

621.5(075)
Л72

А. П. Лозовський О. М. Іванов

ОСНОВИ ХОЛОДИЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ



Навчальний
посібник


УНІВЕРСИТЕТСКА
КНИГА

621.5(075)
Л72

А.П. Лозовський О.М. Іванов

ОСНОВИ ХОЛОДИЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчальний посібник

Рекомендовано Міністерством освіти і науки,
молоді та спорту України як навчальний посібник
для студентів вищих навчальних закладів

НТБ ВНТУ



467482

621.5(075) Л72 2015

Лозовський А.П. Основи холодильних техн



Суми
Університетська книга
2015

УДК 631.371(075.8)
ББК 36.81я73
Л 72

621.56 + 621.59 + 621.58 +
+ 621.59 (075)

Рецензенти:

А.Ф. Головчук, доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, ректор Уманського національного університету садівництва, завідувач кафедри «Трактори, автомобілі та ремонт машин»;

В.П. Дмитриков, доктор технічних наук, професор кафедри «Машини та обладнання агропромислового виробництва» Полтавської державної аграрної академії;

О.П. Руденко, доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри загальної фізики Полтавського національного педагогічного університету імені В.Г. Короленка

Гриф надано Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України.
Лист № 1/11-3122 від 06.03.2012 р.

Автори: *Лозовський А.П.*, к.т.н., доцент, професор кафедри «Машини та обладнання агропромислового виробництва» Полтавської державної аграрної академії; *Іванов О.М.*, к.т.н., ст. викладач кафедри «Машини та обладнання агропромислового виробництва» Полтавської державної аграрної академії

Лозовський А. П.

Л 72 **Основи холодильних технологій : навчальний посібник / А. П. Лозовський, О. М. Іванов. – Суми : Університетська книга, 2015. – 149 с.**

ISBN 978-966-680-614-0

У посібнику викладено основи холодильних технологій у переробній промисловості для обробки, переробки та зберігання сировини і продукції рослинного та тваринного походження. Наведено основні способи отримання та використання штучного холоду на різних стадіях технологічного процесу. Висвітлено сутність термодинамічних процесів і оборотних колових циклів холодильників, схеми холодильних машин і установок, їх калоричні розрахунки.

Для студентів спеціальностей «Процеси, машини і обладнання агропромислового виробництва», «Техніка та енергетика аграрного вироб-

НТБ ВНТУ 467482
М.Вінниця

УДК 631.371(075.8)
ББК 36.81я73

ISBN 978-966-680-614-0

© Лозовський А.П., Іванов О.М., 2012
© ТОВ «ВТД «Університетська книга», 2015

ЗМІСТ

Вступ	5
Тема 1. Основи холодильної технології	7
1.1. Загальні положення (передмова)	7
1.2. Технічна термодинаміка: основні поняття та визначення	8
1.3. Термодинамічна система	9
1.4. Термічні параметри стану термодинамічної системи	10
1.5. Термодинамічний процес	12
<i>Питання для самоконтролю</i>	17
Тема 2. Теоретичні основи штучного охолодження	18
2.1. Способи отримання низьких температур	18
2.2. Адіабатичне дроселювання	23
2.3. Адіабатичне розширення газу	23
2.4. Вихровий ефект	24
2.5. Термоелектричний ефект	25
<i>Питання для самоконтролю</i>	27
Тема 3. Термодинамічні процеси і оборотний цикл	28
3.1. Другий закон термодинаміки (загальні положення)	28
3.2. Оборотний коловий процес	29
3.3. Найпростіший коловий процес (цикл Карно)	31
3.4. Ступінь необоротності циклу	32
<i>Питання для самоконтролю</i>	33
Тема 4. Схеми парової холодильної машини	34
4.1. Загальні положення	34
4.2. Схеми та цикли парокомпресійних холодильних агрегатів	35
<i>Питання для самоконтролю</i>	42
Тема 5. Розрахунок циклу парової холодильної машини	44
5.1. Розрахунок теоретичного циклу парокомпресійної холодильної машини	44
5.2. Двоступінчаста холодильна машина	47
5.3. Схема абсорбційної холодильної машини	50
<i>Питання для самоконтролю</i>	53
Тема 6. Холодильні агенти і теплоносії холодильних машин	54
6.1. Загальні положення	54
6.2. Вимоги до холодильного агента	55
6.3. Теплоносії	58
6.4. Системи машинного охолодження	60
<i>Питання для самоконтролю</i>	65

Тема 7. Льодяне і льодосоляне охолодження	66
7.1. Загальні положення	66
7.2. Охолодження водняним льодом	68
7.3. Охолодження льодосоляне	69
7.4. Охолодження сухим льодом	73
7.5. Льодовні і деякі способи заготівлі природного льоду	74
<i>Питання для самоконтролю</i>	<i>78</i>
Тема 8. Холодильні установки	79
8.1. Загальні положення	79
8.2. Основні елементи холодильних установок	81
<i>Питання для самоконтролю</i>	<i>88</i>
Тема 9. Визначення холодильної потужності і вибір холодильної установки	89
9.1. Машинне охолодження	89
9.2. Холодильні установки	90
9.3. Визначення потужності і вибір установки	95
9.4. Автоматизація холодильних установок	99
<i>Питання для самоконтролю</i>	<i>100</i>
Тема 10. Калоричні розрахунки холодильної установки	101
10.1. Загальні положення	101
10.2. Класифікація апаратів для обробки холодом	103
10.3. Калоричні розрахунки холодильної установки	105
10.4. Ізоляція холодильних установок	110
10.5. Теплотехнічні розрахунки ізоляції захисних засобів конструкцій холодильників	114
<i>Питання для самоконтролю</i>	<i>118</i>
Тема 11. Холодильна обробка та зберігання м'яса і м'ясопродуктів	119
11.1. Загальні положення	119
11.2. Охолодження і підморожування	121
11.3. Заморожування і розморожування	123
11.4. Технологія і техніка обробки холодом	126
<i>Питання для самоконтролю</i>	<i>131</i>
Тема 12. Холодильна обробка та зберігання молока і молокопродуктів	132
12.1. Загальні положення	132
12.2. Охолодження молока	134
12.3. Заморожування молока	136
12.4. Технологія і техніка обробки молока холодом	138
<i>Питання для самоконтролю</i>	<i>140</i>
Короткий термінологічний словник	141
Список рекомендованої літератури	147

ВСТУП

Постійне розширення меж використання штучного холоду в науково-дослідній сфері, сільському господарстві та багатьох галузях промисловості сприяє інтенсивному розвитку та вдосконаленню методів отримання низьких температур і розробці для цього нових технологічних засобів й обладнання.

Основними сферами промисловості, в яких застосування штучного холоду є важливою технологічною ланкою їх виробничого циклу, є харчова та переробна галузі. Використання низьких температур у цих галузях не обмежується тільки створенням сприятливих умов для коротко- або довготривалого зберігання (консервації) продукції на різних стадіях виробництва, а й може бути задіяне як основна технологічна операція для виробництва різноманітної продукції. Ефективність запровадження технології використання холоду в тому чи іншому виробничому циклі значною мірою залежить від оптимального вибору для цієї мети високопродуктивного й енергоощадливого холодильного обладнання та продуманості щодо застосування низьких температур у технологічному процесі з дотриманням усіх необхідних правил та рекомендацій.

Саме тому актуальним є завдання підготовки кваліфікованих наукових та інженерних кадрів з виробництва та раціонального використання штучного холоду для потреб харчової і переробної галузі.

Метою вивчення дисципліни «Основи холодильних технологій» як професійно орієнтованого курсу є отримання студентами знань про існуючі та нові прогресивні технології зберігання й обробки сільськогосподарської сировини холодом, необхідних у подальшій виробничо-технологічній, науково-дослідній та практичній діяльності майбутніх фахівців.

Завданням курсу є засвоєння теоретичних основ холодильних технологій: первинної холодильної обробки, короткочасного зберігання, підготовки до транспортування, охолодження,

заморожування, довготривалого зберігання сировини та продукції, розморожування (дефростації), зокрема, швидкокопсувної; вибір раціональних режимів та способів ведення технологічних операцій; класифікація способів обробки й зберігання, зокрема, м'ясо- та молокопродуктів; принципи вибору способів і класифікація холодильників функціонального призначення, основні технології зберігання сільськогосподарської продукції з використанням холоду.

Предмет дисципліни – нові технологічні підходи щодо обробки та переробки м'ясо- і молокопродукції, плодоовочевої та плодово-ягідної сировини і продуктів; оптимізація сучасних технологічних процесів виробництва й зберігання; використання нового технологічного обладнання та устаткування для виробництва продуктів; застосування нових нетрадиційних способів обробки, переробки та виготовлення харчових продуктів із застосуванням холоду.

Зміст дисципліни – способи отримання низьких температур; термодинамічні процеси і оборотний цикл; схеми парових холодильних машин і розрахунки циклу парової холодильної машини; склад холодильника і технологічні зв'язки; схема абсорбційної холодильної машини; холодильні агенти та теплоносії холодильних машин; льодяне і льодосоляне охолодження; схеми типових установок; класифікація холодильників за функціональним призначенням; новітні досягнення науки і техніки використання холоду в переробній галузі.

ОСНОВИ ХОЛОДИЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

- Загальні положення (передмова) • Технічна термодинаміка – основні поняття та визначення • Термодинамічна система • Термічні параметри стану термодинамічної системи • Термодинамічний процес

Ключові слова: термодинаміка, система, абсолютний тиск, пито-
мий об'єм, абсолютна термодинамічна температура, параметри,
оборотний процес.

1.1. Загальні положення (передмова)

Енергетичне господарство є життєво необхідною складовою всіх галузей виробництва, у тому числі сільського господарства, переробної галузі, а також побутового сектору.

Для систем енергопостачання виробництв переробної галузі характерні певні особливості:

- невелика одинична потужність енергосилових та енергоспоживаючих установок, що зумовлює необхідність створення спеціального обладнання, яке відрізняється від обладнання, застосовуваного у великій станційній енергетиці;
- наявність великої кількості автономних джерел теплоти;
- велика розосередженість споживачів енергії;
- наявність на балансі сервісних служб АПК місцевих комунальних мереж (електричних, теплових, газових та ін.).

Ці особливості повинні враховуватися фахівцями під час проектування та експлуатації систем енергопостачання агропромислового виробництва (АПВ). Характерною рисою АПВ є те, що це дуже складний комплекс технічних, біологічних, фізичних, хімічних та інших факторів, які забезпечують умови життєдіяльності тварин і рослин (у сільськогосподарському виробництві) та мікроорганізмів, бактерій тощо – у переробній галузі.

Одне з актуальних завдань сьогодення полягає в необхідності впровадження *енергозберігаючих заходів* в усіх галузях виробництва, транспорту й побутового сектору. З цією проблемою нерозривно пов'язані питання *енергетичної безпеки* країни, економіки та *охорони навколишнього середовища*.

Ефективним шляхом енергозбереження є використання *нетрадиційних джерел енергії*, а також вирішення завдань оптимізації при проектуванні та експлуатації енергетичного обладнання.

У загальному енергетичному балансі сільських районів теплова енергія відіграє провідну роль. Тому розвиток теплопостачання, розроблення й експлуатація вискоелективного теплотехнічного обладнання, зокрема холодильного, стає однією з умов підвищення рентабельності як переробної галузі, так і сільськогосподарського виробництва в цілому.

Вирішення зазначених проблем залежить значною мірою від *рівня підготовки фахівців у сфері енергетики*.

1.2. Технічна термодинаміка: основні поняття та визначення

Термодинаміка – це наука про закони теплового руху (термо) і його перетворення (динаміка) в інші види руху, що відбуваються в макроскопічних рівноважних системах і при переході систем до стану рівноваги.

Відмітна особливість термодинаміки полягає в тому, що вона дозволяє розглянути всі різноманітні види енергії, які можуть проявлятися під час взаємодії тіл та фізичних полів, а також усі перетворення різних видів енергії в макроскопічних системах.

Розрізняють технічну і хімічну термодинаміку, термодинаміку біологічних систем та ін. У нашому випадку розглядається й вивчається технічна термодинаміка, зокрема процеси з відведенням теплоти.

Технічна термодинаміка вивчає закономірності взаємного перетворення теплоти і роботи, а також властивості тіл, що беруть участь у цих перетвореннях, та теплові процеси, що відбуваються в різних апаратах й установках (теплових і *холодильних* машинах).

На основі технічної термодинаміки виконуються розрахунки та проектування теплових двигунів, компресорних машин, холодильних машин і установок, течії в повітро- і паропроводах, повітрообміну приміщень, кондиціонування повітря, сушіння, збереження сільськогосподарської продукції й ін.

Термодинаміка дозволяє проводити аналіз всіх етапів реального перетворення енергії тіл та полів в корисну дію. Спираючись на положення рівноважної термодинаміки, можна охарактеризувати особливості можливих станів рівноваги і загальний енергетичний ефект рівноваги. Термодинаміка *необоротних процесів* дозволяє оцінити *дисипацію енергії* в реальних процесах і, як наслідок, *коефіцієнт використання енергії*.

Тепловий рух обумовлений рухом і взаємодією між собою великої кількості мікрочастинок. Відомі два методи вивчення теплової форми руху матерії [2, 3]. Метод статистичної фізики ґрунтується на *молекулярній моделі* фізичних систем і використовує можливості *математичної теорії ймовірності*. Термодинамічний метод, названий *феноменологічним*, встановлює зв'язок між *макроскопічними параметрами*, що визначають зміни стану системи, і не потребує звернення до молекулярної структури речовини. Такий підхід дуже зручний і цілком достатній для розв'язання більшості практично важливих завдань.

Термодинаміка ґрунтується на двох законах (початках), отриманих дослідним шляхом. *Перший закон термодинаміки* виражає загальний закон збереження та перетворення енергії в застосуванні до термодинамічних процесів. *Другий закон термодинаміки* вказує на якісну відмінність форми передачі енергії у вигляді теплоти і пов'язаний із принципом зміни ентропії в оборотних і необоротних процесах.

1.3. Термодинамічна система

Термодинамічною системою називають сукупність матеріальних тіл, що знаходяться в тепловій і механічній взаємодії одне з одним та з оточуючими цю систему зовнішніми тілами (останні утворюють зовнішнє середовище). Тобто, термодинамічними системами прийнято називати макроскопічні системи, що знаходяться в стані термодинамічної рівноваги.

Систему, що не обмінюється з навколишнім середовищем ні енергією, ні речовиною, називають *ізолюваною (закритою)* системою. Якщо система не обмінюється із зовнішнім середовищем теплотою, її називають *теплоізолюваною, або адіабатною*.

Відкриті системи характерні тим, що між ними і навколишнім середовищем відбувається обмін речовинами (масообмінна взаємодія).

Термодинамічна система містить у собі робочі тіла (гази, повітря, пари) і джерела теплоти.

Гази, у яких ми можемо нехтувати впливом сил взаємодії між молекулами й об'ємом самих молекул, називають *ідеальними газами*.

1.4. Термічні параметри стану термодинамічної системи

Макроскопічні величини, тобто величини, що визначають стан термодинамічної системи (ТС) у даний момент, називають *параметрами стану* ТС. До перших відносять абсолютний тиск P , питомий об'єм V і абсолютну температуру T , до других – внутрішню енергію u , ентальпію h і ентропію S .

Параметри, що не залежать від маси робочого тіла або кількості мікрочастинок у системі, називаються *інтенсивними* (наприклад, тиск, температура); параметри, значення яких пропорційне масі робочого тіла або кількості мікрочастинок у системі, називають *адитивними*, або *екстенсивними* (енергія, ентропія, ентальпія).

Стан ізольованої термодинамічної системи, що характеризується сталістю термодинамічних параметрів у часі і по всьому об'єму системи, називається *рівноважним*.

У рівноважному стані системи відсутні потоки енергії речовини. Будь-яка ізольована система згодом приходиться у стан рівноваги і самочинно з нього вийти не може. В ізольованих ТС рівноважний стан визначається зовнішніми умовами (значеннями тиску і зовнішньою стосовно ТС температурою навколишнього середовища.) Якщо між різними частинами об'єму системи є різниця температур, тиску та ін., то вона є *нерівноважною*.

Абсолютний тиск – результат ударів об стінку мікрочастинок робочого тіла, що хаотично рухаються. Відповідно до молекулярно-кінетичної теорії тиск газу визначається рівнянням

$$P = \frac{2}{3} n \frac{m \bar{w}^2}{2}, \quad (1.1)$$

де n – кількість молекул в одиниці об'єму;

m – маса молекули;

\bar{w}^2 – середня квадратична швидкість поступального руху молекул.

Чисельно абсолютний тиск дорівнює силі, що діє на одиницю площі поверхні тіла в напрямку внутрішньої нормалі до неї.

У системі $СИ$ тиск вимірюють у паскалях. Один паскаль $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$. Отже, 1 Па дорівнює тискові, зумовленому 1 Н , рівномірно розділеному в напрямку нормалі по поверхні площею 1 м^2 . У практичних розрахунках частіше використовують $1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}$ і $1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$. Серед інших одиниць вимірювання тиску слід зазначити насамперед такі:

$$1 \text{ кгс/см}^2 = 1 \text{ ат}; 1 \text{ ат} = 98\,100 \text{ Па}; 1 \text{ Па} = 0,102 \cdot 10^{-4} \text{ кгс/см}^2;$$

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}.$$

Тиск поділяють на абсолютний P , атмосферний P_a , надлишковий P_n і вакууметричний P_v .

Для вимірювання тиску застосовують прилади: манометри, барометри, вакууметри.

Якщо абсолютний тиск $P > P_a$, то надлишковий тиск дорівнює різниці між абсолютним тиском вимірюваного середовища і атмосферним тиском, тобто $P_n = P - P_a$. Якщо $P < P_a$, то розріджений тиск дорівнює $P_v = P_a - P$. У цьому випадку прилад (вакууметр) показує значення розрідження (вакууму).

Абсолютна термодинамічна температура T згідно з молекулярно-кінетичною теорією газів пропорційна кінетичній енергії поступального руху частинок робочого тіла (холодоагенту):

$$kT = \frac{2}{3} \cdot \frac{m\bar{w}^2}{2}, \quad (1.2)$$

де k – стала Больцмана, що дорівнює $1,380\,662 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$.

Рівняння (1.2) указує на те, що температура є мірою інтенсивності теплового руху. З рівнянь (1.1) і (1.2) випливає, що велика кількість випадкових явищ (рух і взаємодія молекул) виражається у вигляді певної закономірності – значення макроскопічних параметрів. Тут виявляється методологічний аспект взаємного зв'язку між динамічними і статистичними закономірностями.

Температура, що обумовлюється рівнянням (1.2), називається **термодинамічною (абсолютною)**.

Поняття термодинамічної температури впливає з другого закону термодинаміки. Для шкали абсолютної температури характерні дві точки відліку. За початок відліку приймають абсолютний нуль. Якщо $T = 0 \text{ К}$, тепловий рух молекул припиняється. Інша реперна точка відліку – **температура потрійної точки води**. Потрійна точка води характеризує стан рівноваги між трьома фазами: льодом, рідиною і паром. Температура потрійної точки дорівнює $273,16$

К (+0,01 °С). 1/273,16 частка інтервалу між цими двома реперними точками відліку за термодинамічною температурною шкалою, є один градус Кельвіна – 1 К. Температуру вимірюють також за шкалою Цельсія, де за нуль приймають температуру танення льоду, а за 100 °С – температуру кипіння води при тиску 101 325 Па (так звані нормальні фізичні умови).

Зв'язок між термодинамічною температурою T (К) і температурою t (°С) є таким:

$$T = t + 273,16. \quad (1.3)$$

Для вимірювання температури застосовують рідинні термометри, термомпари, пірометри та інші прилади. Їхня дія заснована на використанні таких властивостей речовин, як теплове розширення, термоелектрорушійна сила, електричний опір, інтенсивність випромінювання та ін.

Питомий об'єм (v) – це об'єм, що займає одиниця маси речовини. Для однорідного тіла масою m і об'ємом V його визначають за формулою:

$$v = \frac{V}{m}. \quad (1.4)$$

Величина, обернена питомому об'єму, – густина $\rho = 1/v$, звідси $\rho v = 1$. Одиниця виміру питомого об'єму $\text{м}^3/\text{кг}$, а густини – $\text{кг}/\text{м}^3$.

Рівняння стану термодинамічних систем наведені в літературі [2; 3].

1.5. Термодинамічний процес

Зміна стану термодинамічної системи внаслідок впливу на неї зовнішнього середовища називається **термодинамічним процесом**. При цьому відбувається послідовна зміна термодинамічних параметрів в стані робочого тіла.

Процес, що складається з безперервної низки послідовних рівноважних термодинамічних станів, називається **рівноважним термодинамічним процесом**. Кожний із таких станів, будучи рівноважним, може бути описаний відповідними рівняннями стану [1–4; 8; 16].

Для того, щоб при переході термодинамічної системи з одного стану в інший усі проміжні стани могли розглядатися як рівно-

важні, такий процес має відбуватися дуже повільно*. Процес, що не задовольняє цій вимозі, є *нерівноважним*.

Будь-який реальний процес певною мірою є нерівноважним. Наприклад, під час руху поршня в циліндрі процес відбувається досить швидко, і тому не виконується умова його рівноважності. Рівноважні процеси – оборотні. *Оборотні термодинамічні процеси* – це такі процеси, за яких термодинамічна система після невеликих змін свого стану повертається до початкового. Наприклад, термодинамічний процес, зображений на рис. 1.1а, може протікати через ті самі рівноважні стани як у прямому ($A \rightarrow B$), так і зворотному ($B \rightarrow A$) напрямках, і називається оборотним.

Отже, при здійсненні оборотних процесів не відбувається залишкових змін ні в самій системі, ні в навколишньому середовищі.

Для здійснення оборотного процесу необхідне, по-перше, забезпечення теплової і механічної рівноваги, тобто рівність для кожного стану температури і тиску робочого тіла та навколишнього середовища; по-друге, відсутність тертя, завихрень та інших однобічно спрямованих (необоротних) процесів.

Хоча в природі і техніці реально відбуваються процеси необоротності, вивчення оборотних процесів має суттєве практичне значення, оскільки вони служать для оцінки ступеня досконалості реальних (необоротних) процесів. Крім того, зіставлення необоротних процесів з оборотними дозволяє виявити шляхи підвищення ефективності перших (наприклад, ККД двигунів, установок та

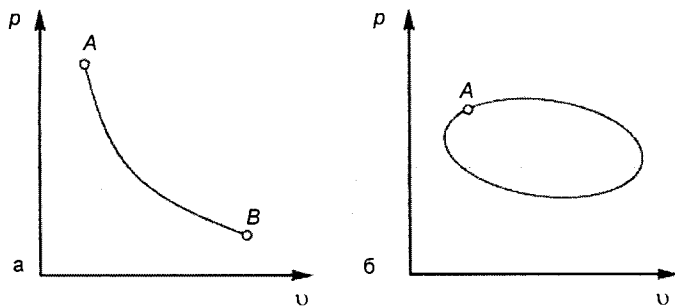


Рис. 1.1. Термодинамічний процес в p - v -координатах:

а – процес розширення; б – коловий процес

* Досить повільно порівняно з відповідним часом релаксації, тобто з інтервалом часу, протягом якого система самочинно повертається в стан рівноваги.

ін.) Мірою необоротності процесу в замкнутій системі, тобто зміною функції його стану, є *ентропія* (див. *Словник термінів*).

Оборотний термодинамічний процес, у якому робоче тіло, повертаючись у вихідний стан, не набуває двічі одного й того самого стану, називається *коловим процесом*, або *циклом* (рис. 1.16).

Ентальпія. У термодинамічних і теплотехнічних розрахунках часто використовують суму внутрішньої енергії системи U і добутку тиску p на величину об'єму системи V , яку називають *ентальпією*:

$$H = U + pV. \quad (1.5)$$

Для системи, що містить 1 кг робочого тіла *питома ентальпія* h , Дж/кг, дорівнює

$$h = u + pv. \quad (1.6)$$

Величини, що входять у (1.6) – функції стану, і тому ентальпія – функція стану. З чого випливає, що dh – повний диференціал, тобто зміна ентальпії в процесі не залежить від його характеру, а визначається тільки початковим і кінцевим станами системи

$$\Delta h_{1-2} = \int_1^2 dh = h_2 - h_1. \quad (1.7)$$

Якщо продиференціювати (1.6), то будемо мати:

$$dh = du + pdv + vdp, \quad (1.8)$$

звідки

$$\delta q = dh - vdp. \quad (1.9)$$

Рівняння (1.8) – це *інша форма запису першого закону термодинаміки*.

Нехай процес зміни стану робочого тіла відбувається, якщо $p = \text{const}$. Тоді з рівняння (1.8) будемо мати

$$dh = \delta q_p. \quad (1.10)$$

З огляду на те, що для ізобарного процесу $C_p = \delta q_p / dT$, одержимо

$$dh = C_p dT. \quad (1.11)$$

Це рівняння є справедливим і для будь-якого іншого термодинамічного процесу, тому що зміна ентальпії однозначно визначається початковим і кінцевим станами системи.

Якщо $t = 0$ °С, значення ентальпії приймають рівним нулю.

Ентропія. Із аналітичного виразу першого закону термодинаміки для закритих систем відомо [3, с. 14–19], що при підведенні до термодинамічної системи кількості теплоти δQ і внаслідок зміни її об'єму на величину dV здійснюється робота розширення проти сил зовнішнього тиску. Оскільки в розглянутій системі немає інших змін, то відповідно до закону збереження енергії маємо

$$\delta Q = du + \delta L. \quad (1.12)$$

Отже, для ізольованої термодинамічної системи теплота, що передається їй, йде на зміну її внутрішньої енергії та на здійснення зовнішньої роботи.

З рівняння (1.11) випливає, що внутрішня енергія системи, будучи однозначною функцією її стану, змінюється під дією зовнішніх впливів (надходження деякої кількості теплоти δQ і здійснення роботи δL). Крім того, робота може відбуватися або за рахунок передачі системі кількості теплоти, або за рахунок зміни внутрішньої енергії (або за рахунок δQ і dU).

Вираз (1.11) – рівняння *першого закону термодинаміки* для ізольованих систем. Для системи, що містить 1 кг робочого тіла:

$$\delta q = du + \delta l \quad (1.13)$$

або, ураховуючи [3, с. 13], що $\delta l = pdv$:

$$\delta q = du + pdv.$$

В інтегральній формі це рівняння має такий вигляд:

$$q = \Delta u + l. \quad (1.14)$$

Вище зазначалося (1.11), що величина δQ – неповний диференціал. З математики відомо, що диференціал будь-якої функції завжди можна перетворити в повний, помноживши його на інтегруючий множник (дільник).

У диференціальної форми δQ інтегруючий дільник – температура T , отже,

$$\frac{\delta Q}{T} = dS, \quad (1.15)$$

де T – термодинамічна температура;
 S – ентропія.

Для системи, що містить 1 кг робочого тіла:

$$\frac{\delta q}{T} = dS, \quad (1.16)$$

де S – питома ентропія, Дж/(кг·К).

Промислові технології, які використовують холод. Здійснення різноманітних технологічних процесів за температури, нижчої від температури навколишнього середовища, пов'язане з виробництвом холоду. Таких технологій дедалі все більше, і вони набувають все більшого застосування в багатьох галузях народного господарства. Розглянемо найбільш важливі технології по галузях промисловості.

Холодильна технологія харчових продуктів охоплює як сільське господарство, так і переробну промисловість: м'ясу і молочну; рибодобувну і рибопереробну з рибпромисловими і переробними базами і флотом; торгівлю; транспорт; сховища сировини і готового продукту та ін.

У технологічних процесах *нафтової, газової та хімічної* промисловості використовують штучний холод у діапазоні помірних температур (близько -100°C).

У *хімічній промисловості* низькі температури застосовують при отриманні етилену, фармацевтичних і біохімічних препаратів, азотного та синтетичного каучуку, хлору та ін.

У *будівельній промисловості* використовують штучний і природний холод для заморожування ґрунтів під час будівництва підземних споруд (шахти, тунелі, сховища для зниженого газу та ін.)

Технологічні процеси у виробництві *хіміко-фармацевтичних препаратів, вітамінів, антибіотиків* супроводжуються споживанням штучного холоду на температурному рівні $-10\dots-15^\circ\text{C}$.

При отриманні *білково-вітамінних концентратів* шляхом синтезу суміші рідких парафінів нафти і мінеральних солей зі спеціальною культурою дріжджів потреба в холоді дуже значна; одна тонна продуценту у виробництві білково-вітамінних концентратів виділяє 16 ГДж теплоти, у виробництві лізину – близько 54,5 ГДж. Сьогодні потужності заводів потребують холоду в кількостях, що вимірюються десятками тисяч кіловат енергії. (Докладно – дивись наведений список літератури.)

Література: [1, с. 26–59]; [2, с. 43–48]; [3, с. 4–74]; [4, с. 364–455].

