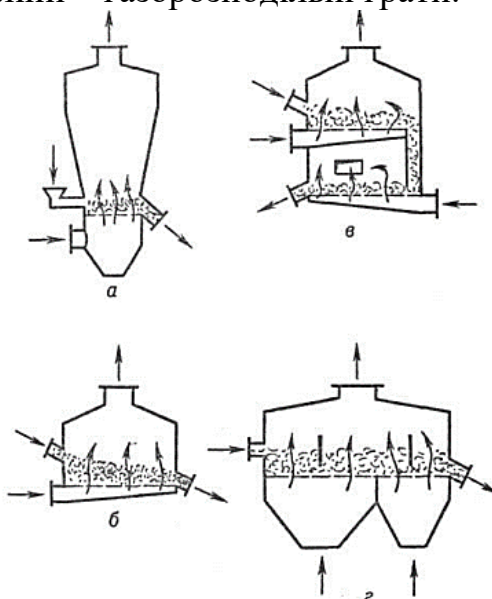
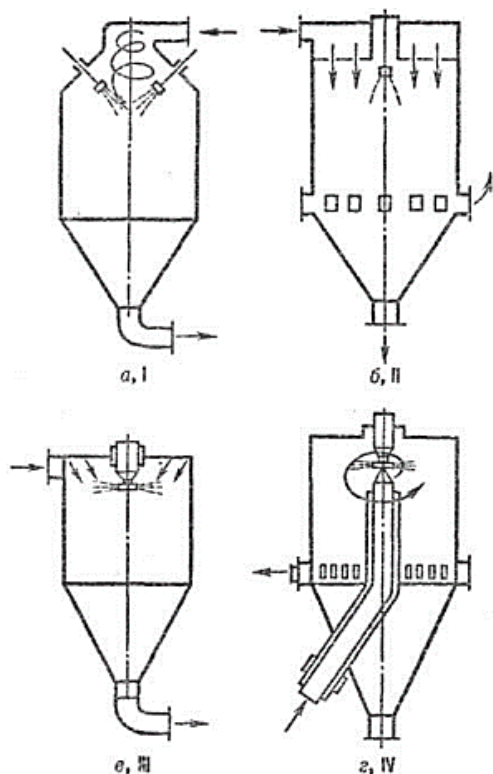


Рисунок 15.5 – Сушарки з киплячою шаром

*Розпилювальні сушарки* мають циліндричні або циліндро-конічні камери, рис. 15.6.



I – центральне закручене підведення сушильного агента (прямоструйний апарат);

II – рівномірний розподіл газів по перерізу через ґрати;

III – рівномірна подача газів над смолоскипом розпилу по всьому перерізу камери;

IV – зосереджена подача газів під корінь смолоскипу розпилу.

Рисунок 15.6 – Сушарки з форсунками: сушарки з форсунковим (*a, б*) та дисковим (*в, г*) розпиленням матеріалів

У них в'язкі рідкі текучі пастоподібні матеріали розпорошуються в потік гарячого сушильного агента механічними та пневматичними форсунками, а також такими, що обертаються з окружною швидкістю 100-200 м/с відцентровими дисками [1, 2, 3]. Продуктивність сушарок по випареній волозі 10-20000 кг/год. Недоліком є громіздкість через відносно низьку напруги робочого об'єму сушильної камери з волозі, конструктивно складні та дорогі в експлуатації.

*Вальцеві сушарки* призначені для безперервного атмосферного або вакуумного сушіння в'язких, рідких та пастоподібних матеріалів (барвники, пектиновий клей, молоко тощо) (рис. 15.7). Основні елементи – обігріванні водяною парою порожнисті вальці, що обертаються з частотою 1-13 хв<sup>-1</sup>. Матеріал змочує поверхню вальців і висушується в тонкому шар. Товщина сухої плівки, що знімається спеціальними ножами становить 0,1-1,0 мм [1, 2, 3].

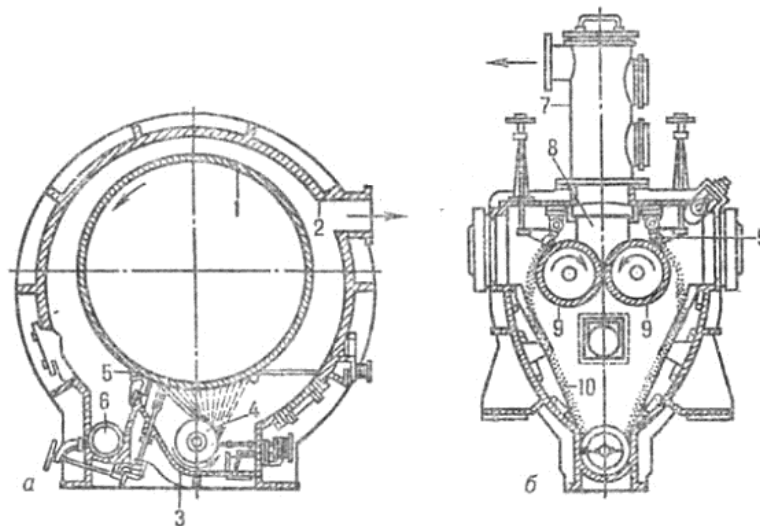


Рисунок 15.7 – Вальцеві вакуум-сушарки: а – одновальцева; б – двохвальцева; 1 – корпус, 2 – порожнистий барабан (валець), 3 – корито, 4 – розподільчий валик, 5 – ніж, 6 – шнек, 7 – приймальний ковпак, 8 – збірник, 9 – вальці, 10 – похила стіна.

### 15.3 Приклади розв'язування завдань

**Задача 1.** Розрахувати і накреслити барабанну сушарку з реальним процесом сушіння. Основний елемент барабанної сушильної установки – циліндричний барабан, що обертається, з внутрішньою насадкою, яка сприяє переміщенню матеріалу. Сушильний агент (повітря), параметри якого  $I_0$ ,  $d_0$ ,  $t_0$ ,  $\varphi_0$ , вентилятором подається у калорифер, де підігрівається до стану  $I_1$ ,  $d_1$ ,  $t_1$ ,  $\varphi_1$ , а потім надходить у сушильний барабан (рис. 15.8).