Питання для самоконтролю

1. Що вивчає термодинаміка? Яке значення технічної термодинаміки в розв'язанні практичних завдань у галузях сільськогосподарського виробництва?
2. Що таке термодинамічна система?
3. Дайте визначення і характеристику різним параметрам стану термодинамічної системи. Наведіть відповідні приклади.
4. Назвіть основні термічні параметри стану.
5. Наведіть визначення абсолютного тиску. Які прилади використовують для вимірювання тиску? У яких одиницях вимірюють тиск у системі СІ?
6. Що таке абсолютна термодинамічна температура? За допомогою яких приладів вимірюють температуру? На чому заснована дія таких приладів?
7. Що таке оборотний процес і цикл?

А67182

Теоретичні основи штучного ОХОЛОДЖЕННЯ

- Способи отримання низьких температур
- Адіабатичне дроселювання (ефект Джоуля – Томпсона)
- Адіабатичне розширення газу
- Вихровий ефект (ефект Ранка)
- Термоелектричний ефект (ефект Пельтьє)

Ключові слова: процеси термодинамічні, діаграми фазові, температура кріоскопічна, охолодження, заморожування, підморожування.

2.1. Способи отримання низьких температур

Для тривалого зберігання якості сировини і готової продукції, створення певних умов при технологічній переробці сільськогосподарської продукції, забезпечення необхідних умов при транспортуванні сировини і продуктів, що швидко псуються, застосовують низькі температури. Для цього використовується спеціальне обладнання – холодильні машини або установки.

У *консервному виробництві* холод застосовують для охолодження сировини і продуктів на різних стадіях технологічного процесу: охолодження продуктів (плодів, овочів, молока, м'яса, риби) при підготовці їх до тривалого зберігання (температура охолодження вище критичної); підморожування продуктів і сировини для зберігання їх у свіжому вигляді (температура завжди нижча за кріоскопічну); охолодження з метою прискорення і повноти дифузійних процесів (насичення соків вуглекислим газом, сульфитація фруктового пюре, дифузія цукру в плодах); заморожування і самозаморожування продукту (організація сублімаційного сушіння продуктів).

Низькі температури отримують за допомогою фізичних процесів, які супроводжуються поглинанням теплоти. До таких про-

цесів належать фазові перетворення речовин, які супроводжуються поглинанням теплоти зовні: плавлення; кипіння (випаровування); сублімація; адіабатичне дроселювання газу з попередньою температурою, яка менша за температуру верхньої точки інверсії (ефект Джоуля – Томпсона); адіабатичне розширення газу з віддачею корисної зовнішньої роботи; вихровий ефект (ефект Ранка); термоелектричний ефект (ефект Пельтьє).

Фазове перетворення певної кількості речовини при плавленні, кипінні, сублімації здійснюється за низьких температур і з поглинанням значної кількості теплоти. Ця особливість фазових перетворень дає можливість отримувати низькі температури.

Фазові перетворення в P - t -координатах подано на рис. 2.1а. Три однофазні стани (тверда, рідинна і газоподібна фази) розділені кривими CA , BA і KA , кожна з яких відповідає двофазному стану речовини: AB – «тверде тіло – рідина», AK – «рідина – пара», AC – «тверде тіло – газ», AB – називають кривою плавлення, AK – крива кипіння, AC – крива сублімації. Вид і розташування цих кривих залежать від природи речовини.

Будь-які термодинамічні діаграми стану реального газу (P - V , S - T , i - S та ін.) також є фазовими діаграмами. Однак на відміну від P - t -діаграми, де зони двофазного стану зображені лініями, на P - V і T - S -діаграмах вони зображені відповідними площами (рис. 2.1б, в). Це дає можливість здійснювати аналіз процесів у двофазному стані речовини.

Так, процес *ізотермічного тиску* на P - t -діаграмі (1-2-3-4, рис. 2.1а) виразніше відображається на P - V -діаграмі (1-2-3-4, рис. 2.1б). Процес (2-3) на P - t -діаграмі відображається однією точкою 2, 3 і не розкриває характеру процесу. На P - V -діаграмі процес (2-3), що супроводжується конденсацією і повним перетворенням газоподібної фази на рідину в точці 3, піддається аналізу з урахуванням даних діаграми.

Так, з діаграми виходить, що ступінь сухості змінюється від $x = 1$ (точка 2) до $x = 0$ (точка 3). Процес ізотермічної конденсації (2-3) збігається з ізобарою sv . Подальше стиснення (3-4) призводить до різкого підвищення тиску, оскільки рідина менше стискується, ніж газ.

Отже, ліворуч I - K існує тільки рідинна фаза, а праворуч II - K – тільки газ. Між цими кривими знаходиться ділянка двофазного стану (*пара + рідина*). У критичній точці K різниця між газом і рідинною фазою зникає. Вище від цієї точки існування речовини у двофазному стані неможливе (ніяким тиском перетворити газ у рідину за умови $t > t_{кр}$ не можна).

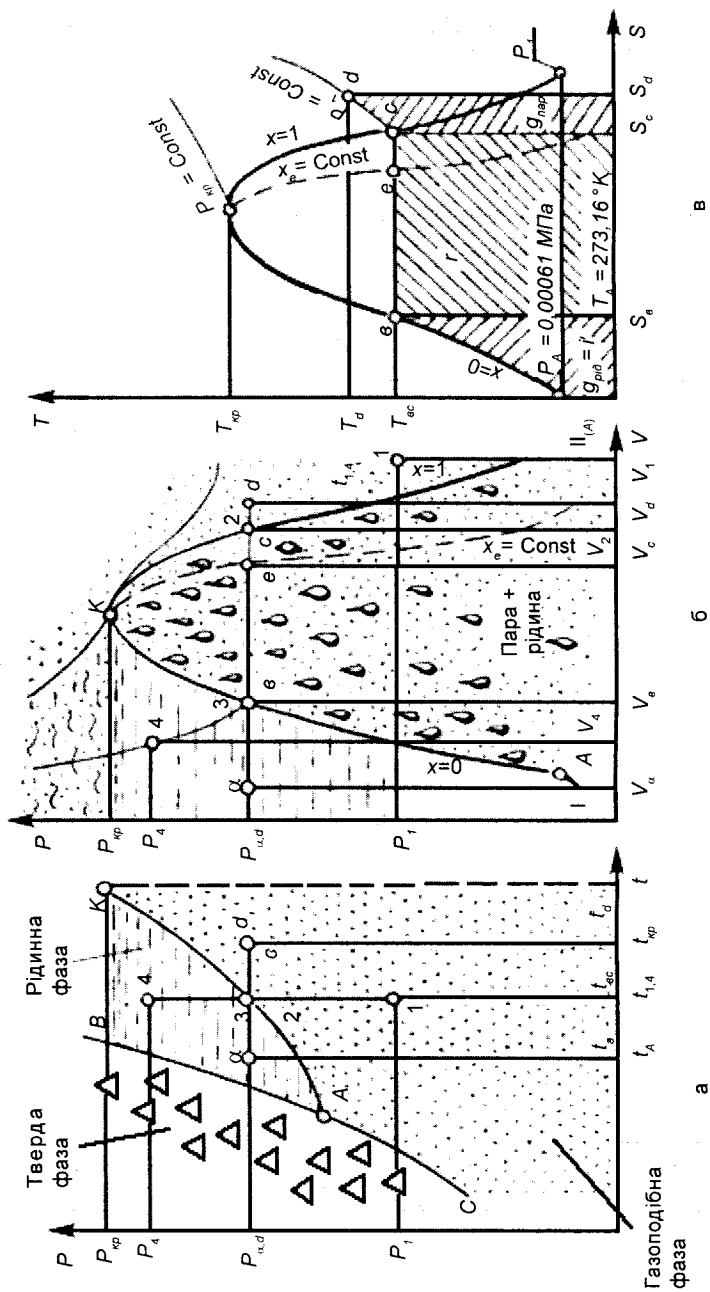


Рис. 2.1. Фазові діаграми стану:

АВ – «тверде тіло – рідина» (крива плавлення); АК – «рідина – пара» (крива кипіння); АС – «тверде тіло – газ» (крива сублимації)

На P - V -діаграмі крива I - K – це стан *киплячої рідини*. Пара, що при цьому утворюється, знаходиться в динамічній рівновазі з киплячою рідиною. Таку пару називають *насиченою парою*. Наявність рідини в парі характеризується *коефіцієнтом сухості пари*

$$x = \frac{m_{c,n}}{m_{a,n}} = 0 \dots 1, \quad (2.1)$$

де $m_{c,n}$ і $m_{a,n}$ – маса сухої і вологої пари відповідно ($m_{a,n} = m_{c,n} + m_p$); m_p – маса рідини.

Отже, крива II - K відповідає стану сухої насиченої пари ($x = 1$), а крива I - K – стану киплячої рідини ($x = 0$). Проміжок між цими кривими відповідає стану вологої насиченої пари.

Пару, температура якої при даному тиску (наприклад, P_a , d) більша за температуру кипіння (наприклад, $t_{2,3}$), називають *перегрітою парою* (точка d).

Процес отримання перегрітої пари (d - b) складається з трьох послідовних стадій: підігрівання рідини до температури кипіння (a - b), пароутворення (b - c) за сталої температури й перегрівання пари до необхідної температури (c - d). Усі ці стадії протікають за сталого тиску та на термодинамічних діаграмах відображається ізобарою.

Процес пароутворення в T - S -діаграмі відображено на рис. 2.1 в. Кількість теплоти, що витрачається на пароутворення в процесі (b - c), називають *теплотою пароутворення*

$$r = Sbc s_{c,s} = T_{a,c} (S_c - S_a). \quad (2.2)$$

Кількість теплоти на нагрівання рідини q_p і перегрівання сухої пари q_n визначають за формулою

$$q_{p,d} = Sabs_a O, \quad (2.3)$$

$$q_{n,p} = Scds_d s_c. \quad (2.4)$$

Отже, T - S -діаграма надає можливість обчислити відповідну кількість теплоти, що утворюється (або витрачається) при проведенні того чи іншого процесу, пов'язаного з нагріванням і охолодженням газу, у тому числі під час фазових перетворень.

Використання фазового перетворення для отримання *низької температури* найбільш доступне при використанні водяного льоду, який при атмосферному тиску плавиться за температури 0°C і має відносно велику величину питомої теплоти плавлення (335 кДж/кг). Більш низька температура плавлення виникає,

якщо змішувати лід з деякими солями. У такий спосіб можна знизити температуру до *криогідратної* (евтектичної) температури – *найнижчої температури плавлення* певної суміші.

Найширше використовуються низькі температури, які виникають у результаті кипіння. Температура кипіння речовини залежить від тиску: зі зменшенням тиску температура кипіння знижується і, навпаки, зі збільшенням тиску підвищується [1–4]. Наприклад, температура кипіння рідкого аміаку за атмосферного тиску становить $-33,4$ °С. Якщо створити в посудині тиск $0,2$ МПа, то аміак у ній закипить за температури -19 °С.

Отже, за допомогою однієї речовини (аміак) можна отримати інтервал низьких температур, а, вибираючи речовини з необхідними якостями, – будь-яку з низьких температур.

У процесі кипіння температура залишається сталою до моменту повного перетворення рідини на пару. Унаслідок кипіння дістають пару з температурою і тиском рідини, що кипить (*насичена пара*). Якщо в ній є частинки рідини, то пара буде *вологою насиченою парою*, а якщо її немає, – *сухою насиченою парою*. Якщо до сухої насиченої пари підводити теплоту, то утворюється *перегріта пара* з тиском киплячої рідини і температурою вищою, ніж температура кипіння.

Джерелом низької температури може бути сухий лід (тверда вуглекислота), який за атмосферного тиску має температуру сублімації $-78,5$ °С і теплоту сублімації 574 кДж/кг (теплота сублімації дорівнює сумі теплоти плавлення і пароутворення, тому процес дає великий холодильний ефект).

Якщо сухий лід змішати із сірчаною кислотою, температура евтектичної точки досягне -82 °С. У вакуумі температуру сублімації сухого льоду можна знизити до -100 °С.

Водяний лід сублімує за температури нижче ніж 0 °С. Цю температуру водяного льоду використовують для сушіння різних препаратів під вакуумом.

На практиці для охолодження середовища і підтримання сталої низької температури холод слід виробляти безперервно тривалий період. Охолодження за допомогою плавлення і сублімації має той недолік, що робоча речовина, відібравши теплоту від охолоджуваного середовища, змінює свій агрегатний стан і втрачає свої охолоджувальні властивості. Тому для безперервного охолодження треба мати великий запас робочої речовини.

2.2. Адіабатичне дроселювання

Адіабатичне дроселювання – це необоротне розширення газу при його проходженні крізь пристрій з малим прохідним перерізом (дросель, пориста перегородка та ін.). Процес протікає швидко, тому теплообмін із зовнішнім середовищем практично не відбувається і *ентальпія речовини* не змінюється. Корисна зовнішня робота не здійснюється, тому що робота проштовхування перетворюється на теплоту тертя.

При адіабатичному дроселюванні реального газу, на відміну від ідеального внаслідок зміни внутрішньої енергії, виконується робота проти сил взаємодії молекул. Це приводить до зміни температури газу (*ефект Джоуля – Томпсона*) – підвищення або зниження залежно від його попереднього стану.

Ефект Джоуля – Томпсона (дросель-ефект) – зміна температури газу при його адіабатичному дроселюванні, тобто зниження тиску газу при його протіканні крізь пористу перегородку, діафрагму або вентиль без теплообміну з навколишнім середовищем. Такий ефект називають позитивним, якщо температура газу при адіабатичному дроселюванні знижується, і негативним, якщо вона підвищується. Позитивний ефект Джоуля – Томпсона використовують у техніці для отримання низьких температур, а також при зрідженні газу.

Для всіх газоподібних речовин у зоні, близькій до критичної, адіабатичне дроселювання приводить до зниження температури. У надкритичній зоні існує стан газу, що називають *точками інверсії*, у яких ефект зміни температури змінює знак. Сукупність цих точок являє собою криву, яку називають *інверсійною кривою*. Вибираючи стан газу, що лежить під інверсійною кривою, можна здійснити процес, який супроводжується зниженням температури газу.

Процес адіабатичного дроселювання використовують для утворення помірно низьких і криогенних температур.

2.3. Адіабатичне розширення газу

Адіабатичне розширення газу з віддачею корисної зовнішньої роботи можливе за будь-якого стану газу, тому що температура змінюється в бік зниження. Крім того, на відміну від дроселювання температура газу (за інших однакових умов) знижується більше і ефект можливий лише для ідеального газу.

Процес адіабатичного розширення газу застосовують для утворення криогенних температур.

2.4. Вихровий ефект

Ефект, що виникає при подаванні стисненого повітря з температурою, яка дорівнює температурі навколишнього середовища, по тангенціальному вводу в трубу зумовлює те, що температура повітря біля стінок труби буде вищою, а в центрі – нижчою, ніж температура повітря на вході в трубу.

Таке явище викликане тим, що швидкість обертання повітря в трубі є різною: біля центральної частини вона більша, ніж на периферії. Якщо розділити периферійну і центральну частини потоку, то можна отримати потоки повітря з низькою і високою температурами (ефект Ранка).

Утворення охолодженого та нагрітого потоків є результатом перерозподілу енергії стиснутого газу, що входить до вихрової трубки. За відсутності теплообміну з навколишнім середовищем сумарна кількість енергії охолодженого та нагрітого потоків згідно із законом збереження енергії дорівнює кількості енергії газу, що надходить:

$$G_c i_c = G_x i_x + G_z i_z, \quad (2.5)$$

де G_c, G_x, G_z – витрата стиснутого, охолодженого та нагрітого потоків газу відповідно, кг/с;

i_c, i_x, i_z – питома ентальпія стиснутого, охолодженого та нагрітого потоків газу, Дж/кг.

Незважаючи на порівняно низьку енергетичну ефективність процесу вихрового температурного розділення газів, іноді доцільно використовувати вихрові холодильно-нагрівні апарати. Ця доцільність обумовлена такими особливостями робочого процесу та конструкцією цих апаратів:

1. У вихровій трубці можливе одночасне здійснення кількох процесів, наприклад, охолодження та нагрівання газів, охолодження та осушення чи очищення холодного газу тощо.
2. Робочим тілом вихрової трубки може бути будь-який газ чи суміш газів, а також багатозфазні суміші.
3. Невеликі розміри та маса іноді є визначальними критеріями переважного використання вихрових апаратів. Ці якості дозволяють створювати не тільки компактні, легко транспортуєчі, а й у деяких випадках економічні установки.
4. Невибагливість в обслуговуванні та регулюванні, простота конструкції, відсутність рухомих деталей та складних ущільнювальних елементів визначають високу надійність роботи апаратів у важких умовах експлуатації.

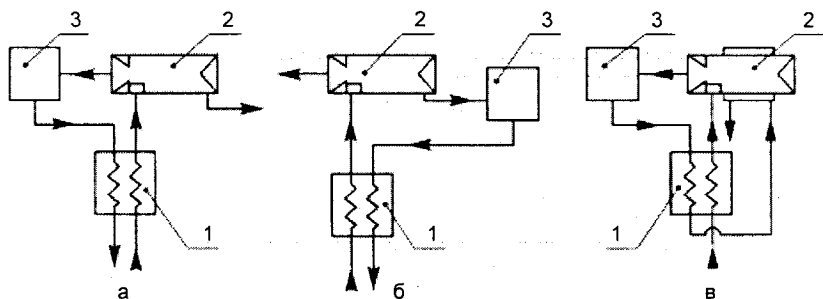


Рис. 2.2. Схема регенеративних холодильно-нагрівних установок:
 а – холодильна установка; б – нагрівна установка; в – холодильна установка з охолоджувальною вихровою трубою

Однак, суттєвим недоліком вихрової труби є порівняно низька термодинамічна ефективність процесу енергетичного розділення, тому при використанні вихрових труб у складі холодильно-нагрівних установок прагнуть до максимальної утилізації енергії потоків, що виробляються у вихровій трубці.

Принципальні схеми холодильно-нагрівних установок наведені на рис. 2.2.

Стиснутий газ проходить теплообмінник 1, де охолоджується (рис. 2.2а) або нагрівається (рис. 2.2б) потоком охолоджувального чи нагрітого газу, що виходить з термокамери 3. Далі стиснутий газ надходить у вихрову трубу 2, де розділяється на охолоджувальний та нагрівний потоки. Один з них (залежно від призначення установки) спрямовується в термокамеру, а звідти в теплообмінник стиснутого газу. Охолоджувальний потік з теплообмінника 1 можна подавати на охолодження камери розділення вихрової труби (рис. 2.2в).

2.5. Термоелектричний ефект

Ефект (*ефект Пельтьє*) полягає в тому, що при проходженні струму через контакт двох різнорідних провідників у напрямку контактної різниці потенціалів відбувається поглинання теплової енергії, а при проходженні у зворотному напрямку – виділення. Холодний спай є джерелом низької температури.

Кількість виділеної або поглиненої теплоти Q пропорційна величині струму I , який проходить через спай:

$$Q = P \cdot I, \quad (2.6)$$

де P – коефіцієнт Пельтьє.

$$P = -T\Delta\alpha, \quad (2.7)$$

де T – абсолютна температура в K ;
 α – різниця термоелектричних коефіцієнтів провідників.

Послідовне з'єднання кількох спаїв з різнорідних провідників з різним типом електропровідності утворюють так званий термоелектричний модуль, або елемент Пельтьє, який є основою електричних охолоджувальних засобів.

Перевагами елемента Пельтьє є невеликі розміри, відсутність будь-яких рухомих частин, а також газів і рідин, екологічна чистота, безшумність роботи, невеликі розміри та вага, висока надійність, стійкість до механічного впливу, здатність працювати в будь-якому просторовому положенні. При поверненні напрямку струму можливе як охолодження, так і нагрівання. Це дає можливість термостатування за температури навколишнього середовища як вище, так і нижче від температури термостатування.

Недоліком елемента Пельтьє є дуже низький коефіцієнт корисної дії, що призводить до великої споживаної потужності для досягнення помітної різниці температур. Незважаючи на це, елементи Пельтьє набули широкого застосування, оскільки без будь-яких додаткових пристроїв за їх допомогою можна отримати температуру нижче ніж 0°C .

Елементи Пельтьє застосовуються в ситуаціях, якщо необхідне охолодження з невеликою різницею температур або якщо енергетична ефективність охолоджувача неважлива.

Залежно від сфери застосування існують різні особливості використання термоелектричного модуля. За всієї різноманітності можливостей щодо використання термоелектрики можна виділити такі основні сфери застосування цих модулів:

- *радіоелектроніка* (мініатюрні охолоджувачі для вхідних каскадів високочутливих приймачів і підсилювачів, охолоджувачі для потужних генераторів та радіокомпонентів, лазерних випромінювачів, охолоджувачі для мікропроцесорів);
- *медицина* (мобільні охолоджувальні контейнери для зберігання біологічних тканин і рідин, охолоджувальні ковдри та підстилки, косметичні та фармацевтичні вироби);
- *вироби широкого вжитку* (переносні холодильники і морозильники різного обсягу та призначення, охолоджувачі питної води);

- *точне машинобудування, наукове та лабораторне обладнання* (камери холоду і заморожувачів, термостати, лабораторні пластини, датчики теплових потоків);
- *пристрої кліматизації* (термоелектричні кондиціонери різного призначення, кліматичні камери);
- *енергетика* (утилізатори непридатного тепла, автономні джерела живлення для пристроїв автоматики, ізотопні джерела живлення для космічних станцій).

Література: [7, с. 364–455], [12, с. 142–216], [29, с. 245–287].

Питання для самоконтролю

1. Назвіть основні способи отримання низьких температур і надайте їх порівняльну характеристику.
2. У чому полягає особливість фазового перетворення речовин?
3. У чому полягає фізична сутність ефекту Джоуля – Томпсона?
4. Яку пару називають насиченою?
5. Який процес називають сублімацією?
6. Який процес використовують для утворення криогенних температур?
7. Яку температуру називають криоскопічною?

Термодинамічні процеси і оборотний цикл

- Другий закон термодинаміки
- Оборотний коловий процес (холодильний цикл)
- Найпростіший коловий процес (цикл Карно)
- Ступінь необоротності циклу

Ключові слова: оборотний процес, цикл Карно, холодопродуктивність, ступінь необоротності циклу, холодильний коефіцієнт.

3.1. Другий закон термодинаміки (загальні положення)

Під час переходу від теплого тіла до холодного відбувається природний процес передачі. У цьому разі енергія руху молекул теплового тіла передається молекулам холодного тіла. Без витрати будь-якої енергії зовні цей процес триває доти, доки температура тіл не стане однаковою.

Оборотний процес, тобто передавання теплоти від холодного тіла до теплого, сам по собі не може відбуватися. Проте якщо витратити зовнішню енергію, то такий процес стає можливим.

Отже, для здійснення безперервного охолодження необхідні безперервні витрати енергії.

У холодильних машинах, де теплота передається від охолоджувального тіла навколишньому середовищу з більш високою температурою, такими витратами є електроенергія, що споживається в процесі охолодження.

Німецький фізик Р. Клаузіус (1850) сформулював другий закон термодинаміки так:

Теплота не може переходити від холодного тіла до гарячого сама по собі, без компенсації.

3.2. Оборотний коловий процес

Сукупність процесів, унаслідок яких витрачається енергія для передавання теплоти від охолоджувального тіла за низької температури навколишньому середовищу за високої температури, називають **оборотним коловим процесом**, або **холодильним циклом**. На відміну від прямого колового процесу (рис. 3.1а), який складається з двох ізотермічних (1-2, 3-4) і двох адіабатних (2-3, 4-1) процесів і на здійснення яких витрачається теплота q_0 (унаслідок чого здійснюється робота), оборотний коловий процес (рис. 3.1б) складається з тих самих процесів, однак здійснюється у зворотному порядку, і на здійснення його витрачається робота l , у результаті чого віднімається теплота.

Отже, у коловому процесі беруть участь тіло, яке охолоджують, робоча речовина (холодоагент) та охолоджувальне середовище (середовище, що приймає теплоту).

Робоча речовина, що має температуру, нижчу від температури тіла, що охолоджується, приймає теплоту q_0 , яка передається йому в природному процесі теплопередачі. Ця теплота має бути передана охолоджувальному середовищу, температура якого вища за температуру робочої речовини, що прийняла теплоту q_0 . Сам по собі цей процес не відбувається (згідно з другим законом термодинаміки). Тому на ділянці (1-2) колового процесу до робочої рідини має бути підведена енергія (це може статися, наприклад, унаслідок стиснення робочої речовини) з метою підвищення її температури, щоб вона змогла передати теплоту, отриману в попередніх процесах, охолоджувальному середовищу. Тобто робоча речовина на наступній ділянці колового процесу (2-3) теплообміном

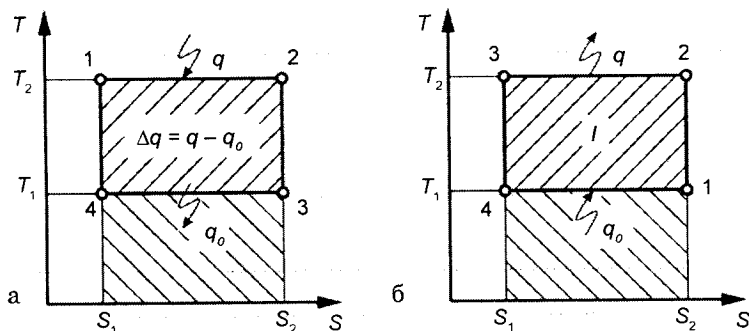


Рис. 3.1. Прямий (а) і оборотний (б) коловий процес

передає частину теплоти охолоджувальному середовищу. Далі на ділянці колового процесу (3-4) робоча речовина повертається у свій попередній стан.

У цьому коловому процесі робоча речовина (холодоагент), знаючи низку змін, повинна повернутися у свій первісний стан і безперервно здійснювати такий коловий процес, або цикл.

Складовими колового процесу можуть бути різні процеси. З термодинаміки відомо, що найбільш досконалим процесом (циклом), у якому витрачається найменша робота, є *оборотний цикл Карно* (рис. 3.16).

В ізотермічному процесі (4-1) кожний кілограм холодильного агента, що циркулює, отримує від тіла, яке охолоджується, теплоту q_0 , яку називають *питомою масовою холодопродуктивністю* і яка зображується площею $S_1-4-1-S_2$. Її величина визначається за формулою

$$q_0 = T_1 \cdot (S_2 - S_1). \quad (3.1)$$

В адіабатному процесі (1-2) при виконанні певної роботи l_k холодильний агент стискується, його температура підвищується від T_1 до T_2 . Після цього в ізотермічному процесі (2-3) кожний кілограм холодоагенту, що циркулює, віддає охолодному (нарколишньому) середовищу теплоту q , що вимірюється площею $S_1-3-2-S_2$:

$$q_0 = T_2 \cdot (S_2 - S_1). \quad (3.2)$$

У заключному адіабатичному процесі (3-4) холодильний агент розширюється без теплообміну з навколишнім середовищем. Температура при цьому знижується від T_2 до T_1 і виконується робота l_p .

Робота циклу дорівнює різниці робіт, витрачених на стиснення холодильного агента l_k і отриманих при його розширенні l_p :

$$l = l_k - l_p. \quad (3.3)$$

Робота циклу перетворюється на теплоту, яка підводиться до холодильного агента, та має дорівнювати енергії, відведеній від нього, тобто:

$$q = q_0 + l. \quad (3.4)$$

Тоді

$$l = q - q_0. \quad (3.5)$$

У T - S -діаграмі робота циклу зображена площею 1-2-3-4.

Ефективність здійснення холодильного циклу вимірюється *холодильним коефіцієнтом*, що дорівнює відношенню теплоти, отриманої холодильним агентом від тіла, яке охолоджується, до роботи циклу:

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l}. \quad (3.6)$$

З рівняння (3.6) з урахуванням (3.1), (3.2), (3.5) останнє рівняння матиме вигляд:

$$\varepsilon = \frac{T_1}{T_2 - T_1}. \quad (3.7)$$

З (3.7) випливає, що ефективність циклу Карно залежить від температури тіл, в інтервалі яких здійснюється цикл.

Отже, найдоцільніше використовувати для охолодження джерело з більш високою температурою T_1 .

3.3. Найпростіший коловий процес (цикл Карно)

Здійснення колових процесів (циклів) можливе тільки для ідеальних газів, коли всі процеси, з яких складається коловий цикл (ізотермічні, адіабатні та ін.), самі по собі будуть коловими.

Ідеальний газ – це газ, силами взаємодії між молекулами якого у задачах, що розглядаються, можна нехтувати. Рівняння стану ідеального газу є *рівняння Клайперона*. Реальні гази є близькими за своїми властивостями до ідеального газу, якщо вони достатньо розріджені, наприклад, повітря за звичайних температур і тиску.

Цикл Карно, що являє собою найпростіший коловий цикл, є процесом *оборотним*, тобто *ідеальним*.

Ідеальний цикл Карно може відбуватися за таких умов:

- у процесі теплообміну між холодильним агентом і охолоджувальним (або холодним) середовищем різниця температур нескінченно мала, тобто температура холодильного агента у випарнику має бути нескінченно близькою до температури охолоджувального середовища, а в компресорі – нескінченно близькою до температури охолодженого середовища;
- температури охолоджувального і охолоджуваного середовищ при теплообміні є сталими ($T_1 = \text{const}$, $T_2 = \text{const}$);

- цикл здійснюється на ділянці вологої пари (між суміжними кривими T - S -діаграми: якщо $x = 0$ і якщо $x = 1$, див. рис. 2.1);
- процес адіабатичного розширення і стиснення здійснюється в умовах ідеальної теплоізоляції і за відсутності тертя (адіабатичне стиснення відбувається в компресорі, а розширення – у розширювальному циліндрі (детандері*)).

Реальні цикли завжди необоротні внаслідок необоротності процесів, з яких вони складаються: розширення і стиснення за наявності тертя; дроселювання, що супроводжується зміною температури (ефект Джоуля – Томпсона), а також унаслідок того, що існує реальна скінченна різниця температур у процесі теплообміну у випарнику і конденсаторі.

Тому після завершення необоротного процесу система може повернутися у вихідний стан тільки за умови витрат додаткової енергії ззовні.

3.4. Ступінь необоротності циклу

Ступінь необоротності циклу може бути різним. Тому термічна досконалість циклу визначається порівнянням його з оборотним (рис. 3.16), що має саме таку величину питомої масової холодопродуктивності. Ступінь необоротності циклу характеризується **коефіцієнтом необоротності** η_p , який дорівнює відношенню їх холодильних коефіцієнтів, тобто:

$$\eta_p = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{об}} = \frac{l_p}{l_{об}}, \quad (3.8)$$

де $\varepsilon_p, \varepsilon_{об}$ – холодильні коефіцієнти реального і оборотного циклів;
 $l_p, l_{об}$ – робота реального і оборотного циклів.

Чим більший ступінь необоротності циклу, тим більшу роботу необхідно виконати для отримання одного й того самого корисного ефекту.

Література: [2, 79–82, 92–96], [7, с. 364–455], [12, с. 142–216].

* Детандер – (від фр. *detandere* – ослаблювати) – поршнева або турбінна машина для охолодження газу шляхом його розширення зі здійсненням зовнішньої роботи. Застосовується переважно в спеціальних установках для зрідження та розділення газів.

Питання для самоконтролю

1. У чому полягає сутність другого закону термодинаміки?
2. Чим характеризується оборотний цикл Карно?
3. Чим відрізняються компресорні холодильні машини від абсорбційних?
4. Яке призначення компресора в холодильній машині?
5. Яке призначення конденсатора в холодильній машині, а також дроселя (регулювального вентиля)?
6. Де в холодильній машині встановлюють випарник і конденсатор?
7. З якою метою перед випарником встановлюється дросель (регулювального вентиля)?

Схеми парової холодильної машини

- Загальні положення
- Схеми та цикли парокompресійних холодильних агрегатів

Ключові слова: цикл Карно, парова холодильна машина, регулювальний вентиль, теплообмінник, компресор, холодоагент.

4.1. Загальні положення

Залежно від робочого тіла (холодоагента), яке використовують, холодильні машини поділяють на газові і парові. У парових холодильних машинах робочим тілом є аміак і хладони – вуглеводи, у яких атоми водню замінені атомами хлору і фтору. У газових холодильних машинах як робоче тіло використовують повітря. За видом енергії, що витрачається на роботу холодильної машини, розрізняють компресорні, абсорбційні та пароежекторні машини.

У *компресорних холодильних машинах* робочий цикл здійснюється з допомогою механічної енергії (робота компресора), в *абсорбційних* і *пароежекторних* – у результаті витрати теплоти.

Для забезпечення необхідних температур кипіння і конденсації робочого тіла використовують одно- та багатоступінчасті і каскадні парові компресорні холодильні машини. В одноступінчастих використовують один, а в багатоступінчастих і каскадних – два і більше компресорів, які забезпечують утворення холодильного циклу.

Для холодильної обробки і низькотемпературного зберігання харчових продуктів і сировини застосовують переважно *парові компресорні одно- і двоступінчасті холодильні машини*.

Отже, при вивченні даної теми необхідно звернути увагу на схему і цикл холодильної машини з оборотним циклом Карно, а також на роботу машини з регулювальним вентилем, «сухим» ходом компресора, відокремлювачем рідини, підключенням регулювального вентиля тощо.

4.2. Схеми та цикли парокомпресійних холодильних агрегатів

Роботу холодильної машини з оборотним циклом Карно зображено на рис. 4.1. Рідкий холодоагент надходить у випарник B , де кипить при низькій температурі T_0 і низькому тиску p_0 . При цьому до холодильного агента підводиться теплота від тіла, що охолоджується, до температури T_0 і тиску p_0 (4-1).

Для безперервного охолодження у випарник треба безперервно подавати рідкий холодильний агент, а утворену пару виводити з випарника і конденсувати. Виведення утвореної пари здійснюється компресором KM , який засмоктує цю пару і адиабатично (1-2) стискає до тиску конденсації p_k (відповідно до температури конденсації T_k). Під час стиснення підвищується не тільки тиск, а й температура холодильного агента від T_0 до T_k , оскільки робота, витрачена на стиснення пари холодильного агента, приймається ним у вигляді еквівалентної теплоти, і він нагрівається.

Стиснену пару компресор KM нагнітає в конденсатор KH . У конденсаторі пара холодильного агента за високої температури T_k і тиску p_0 віддає теплоту в охолоджувальне середовище (воду або повітря). Унаслідок цього пара перетворюється на рідину з температурою T_k і високим тиском p_k .

Оскільки у випарнику треба підтримувати низьку температуру (тобто *низький тиск кипіння*) холодильного агента, з конденсатора холодильний агент надходить у детандер DT . Там холодиль-

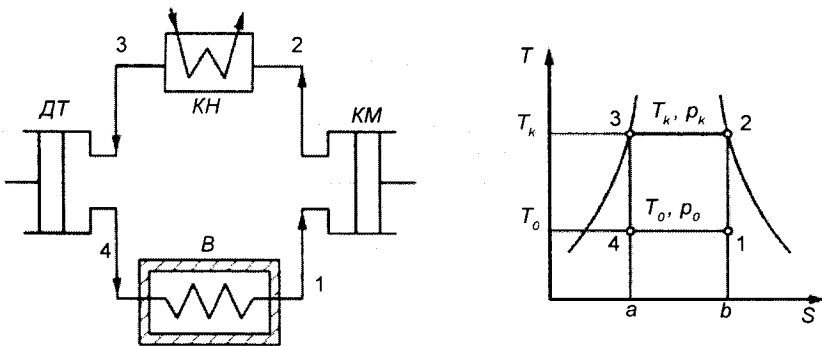


Рис. 4.1. Схема і цикл холодильної машини з оборотним циклом Карно:

B – випарник; KM – компресор; KH – конденсатор; DT – детандер.

ний агент адіабатично розширюється до тиску p_0 , що відповідає низькій температурі T_0 , за якої відводиться теплота від тіла, що охолоджується. Потім цикл повторюється: холодильний агент кипить у випарнику, всмоктується і стискується компресором, надходить у конденсатор і конденсується, розширюється в детандері до тиску кипіння і надходить у випарник і т.д.

Кількість теплоти, відведена одним кілограмом холодильного агента у випарнику в T - S -діаграмі, вимірюється площею $a41e$ і може бути подана як різниця ентальпій

$$q_0 = i_1 - i_4. \quad (4.1)$$

Кількість теплоти, що передається від холодильного агента до охолоджувального середовища в конденсаторі KH , вимірюється площею $a32e$ або різницею ентальпій

$$q = i_2 - i_3. \quad (4.2)$$

Роботу конденсатора і детандера та роботу циклу можна визначити за формулою

$$l_\kappa = i_2 - i_1; \quad (4.3)$$

$$l_p = i_3 - i_4; \quad (4.4)$$

$$l = l_\kappa - l_p = (i_2 - i_1) \cdot (i_3 - i_4). \quad (4.5)$$

Холодильний коефіцієнт циклу (2.6) становитиме

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l} = \frac{i_1 - i_4}{(i_2 - i_1) - (i_3 - i_4)}. \quad (4.6)$$

Реалізувати цей цикл важко, через те що робота розширення в детандері DT значно менша за роботу стискування в компресорі KM . У детандер надходить рідкий холодоагент малого питомого об'єму. Виготовлення і експлуатація малого за розмірами циліндра утруднені, а робота розширення майже повністю поглинається механічними втратами. Тому на практиці тиск рідини перед випарником знижується в регульовальному (дросельному) вентилі PB (рис. 4.2), який значно простіше виготовляти й експлуатувати.

У разі заміни детандера регульовальним вентилям процес адіабатичного розширення (3-4) (рис. 4.2) замінюють необоротним процесом дроселювання (3-4'), який здійснюється за ізоентальпією $i_3 = i_4$. При дроселюванні в PB мають місце подвійні втрати: втрачається корисна робота розширення $l_p = 0$, унаслідок чого збільшується робота, витрачена в циклі $l_p = l_\kappa$; змінюється холодоп-

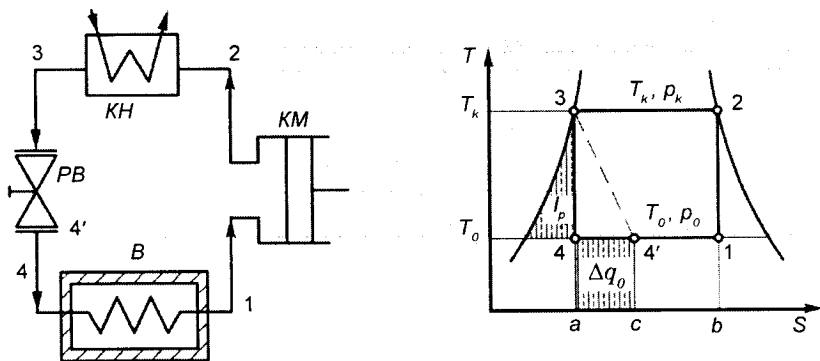


Рис. 4.2. Схема і цикл парової холодильної машини з регулювальним вентилем:

B – випарник; *KM* – компресор; *KH* – конденсатор; *PB* – регулювальний вентиль (дросьель, клапан, кран)

родуктивність Δq_0 , оскільки під час проходження холодильного агента через *PB* робота сил тертя перетворюється на теплоту, що викликає випаровування частини рідкого холодильного агента в *PB* і, відповідно, зменшення кількості рідкого холодильного агента, що надходить у випарник:

$$\Delta q_0 = S_{a44'c} = i_{4'} - i_4.$$

Питома масова холодопродуктивність при заміні *DT* на *PB*

$$q_0 = S_{a41b} - S_{a44'c} = (i_1 - i_4) - (i_{4'} - i_4) = i_1 - i_{4'}. \quad (4.7)$$

Робота циклу збільшиться (4.5)

$$l = i_2 - i_1. \quad (4.8)$$

Холодильний коефіцієнт циклу з використанням (4.6)–(4.8):

$$\varepsilon = \frac{i_1 - i_{4'}}{i_2 - i_1}. \quad (4.9)$$

Отже, заміна детандера дросьельним вентилем зумовлює зменшення питомої масової холодопродуктивності і холодильного коефіцієнта, а також збільшення роботи циклу.

У циклах 1-2-3-4 (рис. 4.1) і 1-2-3-4' (рис. 4.2) з випарника виходить і в компресор надходить *волога насичена пара*: точка 1 характеризує фазовий стан холодильного агента, якщо $0 < x < 1$

(відрізок ϵ -с, див. рис. 1.1). Теоретично такий режим роботи є найбільш вигідним, тому що надає можливість здійснити оборотний цикл Карно.

На практиці надходження в компресор вологої пари холодильного агента є небажаним, оскільки, по-перше, зменшується дійсна продуктивність компресора через зростання питомого об'єму пари, що всмоктується; по-друге, виникає небезпека аварії компресора в результаті гідравлічного удару, якщо краплини холодильного агента не встигнуть випаритись і рідина потрапить у циліндри компресора.

Тому вологий хід компресора є дуже небезпечним. На практиці компресори працюють *сухим ходом*, тобто засмоктують і стискають суху або перегріту пару.

Розглянемо цикл $1'-2'-3'-4'$ (рис. 4.3) із засмоктанням в компресор сухої насиченої пари.

Питому масову холодопродуктивність холодильного агента в циклі $1'-2'-3'-4'$ можна визначити так:

$$q_0 + \Delta q_0 = S_{a41b} + S_{b11'd} = i_{1'} - i_{4'}. \quad (4.10)$$

Кількість теплоти, яку конденсатор віддає в навколишнє середовище, становитиме

$$q = S_{c4'32'd} = i_{2'} - i_{3'}, \quad (4.11)$$

і робота циклу (2.3) за умови, що $l_p = 0$,

$$l = S_{122'1'} = i_{2'} - i_{1'}. \quad (4.12)$$

Холодильний коефіцієнт розглянутого циклу (2.6) становить

$$\epsilon = \frac{q_0 + \Delta q_0}{1 + \Delta l} + \frac{q_0}{l} = \frac{1 + \frac{\Delta q_0}{q_0}}{1 + \frac{\Delta l}{l}}. \quad (4.13)$$

Аналіз свідчить, що $\frac{\Delta l}{l} > \frac{\Delta q_0}{q_0}$, тобто холодильний коефіцієнт зменшується. З погляду термодинаміки сухий хід у теоретичному циклі є невигідним. Отже, при сухому ході компресора (цикл $4'-1'-2'-3$) відносно вологого ходу (цикл $4'-1-2-3$) питома масова холодопродуктивність холодильного агента (4.10) і робота циклу (4.12) збільшуються; холодильний коефіцієнт зменшується (4.13).

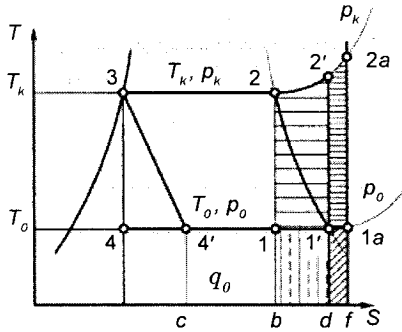


Рис. 4.3. Схема парової машини з «сухим» ходом компресора

При всмоктуванні в компресор перегрітої пари (цикл 1а-2а-3-4') (рис. 4.3) питома масова холодопродуктивність холодильного агента збільшується, однак менше, ніж робота циклу. Тому необоротні втрати циклу при всмоктуванні в компресор перегрітої пари збільшуються.

Сухий хід компресора може бути забезпечений такими технічними рішеннями: відокремлювачем рідини *ВР* (рис. 4.4) або підтриманням незначного перегрівання пари після випарника за допомогою автоматичного терморегулювального вентиля *ТРВ*.

Відокремлювач рідини можна використовувати за схемою, наведеною на рис. 4.4. Рідкий холодильний агент після *РВ* надходить у *ВР*. Пара, що утворилася при дроселюванні у *ВР*, відділяється від рідини і відсмоктується компресором *КМ*. Одночасно у відокремлювач рідини *ВР* надходить волога пара з випарника *В*. Рідина, що виноситься паром з випарника, осідає, а суха насичена пара відсмоктується компресором з випарника *В*. Так забезпечується сухий хід компресора.

При використанні автоматичного регулювального вентиля останній встановлюють за схемою (рис. 4.5) на магістралі входу рідкого холодильного агента у випарниках.

Якщо у випарник надходить більше рідини, ніж випаровується, то вона наближається до вихідного штуцера випарника, і перегрівання пари зменшується. У цьому разі *ТРВ* зменшує надходження рідини у випарник. Якщо у випарник рідини надходить недостатньо, за допомогою *ТРВ* надходження її збільшується, а отже, зменшується перегрівання пари у випарнику, тобто *ТВР* забезпечує необхідне перегрівання пари (точка 1а циклу 4'-1а-2а-3, рис. 4.3) на вході в компресор.

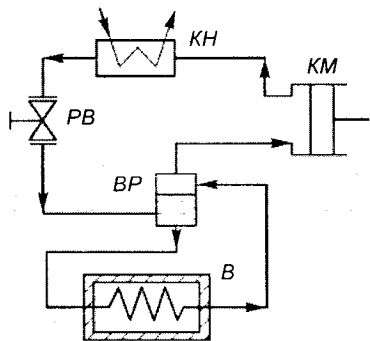


Рис. 4.4. Схема підключення відокремлювача рідини BP

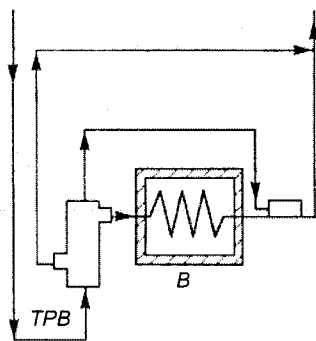


Рис. 4.5. Схема підключення терморегулюючого вентиля TPB

З метою підвищення ефективності холодильної машини використовують охолодження рідини (холодильного агента) перед регульовальним вентиляем. Цей процес називають умовно переохолодженням рідини. При цьому зменшуються витрати, пов'язані з дроселюванням холодильного агента у PB .

Процес переохолодження рідини від температури T_k (точка 3, рис. 4.3) до температури T_n (3-3') за сталого тиску P_k зображено ізобарою $P_k = \text{const}$ на ділянці $x = 0$ фазової $T-S$ -діаграми.

Якщо в холодильну машину ввести *регенеративний теплообмінник* TP (рис. 4.6а), у якому рідкий холодильний агент охолоджувати

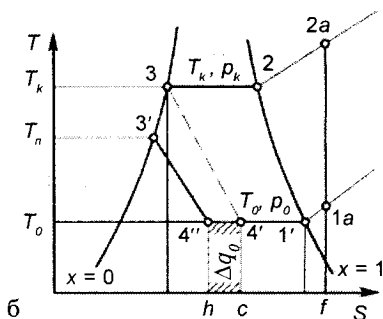
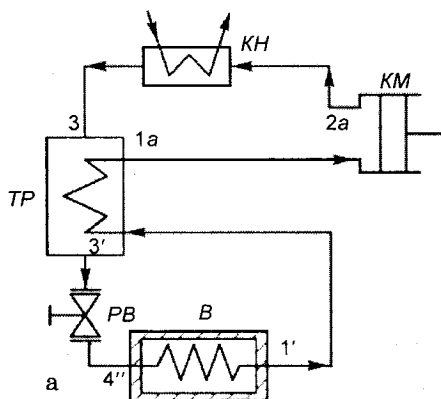


Рис. 4.6. Схема і цикл парової холодильної машини з регенеративним теплообмінником TP

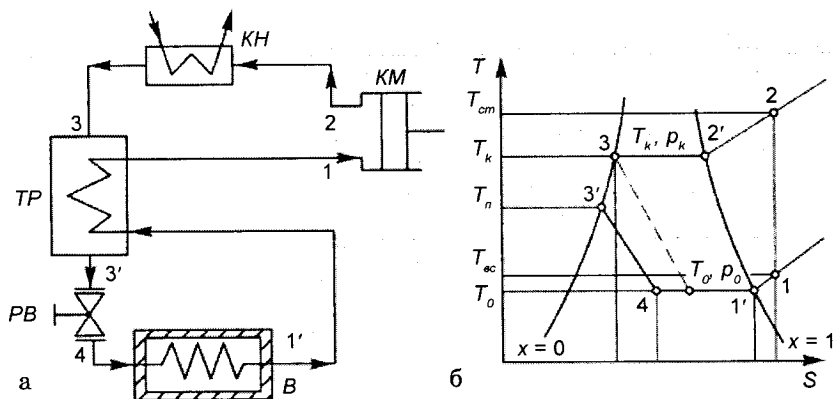


Рис. 4.7. Схема і цикл парової холодильної машини з урахуванням всіх практичних змін

парою, що виходить з випарника, температура рідкого холодильного агента перед *PB* стане нижчою за температуру навколишнього середовища $T_n < T_k$. Це зумовлює зниження необоротних втрат дроселювання, тому що в результаті переохолодження вміст рідини в рідкому холодильному агенті перед регулювальним вентилям зменшується, унаслідок чого знижується пароутворення в процесі дроселювання.

Отже, при охолодженні рідкого холодильного агента перед дроселюванням (цикл 4''-1а-2а-3-3', рис. 4.6б) порівняно з циклом 4'-1а-2а-3 питома масова холодопродуктивність холодильного агента збільшується ($S_{h4''4c}$), робота циклу змінюється, холодильний коефіцієнт збільшується

$$\varepsilon = \frac{q_o + \Delta q_o}{l} > \frac{q_o}{l}. \quad (4.14)$$

З урахуванням заміни детандера регулювальним (дросельним) вентилям, переохолодження рідкого холодильного агента T_n перед *PB*, перегрівання сухої пари (сухий хід компресора) T_{0c} холодильну машину можна зобразити у вигляді схеми (рис. 4.7).

Отже, з урахуванням усіх замін можна подати характерні точки й інтервали циклу у вигляді табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Характерні точки й інтервали циклу одноступінчастої холодильної машини

Характерна точка або інтервал циклу	Характеристика стану холодильного агента в точці або процесу, який здійснюють
4	Парорідинна суміш на вході у випарник
4-1'	Процес кипіння у випарнику за температури T_0 і p_0
1'	Суха насичена пара $x = 1 (T_0, P_0)$, вихід із випарника
1'-1	Перегрівання сухої насиченої пари за умови $P_0 = \text{const}$ до температури всмоктування $T_{\text{вс}}$ компресора; перегрівання пари відбувається в регенеративному теплообміннику TP (важливий варіант використання терморегулювального вентиля TPB для забезпечення необхідного ступеня перегрівання у випарнику)
1	Суха перегріта пара до температури $T_{\text{вс}}$ на вході в компресор з параметрами $P_0, T_{\text{вс}}$
1-2	Адіабатичне стиснення сухої перегрітої пари в компресорі
2	Вихід з компресора стисненої пари з параметрами $P_k, T_{\text{ст}}$ (високий тиск і висока температура)
2'	Стиснена пара, охолоджена до стану сухої насиченої пари $x = 1$ у конденсаторі (параметри P_k, T_k)
2'-3	Конденсація насиченої пари в конденсаторі за умови $P_k = \text{const}$, $T_k = \text{const}$
3	Рідкий холодильний агент з параметрами P_k, T_k
3-3'	Ізобара переохолодження рідкого холодильного агента за умови $P_k = \text{const}$ до температури T_n внаслідок передавання частини теплоти на перегрівання пари, що надходить у компресор (може бути варіант переохолодження з допомогою інших засобів)
3'	Рідкий холодильний агент перед дроселювальним вентилям з параметрами P_k, T_n (високий тиск, температура нижча за температуру навколишнього середовища)
3'-4	Дроселювання за умови $i = \text{const}$, частина рідкого холодильного агента перетворюється на пару за рахунок теплоти тертя при дроселюванні холодильного агента в PB

Література: [4, с. 148–200]; [6, с. 30–47]; [11, с. 372–380]; [23; 24].

Питання для самоконтролю

1. За якими ознаками поділяють холодильні машини?
2. За рахунок чого здійснюється робочий цикл у компресорних, абсорбційних та пароежекторних холодильних машинах відповідно?

3. Яке призначення випарника і де він встановлюється в холодильних машинах?
4. З якою метою в холодильних машинах встановлюється регулювальний вентиль перед випарником?
5. Яке призначення відокремлювача рідини в холодильній машині?
6. Чим відрізняються парові компресорні холодильні машини від абсорбційних?
7. З якою метою в холодильних машинах використовується конденсатор і де він встановлюється?

Розрахунок циклу парової холодильної машини

- Розрахунок теоретичного циклу парокомпресійної холодильної машини
- Двоступінчаста холодильна машина
- Схема абсорбційної холодильної машини

Ключові слова: теоретичний цикл, температурні режими, параметри машини та холодоагенту, схеми роботи машин.

5.1. Розрахунок теоретичного циклу парокомпресійної холодильної машини

Теоретичний цикл холодильної машини розраховують, використовуючи $T-S$ або $i-lg p$ -діаграми і дані таблиць насиченої пари холодильного агента [1-4].

Вихідними умовами для розрахунку є такі параметри:

- холодопродуктивність машини Q_0 , Вт (кількість теплоти, вибраної із середовища, яке охолоджується, за одиницю часу):

$$Q_0 = q_0 \cdot G, \quad (5.1)$$

де q_0 – питома масова холодопродуктивність холодильного агента, Дж/кг;

G – масова продуктивність компресора, кг/с;

- температура випаровування холодильного агента, t_0 , °C;
- температура конденсації холодильного агента, t_k , °C;
- температура переохолодження рідкого холодильного агента після конденсації, t_n , °C;
- температура холодильного агента, що всмоктується компресором, t_{ec} , °C;
- холодильний агент.

Температурні режими роботи машини (t_0, t_k, t_n, t_{sc}) визначають, виходячи з таких рекомендацій:

t_0 – беруть на 5–10 °С нижчою від потрібної температури в холодильній камері. Температуру камери (або іншого приміщення) установлюють відповідно до технологічних вимог. Наприклад, у камері для заморожування м'яса – 23 °С ($t_0 = -30$ °С);

t_k – має бути на 3–4 °С вищою від температури води, що відходить з конденсатора і там нагрівається. Наприклад, при використанні води з температурою 18 °С $t_k = 25$ °С;

t_n – має бути на 2–3 °С вищою від температури води, що надходить на переохолодник;

$t_{sc} = t_0 + (5 \dots 10)$, виходячи із циклу перегрівання пари холодильного агента на 5–10 °С перед всмоктуванням у компресор.

Визначившись з холодильним агентом, будують теоретичний цикл холодильної машини для вибраної схеми її роботи, орієнтуючись на дані, наведені в темі 4 (див. таблицю характерних точок).

Побудований цикл холодильної машини дозволяє визначити такі параметри:

- питому масову холодопродуктивність q_0 , Дж/кг:

$$q_0 = i_1 - i_4; \quad (5.2)$$

- роботу циклу, витрачену на стиснення 1 кг холодильного агента, l , Дж/кг:

$$l = i_2 - i_1; \quad (5.3)$$

- питому теплоту конденсації або кількість теплоти, яку віддає 1 кг холодильного агента в конденсаторі під час охолодження і конденсації, q_k , Дж/кг:

$$q_k = i_2 - i_3; \quad (5.4)$$

- теплове навантаження на переохолоджувач визначають за формулою:

$$q_{по} = i_3 - i_3'. \quad (5.5)$$

Якщо процеси охолодження, конденсації і переохолодження відбуваються в конденсаторі, то

- питома теплота конденсації, q_k , Дж/кг:

$$q_k = i_2 - i_3; \quad (5.6)$$

- холодильний коефіцієнт циклу:

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l} = \frac{i_1 - i_4}{i_2 - i_1}; \quad (5.7)$$

- продуктивність компресора або кількість холодильного агента, що циркулює в машині, G , кг/с:

$$G = \frac{Q_0}{q_0}; \quad (5.8)$$

- об'єм пари холодильного агента, яку всмоктує компресор, V_K , м³/с:

$$V_K = G \cdot V_1, \quad (5.9)$$

де V_1 – питомий об'єм холодильного агента в точці 1, м³/кг;

- теплоте конденсації (загальна кількість теплоти, що відводиться від холодильного агента – теплове навантаження на конденсатор), Q_k , Вт:

$$Q_k = G \cdot q_k. \quad (5.10)$$

За цією кількістю теплоти визначають:

- теплопередавальну поверхню конденсатора холодильної машини, F , м²:

$$F = \frac{Q_k}{k(t_{хол} - t_{cep})}, \quad (5.11)$$

де k – коефіцієнт теплопередачі від холодильного агента в конденсаторі до охолоджувального середовища, Вт/(м²·град);

t_x, t_{cep} – температура охолодження агента і середовища, що його охолоджує, °С;

- об'ємну холодопродуктивність холодильного агента, q_v , Дж/м³:

$$q_v = \frac{q_0}{V_1}; \quad (5.12)$$

- потужність (теоретичну) електродвигуна, потрібну для роботи компресора N_T , Вт:

$$N_T = G \cdot l; \quad (5.13)$$

- питому холодопродуктивність (теоретичну) холодильної машини, K_T , Вт/Вт:

$$K_T = \frac{Q_o}{N_T}. \quad (5.14)$$

Для обчислення параметрів за формулами (5.2)–(5.14) використовують вихідні дані і результати побудованого теоретичного циклу холодильної машини.