Установка працює за принципом прямої течії повітря і матеріалу під час сушіння цукру-піску і протилежної під час сушіння крохмалю.

Початкові дані: потужність сушарки за висушеним матеріалом –  $G_2$ , кг/год; питома теплоємність абсолютного сухого матеріалу –  $c_{с.м}$ ; вологість матеріалу, % до загальної маси: початкова –  $\omega_1$ , кінцева –  $\omega_2$ ; температура

матеріалу, який надходить на сушіння –  $\theta_1$ ; температура матеріалу, який виходить з сушильного барабана –  $\theta_2$  (табл. 15.1).

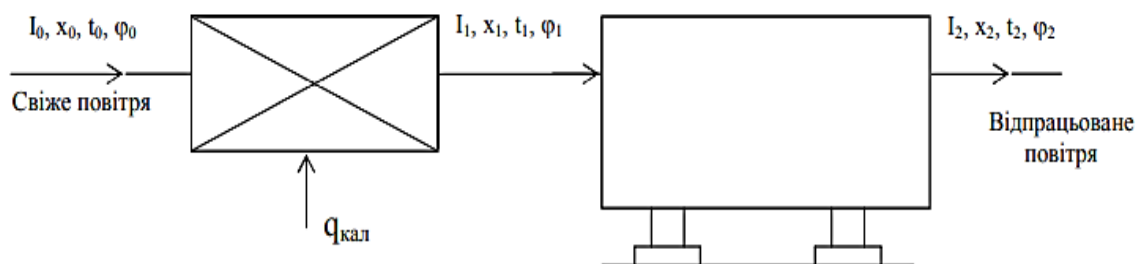


Рисунок 15.8 – Схема сушильної установки

Параметри повітря: температура свіжого повітря, що надходить до калорифера –  $t_0$ ; відносна вологість свіжого повітря –  $\varphi_0$ , температура повітря, що надходить до сушильного барабана –  $t_1$ ; температура відпрацьованого повітря, що виходить з сушильного барабана, –  $t_2$ ; загальні втрати теплоти в навколишнє середовище –  $Q_{н.с.}$ ; напруга барабана за вологою –  $A$ .

Під час виконання розрахунку необхідно: накреслити принципову схему сушильної установки і показати продуктивні і теплові потоки та їх параметри; побудувати і описати процес, що протікає в сушильній установці, в I–x діаграмі.

У результаті графоаналітичного розрахунку визначити: кількість видаленої вологи; параметри повітря, що надходить до калорифера  $I_0, x_0$ ; параметри повітря на виході з калорифера -  $I_1, x_1, \varphi_1$ ; на виході з сушильного барабана –  $I_2, x_2, \varphi_2$ ; питому і повну витрати повітря; питому і повну витрату теплоти в калорифері; основні розміри сушильного барабана.

Таблиця 15.1. Початкові дані для розрахунку барабанної сушарки

№	Величини	Варіант									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>

**Цукор-пісок**

Не парне	$G_2$ , кг/год	9500	11500	12500	6400	8500	7500	14000	15000	18000	19000
	с.м., кДж/кг	0,712	0,712	0,712	0,712	0,712	0,712	0,712	0,712	0,712	0,712
	$\omega_1$ , %	1,5	1,4	1,6	1,6	1,5	1,7	1,7	1,5	1,6	1,7
	$\theta_1$ , С	50	52	54	54	50	55	55	53	51	49
	$\omega_2$ , %	0,45	0,47	0,50	0,50	0,53	0,45	0,45	0,49	0,5	0,55
	$\theta_2$ , С	32	33	34	34	36	38	38	39	40	35
Парне	$t_0$ , С	18	20	22	22	25	-10	-10	20	-5	25
	$\varphi_0$ , %	60	65	70	70	80	65	65	70	75	80
	$t_1$ , С	105	110	115	115	125	120	120	115	110	105
	$t_2$ , С	65	70	75	75	80	70	70	65	80	75
	$Q_{н.с.}$ , кДж	25000	30000	35000	35000	40000	25000	25000	30000	35000	40000
	$A$ , кг(м <sup>3</sup> ·год)	7	6	7	7	7	7	7	7	6	7

### Крохмаль

		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Не парне	$G_2$ , кг/год	250	300	350	400	450	500	550	600	650	300
	с.с.м., кДж/кг	1,09	1,040	1,130	1,215	1,250	1,09	1,040	1,130	1,215	1,250
	$\omega_1$ , %	34	35	36	37	38	34	35	36	37	38
	$\theta_1$ , С	12	11	10	9	8	12	11	10	9	8
	$\omega_2$ , %	13	14	15	19	21	20	18	16	14	13
	$\theta_2$ , С	30	35	28	32	29	30	34	32	28	34
	$t_0$ , С	10	15	20	25	-5	10	15	20	-5	25
Парне	$\phi_0$ , %	60	65	70	75	80	80	75	70	65	60
	$t_1$ , °С	77	85	100	110	85	80	85	90	100	110
	$t_2$ , °С	32	35	35	40	32	32	35	35	40	32
	Qн.с. кДж/кг	15000	20000	25000	30000	40000	20000	25000	30000	35000	40000
	A, кг(м <sup>3</sup> ·г·од)	6	7	6	7	6	7	6	7	6	7

Барабанну сушарку розраховують аналітично і графічно за допомогою діаграми вологого повітря.

*Розрахунок потужності барабанної сушарки за вологим матеріалом.* Нехтуючи втратами сухої речовини під час сушіння, потужність сушарки за вологим матеріалом розраховують за таким рівнянням, кг/год:

$$G_1 = G_2 \frac{100 - \omega_2}{100 - \omega_1}$$

*Розрахунок кількості випареної вологи.* Згідно з законом збереження речовини витрата висушеної вологи, кг/год,

$$W = G_1 - G_2$$

Для перевірки кількість висушеної вологи визначають також з таких рівнянь:

$$W = G_1 \frac{\omega_1 - \omega_2}{1 - \omega_2}$$

$$W = G_2 \frac{\omega_1 - \omega_2}{1 - \omega_1}$$

Тепловий розрахунок барабанної сушарки. Відмінність дійсного сушильного процесу, що відбувається в сушарці, від теоретичного визначається величиною  $\Delta$ , кДж/кг вологи:

$$\Delta = c_w \theta_1 - (q_m + q_{нс})$$

де  $c_w = 4,19$  кДж/(кг К) – теплоємність води;

$\theta_1$  – температура матеріалу на вході в сушарку;

$q_m$  – питомі витрати теплоти на нагрівання матеріалу, кДж/кг вологи;

$q_{нс}$  – питомі втрати теплоти в навколишнє середовище, кДж/кг вологи.

Питомі витрати теплоти на нагрівання матеріалу в сушарці:

$$q_M = \frac{G_2 c_{M_2} (u_2 - u_1)}{W}$$

$c_{M_2}$  – питома теплоємність абсолютно сухого матеріалу, кДж/(кг К)

$$c_{M_2} = \frac{c_B \omega_2 + c_{c.M} (100 - \omega_2)}{100}$$

де  $c_{c.M}$  – питома теплоємність абсолютного сухого матеріалу, кДж/(кг К);

$\theta_2$  – температура матеріалу на виході з сушарки;

$c_B$  – питома теплоємність води.

Питомі втрати теплоти в навколишнє середовище:

$$q_{H.c} = \frac{Q_{H.c}}{W}$$

Визначивши питомі втрати теплоти, розраховують поправку /1 на дійсну сушарку.

*Зображення стану повітря і побудова процесу сушіння в I–x діаграмі (рис. 15.9). Робимо ксерокопію I–x діаграми і на ній виконуємо побудову. За заданими значеннями початкової температури  $t_0$  і початкової відносної вологості  $\varphi_0$  визначаємо положення точки А, яка характеризує стан свіжого повітря. На перетині лінії сталого вологовмісту  $x_0 = \text{const}$  з ізотермою  $t_1 = \text{const}$  знаходять точку В, яка характеризує стан нагрітого повітря перед сушильною камерою. Через точку А проводять лінії  $I = \text{const}$ ,  $x = \text{const}$  і визначають значення питомої ентальпії  $I_0$  і питомого вологовмісту  $x_0$  свіжого повітря.*

Провівши через точку В лінії  $I = \text{const}$  і  $\varphi = \text{const}$ , визначають параметри нагрітого в калорифері повітря  $I_1$ ,  $\varphi_1$ ,  $x_1 = x_0$ .

Точка С, яка характеризує стан повітря на виході з сушарки при теоретичному процесі сушіння, міститься на перетині ізотерми  $t_2$  та  $I_1 = \text{const}$ .

Теоретичний сушильний процес у барабанній сушарці для заданих умов зображується лінією ВС.

Лінія реального сушильного процесу починається в точці В і пройде вище лінії  $I_1 = \text{const}$ , якщо  $\Delta > 0$  або нижче лінії  $I_1 = \text{const}$ , якщо  $\Delta < 0$ .

Через довільну точку  $e$  на лінії ВС проводять горизонтальну лінію  $eF$  до перетину з лінією  $x_0 = \text{const}$ . Потім паралельно осі ординат проводять лінію  $eE$ .

$$eE = eF \frac{\Delta}{m}$$

де  $eF$  – довжина відрізка, мм

$$m = \frac{M_1}{M_x}$$

де  $M_1, M_x$  – відповідно масштаби осі питомої ентальпії і осі питомого вологовмісту діаграми.

Якщо  $\Delta > 0$ , відрізок  $eE$  відкладають вгору від точки  $e$ , при  $\Delta < 0$  – вниз. Через точки  $B$  і  $E$  проводять лінію реальної сушарки до перетину з лінією  $t_2 = \text{const}$ .

Отримана точка  $C_1$  (при  $\Delta > 0$ ) характеризує стан повітря на виході з сушильного барабана.

Весь процес, що відбувається в реальній сушарці, зображується ламаною лінією  $ABC_1$ .

При побудові процесу за допомогою діаграми  $I$ – $x$  визначають усі невідомі параметри вологого повітря.