5.2. Двоступінчаста холодильна машина

У разі якщо в об'єкті, який охолоджується, необхідно підтримувати низьку температуру, у випарнику холодильної машини підтримують низький тиск випаровування p_0 , що відповідає температурі випаровування t_0 $-25\dots-30$ °С. При цьому значно зростає ступінь стиснення холодильного агента в компресорі p_k/p_0 . Це призводить до того, що знижується холодопродуктивність машини, збільшується витрата енергії на здійснення холодного циклу і зменшується холодильний коефіцієнт.

Отже, знижується економічність роботи холодильної машини. Крім того, наприкінці стиснення підвищується температура холодильного агента і погіршуються умови змащування компресора.

Отже, за умови значного стиснення застосовувати цикл одноступінчастої холодильної машини економічно не вигідно, а в окремих випадках майже неможливо.

Перехід до циклів багатоступінчастого стиснення – один із шляхів підвищення економічності холодильної машини. Якщо стиснення $p_k/p_0 \geq 9$, доцільно переходити до двоступінчастого стиснення.

У циклі двоступінчастих машин пара стискується послідовно у двох циліндрах (ступенях), а між ступенями стиснення пара охолоджується водою або рідким холодильним агентом. Пара охолоджується водою незначною мірою (точка 3 на рис. 5.16). Таке проміжне охолодження між ступенями є *неповним* (точка 3 на T - S -діаграмі). Для повного проміжного охолодження (точка 3' на T - S -діаграмі, рис. 5.16) використовують холодильний агент.

Схема двоступінчастого стиснення подана на рис. 5.1.

Пара під тиском p_0 всмоктується компресором першого ступеня (циліндр низького тиску *ЦНТ*) і стискується адіабатично до

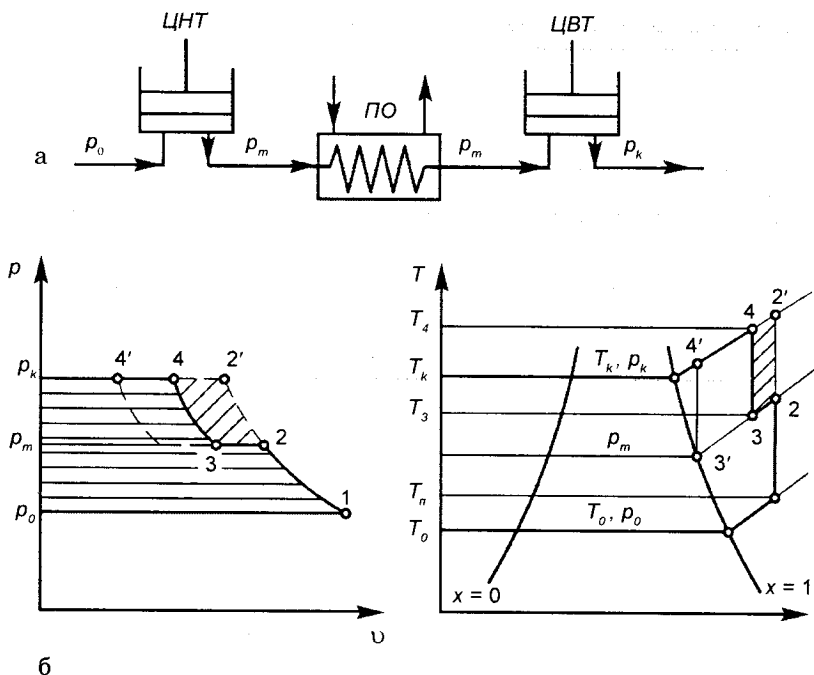


Рис. 5.1. Цикл двоступінчастого стиснення холодоагенту:
 ЦНТ – циліндр низького тиску; ПО – проміжний охолоджувач;
 ЦВТ – циліндр високого тиску; а – схема двоступінчастого стиснення;
 б – процеси в $P-V$; $S-T$ – діаграмах.

тиску p_n у процесі (1-2), після чого надходить у проміжний охолоджувач ПО, де охолоджується в процесі (2-3) до температури T_3 . Таке проміжне охолодження неповне, оскільки пара лишається перегрітою (точка 3) і не досягає стану насичення (точка 3').

Після проміжного охолодження пара всмоктується компресором другого ступеня (циліндр високого тиску ЦВТ) і адиабатично стискується в процесі (4-3) від p_n до p_k . Ступені низького і високого тиску можуть бути виконані у вигляді одного двоступінчастого компресора або двох одноступінчастих компресорів.

Загальні витрати дорівнюють сумі робіт двох ступенів стиснення в діаграмі $P-V$: S_{p_0} -1-2-3-4- p_k . Економія роботи, що визначається площею 2-3-4-2', досягається завдяки проміжному охолодженню.

Схему двоступінчастої холодильної машини з *неповним проміжним охолодженням* і цикл $T-S$ -діаграми наведено на рис. 5.2.

Рідкий холодильний агент (G , кг/с) з конденсатора $КН$ у стані (5) надходить у переохолоджувач $ПО$, де в процесі (5-5') переохолоджується. Переохолоджена рідина дроселюється в процесі (5'-5'') першим регулювальним вентиляем $PВ1$ до проміжного тиску p_m . Після вентиля $PВ1$ волога пара зі ступенем сухості x надходить у проміжну посудину $ПП$, де відокремлюється G_x , кг/с сухої пари від $G(1-x)$ рідини, кг/с. Рідина в стані (6) і кількості $G(1-x)$ дроселюється повторно в процесі (6-6') та надходить у випарник, де випарюється за температури t_0 у процесі (6'-1). У цьому процесі кількість теплоти (Q_0 , Вт) відбирається з охолоджувального середовища. Пара, що утворилась, всмоктується $ЦНТ$ і адиабатично стискується (процес 1-2) до проміжного тиску p_m . Стиснена пара з температурою перегрівання t_2 і тиском p_m надходить у проміжний водяний холодильник $ПХ$, де охолоджується до стану точки (3).

Перед входом у $ЦВТ$ пара з охолоджувача в стані (3) змішується з парою, відокремленою в проміжній посудині $ПП$ у стані (3'), утворюється стан (3''). Циліндр високого тиску $ЦВТ$ стискує пару в адиабатичному процесі (3''-4''), після чого пара надходить у конденсатор $КН$, де охолоджується і конденсується в процесі (4''-5).

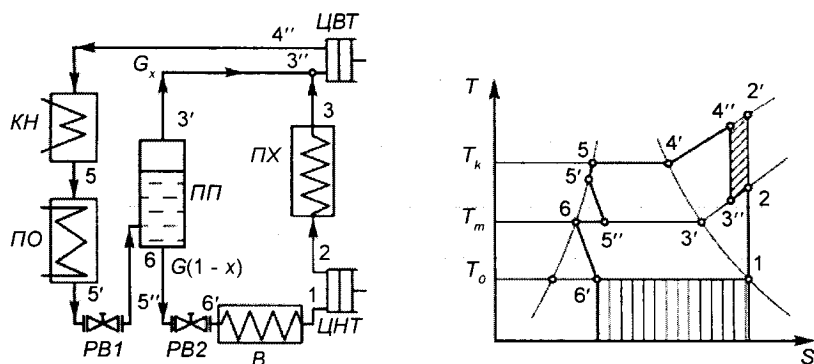


Рис. 5.2. Схема і цикл парової холодильної машини двоступінчастого стиснення:

$ЦВТ$ – циліндр високого тиску; $КН$ – конденсатор; $ПО$ – переохолоджувач; $PВ1$, $PВ2$ – вентиля регулювальні; B – випарник; $ПП$ – посудина проміжна; $ПХ$ – холодильник водяний проміжний

У разі якщо в схемі холодильної машини встановлено два випарники, рідина $G(1-x)$ у $ПП$ розподіляється на дві частини: G_2 надходить у випарник високого тиску p_m , де випаровується за температури t_m у процесі (6-3'), а G_1 після повторного дроселювання надходить у випарник низького тиску p_0 , де випаровується за температури t_0 у процесі (6'-1).

Отже, через різні елементи двоступінчастої машини циркулює неоднакова кількість холодильного агента – через $ЦВТ$, конденсатор і переохолоджувач проходить G , через випарник і $ЦНТ-G_1$, через магістраль $ПП-ЦВТ-G_2$, кг/с. При цьому $G_1 + G_2 = G$. З цієї причини зображення процесів двоступінчастого циклу в термодинамічних діаграмах є умовним, тому що кожний процес, показаний у діаграмі, відображає зміну 1 кг холодильного агента.

Неповне охолодження використовують, якщо температура охолодної води нижча за температуру пари в кінці стиснення.

У такому разі економія в роботі порівняно з одноступінчастим стисненням буде зображена площею $S_{2-3'-4''-2}$.

5.3. Схема абсорбційної холодильної машини

Робота абсорбційних холодильних машин відрізняється від компресорних тим, що *відведення теплоти від тіла, яке охолоджується*, у навколишнє середовище здійснюється через витрати зовнішньої енергії у вигляді теплоти, а не роботи.

В абсорбційних холодильних машинах як робочі речовини (холодоагенти) використовують розчини, що складаються з двох компонентів з різними температурами кипіння за однакового тиску. Компонент з низькою температурою кипіння виконує функцію холодильного агента, а з вищою температурою кипіння – абсорбента (вбирача). Найчастіше як холодильний агент застосовують аміак, а як абсорбент – воду, оскільки вона добре вбирає пари аміаку.

В абсорбційній холодильній машині (рис. 5.3), як і в пароконпресійній, холод утворюється завдяки кипінню холодоагенту (аміаку) у випарнику B за низької температури. Призначення конденсатора, регулювального вентиля і випарника таке саме, як і в пароконпресійній холодильній машині.

У випарнику до холодильного агента підводиться теплота Q_0 , яку віддає середовище, що охолоджується. У результаті холодильний агент кипить за температури T_0 і тиску p_0 . Пара холодильного агента, що утворюється, надходить в абсорбер A_0 , де вбира-

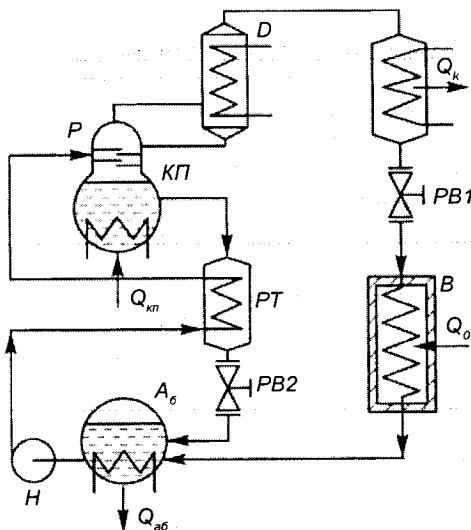


Рис. 5.3. Схема абсорбційної холодильної машини:

H – насос; P – ректифікатор; $КП$ – кип'ятильник; D – дефлегматор; $PB1$, $PB2$ – вентиля регульовальні; B – випарник; PT – теплообмінник регенеративний; A_0 – абсорбер

ється абсорбентом – водою з незначною конденсацією аміаку (слабкий розчин), що надійшла через регульовальний ventиль $PB2$. Процес абсорбції відбувається за тиску випаровування p_0 і супроводжується виділенням теплоти абсорбції $Q_{аб}$, яка відводиться охолоджувальною водою з температурою $T_{о.в.}$.

Міцний розчин, що утворюється, з абсорбера подається через регенеративний теплообмінник PT , ректифікатор P у кип'ятильник $КП$, де тиск $p_{кп}$ вищий. У кип'ятильнику холодильний агент (аміак) випаровується за високого тиску $p_{кп} > p_0$ внаслідок підвищення теплоти $Q_{кп}$ від джерела нагрівання. Пара аміаку, що виділилася з водоаміачного розчину, через дефлегматор D надходить у конденсатор і в ньому зріджується за температури T_k і тиску p_k , віддаючи теплоту конденсації Q_k охолодній воді. Одночасно в кип'ятильнику утворюється слабкий розчин аміаку, який дроселюється в регульовальному ventилі $PB2$ до тиску p_0 і повертається в абсорбер A_0 для вбирання пари аміаку з випарника.

Рідкий холодильний агент з конденсатора потрапляє в аміачний регульовальний ventиль $PB1$, дроселюється до тиску p_0 і надходить у випарник. Цикл повторюється знову.

Використання теплообмінника PT , ректифікатора P і дефлегматора D значно підвищує економічність холодильного циклу. Теплообмінник PT застосовується для підігрівання міцного розчину на шляху в кип'ятильник завдяки охолодженню слабкого розчину, що надходить з кип'ятильника в абсорбер (аналогічно зі схемою компресійної холодильної машини з регенеративним теплообмінником – див. рис. 4.6).

При цьому зменшується витрата нагрівальної пари в кип'ятильнику і охолодної води в абсорбері. Ректифікатор і дефлегматор використовують для очищення пари холодильного агента від пари абсорбенту, унаслідок чого отримують практично чистий аміак, що надходить у конденсатор.

Тепловий баланс такої машини дорівнює

$$Q_0 + Q_{кп} = Q_к + Q_{ад}. \quad (5.15)$$

Ефективність дії абсорбційної холодильної машини характеризується тепловим коефіцієнтом

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{Q_{кп}}. \quad (5.16)$$

Абсорбційну холодильну машину можна розглядати як систему, у якій здійснюються прямий і оборотний цикли.

У прямому циклі внаслідок перенесення теплоти від джерела високої температури в навколишнє середовище здійснюється робота, а в оборотному циклі ця робота витрачається на перенесення теплоти від джерела низької температури T_0 в навколишнє середовище (води, $T_{ос}$).

Ефективність прямого циклу характеризується термічним коефіцієнтом

$$\eta = \frac{L}{Q_{кп}}, \quad (5.17)$$

а оборотного – холодильним коефіцієнтом

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{L}. \quad (5.18)$$

Тоді з урахуванням (5.17)–(5.18)

$$\varepsilon_\alpha = \eta \cdot \zeta. \quad (5.19)$$

Для оборотного циклу Карно тепловий коефіцієнт можна записати у вигляді

$$\varepsilon^{обр} = \frac{T_{кл} - T_{ов}}{T_{кл}} \cdot \frac{T_o}{T_{ов} - T_k}. \quad (5.20)$$

З рівняння (5.20) випливає, що за однакових температур джерел T_o і $T_{ов}$ термодинамічна ефективність роботи абсорбційної холодильної машини нижча, ніж компресійної, тому що

$$\frac{T_{кл} - T_{ов}}{T_{кл}} < 1.$$

Перевагою абсорбційних машин є те, що для їх роботи можна використати дешеві джерела теплоти (відпрацьовану пару, відхідні гази, гарячу воду, сонячну енергію та ін.).

Література: [1, с. 44–50]; [2, с. 49–70]; [3, с. 27–34]; [4, с. 364–455].

Питання для самоконтролю

1. Які параметри є вихідними умовами розрахунку циклу холодильної машини?
2. З яких рекомендацій визначають температурні режими роботи холодильної машини?
3. Які параметри можна визначити з побудованого циклу холодильної машини?
4. Як визначають холодопередавальну поверхню конденсатора?
5. Як можна визначити теоретичну потужність електродвигуна компресора?
6. За якою формулою визначають теплоту конденсації?
7. Як визначають теоретичну холодопродуктивність холодильної машини?

Холодильні агенти і теплоносії ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН

- Загальні положення • Вимоги до холодильного агента • Теплоносії
- Системи машинного охолодження

Ключові слова: холодильні агенти (холодоагенти), теплоносії, охолоджувальне і охолодне середовище, переваги, недоліки.

6.1. Загальні положення

Холодильний агент – робоча речовина холодильної машини, яка під час кипіння або в процесі розширення віднімає теплоту від охолоджуваного об'єкта і потім після стиснення передає її охолодному середовищу (вода, повітря тощо). До холодильного агента висувається низка вимог: він повинен мати низьку температуру кипіння при тиску, який вище від атмосферного; помірні тиск і температуру конденсації; низьку температуру твердіння і високу критичну температуру; більшу теплоту пароутворення за малих питомих об'ємів пари; малу теплоємність і високу теплопровідність. Крім того, бажано, щоб холодильний агент був вибухонебезпечним, нетоксичним, негорючим, нейтральним до конструкційних матеріалів, інертним до мастильних матеріалів, недефіцитним і недорогим.

Залежно від температури кипіння при атмосферному тиску холодильні агенти поділяють на три групи: високотемпературні (вище ніж $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$), помірні (нижче ніж $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) і низькотемпературні (нижче ніж $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$). Основними холодильними агентами є аміак, фреони (хладони) і деякі вуглеводні. Фреони здебільшого не шкідливі і не горючі; нараховується більш ніж 50 різних фреонів та їх сумішів, які використовуються в усіх температурних групах.

Отже, **холодильний агент (холодоагент)** – це робоча речовина, що здійснює в холодильній машині оборотний коловий цикл, унаслідок якого теплота від середовища, що охолоджується, передається середовищу з вищою температурою – охолодному (воді, повітря).

Холодильними агентами можуть бути тільки ті речовини, які задовольняють певні вимоги: термодинамічні, фізико-хімічні, фізіологічні і економічні.

6.2. Вимоги до холодильного агента

Основними **термодинамічними вимогами** до холодильного агента є такими:

- тиск кипіння холодильного агента має бути вищим від атмосферного, щоб запобігти проникненню в систему повітря, що негативно впливає на роботу холодильної машини;
- тиск холодильного агента наприкінці стиснення повинен бути не надто високим, бо це може призвести до ускладнення конструкції і збільшення маси машини;
- теплота пароутворення має бути високою, це зменшує кількість холодоагенту для забезпечення необхідної холодопродуктивності;
- температура твердіння холодильного агента має бути низькою (тому що вона обмежує можливості досягнення низьких температур), а критична температура має бути високою (оскільки в разі її зниження зменшується холодильний коефіцієнт);
- питома вага і в'язкість холодильного агента мають бути малими для зниження гідравлічних втрат; використання холодильного агента з малою в'язкістю збільшує коефіцієнт теплопередачі і зменшує необхідні поверхні теплообміну;
- об'ємна холодопродуктивність (q_v) холодильного агента має бути досить великою (це зменшує габаритні розміри і масу компресорів); однак в разі підвищення q_v зростає різниця тиску в холодильній машині, що є небажаним.

Фізико-хімічні вимоги до холодильного агента є такими:

- бажано, щоб холодильні агенти розчинялись у воді (для уникнення утворення льодяних пробок за низьких температур), погано розчинялись у маслі за високих температур (щоб запобігти винесенню масла з компресора) і добре за низьких (щоб масло поверталось з випарника в компресор);
- холодильні агенти мають бути нейтральними до металів і прокладних матеріалів;

- холодильні агенти повинні бути негорючими і вибухобезпечними, з низькою в'язкістю, мінімальною текучістю крізь нещільності, з високим значенням коефіцієнтів теплопровідності і тепловіддачі;
краще використовувати холодильні агенти з певним запахом, кольором або іншими властивостями, щоб забезпечити можливість легко виявити втрати.

Фізіологічні властивості полягають у тому, що холодильні агенти мають бути неотруйними, не викликати подразнення слизових оболонок очей, носа і дихальних шляхів людини.

Економічні вимоги полягають у тому, що холодильні агенти мають бути дешевими і легко транспортуватися.

Фізичні властивості деяких холодильних агентів подані в табл. 6.1.

Вибір холодильного агента здійснюється залежно від призначення холодильної машини, умов її роботи і конструктивних особливостей.

Як холодильні агенти сьогодні найчастіше використовують воду, аміак, хладони і повітря. Сірчистий ангідрид і хлористий метил, які були відомі як холодильні агенти з 1874 р., сьогодні майже не застосовують. Вуглекислий газ використовують в основному для отримання «сухого» льоду.

Холодильні агенти транспортують у цистернах, металевих балонах. Балони фарбують у певні кольори: з аміаком – у жовтий, з фреоном – алюмінієвий, з вуглекислим газом – чорний.

Аміак застосовують у поршневих компресійних, а також в абсорбційних установках за температури кипіння $t_0 > -70$ °С. Основні переваги аміаку – малий питомий об'єм при температурах

Таблиця 6.1. Основні фізичні властивості холодильних агентів

Холодильний агент	Молекулярна маса	Нормальна температура кипіння	Температура замерзання	Об'ємна холодопродуктивність, q_v , кДж/м^3 , $t_0 = -15$ °С $t_k = +30$ °С	Відносні розміри компресорів
Вода	18,016	+100,0	0,0	–	–
Аміак	17,030	–33,4	–77,7	2166	1
Вуглекислота	44,100	–78,9	–56,6	7750	0,28
Фреон-12	120,920	–29,8	–155,0	1275	1,70
Фреон-22	86,480	–40,8	–160,0	2060	1,05
Фреон-142	100,480	–9,21	–130,8	665	3,27

випаровування (у межах його використання), велике значення теплоти пароутворення, мала розчинність у маслі (легко відокремлюється від масла, що потрапило в масловіддільник), не спричинює корозії чорних металів (однак агресивно діє на мідь та її сплави за наявності вологи).

До недоліків аміаку належить його отруйність (допустима концентрація його у виробничих приміщеннях не більше ніж 0,02 мг/дмі), горючість (суміш із повітрям 11–15% за об'ємом горить жовтуватим полум'ям), вибухонебезпечність (за умови концентрації повітря 16–26,8%).

Хладони (фреони) являють собою вуглеводні, у яких атоми водню замінені атомами хлору і фтору. Усі вони хімічно інертні, мало- або невибухонебезпечні.

Скорочене позначення холодильного агенту здійснюють за формулою $R-N$ (де R – символ, який означає холодильний агент; N – номер хладона, або наданий номер для інших холодильних агентів). Для хладонів номер розшифровується так. Перша цифра у двозначному номері або перші дві цифри у тризначному номері означають той насичений вуглеводень $C_n H_{2n+2}$, на основі якого отримали хладон. Встановлено такі цифри: 1 – CH_4 (метан); 11 – C_2H_6 (етан); 21 – C_3H_8 (пропан); 31 – C_4H_{10} (бутан). Потім записують кількість атомів фтору в хладоні: CF_2Cl_2 – $R12$, $C_3F_4Cl_4$ – $R214$, CCL_4 – $R10$. У разі наявності в хладоні незаміщених атомів водню їх число додають до числа десятків номера: $CFCl_3$ – $R11$, CF_2Cl_2 – $R12$, $CHFCl_2$ – $R12$, CHF_2Cl – $R22$. Якщо в хладоні є атоми брому, після основного номеру пишуть літеру B , а після неї – кількість атомів брому, тобто CF_2Br_2 – $R12B2$. У позначеннях сумішей холодильних агентів зазначають назву складових і їхні масові частки. Наприклад, суміш, до складу якої входить 90% $R22/R12$ (90/10). Такі холодильні агенти, як аміак ($R717$), хладони $R12$ і $R22$, використовують у компресорних холодильниках для отримання температур кипіння $-30 \dots -40$ °C без вакууму в системі охолодження. Холодильний агент $R12$ застосовують в одноступінчастих холодильних машинах за температури конденсації не більше ніж 75 °C та температури кипіння не нижче ніж -30 °C.

Холодильний агент $R22$ використовують у машинах з поршневим і гвинтовим компресорами одно- і двоступеневого стиснення, а також у побутових холодильних машинах. Діапазон температур кипіння від -10 до -70 °C за температури конденсації не вище ніж 50 °C. Для поліпшення розчинення й циркуляції масла замість $R22$ використовують суміші $R22$ і $R12$, азеотропну суміш

R502 застосовують переважно в низькотемпературних одноступінчастих холодильних машинах за температури конденсації близько $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ і температури кипіння близько $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Азеотропні суміші (R500, R502, R503) – це нероздільно киплячі однорідні (гомогенні) суміші, що переганяються без поділу на фракції і без зміни температури кипіння. Їх застосовують порівняно нечасто (у побутових кондиціонерах).

Для практичного використання перспективними є такі холодоагенти:

- для високотемпературних холодильних машин – R22/R114; R143/R12; R13B1/R12; R12/R142; R22/R12; R142/CO₂;
- для низькотемпературних холодильних машин – R13/R12; R13B1/R12; R13B1/R22; R13/R22/R12 азот.

6.3. Теплоносії

Теплоносії – це речовини, за допомогою яких теплота відводиться від об'єктів, що охолоджуються, і передається холодильному агенту. Схему охолодження теплоносієм показано на рис. 6.1.

Охолоджений у випарнику *В* теплоносій (вода, розсіл) насосом *Н* нагнітається в батарею *Б*, установлену в об'єкті, що охолоджується, де він приймає теплоту, а потім повертається у випарник і віддає його холодильному агенту, що кипить. У холодильній техніці теплоносії застосовують, де безпосередньо охолодження холодильним агентом неможливе або небажане.

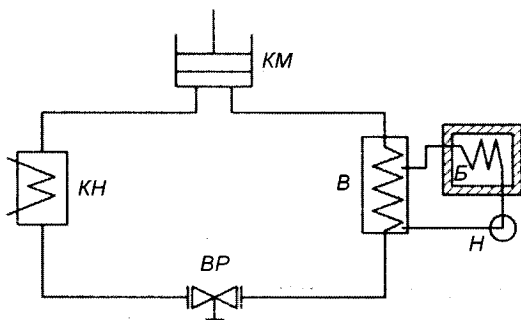


Рис. 6.1. Схема принципова охолодження теплоносієм:

КМ – компресор; *В* – випарник; *Б* – батарея; *Н* – насос; *BP* – вентиль регулювальний; *КН* – конденсатор

Теплоносії називають також холодоносіями, якщо розглядати процес перенесення «холоду» від випарника до об'єкта, що охолоджується.

У холодильній техніці застосовують водні розчини солей (розсолів) NaCl , MgCl_2 , CaCl_2 , що не замерзають при відносно низьких негативних температурах.

Температура замерзання їх знижується до певного значення концентрації солі, що відповідає так званій криогідратній (евтектичній) точці.

Температура замерзання, що відповідає криогідратній точці, є найнижчою для даного розчину (рис. 6.2). Подальше збільшення концентрації супроводжується підвищенням температури замерзання.

Гілки кривих, що знаходяться ліворуч від криогідратної точки, – криві відділення льоду, праворуч – криві відділення солі.

Для хлориду натрію найнижча температура замерзання (точка K) $-21,2^\circ\text{C}$ за концентрації $23,1\%$, для хлориду кальцію (точка K_1) -55°C за концентрації $29,9\%$.

Слід пам'ятати, що зі збільшенням концентрації розсолу збільшується його маса, зменшується теплоємність, тобто збільшуються витрати енергії на перекачування розсолу. З іншого боку, зниження концентрації розсолу може призвести до замерзання у випарнику.

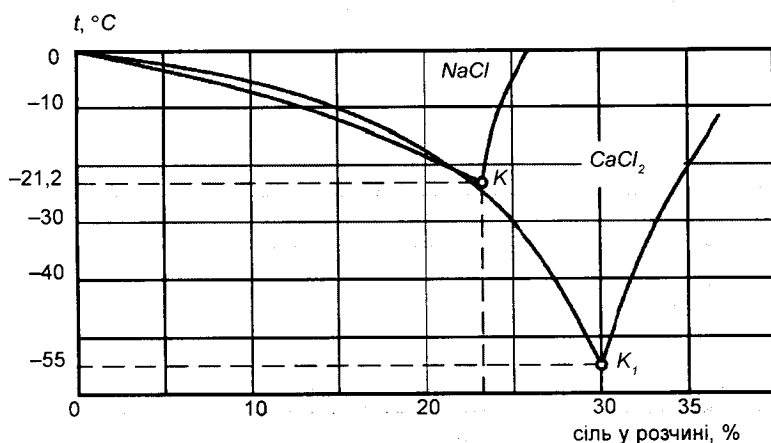


Рис. 6.2. Залежність температури замерзання розсолу від концентрації солі

Рекомендується концентрацію розсолу вибирати, виходячи з того, що його температура замерзання має бути на 5–8 °С нижчою від температури кипіння холодильного агента. Тому розсіл NaCl можна застосовувати тільки за температури кипіння агента вище ніж –15 °С, а розсіл CaCl₂ – за температури кипіння агента вище ніж –45...–48 °С.

Розсоли за наявності кисню повітря спричинюють велику корозію металів. Щоб уникнути надходження кисню в розсіл, застосовують закриту розсольну систему. З метою зменшення корозії в розсіл додають пасиватори (речовини, що уповільнюють корозію металів) – силікат натрію, хромову сіль, фосфорні кислоти.

Задля зменшення втрат на тертя, збільшення продуктивності насосів іноді в розсіл додають високомолекулярні сполуки – полімери 0,03–0,07%. Такі полімери називають *поверхнево-активними речовинами* (ПАР).

Для температур нижче ніж –50 °С як холодоносії використовують органічні речовини – водний розчин етиленгліколю з температурою замерзання –72 °С, хладон R11.

Як теплоносії можна використовувати повітря, однак воно має низьку теплоємність.

6.4. Системи машинного охолодження

Для відведення теплоти з охолоджувальних приміщень холодильника застосовують такі системи: безпосереднього охолодження, повітряне, комбіноване. Остання система (змішане охолодження) ґрунтується на одночасному охолодженні камер двома або всіма наведеними вище системами.