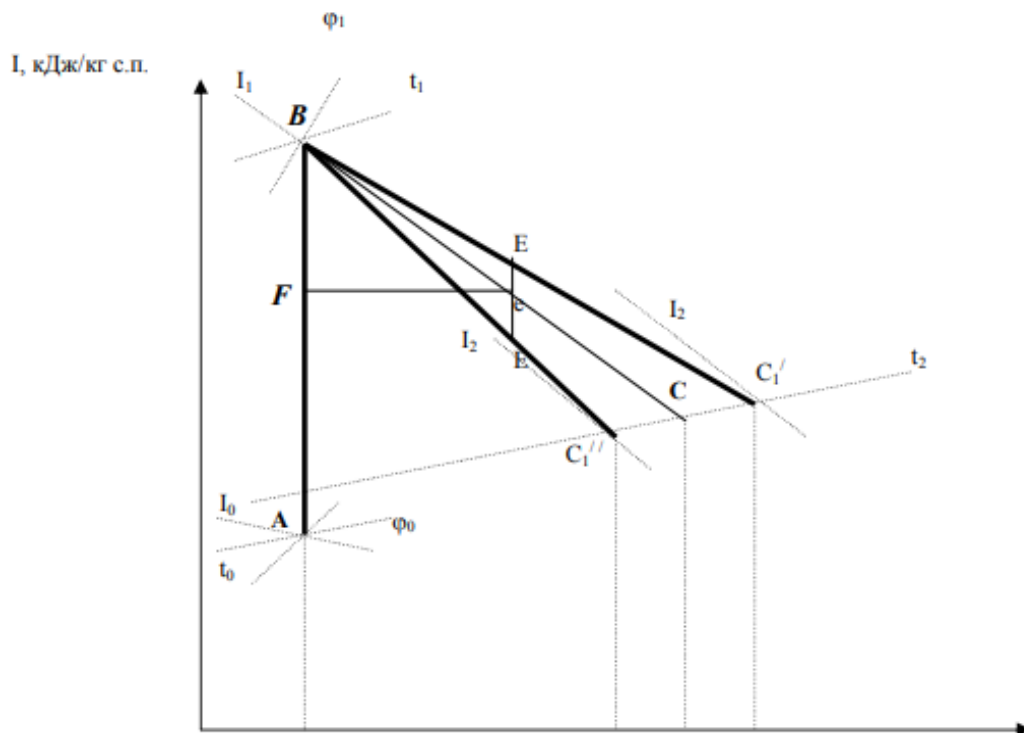


Рисунок 15.9 – Побудова реального сушильного процесу

*Розрахунок витрати повітря в сушарці.* Питома витрата повітря, що подається в сушильний барабан, кг/кг вологи.

Повна витрата повітря, кг/год,

*Розрахунок витрати теплоти в калорифері.* Питома витрата теплоти в калорифері для барабанної сушарки, кДж/кг вологи

$$q_{\text{кал}} = \ell (I_1 - I_0)$$

де  $I_1$  і  $I_0$  – питома ентальпія свіжого повітря відповідно до і після калорифера, кДж/кг с.п.



Оцінка отриманого результату. Питома витрата теплоти  $q_{\text{кал}}$ , кДж на 1 кг висушеної вологи, повинна не більше ніж у півтори рази перевищувати теплоту пароутворення води при  $0^\circ\text{C}$ , яка дорівнює 2500 кДж/кг. Висока витрата теплоти на сушіння пояснюється значними витратами теплоти з повітрям, яке виходить із сушарки ще досить теплим. З метою економії теплової енергії на обезвожування харчових продуктів частину вологи перед сушінням видаляють пресуванням або центрифугуванням.

Повна витрата теплоти в калорифері  $Q$ , кДж/год

$$Q_{\text{кал}} = q_{\text{кал}} W$$

*Визначення основних розмірів сушильного барабана.* Знаючи напругу барабана по волозі, тобто кількість вологи, що видаляється з матеріалу в  $1 \text{ м}^3$  простору сушильного барабана, можна визначити об'єм барабана  $V$ ,  $\text{м}^3$

$$V = \frac{W}{A}$$

де  $A$  – напруга барабана по волозі,  $\text{кг}/(\text{м}^3 \text{ год})$ .

Об'єм сушильного барабана  $V$ ,  $\text{м}^3$ , можна також визначити з такого рівняння:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} B$$

де  $D$  і  $B$  – відповідно діаметр і довжина барабана, м.

Діаметр барабана визначають виходячи з витрати сухого повітря  $L$ , м.

$$D = 0,0188 \sqrt{\frac{LV_0}{(1-B)\omega}}$$

де  $V_0$  – об'єм вологого повітря, який припадає на 1 кг сухого повітря,  $\text{м}^3/\text{кг}$  сухого повітря, визначається залежно від температури  $t_2$  і відносної вологості  $\varphi_2$  повітря, яке виходить з сушильного барабана;

$\beta$  – коефіцієнт заповнення барабана, який приймається в межах 0,04...0,06;

$\omega$  – швидкість сушильного агента в барабані; при сушінні цукру-піску  $\omega = 0,5...1 \text{ м/с}$ .

За відомими об'ємом і діаметром барабана довжину барабана визначають з рівняння

$$B = \frac{4V}{\pi D^2}$$

Діаметр барабана приймають 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2400, 2800 мм.  
Відношення довжини барабана до його діаметра має бути в межах  $B/D = 3,5...7$ .

#### 15.4 Завдання для самостійного виконання

##### Тестові завдання

##### Форми зв'язку вологи з матеріалом:

- А. хімічна, фізико-хімічна, механічна;
- В. хімічна, фізична, теплова;
- С. хімічна, фізична;
- Д. механічна, фізична.

##### Рушійною силою процесу сушіння є:

- А. різниця температур;
- В. різниця концентрацій;
- С. різниця тиску;
- Д. різниця струму.

##### В процесі сушіння видаляється:

- А. зв'язана волога;
- В. хімічнозв'язана волога;
- С. вільна волога;
- Д. адсорбційно зв'язана волога.

##### Сублімаційним сушінням є

- А. вилучення вологи з матеріалу шляхом перетворення її у лід, а після цього, проминувши рідку фазу – у водяну пару;
- В. вилучення вологи з матеріалу шляхом нагрівання і перетворення у водяну пару;
- С. вилучення вологи з матеріалу шляхом нагрівання струмом високої частоти;
- Д. вилучення вологи з матеріалу за рахунок обробки інфрачервоними променями.

##### Кількість пари, що надходить з поверхні матеріалу в повітря:

- А.  $W = k_B(P_M - P_{II})S_\tau$
- В.  $W = k_B/(P_M - P_{II})S_\tau$
- С.  $W = k_B(P_M + P_{II})S_\tau$
- Д.  $W = k_B/(P_M + P_{II})S_\tau$

**Волога, що знаходиться в сполученні з матеріалом і при сушінні не видаляється:**

- A. хімічно зв'язана волога
- B. фізично зв'язана волога
- C. динамічно зв'язана волога
- D. всі відповіді вірні

**Перевагою розпилювальних сушарок є можливість використання:**

- A. теплоносіїв з високою температурою
- B. теплоносіїв з низькою температурою
- C. теплоносіїв з будь-якою температурою
- D. всі відповіді вірні

**Після періоду прогріву матеріалу до температури сушіння настає період:**

- A. постійної швидкості сушіння
- B. постійного тиску сушіння
- C. постійної температури сушіння
- D. всі відповіді вірні

**Швидкість сушіння залежить від:**

- A. швидкості руху повітря в сушарці,
- B. температури повітря в сушарці.
- C. фізикохімічних властивостей матеріалу
- D. всі відповіді вірні

**Найчисленніша група сушарних апаратів:**

- A. конвективні сушарки
- B. кондуктивні сушарки
- C. сублимаційні сушарки
- D. СВЧ сушарки

**Кількість висушеного матеріалу:**

- A.  $G_2 = G_1 - \frac{100 - \omega_1}{100 - \omega_2}$
- B.  $G_2 = G_1 + \frac{100 - \omega_1}{100 - \omega_2}$
- C.  $G_2 = G_1 \frac{100 - \omega_1}{100 - \omega_2}$
- D.  $G_2 = G_1 \frac{100 + \omega_1}{100 + \omega_2}$

**Яка волога виділяється в процесі сушіння з овочів і фруктів в першу чергу:**

- A. капілярна волога
- B. адсорбційна волога
- C. мікрокапілярна волога
- D. осмотична волога

## Задачі для самостійного розв'язування

1. Продуктивність сушарки за вологим матеріалом 2500 кг/год. Початкова вологість матеріалу (перед сушаркою)  $a_n = 20\%$  мас., кінцева (після сушарки)  $a_k = 5\%$  мас. Повітря перед входом до калорифера має параметри:  $t = 18\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_0 = 45\%$ . У калорифері повітря нагрівається до  $t_1 = 120\text{ }^\circ\text{C}$ , після чого надходить у сушарку. Відносна вологість повітря на виході з сушарки  $\varphi_2 = 40\%$ . Визначити: витрата води, що видаляється, витрата сухого повітря в розрахунку на теоретичну сушарку і витрата сухого повітря для дійсної сушарки, для якої сума повідомлень і витрат тепла  $\Delta = -838$  кДж/кг уд. води.

2. Повітря з параметрами  $t_0 = 18\text{ }^\circ\text{C}$  та  $\varphi_0 = 45\%$  нагрівається в калорифері перед теоретичною сушаркою до  $t_1 = 120\text{ }^\circ\text{C}$ . З сушарки сушильний агент (повітря) виходить з  $\varphi_2 = 40\%$ . Необхідно знизити температуру сушильного агента перед входом у сушарку до  $80\text{ }^\circ\text{C}$ , застосувавши часткову рециркуляцію сушильного агента. Визначити кратність циркуляції сушильного агента.

3. Знайти точку роси для вологого повітря вмістом води  $x = 0,05$  кг/кг сухого повітря і загальним тиском пароповітряної суміші  $p = 745$  мм рт. Ст.

## Контрольні запитання

1. Що таке сушіння?
2. Які види сушіння ви знаєте?
3. Які сушарки ви знаєте?
4. Напишіть формулу матеріального балансу сушіння.
5. Опишіть принцип дії розпилювальних сушарок.
6. Опишіть принцип дії вальцевих сушарок.
7. Опишіть принцип барабанної сушарки.

## Тема 16. Процес кристалізації. Апаратурне оформлення

### 16.1 Методи кристалізації

*Кристалізацією* називається процес виділення твердої фази з розчину чи розплаву. Виділення розчиненого кристалічного продукту з розчину або розчину є завершальною стадією технологічного циклу багатьох виробництв харчової промисловості.

У деяких випадках потрібно створити умови за яких кристалізація не допускається (виробництво карамелі). Кристалізація супроводжує основні технологічні процеси (дрібнокристалічні цукрово-яблучні скоринки на поверхні мармеладу).

Іноді (наприклад, при виробництві цукру-рафінаду) для отримання найбільш чистого продукту чергують процеси кристалізації та розчинення. Така операція називається *перекристалізацією*.

Кристалізація, як і розчинення, можлива лише за певних умов, а саме при пересиченні розчину, тобто коли зміст розчиненої речовини перевищує розчинність. Розчин називають насиченим, якщо за певної температури і тиску він стійкий, тобто не розчиняє кристали та не виділяє розчиненої речовини. Відносна кількість розчиненої речовини, що міститься в насиченому розчині, називається розчинність. На розчинність речовини, головним чином, впливають температура та наявність домішок.

Процес кристалізації є масообмінним і протікає у твердій фазі. Для виділення розчиненої речовини у вигляді кристалів треба довести розчин до стану пересичення. Це досягається одним із наступних способів:

– згущенням розчину та підвищенням концентрації розчиненої речовини за рахунок випарювання частини розчинника при кипінні розчину у випарному апараті або за рахунок випаровування розчинника у повітря при температурах нижче від точки кипіння;

– охолодженням розчину для зниження розчинності;

– додаванням до розчину речовин, що зв'язують розчинник (воду) або зменшують розчинність («висалювання»).

Відповідно до цих способів розрізняють *ізотермічну кристалізацію* (при постійній температурі кипіння), *ізогідричну* (при сталості кількості розчинника) та *ізотермічно-ізогідричну* (коли спад розчинника з киплячої маси відшкодовується зовнішнім підживленням розчину). Процес кристалізації може проводитися як у періодичному режимі, так і у безперервному.

## 16.2 Конструкції кристалізаторів

Для харчової промисловості характерне проведення кристалізації в дві стадії. На першій стадії, як це прийнято в цукровому виробництві у спеціальних вакуум-апаратах вариться утфель – суміш кристалів та маточного розчину.

Вакуум-апарат періодичної дії є випарний апарат, пристосований для випарювання попередньо сконцентрованого очищеного соку цукрових буряків – сиропу (рис. 16.1). Підвісна парова гріюча камера апарату виконана з труб, що гріють, діаметром 70÷100 мм із центральною циркуляційною трубою діаметром 500 мм.

З метою зниження розчинності та якнайшвидшого досягнення стану пересичення уварювання утфелю ведуть при низькій температурі – під вакуумом. Кільцевий зазор між камерою, що гріє, і корпусом апарату, поряд з великими діаметрами гріючих та циркуляційних труб забезпечує гарні умови для циркуляції дуже в'язкої суміші. Великий діаметр апарату при незначній висоті камери, що гріє дозволяє максимально зменшити гідростатичні температурні втрати. У нижньому днищі влаштований розвантажувальний отвір для випуску готового утфелю.