Безпосереднє охолодження. У системі охолодження рідкий холодильний газ з конденсатора, пройшовши регульовальний вентиль (дросель, кран), надходить у випарні батареї, які розташовані в охолоджувальних приміщеннях. За рахунок теплоти зовнішнього повітря холодильний агент кипить, унаслідок чого повітря охолоджується. З батареї пари холодильного агента відсмоктує компресор. За способом подання рідкого холодильного агента у випарні батареї системи безпосереднього охолодження поділяють на насосні і безнасосні.

У *безнасосних системах* рідина надходить у батареї внаслідок дії різниці тисків конденсації і кипіння холодильного агента, а в *насосних* вона подається за допомогою спеціальних насосів.

Більшість аміачних холодильних установок є безнасосними.

Принцип роботи холодильної установки при безпосередньому охолодженні наведено на рис. 6.3.

У цій установці для створення низьких температур використовується кипіння фреону (кипить за атмосферного тиску, якщо температура становить $-15...-45\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Компресор 3 призначається: для відсмоктування парів фреону з випарників 2, щоб у них підтримувався низький тиск, а надалі пара перетворюється на рідину; для стиснення пари з метою підвищення тиску, а також температури для наступної конденсації; для виштовхування цієї пари в конденсатор 5, який охолоджує стиснену в компресорі пару фреону і конденсує її. Отже, у трубопроводі 4 після проходження конденсатора фреон перебуває в рідкому стані під тиском, який створює компресор 3. Конденсатори охолоджуються водою або повітрям, а тому мають різну конструкцію.

Теплообмінник 6 потрібний для переохолодження фреону, який компресор 3 висмоктує з випарників 2 і який надходить із конденсатора 5 за рахунок холодних парів. Отже, у теплообміннику рідкий фреон з конденсатора переохолоджується, а пари з випарників 2 перегріваються і надходять у компресор 3 в сухому вигляді.

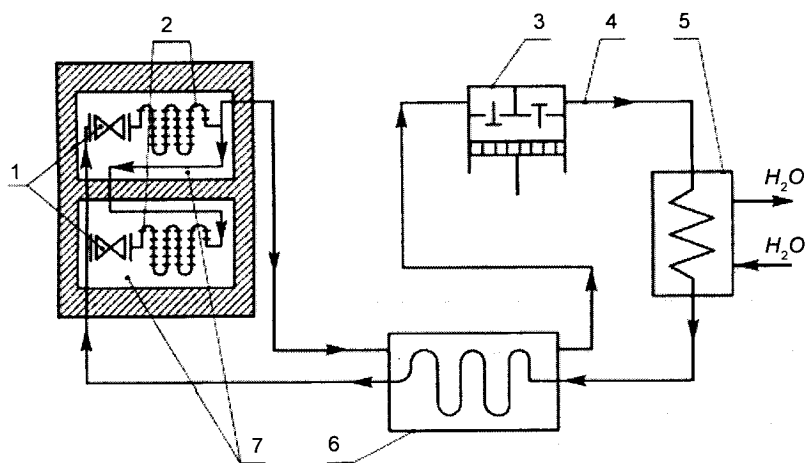


Рис. 6.3. Схема роботи холодильної установки при безпосередньому охолодженні:

1 – вентилі терморегулювальні (дроселючі); 2 – випарники; 3 – компресор; 4 – трубопроводи; 5 – конденсатор; 6 – теплообмінник; 7 – охолоджувані приміщення

Терморегулювальні вентиля (дроселі) 1 знижують тиск рідкого фреону в результаті тиску, створюваного компресором 3, до тиску кипіння. Водночас вентиля регулюють заповнення випарників 2 рідким фреоном. Завдяки терморегулювальному вентилю у випарник рідкий фреон надходить під низьким тиском.

У випарниках 2 рідкий фреон кипить за рахунок охолоджувального приміщення 7, унаслідок чого температура повітря в камері знижується. Випарники в цій системі мають форму змійовика, закріпленого на стінках приміщення, яке охолоджується. Вологу холодну пару, що утворюється під час кипіння, компресор відсмоктує через теплообмінник 6.

Недоліків системи безпосереднього охолодження кілька: її можна використовувати лише для охолодження невеликих (до 150 м²) холодильних камер; у кількох камерах однією машиною важко підтримувати потрібну температуру під час охолодження; в охолоджувані приміщення іноді проникає запах холодильного агента, який може передаватися продуктами; горючі холодильні агенти є пожежонебезпечними.

Розсольне охолодження в камерах досягається в результаті теплообміну між повітрям і холодильним розсолом, що циркулює в батареях, розміщених біля стін або під стелею. Розсіл охолоджується у випарнику під час кипіння холодильного агента, а циркулює в батареях завдяки роботі насоса.

Принцип охолодження камер сховища за цією системою схематично зображений на рис. 6.4.

Призначення вузлів (3, 4, 5, 7) за цією схемою таке саме, як і в системі безпосереднього охолодження (рис. 6.3), відрізняється лише формою випарника.

За наведеною схемою (рис. 6.4) випарник 4 – це циліндр, у середині якого розміщений пучок труб, якими рухається розсіл. Через терморегулювальний вентиль (дросель) 8 у міжтрубний простір випарника 4 надходить рідкий фреон (аміак), де він кипить, охолоджуючи розсіл до температури $-15...-30^{\circ}\text{C}$.

Охолоджений розсіл насосом 5 по трубопроводу 3 подається в охоложені батареї 6, розташовані на стінках або під стелею сховища, а потім надходить у випарник для охолодження.

При розсольному охолодженні холодильний агент не проникає в камери з випарника, оскільки всі його трубопроводи розташовані в машинному відділенні, а температуру повітря в окремих камерах регулюють, змінюючи кількість розсолу, що надходить до камери. Перевагою цієї системи можна вважати також меншу пожежонебезпечність. Проте є й недоліки: потреба в додатковому

обладнанні (випарник, розсольний насос), а також у великих площах машинного відділення (для розміщення всього обладнання); соляний розчин спричинює вихід з ладу трубопроводів і батарей охолодження; потреба в компресорах великої холодопродуктивності, що знижує економічність їхньої роботи; значні витрати енергії на одержання і передавання холоду.

Повітряне охолодження. Полягає в тому, що в камери надходить повітря, яке охолоджується повітроохолодником. Охолоджуючи камери, повітря теплішає і зволожується, а далі (проходячи через повітроохолодник) воно знову охолоджується і частково висушується. Повітроохолодники поділяють на сухі і мокрі. У повітроохолодниках сухого типу повітря охолоджується внаслідок стикання холодильного агента, що кипить, або холодильного розсолу із сухою поверхнею батарей. У повітроохолодниках мокрого типу повітря охолоджується в результаті безпосереднього контакту його з холодним розсалом або водою, що розбризкується. На практиці найчастіше застосовують повітроохолодники сухого типу.

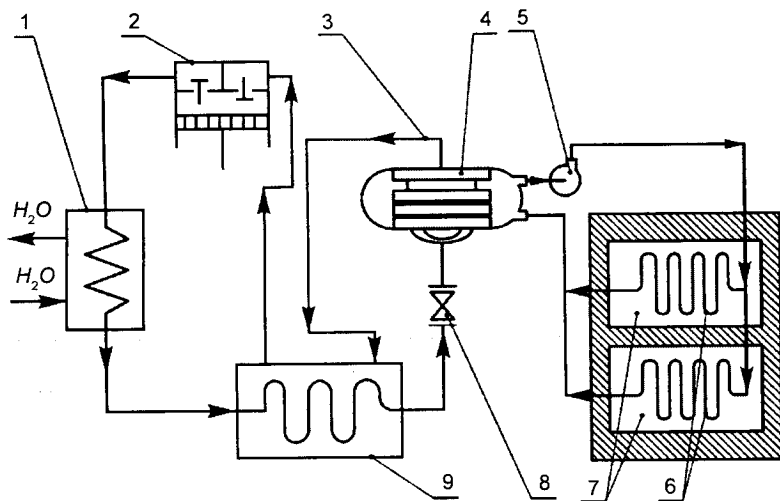


Рис. 6.4. Схема роботи холодильної установки при розсольній системі охолодження:

1 – конденсатор; 2 – компресор; 3 – трубопроводи; 4 – випарник; 5 – насос; 6 – батареї охолоджені; 7 – приміщення охолоджувані; 8 – вентиль (дросель) терморегулювальний; 9 – теплообмінник

Принцип роботи установки (машини) й охолодження камери за допомогою повітряної системи схематично наведено на рис. 6.5.

Призначення вузлів (1-3, 8, 9) за цією схемою таке саме, як і в попередніх схемах. Відмінності полягають у такому.

Пройшовши дросельовальний вентиль 4, рідкий холодильний агент надходить у повітроохолодник 5, який являє собою змійовик з оребрених труб, огорожений дифуззором. У дифуззорі встановлений електродвигун із вентилятором 6, що подає повітря через змійовик 5, у якому кипить холодильний агент. Повітря при цьому охолоджується, нагнітається по повітропроводу 7 і подається на охолоджувані продукти.

Перевагами цієї системи є:

- 1) завдяки збуджувальній циркуляції повітря інтенсифікується теплообмін між ним і продуктами;
- 2) є можливість заздалегідь охолоджувати й висушувати свіже повітря, що подається, і камери для вентиляції;
- 3) можна регулювати температуру і вологість повітря в камерах: повітря рівномірно розподіляється по всій камері.

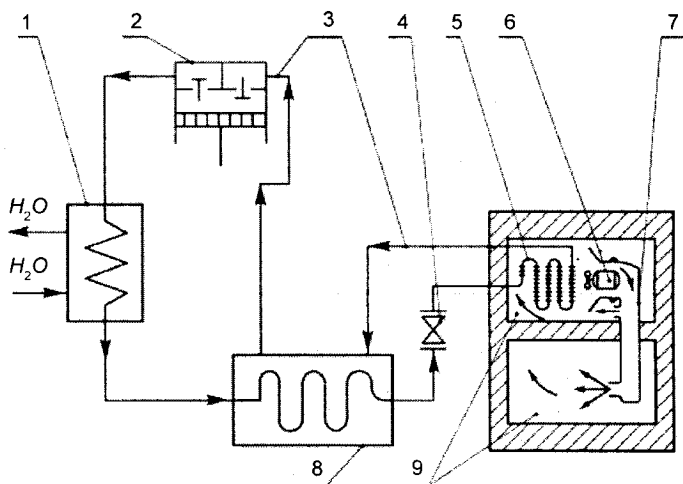


Рис. 6.5. Схема роботи холодильної установки при повітряній системі охолодження:

- 1 – конденсатор; 2 – компресор; 3 – трубопроводи; 4 – вентиль (дросель) терморегулювальний; 5 – повітроохолодник; 6 – вентилятор; 7 – повітровоід;
8 – приміщення охолоджувані; 9 – теплообмінник.

Недоліки повітряної системи полягають у значній усушці продуктів й у великих витратах електроенергії. Щоб запобігти усушці, вдаються до системи заходів захисту: продукти покривають поліетиленовою плівкою, мішковиною з льодяною глазур'ю; камери огороджують за допомогою повітряної сорочки і створюють у них льодяні екрани.

Розглянуті системи і способи охолодження широко використовуються на підприємствах заготівельно-переробного комплексу, зокрема споживчої кооперації.

Література: [1, с. 26–128]; [2, с. 43–326]; [3, с. 4–74]; [4, с. 364–455].

Питання для самоконтролю

1. Що таке холодильний агент? Яке його призначення?
2. Що таке теплоносій? Яке його призначення?
3. У яких випадках теплоносій використовують замість холодильного агента?
4. Назвіть основні вимоги до холодильного агента.
5. Де застосовують теплоносії в холодильній техніці?
6. Назвіть причини зниження температури кипіння холодоагента у випарнику.
7. Які проблеми можна вирішити шляхом використання проміжних теплоносіїв у холодильній техніці? Назвіть види проміжних теплоносіїв.

Льодяне і льодосоляне охолодження

- Загальні положення
- Охолодження водяним льодом
- Охолодження льодосоляне
- Охолодження сухим льодом
- Льодовні і деякі способи заготівлі природного льоду

Ключові слова: лід, охолодження, теплоносії, льодогенератор, льодосоляні суміші, схеми охолодження, сухий лід, вуглекислота

7.1. Загальні положення

Застосовування льоду для охолодження має давню історію. Природний лід використовували протягом кількох століть, і до кінця минулого століття він був єдиним джерелом штучного холоду. У наш час значення льоду як засобу охолодження не зменшується. Найефективніше його застосовують у тих областях України, де є можливість добути велику кількість льоду завдяки природному зимовому холоду. Для цього призначені спеціальні споруди [1, 11, 18, 22].

Сьогодні льодяне охолодження широко застосовують у різних галузях народного господарства. Цьому сприяє не тільки доступність льоду, а й його властивості: велике значення теплоти плавлення, досить низька температура плавлення, можливість акумулювати в малому об'ємі порівняно велику кількість холоду при зміні агрегатного стану.

Для використання льоду як охолоджувача температура його плавлення має бути нижчою за температуру середовища, яке охолоджують (на 5–10 °С нижчою за температуру об'єкта охолодження).

Фізичні властивості льоду за температури 0 °С і атмосферного тиску є такими: температура плавлення 0 °С, теплота плавлення 333 кДж/кг; теплоємність 2,1 кДж/кг · К; теплопровідність 2,33 Вт/(м · К), густина 900 кг/м³. Кількість теплоти, що може бути відведена за допомогою льоду і льодяної води, визначають за формулою [11, 22].

$$Q_n = Q_n + Q_{пл} + Q_{не} = c_n \cdot G \cdot t_n + q_{пл} + c_w \cdot G \cdot t_w, \text{ кДж}, \quad (7.1)$$

де Q_n – теплота, витрачена на нагрівання льоду від температури t_n до 0°C , кДж;

$Q_{пл}$ – теплота, витрачена на плавлення льоду, кДж;

$Q_{не}$ – теплота, необхідна для нагрівання льодяної води до температури t_w , кДж;

c_n, c_w – масові теплоємності льоду і води, кДж/(кг·К);

G – маса льоду (води), кг;

$q_{пл}$ – прихована теплота плавлення льоду, кДж/кг.

Льодяне охолодження може бути здійснене безпосереднім охолодженням або з використанням проміжного теплоносія (вода, повітря).

Безпосереднє охолодження здійснюється в разі, якщо об'єкт, що охолоджується, знаходиться в прямому контакті з льодом. Для збільшення поверхні контакту з охолоджуваним об'єктом (наприклад, овочі, зелень) використовують подрібнений лід. Ступінь подрібнення має відповідати поверхні теплообміну льоду на одиницю його об'єму. Подрібнений лід розміщують відносно об'єкта, який охолоджують, так, щоб умови теплообміну були найсприятливішими.

Використання **проміжних теплоносіїв** (води, повітря) надає можливість іноді вирішити низку проблем, пов'язаних з особливостями об'єктів, що охолоджують.

Так, у молочному виробництві як теплоносій використовують воду. При цьому приміщення, де знаходиться лід, відокремлене від приміщень, де знаходиться об'єкт, що дозволяє здійснювати низку технологічних операцій, не контактуючи безпосередньо з льодом. Вода при цьому циркулює від об'єкта до льоду, і навпаки. Контакт води і льоду може відбуватися безпосередньо через стінку відповідного теплообмінника. Коефіцієнт тепловіддачі від води до поверхні льоду становить $116 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

Повітря як теплоносій (при природному або механічному його переміщенні) використовують у разі, якщо потрібно за високої відносної вологості повітря (до 95%) отримати температуру 5°C і вище. Цей спосіб пов'язаний з необхідністю інтенсифікації теплообміну (від льоду до повітря і від повітря до об'єкта, що охолоджується).

За природної циркуляції повітря лід знаходиться в ємностях, які мають щілини та інші конструктивні особливості для підвищення поверхні теплообміну. Коефіцієнт теплообміну з поверхнею льоду за природної циркуляції дорівнює близько $7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{год)}$.

У разі використання примусової циркуляції повітря за допомогою вентиляторів переганяється крізь шар подрібненого льоду. Теплообмін за цих умов значно інтенсифікується – до $17 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$.

7.2. Охолодження водяним льодом

Для організації тривалого функціонування виробництва з використання льоду для процесів охолодження можна використовувати природний або штучний лід.

Використання *природного льоду* має свої певні й очевидні переваги: малі матеріальні й енергетичні витрати, простота у використанні й обслуговуванні відповідних пристроїв. Тому основним питанням є заготівля льоду. Способи заготівлі можуть бути різними: з водойм, пошаровим наморожуванням льоду в градирнях. Вибір способу залежить від конкретних умов (клімату, характеру місцевості), технологічних можливостей і призначення льоду.

Лід із водойм заготовляють там, де за кліматичними умовами протягом зими температура не буває нижче ніж $-5 \text{ }^\circ\text{C}$, а товщина льоду досягає $200\text{--}250 \text{ мм}$ і більше. Лід у водоймах щільний, чистий, прозорий, його легко розпилювати на стандартні плити, зручні для транспортування. Для безпосереднього використання при охолодженні харчових продуктів необхідно отримати дозвіл санітарних органів на його заготівлю.

З метою полегшення трудомісткості процесів і зниження витрат слід застосовувати відповідні методи механізації робіт. Однак собівартість льоду з водойм завжди вища, ніж льоду, який заготовляють методом заморожування на майданчику на місці його зберігання. Тому заготівлю льоду пошаровим заморожуванням можна рекомендувати всім господарствам. Цей спосіб полягає в поступовому наливанні й заморожуванні тонких шарів води. При цьому отримують каламутний лід.

Заморожування льоду в градирнях застосовують у південних районах з порівняно нестійкими зимами, де температура не буває нижче ніж $-2\text{--}-3 \text{ }^\circ\text{C}$. Градирні являють собою дво- або триярусні споруди етажеркового типу, у верхній частині яких знаходяться форсунки для розбризкування води. Наморожений лід сколюють і відправляють у льодосховище.

Для зберігання льоду використовують тимчасові і постійні льодосховища. Тимчасові – це бурти льоду, наморожені на майданчику або утворені з блоків льоду з водойм, укриті

ізоляційними матеріалами; постійні льодосховища дороги, тому їх будують переважно в південних районах.

Якщо умови не дозволяють отримувати натуральний лід, використовують відповідні пристрої для виготовлення *штучного льоду* (вартість такого льоду в 4–5 разів вища за вартість природного). Штучний лід виготовляють за допомогою *льодогенераторів* – теплообмінних апаратів для заморожування води за допомогою *компресійної холодильної машини*.

Льодогенератори виконують за двома схемами – з проміжним теплоносієм і безпосереднім охолодженням.

Використання льоду для охолодження попри всі переваги має суттєвий недолік: за допомогою льоду не можна отримати температуру в об'ємах, які охолоджуються нижче ніж 8°C , що не дозволяє використовувати його для тривалого зберігання продуктів.

7.3. Охолодження льодосоляне

Для того, щоб отримати нижчі температури, ніж при охолодженні чистим льодом, застосовують лід у суміші із сіллю. У такій суміші одночасно і паралельно здійснюються процеси розчинення солі з утворенням розсолу та плавлення льоду з утворенням води і подальшим розчиненням солі. На плавлення льоду і розчинення солі витрачається теплота суміші, унаслідок чого її температура знижується. Найбільш низька температура суміші визначається криогідратною точкою (див. рис. 6.2), у якій в термодинамічні рівновазі знаходяться всі три фази – розсіл (розчин), сіль і лід.

Холодильники з льодосоляним охолодженням займають меншу площу, їх можна розмістити в будівлі, що стоїть окремо, у прибудові або підвальному приміщенні.

Слід мати на увазі, що плавлення льодосоляних сумішей супроводжується зміною їх температури внаслідок зміни концентрації солі в розчині. Виняток становлять суміші, що відповідають еквентичним концентраціям (див. рис. 6.2). У цьому разі евтектичний лід плавиться за сталої температури і найбільш низької для суміші льоду і солі.

Охолодження льодосоляною сумішшю можна здійснити такими способами:

- безпосереднім охолодженням повітря приміщень, що охолоджуються, через контакт його з поверхнею льодосоляної суміші;

- подаванням в камери холодного повітря, попередньо охолодженого льодосоляною сумішшю;
- циркуляцією холодного розсолу по змійовиках, установлених в охолоджуваних приміщеннях.

Безпосереднє охолодження повітря камер виконують за допомогою льодосоляної суміші, яку завантажують у *гранчасті кишені*, що установлені вздовж стін камери. Кишені виготовляють з дерев'яних брусків. Для кращої циркуляції повітря в камері встановлюють вентилятор. Льодокишенні холодильники прості за будовою, проте велика їх площа зайнята льодокишенями, крім того, низькою є інтенсивність процесу охолодження.

При використанні повітря для відведення теплоти від об'єкта, який охолоджується, вентилятором засмоктується повітря з камери охолодження, продувається крізь шар льодосоляної суміші і знову повертається (уже охолоджене) до камери. Така примусова циркуляція повітря інтенсифікує процес охолодження.

Охолодження камер циркуляцією холодного розсолу здійснюють двома способами: шляхом примусової циркуляції розсолу насосами і шляхом самоциркуляції – унаслідок різниці в густині розсолу.

При організації *примусової циркуляції розсолу* (рис. 7.1) лід періодично завантажується в генератор холоду 5, куди через зрошувач 4 надходить розсіл. Зрошуючи лід, розсіл охолоджується і

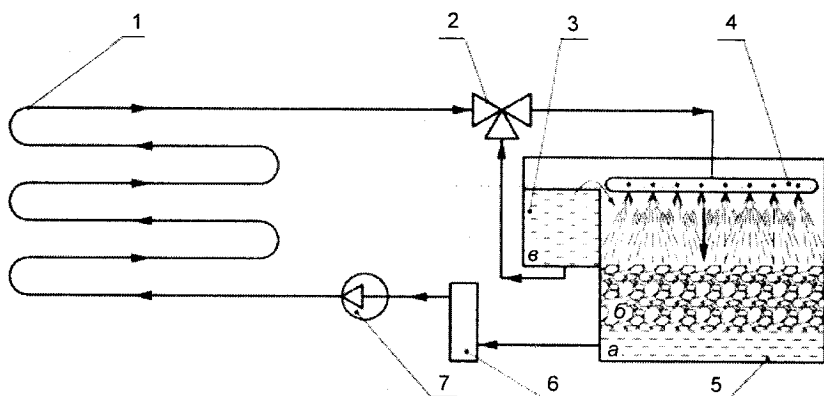


Рис. 7.1. Схема установки розсольного охолодження з насосною циркуляцією: а – розсіл; б – лід; в – сіль;

1 – батарея охолоджувальна; 2 – вентиль регульовальний; 3 – концентратор розсолу; 4 – зрошувач (колектор); 5 – генератор холоду; 6 – фільтр; 7 – насос

потрапляє в нижню частину генератора холоду, звідки насосом 7 крізь фільтр 6 подається в охолоджувальні батареї 1, розташовані в камерах.

Нагріваючись у камерах за рахунок теплоти охолоджуваних об'єктів, розсіл знову надходить до зрошувача генератора холоду. Для підтримання постійної концентрації розсолу частина «теплого» розсолу за допомогою регульовального вентиля надходить до концентратора розсолу. З нього більш насичений розчин перетікає в генератор холоду. Концентратор 3 періодично завантажується сіллю.

Рознесені в різні місця, камера і холодогенератор створюють сприятливі умови для обслуговування установки. Різниця температур розсолу в охолоджувальній батареї і повітря в охолоджувальному об'ємі становить 6–8 °С.

У схемі безнасосної циркуляції розсолу (рис. 7.2) розсіл, що виходить з генератора холоду 4, має концентрацію, а отже, і густину, яка менша, ніж на вході в генератор унаслідок розчинення його талою водою.

В охолоджувальній батареї 3 розсіл підігрівается, і його густина знижується. Завдяки такій різниці густини відбувається циркуляція розсолу через батарею 3, встановлену в камері, концентратор розсолу 1 і генератор охолоду 4.

Для охолодження невеликих місткостей (наприклад, теплоізованих контейнерів, кузовів автомобілів) доцільно

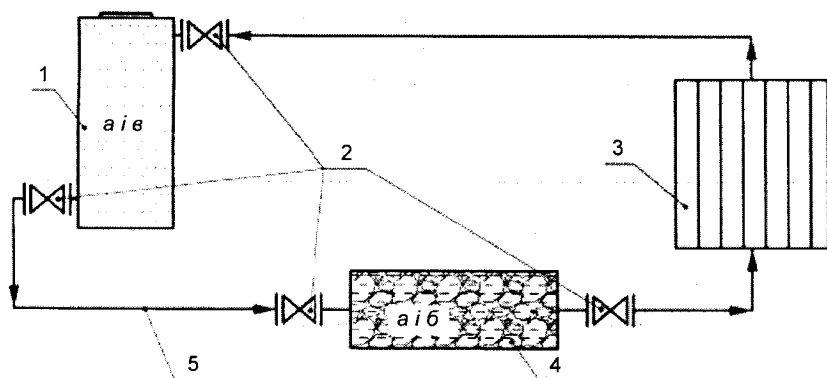


Рис. 7.2. Схема установки розсольного охолодження з безнасосною циркуляцією (природною): а – розсіл, б – лід, в – сіль;

1 – концентратор розсолу; 2 – вентиль регульовальний; 3 – батарея охолоджувальна; 4 – генератор холоду; 5 – трубопроводи

Таблиця 7.1. Характеристика суміші солі і льоду

Назва солі	Масова частка солі в розчині, %	Густина розчину, кг/м ³	Температура плавлення, °С	Теплота плавлення, кДж/кг	Теплоємність розчину, кДж/кг·К
Натрій сульфат	3,8	1030	-1,2	336	3,4
Цинк сульфат	27,2	1250	-6,5	214	3,2
Калій хлорид	19,3	1150	-11,1	299	3,3
Натрій хлорид	23,1	1170	-21,2	237	3,3
Кальцій хлорид	29,9	1280	-55,0	213	2,6

використовувати евтектичні розчини льоду і солі. Евтектики являють собою однорідні суміші льоду і солі й мають низьку температуру плавлення та досить велику теплоту плавлення (табл. 7.1).

Евтектичним розчином заповнюють металеві ємності (близько 90–94% їх об'єму), заморожують за температур, нижчих за температуру плавлення евтектики, після чого розміщують їх у ємностях, що охолоджуються. Там при поглинанні теплоти евтектик – розчин тоне за сталої температури. Кількість теплоти, що може бути відведена за допомогою такого холодоакумулятора, визначають за формулою (7.1).

Холодоакумулятори можуть бути використані багаторазово. Змінюючи місткості холодоакумуляторів і їх кількість, можна забезпечити охолодження достатньо великих об'ємів камер. Крім того, вони можуть бути використані як додаткові джерела охолоду в години пікових навантажень у стаціонарних холодильниках [1, 11, 22].

Загальну охолоджувальну поверхню граничних кишень у льодокишених холодильниках обчислюють за формулою

$$F_k = \frac{Q_0}{\alpha(t_n - t_{cm})} = 2 \sum_{i=1}^n (b+l) \cdot h, \quad (7.1)$$

де Q_0 – витрати холоду для камери, Вт;

α – коефіцієнт тепловіддачі від охолоджувальної бічної поверхні граничних кишень, Вт/м²·К;

n – кількість кишень;

b, l, h – габаритні розміри кишень, м.

Протягом доби величина охолоджувальної поверхні змінюється більш ніж на 20% більшими за середню розрахункову поверхню

Таблиця 7.2. Характеристика льодосоляної суміші (лід + NaCl)

Відношення солі до маси льоду, %	Температура плавлення суміші, °С	Холодопродуктивність 1 кг суміші, q_0 , кДж/кг	Середня густина розчину за температури 15 °С, кг/м ³
0	0	333	1,000
5	-3,1	314	1,031
10	-6,2	285	1,067
15	-9,9	260	1,098
20	-13,7	239	1,114
25	-17,8	214	1,152
30	-21,2	193	1,174

$$F = 1,2 \cdot F_k. \quad (7.2)$$

Добові витрати суміші (G , кг/добу) становитимуть

$$G = \frac{24 \cdot 3600}{q_0} Q_0, \quad (7.3)$$

де q_0 – питома холодопродуктивність суміші (табл. 7.2).

7.4. Охолодження сухим льодом

Сухим льодом називають тверду вуглекислоту, яка за атмосферного тиску та наявності припливу теплоти сублимує, тобто переходить із твердого стану в газоподібний, минаючи рідку фазу. Температура сублимації сухого льоду за атмосферного тиску становить $-78,9$ °С.

Пара, яка утворюється, перегрівається, що додатково до теплоти сублимації дозволяє отримати питому холодопродуктивність сухого льоду за температури 0 °С 637 кДж/кг, що в 1,9 разу більша, ніж водяного льоду.

Об'ємна холодопродуктивність сухого льоду, урахувавши його об'ємну масу (1300–1500 кг/м³), у 2,95 разу більша, ніж водяного льоду. Це дозволяє значно скоротити об'єми генераторів холоду.

Використання сухого льоду надає можливість отримати широкий діапазон низьких температур. У суміші з ефіром можна отримати температуру близько -100 °С. Проте вартість сухого льоду в 10 разів вища, ніж водяного.

Охолодження за допомогою сухого льоду можна здійснювати безпосередньо як при контакті з об'єктом, що охолоджується, так і з використанням проміжного теплоносія (повітря). В останньому разі повітря циркулює між охолоджувальною камерою і шаром подрібненого сухого льоду, який розміщують у металевих емностях (кишенях).

Сухий лід отримують за допомогою трьох послідовних стадій: одержання чистого вуглекислого газу, рідкої вуглекислоти і сухого льоду. Джерелами вуглекислого газу для виробництва сухого льоду є газоподібні відходи бродильних виробництв, заводів синтетичного аміаку й азототукових заводів. Останнім часом вуглекислоту отримують з природних джерел (підземні води, природні вуглекислі солі). Вартість сухого льоду здебільшого залежить від витрат на одержання чистого вуглекислого газу.

Рідку вуглекислоту отримують стисканням і подальшою конденсацією вуглекислого газу. У промисловості сухий лід отримують при високому (близько 7 МН/м²), середньому (близько 2 МН/м²) або низькому (близько 1 МН/м²) тиску.

Сухий лід зберігають у спеціальних сховищах шахтного типу, які добре ізольовані, а рідку вуглекислоту – у ресиверах.

7.5. Льодовні і деякі способи заготівлі природного льоду

Є кілька видів споруд для льодяного охолодження, проте основними вважаються льодовні.

Льодовні являють собою стаціонарні споруди для охолодження і короткочасного зберігання продуктів із запасом льоду на весь сезон. Льодовня складається з холодильних камер (однієї чи кількох), приміщення для льоду і допоміжних. Розміщення приміщення для льоду відносно холодильної камери (або камер) може мати кілька варіантів. Залежно від цього є льодовні з нижнім, верхнім і бічним розташуванням льоду.

Льодовні з нижнім розташуванням льоду – це примітивні холодильні споруди, і використовувати їх нині недоцільно.

У льодовні з верхнім розташуванням льоду забезпечується інтенсивна циркуляція повітря, а також відведення талої води; охолоджуюче повітря опускається в камеру з продуктами, звідки витіснене тепле повітря надходить угору, де й охолоджується льодом. Далі процес триває до повного відтавання льоду.

Для відведення води від льоду, що тане, є спеціальна стічна труба. Такий тип льодовні має певні недоліки: не дуже зручно

наповнювати камеру льодом; необхідно мати міцне перекриття з водонепроникними властивостями, яке могло б утримувати масу льоду; вологе повітря, конденсуючись на перекритті приміщення, потрапляє на продукти, що зберігаються в ньому.

Льодовні з бічним розташуванням льоду (рис. 7.3) найбільш досконалі як технічно, так і в експлуатації. Вони є наземними спорудами.

Камери для зберігання продуктів (Б) розташовані поряд з приміщеннями для зберігання льоду (В) та відокремлені від нього ізолюваною стінкою з отворами знизу і вгорі 2 для циркуляції повітря. Вода від льоду, що тоне, витікає крізь обладнані в підлозі стокки 6, що з'єднані з колектором. Останній має гідравлічний затвор, що перешкоджає проникненню до льодовні зовнішнього теплого повітря.

У холодильній камері (Б) відбувається природна циркуляція повітря, зумовлена різницею його щільності за висотою камери.

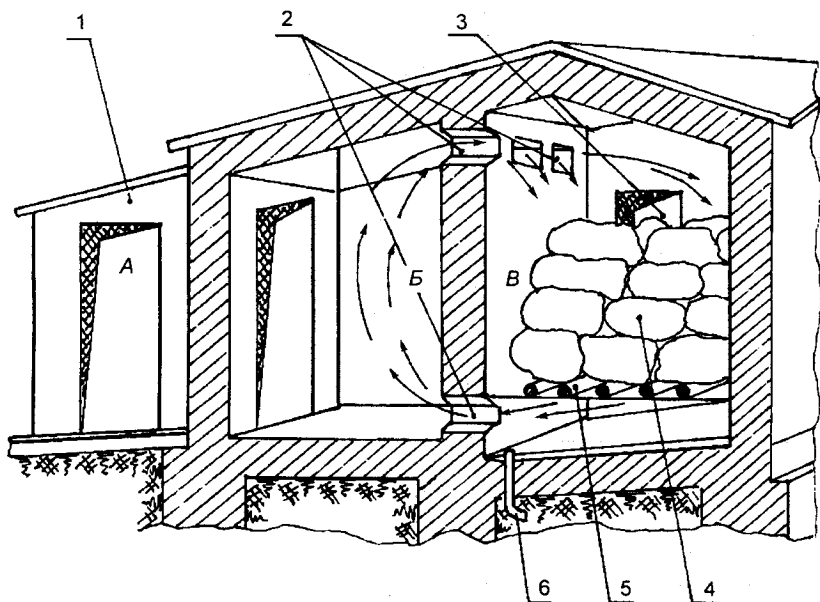


Рис. 7.3. Льодовня з бічним розташуванням льоду:

А – тамбур вхідний; В – камера зберігання продукції; В – камера зберігання льоду; 1 – тамбур; 2 – отвори для циркуляції повітряного потоку; 3 – отвір для завантаження льоду; 4 – лід; 5 – бруски дерев'яні; 6 – канал для стоку талої води

Охолоджене повітря, стикаючись з отворами в стіні, яка відокремлює камери з льодом від камер з продуктами, що охолоджуються і зберігаються, надходить до останньої. Тут повітря, поглинувши теплоту приміщення і продуктів, знову піднімається до стелі, а потім крізь верхній ряд отворів 2 у стіні, що відокремлює камери, надходить у сховище з льодом (В), й охолоджується. Далі процес повторюється.

За умови нормальної експлуатації льодовні завдяки інтенсивній циркуляції повітря температура в камері (В) практично є постійною протягом сезону і в середньому дорівнює 6 °С. Це оптимальний рівень температури, достатній для *короткочасного зберігання* більшості видів різноманітної продукції.

Льодовні з бічним розташуванням льоду характеризуються задовільними санітарними нормами зберігання, що дуже важливо, оскільки йдеться про продукти харчування. Проте цей тип льодовні має й певні недоліки, основними з яких висока первісна вартість будівництва та ізоляційних матеріалів. Пояснюється це тим, що розміри приміщень для зберігання льоду в кілька разів більші, ніж розміри холодильних камер для продуктів (див. формулу (7.3)).

Як уже зазначалося, при охолодженні льодом температура повітря в камері холодильної споруди, де зберігаються продукти, становить 4–6 °С. Проте в разі тривалого зберігання продуктів для збереження їх якості (щоб мати нижчу температуру) використовується подрібнений лід із сіллю. Температура танення цієї льодосоляної суміші нижча ніж 0 °С. Холодильна споруда, у якій застосовується ця суміш для одержання холоду, називається *спорудою льодосоляного охолодження*.

Для проектування будь-яких споруд льодосоляного охолодження треба визначити витрати льоду і солі. На основі таких розрахунків заготовляють лід. Існує кілька способів заготівлі природного льоду [11, 22, 23].

Спосіб шарового заморожування – найпростіший і найдешевший. Він не потребує значних витрат праці, а також складних технічних пристроїв і засобів доставки льоду в сховища. На практиці отриманий у такий спосіб лід зберігають і наморозжують в одному місці.

Спосіб заготівлі льоду з водоймищ – блоки льоду вирубують ся (або випилюються) і витягаються на берег. Невеликі брили вирубують ломом (випилюють ручними пилами). Складність цього способу полягає в тому, що влітку ділянку водоймища, з якого

мають взимку вирубувати лід, слід утримувати в задовільному стані (стежити за рослинністю, станом берегів, запобігати забрудненню, зараженню тощо). Практично дотримання цих умов неможливе та й вартість льоду, отриманого в такий спосіб, значно вища, ніж при наморожуванні на майданчиках. Через це до нього вдаються дуже рідко.

Спосіб заготівлі льоду наморожуванням сталактитів – цей спосіб найбільш придатний для регіонів України з порівняно м'якою і нетривалою зимою (часом він є основним способом заготівлі льоду).

Поблизу льодосховища, якщо є водопровід, встановлюється дерев'яна дво- або триярусна градирня, у верхній частині якої монтується зрошувальний пристрій (система трубопроводів із вертикальними насадками, які мають спеціальні розбризкувачі, розташовані в шаховому порядку). Цей пристрій живиться від водопровідної мережі і огороджується дерев'яними щитами.

За температури зовнішнього повітря нижче 0°C починається подавання води на градирню через розбризкувачі, звідки вона надходить на жердини верхнього ярусу градирні, стікає з них і замерзає у вигляді бурульок. Незамерзла вода доморожується на середньому і нижньому ярусах. У міру надходження води бурульки збільшуються, змерзаються одна з одною, утворюючи суцільну масу, яка за формою нагадує сталактити.

Перед використанням лід зрубують і переносять у льодосховища. Великі моноліти, окремі брили складають, порожнини між ними заповнюють дрібним льодом, який утворюється під час зрубання льоду, заливають водою для остаточного заморожування. Цей спосіб досить трудомісткий, що знижує його ефективність застосування, збільшує вартість льоду.

Штучний водяний лід широко використовується в заготівельному переробному комплексі, має різні види і форми. Загальну кількість льоду заготовляють, як правило, у вигляді великих блоків, їх одержують, заморожуючи воду у формах, занурених у спеціальні апарати – льодогенератори, у яких відбувається циркуляція холодного розсолу. У випарних секціях льодогенераторів розсіл охолоджується завдяки рідкому холодоагенту, що кипить.

Докладно ці питання висвітлені в літературі [11, 22, 20].

Література: [11; 22; 20].

Питання для самоконтролю

1. Які властивості льоду надають можливість використовувати його для охолодження?
2. Які особливості охолодження льодом і охолодження із застосуванням теплоносія вам відомі?
3. Назвіть способи заготівлі водяного льоду для охолодження. Які бувають льодосховища?
4. Що таке льодосоляне охолодження?
5. Назвіть основні елементи схеми охолодження камери з примусовою циркуляцією розсолу.
6. Назвіть основні елементи схеми охолодження камери за рахунок самоциркуляції розсолу.
7. У чому полягають переваги використання сухого льоду для охолодження?

Холодильні установки

- Загальні положення • Основні елементи холодильних установок

Ключові слова: компресор, конденсатор, випарник, морозильні камери, схеми.

8.1. Загальні положення

Штучне охолодження широко використовується при зберіганні швидкопсувних продуктів у технологічних процесах, пов'язаних зі зниженням температури напівфабрикатів або готових виробів, при кондиціюванні повітря тощо. Як теплообмінні (холодильні) апарати застосовуються конденсатори, випарники, переохолоджувачі, охолоджувальні батареї, холодильні камери та ін. [8; 12–16].

Основними елементами холодильних установок є компресори, теплообмінні апарати (випарники), конденсатор і регулювальна арматура (дроселі, детандери, регулювальні вентиля, клапани та ін.). Ці елементи з'єднуються між собою трубопровідною арматурою (трубопроводами). Зниження температури продукції здійснюється в холодильних камерах різноманітних конструкцій. Принципова схема холодильної установки зображена на рис. 8.1.

В охолоджувальний простір поміщають випарник 3, у який надходить холодильний агент у вигляді рідини. За постійного тиску й відповідної температури рідина кипить, причому необхідна для цього теплота віднімається від охолоджуваного приміщення. Пара, яка утворюється при кипінні, із випарника 3 всмоктується компресором 2, стискається і нагнітається в конденсатор 1, де під дією охолоджувальної води конденсується (за постійного тиску і відповідної йому температури). Потім рідкий холодильний агент проходить через регулювальний вентиль 4, який легко і зручно дозволяє змінювати кількість рідини, що надходить у випарник 3.

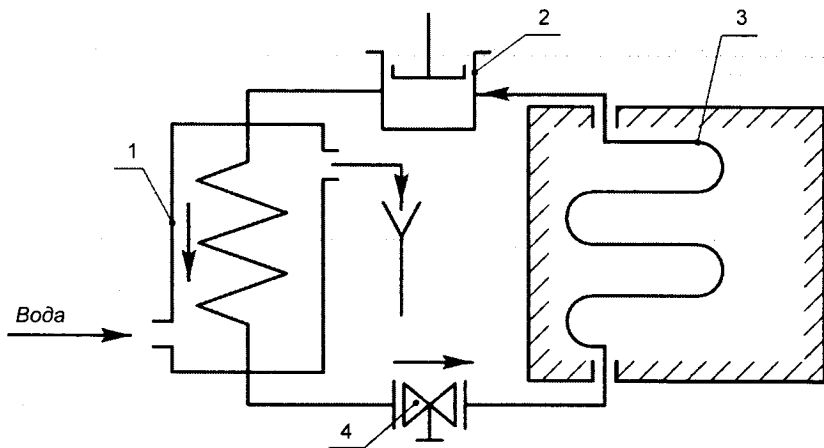


Рис. 8.1. Принципова схема холодильної установки

Застосування аміаку і фреону в холодильних машинах обумовлене низькою температурою їх кипіння. При використанні аміаку його тиск не перевищує 1,2–1,4 МПа і у випарнику, лише якщо температура кипіння менше $-33,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, стає нижче від атмосферного. Вартість аміаку порівняно невисока, проте він має два суттєві недоліки. Він вибухонебезпечний і справляє шкідливу дію на організм людини. Тому під час експлуатації аміачних холодильних установок слід жорстко дотримуватися правил охорони праці.

Фреон-12 і фреон-22 – холодильні агенти, які є нешкідливими, не мають запаху і є вибухобезпечними. Фреон-12 – один з основних холодильних агентів для великих, середніх і малих холодильних установок з поршневим компресором. Проте за температури вище ніж $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ він розкладається з утворенням шкідливих сполук. Тому використання відкритого полум'я в приміщенні з фреоновою холодильною установкою є небажаним.

Фреон-12 дуже текучий і проникає крізь найдрібніші нещільності у з'єднаннях і навіть крізь пори металу. Фреон-22 характеризується приблизно такими самими властивостями, але компресор, що працює на Фреоні-22, є значно компактнішим.

8.2. Основні елементи холодильних установок

Основний елемент холодильних установок – *компресор*. Це машина для стиснення повітря або іншого газу. Компресори поділяють на *турбокомпресори* (відцентрові), *поршневі*, *мембранні*, *ротаційні* (пластинчасті і з ротором, який котиться) та *гвинтові* (рис. 8.2).

Для холодильних установок, як правило, використовують поршневі компресори звичайного типу (не мембранні). Наведена нижче класифікація і характеристика стосуються переважно поршневих компресорів.

Усі компресори, як і холодильні установки, для яких вони призначені, класифікують за температурним режимом, холодопродуктивністю та холодильним агентом. Крім того, їх можна класифікувати за кількістю ступенів стиснення, типом привода, його розміщенням і частотою обертання, за конструкцією основних вузлів (циліндрів, поршня, кривошипно-шатунного механізму, сальника).

За конструктивними ознаками компресори класифікують залежно від будови кривошипно-шатунного механізму (безкрейцкопфні простої або одинарної дії та крейцкопфні подвійної дії), кількості циліндрів (одно- і багаточиліндрові), розміщення осі циліндрів (горизонтальні, вертикальні, V-подібні), будови блоку

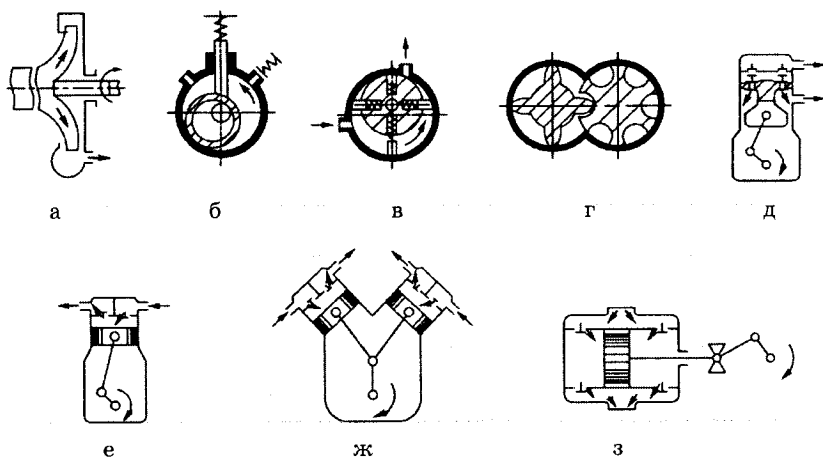


Рис. 8.2. Основні типи компресорів:

а – відцентровані; б, в – ротаційні; г – гвинтові; д, е, ж, з – поршневі

циліндрів і картера (картерні та рознімні), напрямом руху пари в циліндрі (прямоточні і непрямоточні) та ін.

Вертикальний компресор з прямоточним рухом пари холодильного агента в циліндрі зображений на рис.8.3а. Цей компресор має литий чавунний картер 16, у якому обертається колінчастий вал 1, що приводиться в рух від маховика 14. Через шатун 3 зворотньо-поступальний рух отримує поршень 4, розмішений у вертикальному циліндрі 12.

Циліндр компресора зверху закритий кришкою 9 з ребрами 7, які слугують для збільшення поверхні тепловіддачі. Під кришкою розміщено пружину 8, що упирається в кришку безпеки 10. Циліндр компресора закріплений на картері 16. На поршні зверху змонтовані три ущільнювальні чавунні кільця 11, які запобігають перетіканню пари (при стисненні холодильного агента) із робочої порожнини циліндра в порожнину всмоктування. У нижній частині поршня передбачається маслоснімне кільце 13, яке відокремлює всмоктувальну порожнину від картера й знімає зі стінок циліндру залишки мастила, що потрапляє із картера. Завдяки цьому зменшується кількість потрапляння мастила в теплообмінні апарати. Для догляду за механізмом руху і доступу до нижніх головок шатуна на картері передбачені бокові кришки 2 і 15, які слугують також для зняття колінчастого валу та догляду за системою змащування.

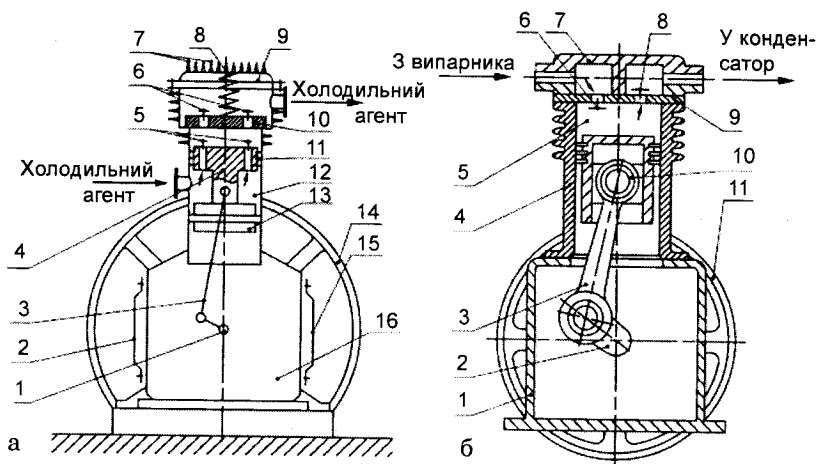


Рис. 8.3. Схема вертикального поршневого компресора:

а – прямоточний; б – непрямоточний

Компресор працює таким чином. Холодильний агент із всмоктувальної порожнини, яка розміщується в середній частині блоку циліндрів, через всмоктувальні клапани 5, розміщені у верхній частині поршня 4, надходить у порожнину над поршнем, у робочу порожнину циліндра. Тут при зворотному русі поршня пари стискаються і через нагнітальні клапани 6, розміщені в кришці безпеки 10, виштовхуються в нагнітальну порожнину, а з неї – у конденсатор.

У прямооточних компресорів як холодильний агент використовують аміак. Фреонові компресори є переважно непрямоточними.

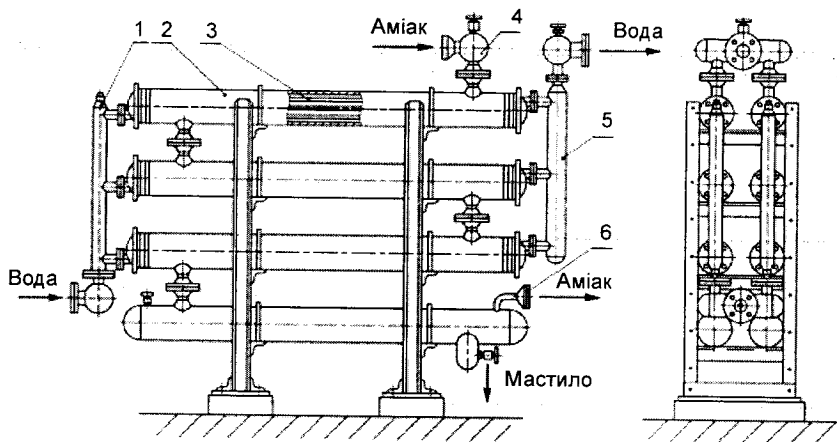
Унепрямоточному компресорі (рис. 8.3б) поршні виконуються непрохідними і, отже, всмоктувальні клапани розміщуються не на поршнях.

Поршень 4 приводиться у рух маховиком 11 через колінчастий вал 2, шатун 3 і палець 10. Колінчастий вал розміщений у картері 1. Головка циліндра 7 разом із нагнітальним клапаном 8 і всмоктувальними клапанами 6 монтується на клапанній плитці 9. Під час руху поршня 4 зверху вниз тиск парів холодильного агента в робочій порожнині циліндра 5 (над поршнем) стає нижчим, ніж тиск у всмоктувальному трубопроводі. Тому всмоктувальний клапан 6 відкривається, і пари холодильного агента надходять у циліндр компресора. Коли поршень з нижнього положення піднімається вгору, всмоктувальний клапан 6 закривається. Відбувається стиснення парів, яке тримає доти, доки тиск у робочій порожнині не перевищить тиск у нагнітальній лінії установки. Після цього нагнітальний клапан 8 відкривається, і стиснені пари прямують у нагнітальну лінію, яка зв'язує компресор із конденсатором.

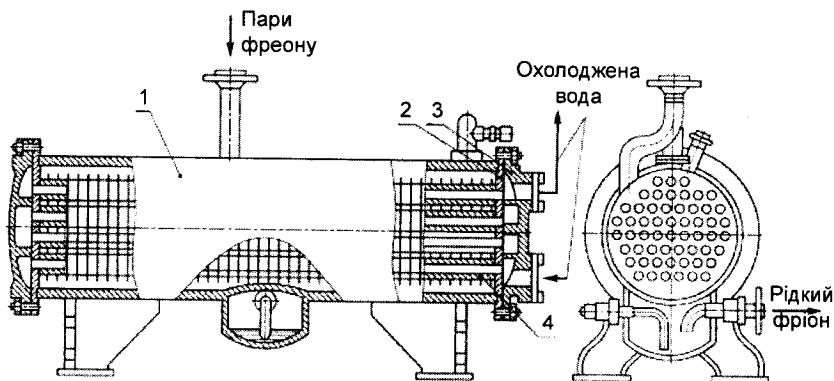
У циліндрах непрямоточних компресорів холодильний агент здійснює зворотно-поступальний рух, і, отже, між ним і стінками циліндрів відбувається більш інтенсивний теплообмін, ніж при проходженні його прямоютоком. Тому непрямоточні компресори застосовують в установках малої холодопродуктивності (до 100 кВт). У той самий час у непрямоточних компресорах встановлений більш легкий поршень, менші сили інерції неурівноважених рухомих частин.

Стиснені компресором пари холодильного агента надходять в охолоджувальний апарат, де слід забезпечити високу інтенсивність тепловіддачі від конденсованого холодильного агента до охолоджуваного середовища.

Аміачний елементний конденсатор (рис. 8.4а) складається з кількох однакових елементів 2, що являють собою кожухотрубні конденсатори з невеликою кількістю труб.



а



б

Рис. 8.4. Конденсатори:

а – аміачний елементарний; б – фреоновий кожухотрубний

Вода надходить через колектори 1 в усі трубчасті елементи 2 і виходить через колектори 5. Аміак протитоком із колектора 4 рухається трубами 3, конденсується і виводиться через штуцер 6.

Для фреонових холодильних машин використовують горизонтальні кожухотрубні й кожухозмійовикові конденсатори зі зміювиковим повітряним охолодженням.

Фреоновий горизонтальний кожухотрубний конденсатор (рис. 8.4б) являє собою сталеву безшовну трубу 1 великого діа-

метру, до кінців якої приварені плоскі сталеві трубчасті решітки 2 з накатними ребрами 5. Конденсатор закритий чавунними кришками з перегородками 3 для утворення кількох ходів проточної води.

Випарник – теплообмінний апарат, у якому теплота віднімається від охолоджуваного середовища киплячим за низької температури холодильним агентом. Охолоджувальним середовищем для охолодження повітря камер і технологічних апаратів можуть бути проміжні теплоносії (розсіл, вода та ін.), для чого використовують розсільні та водяні батареї, або саме повітря охолоджуваних приміщень. Залежно від цього в холодильній техніці розрізняють випарники для охолодження розсолу (або води) і випарники для охолодження повітря. До останніх належать батареї та повітроохолоджувачі безпосереднього випаровування.

До комплекту вертикально-трубного секційного випарника (рис. 8.5а), який використовується в аміачних установках, входять розсільний бак 1 зі встановленими в ньому двома або кількома випарними секціями 2, кожна з яких складається з вертикальних коротких труб, зігнутих по кінцях і приварених з боків до горизонтальних колекторів 3. Секції випарника з'єднані колекторами для подання рідкого аміаку, відсмоктування пари і відведення мастила.

Рідкий аміак надходить від регулювальної станції у розподільний колектор випарника, а з нього – у секції. Через стояки 4, розміщені вертикально між колекторами, аміак заповнює нижній колектор і майже повністю вертикальні труби із зігнутими кінцями.

Отеплений розсіл із батарей холодильних камер надходить у бак, звідки пропелерною мішалкою прогоняється вздовж випарних секцій. Віддаючи теплоту холодній поверхні труб, розсіл охолоджується й перекачується насосом назад у батареї холодильних камер.

Пара, що утворилася при кипінні аміаку у випарнику, відсмоктується в компресор через верхні горизонтальні колектори і відділювачі рідини. Останні з'єднані дренажними трубами з нижніми колекторами 5.

Панельний випарник (рис. 8.5б) складається з прямокутного бака 5, у який занурена система 2 випарних секцій панельного типу. Окремі секції з поверхнею охолодження 5 або 10 м² складаються з двох горизонтальних трубчастих колекторів та двох вертикальних (також трубчастих) стояків, що утворюють прямокутну раму.

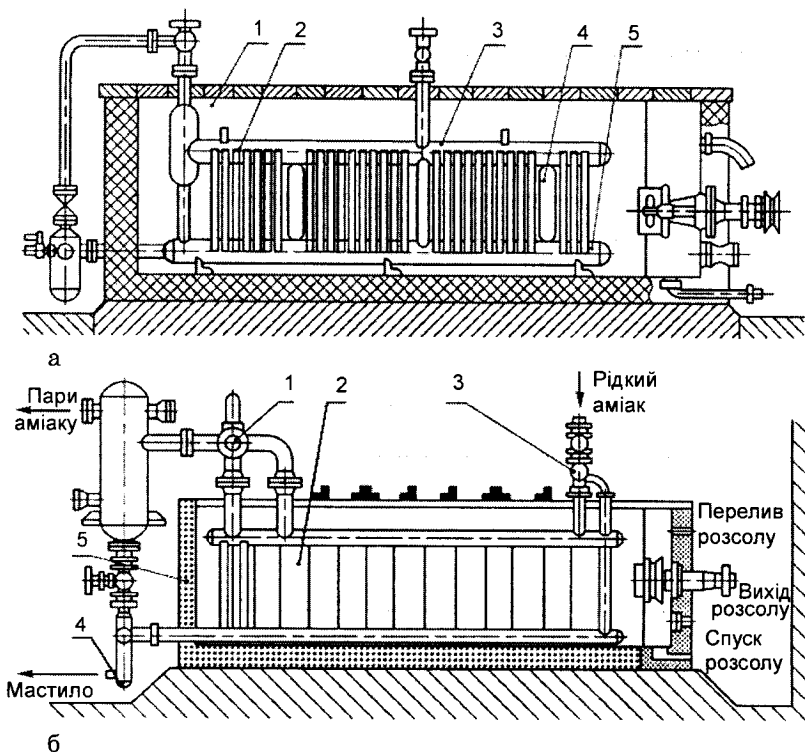


Рис. 8.5. Випарники:

а – випарник секційний; б – випарник панельний

У раму вварені панелі, які складаються з двох сталевих листів з виштампуваними на них канавками, що утворюють вертикальні канали. За довжиною секції встановлюють кілька панелей, які з'єднані між собою крайками. Секції вмикаються паралельно, для чого їх з'єднують у колектори: для подання рідкого аміаку 3, відведення парів аміаку 1 і видалення мастила. Рідкий аміак надходить у секції зверху. Через один із стояків він проходить у нижній колектор, звідти, заповнюючи канали панелей, піднімається майже до верхнього колектора. У панелях аміак кипить завдяки теплоті від циркулюючих в баці 5 розсолу або води. Пари аміаку, що утворюються при його кипінні, піднімаються у верхні колектори секцій, із них по колектору 1 надходять у відділювач рідини

і далі спрямовуються в компресор. Захоплені ними краплі рідкого аміаку звільнюються у відокремлювачі й повертаються в нижні колектори панелей.