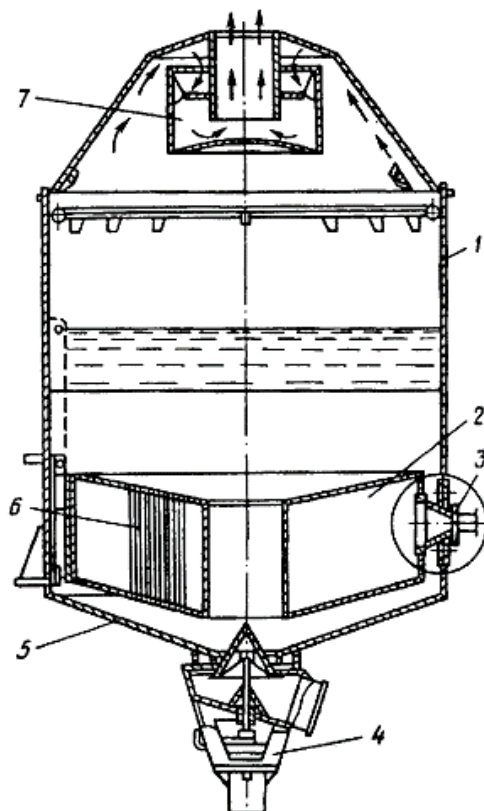


Рисунок 16.1 – Вакуум-апарат з підвісною камерою, що гріє: 1 – корпус, 2 – камера, що гріє, 3 – пристрій для введення пари, 4 – пристрій для випуску утфелю, 5 – днище, 6 – труби, що гріють, 7 – сепаратор інерційного типу.

На початку роботи вакуум-апарат, заповнюється сиропом, концентрація якого збільшується шляхом випарювання за низької температури. При досягненні стану пересичення в апарат через спеціальні пристрої вводиться затрпака і починається уварювання кристалів. При високій швидкості кристалізації на початковій стадії утворюється зайва велика кількість занадто маленьких кристалів, подальше зростання яких затрудняється через зниження концентрації маткового розчину.

Крім того, необхідно забезпечити рівномірність кристалів, для чого також потрібна точна підтримка всіх параметрів процесу.

Уварений у вакуум-апараті утфель надходить в інший кристалізатор – утфелемішалку (мішалку-кристалізатор), де при безперервному перемішуванні та охолодженні триває зростання кристалів. У харчових виробництвах застосовують два типи мішалок-кристалізаторів (з охолодженням або без охолодження): коритного типу (рис. 16.2 а) та барабанні кристалізатори (рис. 16.2 б), що обертаються. У них суміш охолоджується холодною водою, що подається в сорочки на корпусі апарату або в самі порожнисті лопаті, що перемішують, або в спеціальні змійовики, влаштовані всередині апарату.

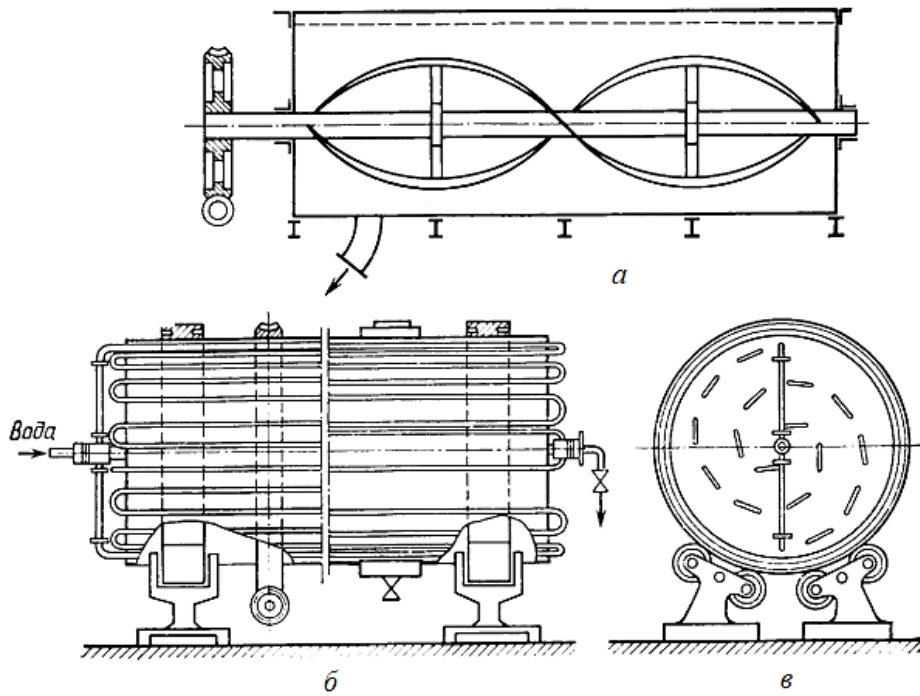


Рисунок 16.2 – Мішалки кристалізатори: а) коритного типу; б) барабанного типу

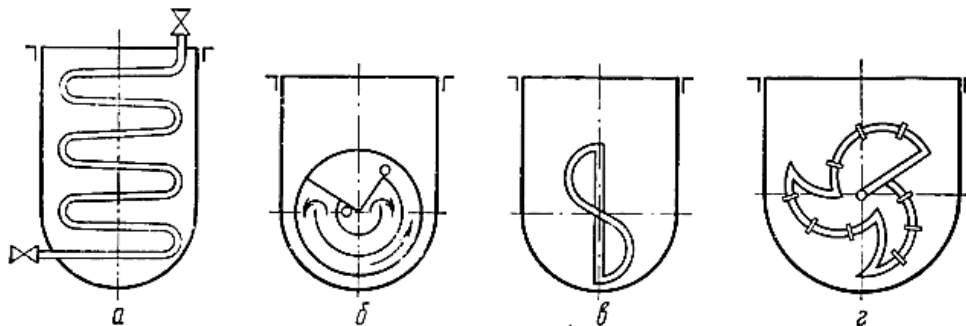


Рисунок 16.3 – Різні варіанти охолодження кристалізаторів

### 16.3 Приклади розв'язування завдань [12, 13]

**Задача.** Кристалізується 24% водний розчин NaCl, охолоджуваний від 30°C до 15°C, що випадає сіль має склад  $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Продуктивність апарату по солі 0,139 кг / с (500кг / год). Слід визначити необхідну поверхню F і витрата охолоджуючої води  $G_{\text{в}}$ , якщо загальний коефіцієнт теплопередачі  $K = 150 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$ . У розрахунку потрібно врахувати, що через відкриту поверхню кристалізатора випаровується 0,8% (від загальної кількості розчину) води.

Розчинність NaCl при 15°C становить 7 частин безводної солі на 100 частин води. Середня теплоємність розчину в інтервалі температур 30 - 15°C дорівнює 3,83 кДж / кг \* К, прихована теплота кристалізації  $q = 84,5 \text{ кДж/кг}$ . Охолоджуюча вода надходить у сорочку при температурі +5°C і нагрівається в кристалізаторі до 10°C.

### Розв'язування

Концентрація солі в маточне розчині (в мас. Долях) становить:

$$\alpha_2 = \frac{7}{107} = 0,065$$

Молекулярний вага NaCl дорівнює 58,5, а NaCl \* 2H<sub>2</sub>O - 94,5, отже:

$$K_m = \frac{58,5}{94,5} = 0,62$$

Визначаємо кількість кристалізується розчину при заданій продуктивності:

$$G_p = \frac{G_{kp}(K_m - \alpha_2)}{(\alpha_1 - \alpha_2) + 0,008\alpha_2} = \frac{0,139(0,62 - 0,065)}{(90,24 - 0,065) + 0,008 \cdot 0,065} = 0,44 \text{ кг/с}$$

З теплового балансу визначаємо кількість відведеного тепла:

$$Q = G_t c(t_n - t_k) + G_{kp} q + W r_{т.п.}$$
$$Q = 0,44 * 3,83 (30 - 15) + 0,546 * 84,5 + 0,008 * 0,44 * 2442,25 = 62,82 \text{ кВт}$$

де 2442,25 кДж / кг – теплота пароутворення води при середній температурі:  $(30 + 15) / 2 = 22,5^\circ\text{C}$ .

Величину  $\Delta t_{\text{ср.лог}}$  визначаємо з рівняння:

$$\Delta t_{\text{ср.лог}} = \frac{\Delta t_{\text{н}} - \Delta t_{\text{к}}}{2,3 \lg \frac{\Delta t_{\text{н}}}{\Delta t_{\text{к}}}} = \frac{(30 - 10) - (15 - 5)}{2,3 \lg \frac{30 - 10}{15 - 5}} = 14,4^\circ\text{C}$$

Знаходимо поверхню теплопередачі:

$$F = \frac{Q}{K \Delta t_{\text{ср}}} = \frac{62820}{150 \cdot 14,4} = 29,08 \text{ м}^2$$

Для шнекових кристалізатора з шириною корита 600 мм на 1 м довжини апарату теплопередаюча поверхня становить 0,9 м<sup>2</sup>. Необхідна довжина кристалізатора в цьому випадку буде дорівнює:

$$L = \frac{F}{b} = \frac{29,08}{0,9} = 32,3 \text{ м}$$

Таким чином, для забезпечення заданої продуктивності буде потрібно 3



шнекових кристалізатора, кожен з них довжиною 12м, збирається з чотирьох секцій (по 3м).

Витрата охолоджуючої води становить:

$$G_B = \frac{Q}{c_2(t_{2k} - t_{2n})} = \frac{62860}{4190(10 - 5)} = 3 \text{ кг/с}$$

**Задача.** Кристалізується % водний розчин речовини, охолоджуваний від  $T_1, ^\circ\text{C}$  до  $T_2, ^\circ\text{C}$ , що випадає сіль має складкристалогідрату. Продуктивність апарату по солі  $G$  кг/с. Слід визначити необхідну поверхню  $F$  і витрата охолоджуючої води  $G_B$ , якщо загальний коефіцієнт теплопередачі  $K = 150 \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{град)}$ . Дані в таблиці 16.1.

Таблиця 16.1. Вихідні дані для розрахунку

№ вар.	речовина	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$G, \text{ кг/с}$	%
1	$\text{NaHCO}_3$	25	12	0,14	22
2	$\text{NaCl}$	27	15	0,15	24
3	$\text{NaHCO}_3$	30	17	0,16	26
4	$\text{NaCl}$	32	18	0,14	22
5	$\text{NaHCO}_3$	25	12	0,15	24
6	$\text{NaCl}$	27	15	0,16	26
7	$\text{NaHCO}_3$	30	17	0,14	22
8	$\text{NaCl}$	32	18	0,15	24
9	$\text{NaHCO}_3$	25	12	0,16	26
10	$\text{NaCl}$	27	15	0,14	22

#### 16.4 Завдання для самостійного виконання

##### Тестові завдання

**Процес кристалізації відбувається коли вихідна фаза перебуває в стані:**

- A. пересичення
- B. переохолодження
- C. А і В
- D. немає вірної відповіді

**У промисловості використовують такі методи кристалізації:**

- A. ізотермічний
- B. ізогіричний
- C. А і В
- D. немає вірної відповіді

**Кристалізацію з хімічною реакцією називають:**

- A. індуктивною
- B. адуктивною
- C. кондуктивною
- D. немає вірної відповіді

**Вихід кристалів розраховується за формулою:**

- A.  $G_{кр} = G_1(B_1 - B_2)/(B_{кр} - B_2)$
- B.  $G_{кр} = G_1(B_1 - B_2) \cdot (B_{кр} - B_2)$
- C.  $G_{кр} = G_1(B_1 - B_2) + (B_{кр} - B_2)$
- D.  $G_{кр} = G_1(B_1 - B_2) - (B_{кр} - B_2)$