Мастильний матеріал, який потрапив у випарник, виводиться в загальний мастилозбірник 4, з якого він видаляється в міру накопичення.

Для забезпечення циркуляції теплоносія в баку монтується пропелерна мішалка і перетин. Рівень теплоносія в баку має бути вищий від рівня у випарних секціях. У разі переповнення баку надлишок теплоносія зливається по переливній трубі в бак додаткової ємності. Охолоджений теплоносій перекачується насосом із бака через патрубок, що розміщений у його нижній частині, і подається в розсільні камерні батареї.

Отеплений теплоносій повертається в бак, надходячи зверху у відсік, де розміщується мішалка. Для опорожнення бака при огляді або ремонті випарника в його днищі вварена спеціальна спускна труба. Зверху бак закривається дерев'яними кришками.

У панельних випарниках завдяки високій швидкості руху теплоносія і майже повному заповненню випарних секцій рідким холодильним агентом забезпечується інтенсивний теплообмін. Випарники зручні для догляду, ремонту й очищення. На їх виготовлення витрачається невелика кількість сталевих труб. Проте вони зазнають інтенсивної корозії через вільний доступ повітря до теплоносія й насичення його киснем.

Для охолодження і заморозування напівфабрикатів або готових виробів використовуються холодильні камери, які за

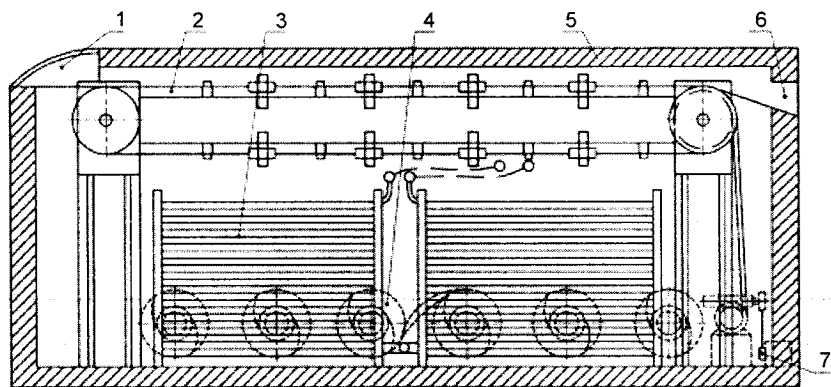


Рис. 8.6. Камера морозильна тунельна

конструктивною ознакою можна поділити на камерні, тунельні, люлькові та шафові. У камерах повітря охолоджується за допомогою батарей, розміщених уздовж стін під дахом, у яких циркулює холодильний агент.

Швидке заморожування досягається дією охолодженого до -30°C повітря, яке рухається уздовж продуктів з великою швидкістю.

Тунельна морозильна камера (рис. 8.6) складається з корпусу 5, покритого пробковою ізоляцією 400 мм завтовшки. У корпусі розміщуються дві батареї 3 безпосереднього випаровування. Над батареями розміщується конвеєр 2 зі стрічкою із дротової сітки. Конвеєр приводиться у рух від електродвигуна 7 через черв'ячний редуктор і варіатор швидкості, за допомогою якого можна регулювати тривалість.

Завантаження продукту на конвеєр здійснюється через отвір 1, а розвантаження – через отвір 6.

Література: [2, с. 320–326]; [3, с. 29–34, 71–74]; [4, с. 29–74; 12–16].

Питання для самоконтролю

1. Наведіть схему парової компресійної й абсорбційної холодильних установок.
2. Які холодильні установки застосовуються в сільському господарстві? Які їхні основні характеристики?
3. Планування холодильника. Холодильні машини, що встановлюються в холодильниках.
4. У чому полягають основні принципи автоматизації холодильних установок?
5. Як вибирають холодильну установку?
6. Охарактеризуйте прямооточний і непрямоточний поршневий компресор.
7. Опишіть конструкцію тунельної холодильної камери.

Визначення холодильної потужності і вибір холодильної установки

- Машинне охолодження • Холодильні установки • Визначення потужності і вибір установки • Автоматизація холодильних установок

Ключові слова: холодильник, хладони, схеми установок, тепловий потік, холодопродуктивність, тепловий баланс, параметри, автоматизація.

9.1. Машинне охолодження

Споруди, призначені для охолодження, підморожування, заморожування і зберігання сировини та продуктів, називають **холодильниками**. Холодильники, обладнані холодильними машинами, дістали назву **холодильників із машинним охолодженням**. Холодильники з машинним охолодженням і комплектом іншого устаткування називають **холодильними установками**.

Холодильна машина, у свою чергу, складається з комплекту устаткування, необхідного для здійснення холодильного процесу (циклу). Фізичне тіло, за допомогою якого здійснюється холодильний цикл, називається **робочим тілом**, або **холодильним агентом (холодоагентом)**. До холодильних агентів висувають низку вимог (див. також тему 6). За атмосферного тиску вони повинні мати низьку температуру кипіння (табл. 9.1).

Холодоагент має бути нешкідливим для здоров'я людини, вибухобезпечним, мати хімічну інертність до металу і мастильних матеріалів. Його важливим показником є **питома холодильна потужність**.

У холодильних машинах як холодоагенти застосовують аміак і хладони (фреони) – галогенопохідні насичених вуглеводів ($C_n, H_x, F_y, Cl_z, Br_r$). Скорочене позначення холодоагента RN, де

Таблиця 9.1. Фізичні властивості деяких холодоагентів [3].

Холодоагент	Хімічна формула	Міжнародний індекс	Температура кипіння при 0,1МПа, °С	Теплота пароутворення за температури -15 °С, кДж/кг	Температура замерзання, °С
Вода	H ₂ O	–	+100		0
Вуглекислота	CO ₂	–	-78,9		-56,6
Хладон-12	CF ₂ Cl ₂	R-12	-29,8	159,3	-155
Хладон-22	CHF ₂ Cl	R-22	-40,8	215,8	-160
Хладон-142		R-142	-9,21		-130,8
Аміак	NH ₃	R-717	-33,4	1310	-77,7

R – символ, що позначає холодильний агент, N – номер хладона.

Хладони R-12, R-22, R-142 не мають запаху, не впливають на продукти. Вони мають високу текучість, і тому слід приділяти особливу увагу герметичності з'єднань трубопроводів.

У холодильній техніці охолодження продукції здійснюється в холодильній камері безпосередньо холодоагентом. Якщо це технічно реалізувати важко, охолодження об'єкта здійснюють за допомогою холодоносія. Як такі використовують розчини солей NaCl, CaCl₂, MgCl₂.

У сільському господарстві найбільш поширеним є пароконпресійні та абсорбційні холодильні машини. Схеми і принципи роботи таких машин викладені в темах 5 і 6, а також у главі 7 [3]. Хладон R-12 – один із найбільш поширених холодильних агентів.

9.2. Холодильні установки

Хладонові і аміачні машини, призначені для охолодження молока, на фермах; м'яса і птиці на м'ясокомбінатах і фабриках; фруктів і овочів у сховищах як з безпосереднім, так і з розсольним охолодженням.

Холодильні установки, які використовуються на молочних фермах, обладнані акумулятором, так званим танком, призначеним для акумулювання холоду в інтервалах між доїннями. Ці установки працюють в автоматичному режимі [6]. Для охолодження молока на фермах застосовують холодильні установки

МХУ-8с, ТОМ-2А, КСА-500, СМ-1200, УВ-10, АВ-30 та ін. [12; 13]. На великих фермах використовують холодильні установки АВ-22, АУ-45 з розсольним охолодженням.

Схема холодильної установки МХУ-8с наведена на рис. 9.1.

Холодоагент, що циркулює у випарнику 13, відбирає теплоту від води у баці 2. Пара, що утворилася при кипінні хладона, проходить через теплообмінник 10, де вона додатково нагрівається рідким хладоном, який надходить із ресивера 8, має вищий тиск і температуру, ніж пара хладона після випарника 13. Пари хладона відсмоктуються поршневим двоциліндровим компресором 6 (ФВ-6). Стиснені в компресорі пари хладоагенту (при цьому їхня температура підвищується до $+70...+80\text{ }^{\circ}\text{C}$) нагнітаються в конденсатор 7, зовнішня поверхня якого обдувається навколишнім повітрям за допомогою вентилятора. Рідкий хладон надходить у ресивер 8, а потім у фільтр-осушувач 9, де він, проходячи крізь силікагель і фільтр, звільняється від вологи і забруднень. У теп-

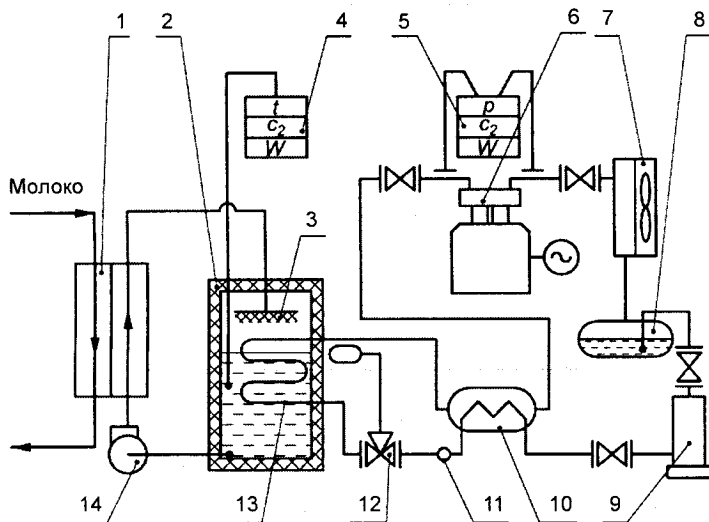


Рис. 9.1. Схема холодильної установки МХУ-8с:

1 – охолоджувач молока; 2 – бак для охолодження води; 3 – колектор; 4 – реле температури; 5 – реле тиску; 6 – компресор; 7 – конденсатор з повітряним охолодженням; 8 – ресивер; 9 – фільтр-осушувач; 10 – теплообмінник; 11 – пристрій оглядовий; 12 – вентиль терморегулювальний; 13 – випарник; 14 – насос

лообміннику 10 холодоагент, віддаючи теплоту парам хладона, додатково охолоджується. Проходячи через терморегулювальний вентиль 12, хладон дроселюється. При цьому знижуються як тиск, так і температура холодильного агента (дросель-ефект має позитивне значення). Тим самим хладон набуває здатності кипіти за низьких температур. З терморегулювального вентиля 12 він надходить у випарник 13, і цикл повторюється. Холодна вода з бака акумулятора 2 насосом 14 подається в охолоджувач молока 1.

Для регулювання товщини льоду на пластинах випарника в установці передбачене реле температури 4. Реле тиску 5 служить для захисту від надмірного підвищення тиску в конденсаторі.

Ступінь охолодження (величину зниження температури хладона в процесі дроселювання) установлюють терморегулювальним вентиляем 12.

Танк – охолоджувач молока **ТОМ-2А** холодильною потужністю 13,9 кВт призначений для охолодження і зберігання молока на фермах. Ним обладнують молочно-товарні ферми на 200, 400 і 600 голів.

Танк – охолоджувач молока **СМ-1200** конструктивно мало відрізняється від охолоджувача **ТОМ-2А**. Для охолодження молока використовують також установку **КСА-500** (входить до комплекту доільної установки «Імпульс») і установку **МК-2000л-2А** (на 2000 л молока). Середня холодильна потужність установки **КСА-500** 8,8–9,0 кВт, а **МК-2000-2А** – 13,4 кВт на 1000 л молока.

Установки **УВ-10** (холодильна потужність 11,65 кВт) і **АВ-30** (холодильна потужність 35 кВт) служать для одержання холодної води, призначеної для охолодження молока під час його первинної обробки на фермах.

На фермах використовують також пастеризаційні установки **ОПФ-1** і **ОПУ-3М** продуктивністю 1000 і 3000 л/год відповідно. У цих установках здійснюється очищення, тонкошарова пастеризація й охолодження молока за повної автоматизації процесу.

Для охолодження холодильних камер і зберігання продуктів, у тому числі в їдальнях і буфетах, використовують хладонові автоматичні холодильні машини типу **ФАК**, а саме: **ФАК-0,7**; **ФАК-1,1Е**; **ФАК-1,5М** і **ФАК-0,7АВ** холодильною потужністю 0,814–1,745 кВт. Вони працюють з різними за розмірами випарними батареями в діапазоні температур –30...–5 °С за температури навколишнього повітря близько 40 °С. Агрегат **ФАК-0,7АВ** відрізняється тим, що його конденсатор охолоджується водою.

Більш великі холодильні камери обладнані холодильними агрегатами типу **ІФ**. Холодильна машина **ІФ-49** з водяним, а машина

ІФ-54 – з повітряним охолодженням. Холодильна потужність обох машин у стандартному режимі 3,5 кВт.

В овоче- і фруктосховищах використовують хладонові холодильні машини типу **ХМ-22-ФВ-22/1**; **ХМ-22-ФВ-22/11**; **ХМ-22-ФУ-45/1**; **ХМ-22-ФУ-45/11**; **ХМ-22-ФУУ-90/1** та інші, які працюють на холодильних агентах **R-12** і **R-22**. Ці машини бувають двох модифікацій: I – з частотним обертанням колінчастого вала компресора 24с^{-1} і II – з частотним обертанням 16с^{-1} . Їх використовують як з безпосереднім батарейним, так і з розсолним охолодженням. Холодильні машини працюють за температури кипіння хладона $-45...+5\text{ }^\circ\text{C}$ і температури охолоджуваної води $+1...+30\text{ }^\circ\text{C}$.

Схему холодильної машини **ХМ-ВФ-20** наведено на рис. 9.2. Після компресора 9 пара холодильного агента надходить у конденсатор 12, де вона охолоджується й конденсується. Після додаткового охолодження в теплообміннику 14 через фільтр-осушувач 16, соленоїдний вентиль 18 і терморегулювальний вентиль 19 вона надходить у випарник 1. З випарника 1 пара холодоагенту відсмоктується компресором 9. На шляху від випарника 1 до компресора пара підігривається в теплообміннику 14 за рахунок теплоти рідкого холодоагенту, що надходить із конденсатора 12.

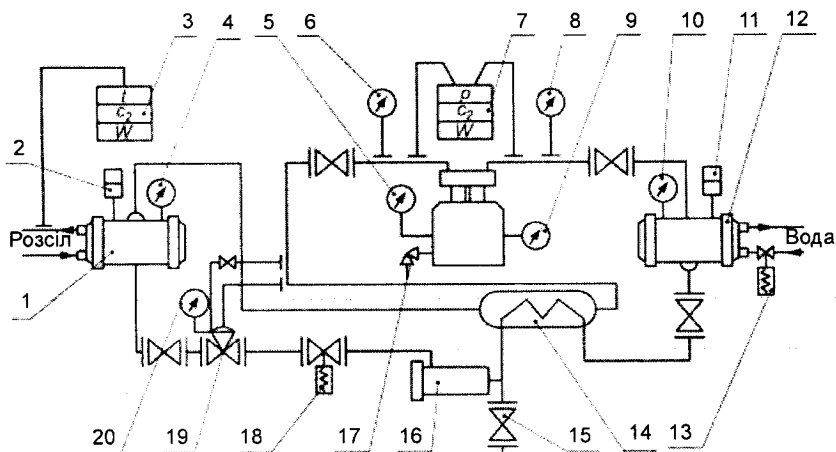


Рис. 9.2. Схема холодильної машини типу **ХМ-ВФ-20**:

1 – випарник; 2 і 11 – клапани запобіжні; 3 – реле температури; 4, 6 і 20 – мановакуумметри; 5, 8 і 10 – манометри; 7 – реле тиску; 9 – компресор; 12 – конденсатор; 13 і 18 – вентилі соленоїдні; 14 – теплообмінник; 15 – вентиль для заправлення холодоагенту; 16 – фільтр-осушувач; 17 – вентиль для заливання мастила; 19 – клапан терморегулювальний

Для охолодження сільськогосподарської продукції, крім хладонових, застосовують також *аміачні холодильні машини* типу ХМ: ХМ-АВ-22/1-11; ХМ-АУ-45/1-11; ХМ-АУУ-90/1-11. Їх використовують для охолодження молока на великих фермах, м'яса на птахофабриках, а також для охолодження фруктів і овочів у сховищах.

При *водяному охолодженні конденсатора* використовують як прямоточну, так і зворотну системи подачі води. У першому випадку охолоджувальна вода скидається в каналізацію, у другому – вона надходить на градирню, де охолоджується внаслідок теплообміну з повітрям, після чого знову подається в систему охолодження конденсатора.

На рис. 9.3 як приклад наведено планування одноповерхового холодильника для заморожування і зберігання плодово-ягідної продукції. Місткість холодильника 1300 т. У холодильнику передбачено три камери 6 для зберігання сировини, чотири камери 5 для зберігання замороженої продукції і одне морозильне

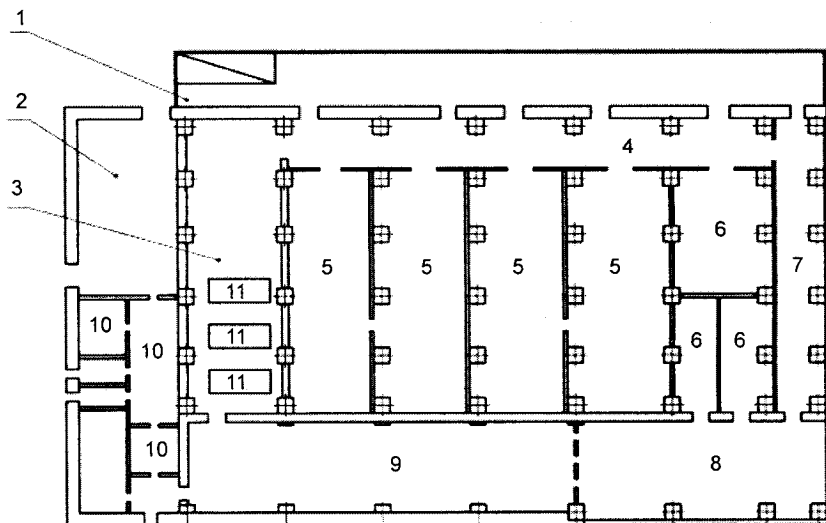


Рис. 9.3. План одноповерхового холодильника:

1 – платформа залізнична; 2 – відділення компресорне; 3 – відділення заморожування; 4 – коридор; 5 – камери схову заморожених і охолоджених продуктів; 6 – камери схову сировини; 9 – відділення підготовки продукції до охолодження і заморожування; 10 – приміщення підсобні і побутові; 11 – апарати морозильні

відділення 3. У холодильнику є компресорне відділення 2, підсобні і побутові приміщення 10 та залізнична платформа 1.

Питання проектування холодильника докладно висвітлено в спеціальній літературі [12–16].

9.3. Визначення потужності і вибір установки

У приміщенні, що охолоджується, слід підтримувати заданий температурний режим. Для цього повинна існувати рівність теплонадходжень до приміщення і теплоти, яка відводиться з нього. Рівняння теплового балансу має вигляд [11]

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (9.1)$$

де Q – витрати холоду в холодильній камері;

Q_1 – надходження теплоти через огороження, включаючи дію сонячної радіації;

Q_2 – надходження теплоти від продуктів під час їх заморожування й зберігання;

Q_3 – тепловий потік із зовнішнім повітрям при вентиляції приміщень;

Q_4 – тепловий потік, обумовлений експлуатацією приміщень;

Q_5 – тепловий потік від фруктів і овочів унаслідок їх дихання.

Тепловий потік через зовнішні стіни і перекриття холодильника визначають за формулою

$$Q_1 = k_i \cdot F_i \cdot [(t_n - t_3) + \Delta t_c], \quad (9.2)$$

де k_i – коефіцієнт тепловіддачі огорожень (стіл, стелі, статі), Вт/(м²·К);

F_i – площа поверхні огороження; м²;

t_n – температура в приміщенні, що охолоджується, значення якої приймають відповідно до технологічних вимог;

t_3 – розрахункова температура зовнішнього повітря, °С;

Δt_c – надлишкова різниця температури, викликана дією сонячної радіації, °С.

Розрахункову температуру зовнішнього повітря приймають рівною

$$t_3 = 0,4 \cdot t_{cm} + 0,6 \cdot t_{max}, \quad (9.3)$$

де t_{cm} – середньомісячна температура о 13-й годині найгарячішого місяця, °С;

t_{\max} – максимальна температура, що визначалася в даному районі, °C;

для орієнтованих розрахунків можна прийняти t_{\max} : для північної кліматичної зони – 25, середньої – 28 і південної – 32 °C.

Для холодильників, що мають горищні перекриття, значення Δt_c приймають залежно від географічної широти:

географічна широта, °C	40	50	60
різниця температур Δt_c , °C	15	10	5

Якщо приміщення безгорищне, залежно від орієнтації поверхні по сторонах світу Δt_c приймають для стін від 2,2 до 11,3 °C (найбільші значення для орієнтації на південний схід і південний захід), а для плоскої покрівлі – 16,5...18,5 °C.

Тепловий потік через підлогу в ґрунт є незначним, і тому його враховують тільки в камерах з від'ємними температурами.

Якщо передбачене обігрівання підлоги, то тепловий потік через підлогу визначають за формулою

$$Q_{nл} = k_{nл} F_{nл} (t_{сеп} - t_3), \quad (9.4)$$

де $k_{nл}$ – коефіцієнт тепловіддачі підлог, розташованих вище від нагрівальних приладів, Вт/(м² · К);

$F_{nл}$ – площа поверхні підлоги, м²;

$t_{сеп} = 1-3$ °C.

Тепловий потік через підлогу, що лежить на ґрунті і не має нагрівальних приладів, визначають за формулою

$$Q_{nл} = \sum (k_{ум} F_3)(t_n - t_3), \quad (9.5)$$

де $k_{ум}$ – умовний коефіцієнт тепловіддачі відповідної зони підлоги, Вт/(м² · К). Значення $k_{ум}$ приймають: на відстані 32 м від зовнішніх стін – 0,23; 4–6 м від зовнішніх стін – 0,12; для іншої площі – 0,01 Вт/(м² · К);

F_3 – площа поверхні відповідної зони, м².

Витрати холоду на охолодження продуктів становлять

$$Q_2 = \frac{0,278 \cdot (c \cdot M + c_m \cdot M_m) \cdot (t_1 - t_2)}{24}, \quad (9.6)$$

де c і c_m – питомі теплоємності продукту, що охолоджується, і матеріалу пари, кДж/(кг·К);

M і M_m – маси продукту і пари, що надходять у холодильник, кг/доб: добове надходження тари приймають рівним: дерев'яної

тари – 20%; картонної – 10%, скляної – 100% добового надходження продуктів;

t_1, t_2 – початкова і кінцева температура продукту відповідно, °С.

Тепловий потік із зовнішнім повітрям при вентиляції приміщень розраховують за формулою

$$Q_2 = \frac{0,278 \cdot \alpha \cdot V \cdot \rho_k \cdot (h_3 - h_k)}{24}, \quad (9.7)$$

де α – кратність повітрообміну, дорівнює 1...6 обмінів повітря за добу;
 V – об'єм вентиляваного приміщення (камери), м³;

ρ_k – густина повітря в охолоджувальному приміщенні, кг/м³;

h_3 і h_k – ентальпії повітря зовнішнього і в приміщенні, кДж/кг.

Експлуатаційний тепловий потік дорівнює

$$Q_4 = Q_4' + Q_4'' + Q_4''' + Q_4''', \quad (9.8)$$

де Q_4, Q_4', Q_4'', Q_4''' – надходження теплоти від електричного освітлення, працюючих електродвигунів, людей і при відкриванні дверей відповідно, Вт.

$$Q_4' = q_4' \cdot F_{\text{суд}}, \quad (9.9)$$

де q_4' – питомий тепловий потік від електричного освітлення, Вт/м².

Для невеликих холодильних камер $q_4' = 3$ Вт/м².

Тепловий потік, який виділяється електродвигунами за умови їх розташування всередині охолоджуваного приміщення, визначаємо за формулою

$$Q_4'' = 1000 \cdot k_{\text{одн}} \cdot \sum Ne, \quad (9.10)$$

а за умови розташування електродвигунів поза приміщенням, що охолоджується:

$$Q_4'' = 1000 \cdot k_{\text{одн}} \cdot \sum Ne \cdot \eta_e, \quad (9.11)$$

де Ne і η_e – потужність (кВт) і ККД електродвигунів;

$k_{\text{одн}}$ – коефіцієнт одночасності роботи електродвигунів ($k_{\text{одн}} = 0, 1 \dots 1, 0$).

Витрати холоду, пов'язані з нахожденням людей у камерах:

$$Q_4''' = 150 \cdot n \cdot \tau_3, \quad (9.12)$$

де n – кількість людей, що одночасно перебувають в камері, чол.;
 τ_3 – час перебування людей у камері, хв.

Витрати холоду через дверні отвори становлять

$$Q_4''' = 6,5 \cdot F \cdot \sqrt{\Delta t} \cdot (i_1 - i_2) \cdot \tau_1 \cdot \gamma, \quad (9.13)$$

де F – поверхня дверних отворів, м²;
 Δt – психометрична різниця температур усередині камери;
 i_1 і i_2 – тепловміст повітря зовнішнього і в камері за відповідної вологості, ккал/кг;
 τ_1 – час, протягом якого двері залишаються відкритими, хв;
 γ – питома вага повітря за температури камери, кг/м³.

Тепловий потік дихання фруктів і овочів рекомендується визначати за методикою, яка викладена в главі 28 [3], або можна користуватися формулою

$$Q_5 = q_5' \cdot M' + q_5'' \cdot (E - M'), \quad (9.14)$$

де q_5' і q_5'' – питомі теплові потоки, які виділяються плодами і овочами при диханні під час охолодження і зберігання відповідно, Вт/т;
 M' – добове надходження фруктів і овочів у камері, т;
 E – повна місткість камери, т.

Значення q_5'' визначають за температурою повітря, а значення q_5' – за середньою температурою між початковою і кінцевою температурою продукту (табл. 9.2).

При зберіганні плодів і овочів у камері з регульованим газовим середовищем (РГС) значення Q_5 розраховують за формулою

$$Q_{5PFC} = (0,3 \dots 0,5) \cdot q_5'' \cdot E. \quad (9.15)$$

Встановлена потужність холодильної установки

$$Q_{ycm} = K_m \cdot \frac{Q}{\beta_p}, \quad (9.16)$$

де K_m – коефіцієнт, що враховує теплонадходження в трубопроводах; для холодильних установок безпосереднього охолодження $K_m = 1,05 \dots 1,07$, для системи охолодження холодоносієм (розсоллом) $K_m = 1,1 \dots 1,2$;
 β_p – коефіцієнт робочо чого часу (для великих і середніх холодильних установок $\beta_p = 0,75 \dots 0,92$), для малих холодильних установок $\beta_p = 0,7$.

Таблиця 9.2. Питомі теплові потоки, що виділяються фруктами і овочами при охолодженні [3].

Флоди і овочі	Значення $q'_{\text{с}}$, Вт/т, за середньої температури охолодження, °С			
	0	5	10	20
Абрикоси	17	50	102	199
Виноград	9	24	36	78
Груші пізні	10	41	56	219
Капуста	33	51	78	194
Картопля	20	24	26	44
Цибуля	19	25	34	58
Морква	28	38	44	135
Огірки	20	34	66	174
Буряк	20	34	60	213
Слива	21	65	126	233
Томати	17	28	41	102
Черешня	21	47	97	219
Яблука порізані	10	21	58	73

За значеннями $Q_{\text{уст}}$, користуючись каталогами або довідниками, вибирають холодильну машину для даної установки. При цьому для машин середньої і малої потужності (до 0,4 МВт) слід надавати перевагу поршнеvim компресорам. Для малих холодильних машин рекомендується застосовувати хладони R-12 або R-22; для середніх – аміак або R-12.

9.4. Автоматизація холодильних установок

Основний параметр, що характеризує роботу холодильної установки, – це температура, а отже, вона є *основним параметром регулювання*. Температуру повітря в камері регулюють, впливаючи на холодильну потужність випарника і на компресор.