**Час процесу охолодження:**

- A.  $\tau = Q/KF\Delta t_{cp}$
- B.  $\tau = Q/K + F\Delta t_{cp}$
- C.  $\tau = Q/K - F\Delta t_{cp}$
- D.  $\tau = QKF\Delta t_{cp}$

**Тепловий баланс:**

- A.  $Q = G_t c(t_n - t_k) + G_{кр} q + W r_{т.п.}$
- B.  $Q = G_t c(t_n - t_k) - G_{кр} q + W r_{т.п.}$
- C.  $Q = G_t c(t_n - t_k) + G_{кр} q - W r_{т.п.}$
- D.  $Q = G_t c(t_n - t_k) - G_{кр} q - W r_{т.п.}$

**Співвідношення швидкості утворення зародків і їхнього росту визначає:**

- A. кінцевий розмір кристала
- B. кількість кристалів
- C. якість кристалів
- D. всі відповіді вірні

**Типи апаратів:**

- A. поверхневі
- B. об'ємні
- C. змішаного типу
- D. всі відповіді вірні

**Щоб уникнути інтенсивної інструкції, різниця температур розчину й охолодженої води повинна бути:**

- A. 3-5 °C
- B. 5-8 °C
- C. 8-10 °C
- D. 12-15 °C

### Задачі для самостійного розв'язування

1. Визначити кількість теплоти, що виділяються при ізогідричному процесі кристалів при охолодженні від 80 до 30 °С 10 т/год. водного розчину поташу. Утворюється кристалогідрат містить дві молекули води.

2. Визначити значення гідростатичних втрати різниці температур  $\Delta t$  при випаровуванні 25%-го водного розчину хлориду кальцію при абсолютному тиску над розчином  $p_l = 0,36$  кгс/см<sup>2</sup> висоті кип'ятильних труб  $H_{тр} = 4,0$  м.

3. Визначити необхідну температуру охолодження 40%-го водного розчину нітрату калію, щоб після виділення кристалів вміст солі в матковим розчині виявилось в рази менше початкового.

4. Розрахувати масу кристалів, що виділяються з 4,2 т розчину соди при охолодженні від 30 до 15 °С і початковим вмістом солі 2,5 мольна 1 кг води. Кристалогідрат вмістить 10 молекул води.

### Контрольні запитання

1. Дайте формулювання процесу кристалізації?
2. Якими методами може здійснюватися процес кристалізації?
3. Перелічіть стадії процесу кристалізації?
4. Які фактори впливають на швидкість зростання кристалів?
5. Чи перерахуєте основні умови оптимізації процесу кристалізації?
6. Запишіть рівняння матеріального балансу процесу кристалізації?
7. Запишіть та поясніть рівняння теплового балансу процесу кристалізації?
8. Який характер має теплопереча при кристалізації?
9. У яких апаратах проводиться кристалізація.

## Список використаної літератури

1. Марценюк О.С. Процеси і апарати харчових виробництв. К.: НУХТ, 2011. 407 с.
2. Процеси і апарати харчових виробництв : навч. посіб. / [Малежик І.Ф., Циганков П.С., Немирович П.М. та ін.] : за ред. проф. І. Ф. Малежика. К.: НУХТ, 2003. 400 с.
3. Омельченко О.В., Цвіркун Л.О., Ларін О.О. Моделювання холодильного обладнання для зберігання плодовоовочевої сировини // Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. праць. Кривий Ріг : ДонНУЕТ. №2(43). 2021. С. 131–138.
4. Черевко О.І., Поперечний А.М. Процеси и апарати харчових виробництв: підручник. Х. : ХДАТОХ. 2002. 420 с.
5. Закон України «Про вимоги до предметів та матеріалів, що контактують з харчовими продуктами». Режим доступа: [http://search.ligazakon.ua/l\\_doc2.nsf/link1/NT1668.html](http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/NT1668.html).
6. Цвіркун Л.О., Омельченко О. В., Цвіркун С.Л. Вибір конструкційних матеріалів та засобів удосконалення і вимірювання для пристрою сортування плодовоовочевої сировини // Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. праць. Кривий Ріг : ДонНУЕТ. №1(42). 2021. С. 107–113.
7. Бойко І.В., Петрик М.Р. Математичне моделювання в науково-технічних дослідженнях. Тернопіль: ТНТУ, 2017. 110 с.
8. Омельченко О.В., Цвіркун Л.О., Ларін О.О. Моделювання холодильного обладнання для зберігання плодовоовочевої сировини // Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. праць. Кривий Ріг : ДонНУЕТ. №2(43). 2021. С. 131–138.
9. Процеси і апарати харчових виробництв. Курсове проектування : навч. посіб. / [Малежик І.Ф., Марценюк О.С., Мельник Л.М. та ін.] : за ред. проф. І.Ф. Малежика. К.: НУХТ, 2012. 543 с.
10. Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум : навч. посіб. / [Малежик І.Ф., Зав'ялов В.Л., Зоткіна Л.В. та ін.] : за ред. проф. І.Ф. Малежика. К. НУХТ, 2006. 224 с
11. 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.
12. Омельченко О.В., Перекрест В.В. Процеси та апарати харчових виробництв : метод. рекомендації до вивч. дисц. Кривий Ріг : ДонНУЕТ, 2021. 106 с.
13. Омельченко О.В., Перекрест В.В. Технологічне обладнання харчових виробництв: метод. рекомендації до вивч. дисц. Кривий Ріг : ДонНУЕТ, 2021. 138 с.

Навчальне видання

*Омельченко Олександр Володимирович,  
Цвіркун Людмила Олександрівна,  
Перекрест Володимир Вікторович*

Кафедра загальноінженерних дисциплін та обладнання

**НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК  
ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ  
ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ**

Формат 60×84/8. Ум. др. арк. 2.

Донецький національний університет  
економіки і торгівлі  
імені Михайла Туган-Барановського  
50042, Дніпропетровська обл.,  
м. Кривий Ріг, вул. Курчатова, 13.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої  
справи ДК № 4929 від 07.07.2015 р.