На рис. 9.4 наведена схема регулювання температури в одно-випарних системах, що здебільшого знаходять застосування в сільському господарстві. Зміна температури повітря в камері сприймається датчиком 1 реле температури 2, який дає команду магнітному пускачеві 3 на пуск або зупинку електродвигуна 4 компресора 5 (залежно від того, нижче чи вище необхідне значення температури повітря). Застосовують також систему

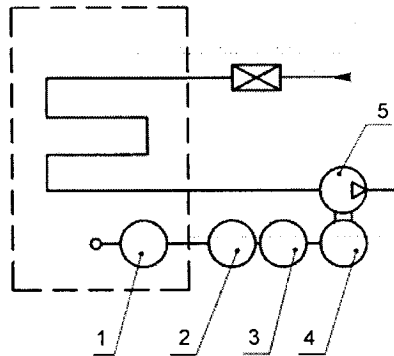


Рис. 9.4. Схема регулювання температури повітря в камері:

1 – датчик; 2 – реле; 3 – пускач магнітний; 4 – електродвигун; 5 – компресор

регулювання температури повітря в камері за допомогою реле тиску, що регулює тиск кипіння холодильного агента.

Малі холодильні установки обладнані повною уніфікованою системою автоматизації, якою регулюється температура повітря, перегрівання пари, а іноді й тиск її конденсації.

Література: [2, с. 325–326]; [3, с. 320–327]; [4, с. 364–368]; [8, с. 12–15].

Питання для самоконтролю

1. Наведіть схему парової компресійної машини. Що таке холодильна потужність холодильної установки? Як розраховують значення холодильного коефіцієнта?
2. Дайте характеристику холодоагентів. У чому полягає особливість охолодження за допомогою холодоносія?
3. Які холодильні установки застосовують у сільському господарстві? Назвіть їхні основні характеристики.
4. Планування холодильника. Холодильні машини, що встановлюють у холодильниках.
5. Наведіть методи визначення холодильної потужності. Як визначають складові рівняння теплового балансу холодильної установки?
6. Як вибирають холодильну машину?
7. Які основні принципи автоматизації холодильних установок вам відомі?

Калоричні розрахунки холодильної установки

- Загальні положення • Класифікація апаратів для обробки холодом
- Калоричні розрахунки холодильної установки • Ізоляція холодильних установок • Теплотехнічні розрахунки ізоляції захисних засобів конструкцій холодильників

Ключові слова: холодильна установка, калоричні розрахунки, статті витрат холоду, ентальпія, теплопередача, ізоляційні матеріали.

10.1. Загальні положення

Поряд зі зростанням холодильних емкостей постійно розвиваються холодильне машинобудування і приладобудування. Холодильні машини нині випускають переважно у вигляді автоматизованих агрегатів. Велика увага приділяється конструюванню й виготовленню дрібних холодильних машин, що дозволяє оснащувати значну кількість підприємств торгівлі, громадського харчування, підприємств малого та середнього бізнесу, торговельних мереж та ін.

Для обслуговування технологічного устаткування й процесів використовують переважно штучний холод.

Охолодження (від +4 °С до -1 °С). Як було зазначено раніше, охолодження – це процес зниження температури харчової сировини і продуктів з метою пригнічення біохімічних процесів і розвитку мікроорганізмів. Це один з ефективних способів холодильного консервування продуктів без зміни їхнього структурного стану. За принципом перенесення теплоти способи охолодження поділяють на три групи:

- 1) шляхом конвекції – охолодження продуктів у повітрі, які упаковані в непроникні штучні або природні оболонки, а також – у рідких середовищах;

- 2) у результаті фазового перетворення – інтенсивне випаровування вологи, що міститься в продукті, у процесі вакуумування;
- 3) змішаним теплообміном – передача теплоти здійснюється конвекцією та радіацією при випаровуванні вологи з поверхні продукту.

Заморожування. Являє собою процес зниження температури нижче від криоскопічної на 10...30 °С, який супроводжується перетворюванням води в лід (або пару – при сублимації). Способи заморожування також поділяють на три групи (контактні і безконтактні):

- 1) заморожування в киплячому холодоагенті;
- 2) заморожування в рідинах як проміжних теплоносіях;
- 3) заморожування в повітрі як у проміжному хладоносії.

Штучний холод використовують для обслуговування таких об'єктів:

- камер для охолодження і зберігання охолодженої сировини або продуктів;
- морозильних камер;
- швидкоморозильних апаратів;
- камер для зберігання замороженої сировини або продукції;
- танкових відділень, призначених для зберігання плодів та соків або молока;
- технологічних апаратів, у яких охолоджуються продукти (трубчасті теплообмінники, ультраохолоджувачі тощо), виморожується волога при виробництві концентрованих соків та ін.

Для отримання холоду застосовують переважно компресійні холодильні установки. Камери і апарати обслуговуються безпосереднім випаровуванням або розсольним охолодженням.

Перевагою розсольного охолодження є можливість акумуляції холоду, що дозволяє періодично вимикати частину потужностей холодильної установки. Крім того, при розсольному охолодженні спрощується регулювання температури і виключається негативний вплив холодильного агента на продукт у разі нещільності системи [3; 4].

Безпосереднє випаровування використовують у разі, якщо є потреба в отриманні низьких температур: у камерах заморожування, у швидкоморозильних апаратах деяких конструкцій, в ультраохолоджувачах для плодівих соків та ін. Витрати холоду при безпосередньому охолодженні менші, а схема використання холоду є більш простою, ніж при розсольному охолодженні [1; 3].

10.2. Класифікація апаратів для обробки холодом

В основу класифікації апаратів охолодження і заморожування харчових середовищ покладені такі ознаки: призначення циклу холодильної установки, способи одержання холоду, кількість рівнів охолодження, вид і кількість робочих речовин, температурний рівень охолодження, корисне виробництво холоду та ін. Система й класифікація застосовує найбільш істотну ознаку холодильної обробки харчових продуктів, що значною мірою визначає їх якість.

Звичайно охолоджувальні установки й охолоджувачі поділяють на: безперервної і періодичної дії; відкриті й закриті; плоскі й круглі; трубчасті й пластинчасті; однорядні й багаторядні (пакетні); односекційні й бактеризовані; прямоструминні й протиструминні. Серед апаратів для охолодження харчових середовищ найбільшого поширення набули охолоджувачі відкритого (зрошувальні і резервуарні) і закритого (трубчасті і пластинчасті) типів. Вони застосовуються для охолодження різного виду м'яса та м'ясопродуктів.

Камери охолодження можуть бути циклічної (періодичної) або безперервної дії. Вони являють собою теплоізольовані приміщення, обладнані підвісними конвеєрами, засобами й приладами охолодження та системами повітророзподілу.

Камери тунельного типу становлять теплоізольовані приміщення, уздовж і по ширині яких розташовані три (чотири) підвісні шляхи, повітря надходить за допомогою повітря охолоджувачів різного типу.

Камери заморожування можуть бути з природною і примусовою циркуляцією повітря, тупикові і прохідні, періодичної й безперервної дії. Вони оснащуються підвісними шляхами або стожковими піддонами. У камерах з природною циркуляцією встановлюють пристінні й стельові охолодні батареї, а з примусовою циркуляцією – повітроохолоджувачі й спеціальні системи повітророзподілу.

Апарати морозильні бувають повітряними, плитковими й контактними. Повітряні морозильні апарати являють собою теплоізольовані тунелі, усередині яких розміщені охолодні батареї, вентилятори і засоби транспортування. Плиткові морозильні апарати призначені для заморожування упакованих продуктів (рибного філе, м'яса в блоках, плодоовочевих наборів та ін.) і мають систему безпосереднього охолодження. Заморожування в контактних апаратах здійснюють методом зрошення або занурення.

Фризери бувають періодичної і безперервної дії, а ескимогенератори – карусельного типу.

Льодогенератори слугують для виробництва сніжного й лускатого льоду, зокрема сніжний лід одержують у льодогенераторах вертикального й горизонтального типів.

За призначенням розрізняють холодильники: *побутові, морозильники й холодильники-морозильники*. Залежно від способу одержання холоду побутові холодильники можуть бути *компресійними, абсорбційними й термоелектричними*; залежно від способу установки – *підлоговими типу шафи, підлоговими типу столу й такі, що вбудовуються*; залежно від кількості камер – *одно-, дво- і трикамерними*.

Установки криогенного заморожування поділяють на *рефрижераторні, проріджені й газороздільні*. Рефрижераторні установки призначені для охолодження й термостатування; проріджені – для перетворення речовин у рідкий стан, а газороздільні – для поділу газових сумішів на складні компоненти.

Таким чином, холодильник – це промислове спеціально обладнане приміщення з холодною компресорною установкою, яка в цьому приміщенні забезпечує температурно-вологий режим, що відповідає технологічним нормам зберігання й виробництва харчових продуктів.

У холодильниках підтримують знижену температуру повітря ($-12...-30-35^{\circ}\text{C}$) і підвищену відносну вологість (80–95%).

Для створення й підтримки наведених параметрів повітря приміщення холодильників будують без вікон; вони мають потужну ізоляцію покрівлі, зовнішніх і внутрішніх огорожень, дверей; оснащуються устаткуванням для охолодження і пристроями для запобігання промерзання ґрунту.

Розрізняють такі типи холодильників:

- *холодильники заготівельні* – призначені для первісної холодної обробки, короткочасного зберігання й підготовки заготовлювальних продуктів до транспортування на переробні підприємства, у торговельну мережу або розподільні холодильники;
- *холодильники виробничі* – є складовою частиною харчових підприємств, забезпечують холодопостачання технологічних процесів виробництва; їх застосовують для охолодження, заморожування та зберігання сировини й готової продукції (або напівфабрикатів), наприклад, холодильник м'ясокомбінату;
- *холодильники розподільні* – призначені для створення й зберігання резервних, сезонних, поточних і страхових запасів, сировини, яка псується, готової продукції, що забезпечує

- ритмічність виробництва харчових галузей і рівномірне постачання харчовими продуктами населення протягом року;
- *холодильники базисні*, призначені для тривалого зберігання резервів швидкокопсувних продуктів (держрезерви);
 - *холодильники перевалочні* – призначені для короткочасного зберігання вантажів при передачі їх з одного виду транспорту на інший, наприклад, з автомобільного на залізничний тощо;
 - *холодильники підприємств роздрібної торгівлі й громадського харчування* – призначені для короткочасного зберігання запасів продуктів, які реалізуються підприємством протягом кількох діб;
 - *холодильники портові*.

За вантажоемністю холодильники поділяють на малі (до 500 т), середні (від 500 т) і великі (понад 500 т). Вантажоемність виражають у тоннах умовного вантажу. За умовний вантаж береться (для м'ясопереробних підприємств) м'ясо в напівтушах, що має при укладанні на підлогу в штабель об'ємну масу $0,35 \text{ т/м}^2$ або при розміщенні на підвісних шляхах завантаження $0,25 \text{ т}$ на 1 м шляху (крім розподільних шляхів і стрілок).

Конструкції будинку холодильника поділяють на несучі й ті, що огороджують. Схеми конструкцій наведені в літературі [8, 11, 15, 16]. Конструкції, що огороджують, захищають приміщення будинку від дії зовнішнього середовища (стіни й покриття) або температурно-вологого режиму сусідніх приміщень (міжповерхові перекриття багатопверхових холодильників, підлоги, внутрішні стіни). Несучі конструкції сприймають вагу конструкцій, які огороджують, вміст холодильника (якщо вантаж підвішений на підвісних шляхах), а також устаткування для транспортування й холодної обробки вантажів. В одноповерхових холодильниках несучі конструкції монтують зі збірних залізобетонних елементів – колон, балок та плит покриття. Сітка колон $6 \times 12 \text{ м}$. Стіни самонесучі. Навантаження на підлогу – до 4000 кг/м^2 .

10.3. Калоричні розрахунки холодильної установки

Калоричні розрахунки виконуються для того, щоб можна було вибрати холодильні машини.

Сумарні витрати холоду в холодильних камерах складаються з таких статей:

- Q_1 – на охолодження (або заморожування) продукту;
- Q_2 – на компенсацію втрат холоду крізь захисні засоби (підлога, стіни, стеля та ін.);

Q_3 – на охолодження та осушування повітря, що надходить, з метою вентиляції камер;

Q_4 – на компенсацію втрат холоду через відкривання дверей камер, освітлення, роботу електродвигунів, нахождение в камері людей та ін.

Загальні витрати холоду становлять

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4. \quad (10.1)$$

Розрахунок звичайно робиться на добові витрати холоду.

При роботі швидкоморозильних апаратів холод витрачається на заморожування продукту та на компенсацію втрат холоду через поверхню апаратів.

У танковому відділенні (наприклад, консервного заводу) статті витрат холоду такі:

- у пусковий період – на охолодження приміщення, розміщених у ньому танків та іншого обладнання і на компенсацію втрат крізь захисні засоби конструкції;
- у період завантаження танків – на охолодження продукту і на компенсацію втрат;
- у період зберігання охолодженого продукту (соку, молока та ін.) – на компенсацію втрат зберігання.

Кількість холоду, який витрачається на наведені потреби, визначають у такий спосіб.

При охолодженні продукту холод витрачається на зниження температури продукту Q'_1 , на компенсацію втрат Q''_1 і на конденсацію пари, які виділяються внаслідок осушення продукту, Q'''_1 .

Ці величини розраховують за формулами:

$$Q'_1 = G \cdot c_o \cdot (t_n - t_k), \quad (10.2)$$

$$Q''_1 = G \cdot A, \quad (10.3)$$

$$Q'''_1 = \Delta \cdot L_i + \Delta_{in} \cdot L_k, \quad (10.4)$$

де G – маса охолоджуваного продукту, кг;

c_o – теплоємність продукту, ккал/кг, °С;

τ – тривалість охолодження, год;

A – тепловиділення, ккал/кг · год (при охолодженні, наприклад, парного м'яса $A = 0,15$ ккал/кг · год);

Δ – відносна усушка;

L_i і L_k – питома теплота, випаровування і конденсації, ккал/кг;

Δ_{in} – кількість інею, що конденсується на батареях, кг.

При заморожуванні продукту процес можна розглядати в три етапи:

- а) охолодження до криоскопічної точки;
- б) льодоутворення;
- в) охолодження до заданої (кінцевої) температури.

Витрати холоду на охолодження є такими самими, як і в розглянутому випадку. Витрати холоду на наступні два етапи, відповідно, становлять

$$Q_1'' = G \cdot W \cdot \omega \cdot L_3, \quad (10.5)$$

$$Q_1''' = G \cdot c_{\sigma} \cdot (t_{кр} - t_{c.к}), \quad (10.6)$$

де W – відносний вміст води в продукті, у частках одиниці;
 ω – відносна кількість вимороженої води за середньої кінцевої температури заморожування, у частках одиниці; якщо, наприклад, продукт містить 75% води, а кількість вимороженої води становить 87,4% загальної кількості води, то $W = 0,75$, а $\omega = 0,874$;
 L_3 – питома теплота льодоутворення ($L_3 = 80$ ккал/кг);
 c_{σ} – теплоємність замороженого продукту, ккал/кг·°C;
 $t_{кр}$ і $t_{c.к}$ – криоскопічна і середня кінцева температура, °C.

Отже, витрати холоду, пов'язані з обробкою продукту, становитимуть:

- при охолодженні:

$$Q_1 = Q_1' + Q_1'' + Q_1''', \quad (10.7)$$

- при заморожуванні:

$$Q_1 = Q_1' + Q_1'' + Q_1''' + Q_1'''' + Q_1'''''. \quad (10.8)$$

Витрати холоду на охолодження і заморожування продукту можна визначити також орієнтовно, виходячи зі зміни його тепловмісту, за формулою

$$Q_1 = G \cdot (i_n - i_k), \quad (10.9)$$

де i_n і i_k – початковий і кінцевий тепловміст (ентальпія) продукту (табл. 10.1).

Розрахунок витрат холоду на компенсацію втрат через захисні засоби конструкції розраховують за формулою

Таблиця 10.1. Тепловміст (ентальпія) продуктів (i , ккал/кг) за різних температур [14].

Температура, °С	Продукти							
	м'ясо, яловичина, птиця	баранина	свинина	риба худа	риба жирна	виноград	інші фрукти і ягоди	фрукти і ягоди в сиропі (2:1)
+25	74,7	72,3	68,8	84,5	79,9	77,7	87,4	80,3
+20	70,9	68,5	65,1	80,3	75,8	73,4	82,9	76,0
+17	68,6	66,3	62,9	77,8	73,4	70,9	80,2	73,5
+15	67,0	64,8	61,4	76,1	71,8	69,2	78,4	71,8
+12	63,2	62,5	59,3	73,6	69,3	66,6	75,7	69,2
+10	60,9	61,0	57,8	71,9	67,7	64,9	73,9	67,5
+7	59,3	58,8	55,7	69,4	65,2	62,4	71,2	65,0
+5	57,8	57,3	54,2	67,7	63,6	60,7	69,4	63,3
+3	56,3	55,8	52,8	66,1	62,0	59,0	67,6	61,6
0	55,5	54,3	50,6	63,5	59,5	56,4	64,9	59,0
-1	44,0	53,5	40,6	50,7	47,7	55,6	64,0	58,2
-3	19,0	42,9	17,6	21,3	20,4	48,4	33,2	43,1
-5	13,7	18,4	13,0	15,3	14,7	27,7	19,8	25,8
-8	9,4	13,3	8,9	10,4	10,1	15,9	12,2	15,5
-10	7,2	9,2	6,9	8,0	7,8	11,9	9,4	11,8
-12	5,3	7,1	5,1	5,9	5,8	8,7	7,1	8,8
-15	3,1	5,0	2,9	3,4	3,9	4,9	4,1	5,1
-18	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,8	1,6	1,9

$$Q_2 = F \cdot k \cdot (t - t_k) \tau^*, \quad (10.10)$$

де F – внутрішня поверхня захисних засобів, m_2 ;
 k – сумарний коефіцієнт теплопередачі, ккал/ $m^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°C}$;
 t і t_k – температура повітря зовні і усередині камери, °C ;
 τ – час охолодження, год.

Значення величин k і t наведені в табл. 10.2.

Витрати холоду на вентиляцію визначають за формулою

* Температура зовнішнього повітря може відрізнятися від температури окремих приміщень, суміжних з холодильною камерою, тому Q_2 розраховують для кожного засобу конструкції окремо.

Таблиця 10.2. Коефіцієнти теплопередачі зовнішніх захисних засобів,
 k , ккал/м²·°С

Найменування захисних засобів	Температура камери, °С			
	-18 і нижче	-10...-18	0...-10	від 0 і вище
Зовнішні стіни (якщо $t - t_k = 25...50$ °С)	0,25	0,30	0,35	0,40
Перегородки (якщо $t - t_k = 5...15$ °С)	0,30	0,40	0,50	0,60
Міжповерхові перекриття і підлоги нижнього поверху (якщо $t - t_k = 5...15$ °С)	0,35	0,40	0,50	0,60

$$Q_3 = V \cdot \gamma \cdot (i_1 - i_2) \quad (10.11)$$

де V – об'єм охолоджуваного повітря, м³;
 γ – питома вага повітря за температури в камері, кг/м³;
 i_1 і i_2 – тепловміст повітря зовнішнього і в камері за певної вологості, ккал/кг.

Витрати холоду на компенсацію втрат визначають у такий спосіб:

а) втрати холоду крізь дверні прорізи:

$$Q'_4 = 6,5 \cdot F \cdot \sqrt{\Delta t \cdot \gamma \cdot (i_1 - i_2)} \cdot \tau_1, \quad (10.12)$$

де F – поверхня відкритих дверних прорізів, м²;
 Δt – психометрична різниця температур усередині камери;
 τ_1 – час, протягом якого двері залишаються відкритими, хв;

б) втрати холоду, пов'язані з електровиділенням і роботою електродвигунів:

$$Q''_4 = 860 \cdot N \cdot \tau_2, \quad (10.13)$$

де N – сумарна потужність електроламп і електродвигунів, кВт;
 τ_2 – час роботи електроламп і електродвигунів, хв;

в) втрати холоду, пов'язані з присутністю людей у камерах:

$$Q'''_4 = 150_4 \cdot n \cdot \tau_3, \quad (10.14)$$

де n – кількість людей, які одночасно присутні в камері;
 τ_3 – час присутності людей у камері, хв.

Сумарні втрати холоду становлять:

$$Q_4 = Q_4' + Q_4'' + Q_4''' \quad (10.15)$$

Можна прийняти, що Q_4 дорівнює 10% сумарних витрат холоду (для великих холодильників) і 40% – для дрібних [8;13].

10.4. Ізоляція холодильних установок

Для зменшення втрат холоду захисні засоби конструкції холодильників покривають шаром ізоляційного матеріалу. Для ізоляції камер зберігання охолодженої сировини, а також танкових відділень використовують пінобетон, піноскло, торфоплити, дерев'яноволокнисті плити, експанзит, мінеральну пробку та ін.

Морозильні камери і камери зберігання замороження продуктів ізолюють експанзитом, мінеральною пробкою, скловолокном, скловатою. Перспективними ізоляційними матеріалами є пінопласт (стиропор) та різні види піноуретанів.

Товщина ізоляції може бути визначена за формулою

$$\delta_{is} = \lambda_{is} \left[\frac{1}{k} \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_o} \right) \right], \quad (10.16)$$

де δ_{is} – товщина ізоляції, м;

k – коефіцієнт теплопередачі ізольованої конструкції захисних засобів, ккал/м²·год·°С;

α і α_o – коефіцієнти тепловіддачі від зовнішнього повітря до поверхні захисних засобів і від внутрішньої поверхні до повітря камери, ккал/м²·год·°С;

$\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n$ – товщина шарів будівельних матеріалів, м;

$\lambda_{is}, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ – коефіцієнти теплопровідності ізоляційних та будівельних матеріалів, ккал/м²·год·°С.

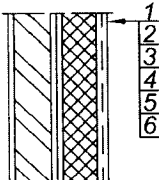
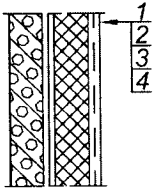
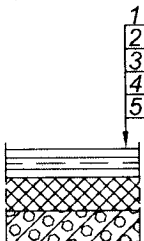
Фізичні властивості ізоляційних матеріалів наведено в табл. 10.3.

Конструкція захисних засобів і термічний опір матеріалів морозильних камер наведені в табл. 10.4.

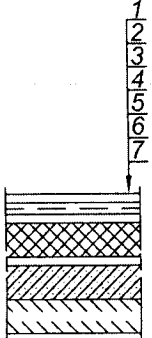
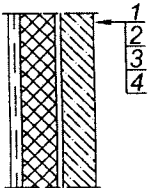
Таблиця 10.3. Основні фізичні параметри теплоізоляційних матеріалів

Матеріал	Об'ємна маса, ρ , кг/м ³	Коефіцієнт теплопровідності, λ , Вт/(м·К)	Межа міцності при згині $R_{зг}$, кПа	Водостійкість матеріалу	Вогнестійкість матеріалу
Жорсткі мінераловатні плити на бітумній зв'язці	250–300	0,064–0,075	110–160	Гідрофобний	Важкозаймистий
Плити з ніздрюватого бетону	350–400	0,116–0,128	600–800	Негідрофобний	Незаймистий
Піноскло марки «А»	250–400	0,064–0,087	800–1000	Гідрофобний	Незаймистий
Мипора	15–18	0,058	–	Негідрофобний	Важкозаймистий
Теплоізоляційні вироби зі скловолкна	35–70	0,058	–	Водостійкий	Незаймистий
Плити торфові спеціальні (підвищеної водостійкості)	180–220	0,070–0,075	300	Гідрофобний	Займистий
Пінопласт полівінілхлоридний ПВХ-1	70–120	0,046–0,058	200	Гідрофобний	Самозагасаючий
Пінопласт полістироловий ПСВ-С	20–25	0,035	110–180	Гідрофобний	Самозагасаючий
Асбовермикулятивні плити	250	0,081–0,087	180	Гідрофобний	Незаймистий
Жорсткий пінопіуретан	50–60	0,035–0,041	200–250	Гідрофобний	Самозагасаючий
Перліто-асбобитумні плити	200–250	0,081–0,087	160–200	Гідрофобний	Незаймистий
Фенолорізольний пінопласт ФРП-1 та ФРП-2	40–60	0,058	50–150	Негідрофобний	Незаймистий
Пінопласт полівінілхлоридний ПВ-1	60–80	0,041–0,046	200–250	Гідрофобний	Самозагасаючий

Таблиця 10.4. Конструкція захисних засобів і термічний опір матеріалів морозильних камер

Найменування та конструкція захисних засобів	№ шифру	Найменування і матеріал шару	Товщина δ_i , м	Коефіцієнт теплопровідності λ_i , Вт/(м·К)	Тепловий опір $R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i}$, м ² ·К/Вт
Зовнішня стіна морозильної камери 	1	Штукатурка складним розчином по металевій сітці	0,020	0,98	0,020
	2	Теплоізоляція з пінопласту полістирольного ПСБ-2	δ_n^1	0,05	Розрахунковий
	3	Пароізоляція – два шари гідроізола на бітумній мастиці	0,004	0,30	0,013
	4	Штукатурка цементно-піщана	0,020	0,93	0,022
	5	Кладка цегляна на цементному розчині	0,380	0,81	0,469
	6	Штукатурка складним розчином	0,020	0,93	0,022
Зовнішня стінна панель 	1	Штукатурка складним розчином по металевій сітці	0,020	0,98	0,020
	2	Теплоізоляція з пінопласту полістирольного ПСБ-2	δ_n^1	0,05	Розрахунковий
	3	Пароізоляція – два шари гідроізола на бітумній мастиці	0,004	0,30	0,013
	4	Зовнішній шар із важкого бетону	0,140	1,86	0,075
Покриття охолоджувальних приміщень 	1	П'ять шарів гідроізола на бітумній мастиці	0,012	0,30	0,040
	2	Стяжка з бетону по металевій сітці	0,040	1,86	0,022
	3	Пароізоляція (шар пергаміну)	0,001	0,15	Нехтують
	4	Плитна теплоізоляція (пінопласт полістироловий, марка ПСБ-С)	δ_n^1	0,05	Розрахунковий
	5	Залізобетонна плита покриття	0,035	2,04	0,017

Продовження табл. 10.4

Найменування та конструкція захисних засобів	№ шифру	Найменування і матеріал шару	Товщина δ_i , м	Коефіцієнт теплопровідності λ_i , Вт/(м·К)	Тепловий опір $R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i}$, м ² ·К/Вт
Підлога охолоджувальних приміщень 	1	Монолітне покриття з важкого бетону	0,040	1,86	0,022
	2	Стяжка армобетонна	0,080	1,86	0,043
	3	Пароізоляція (один шар пергаменту)	0,001	0,15	Нехтують
	4	Плитна теплоізоляція (пінопласт полістироловий, марка ПСБ-С)	δ_n^1	0,05	Розрахунковий
	5	Розчин цементно-піщаний	0,025	0,98	0,026
		Пісок ущільнений	1,350	0,58	2,338
	6	Підготовка бетонна з електронагрівачами	—	—	—
Панель внутрішня стінна 	1	Панель з керамзитобетону ($\rho = 1100$ кг/м ³)	0,240	0,47	0,510
	2	Пароізоляція (два шари гідроізолу на бітумній мастиці)	0,004	0,30	0,013
	3	Теплоізоляція з пінопласту полістиролового, марка ПСБ-С	δ_n^1	0,05	Розрахунковий
	4	Штукатурка складним розчином по металевій сітці	0,020	0,98	0,020

Примітка: 1. Вибирається з умов та потреб побудови належного теплоізоляційного захисного огороження морозильної камери для збереження в ній заданого температурного режиму та мінімізації енерговитрат на його підтримку.

10.5. Теплотехнічні розрахунки ізоляції захисних засобів конструкцій холодильників

Розрахунок коефіцієнта теплопередачі: загальний коефіцієнт теплопередачі багат шарових захисних засобів конструкцій з послідовно розміщеними шарами ізоляції розраховують за формулою

$$k_0 = \frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_s + \sum R_i + R_e} + R_{is}, \quad (10.17)$$

де R_0 – загальний опір теплопередачі багат шарового захисного засобу конструкції, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;

R_s – опір теплопередачі із зовнішнього або більш теплого боку захисного засобу відповідно, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;

$$R_s = \frac{1}{\alpha_s};$$

R_i – опір теплопровідності i -го будівельного шару конструкції (крім шару ізоляції), $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;

$$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i};$$

R_e – опір теплопередачі з внутрішнього боку захисного засобу, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;

$$R_e = \frac{1}{\alpha_e},$$

R_{is} – опір теплопровідності термоізоляційного шару, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;

$$R_{is} = \frac{\delta_{is}}{\lambda_{is}},$$

α_s і α_e – коефіцієнти теплопередачі із зовнішнього і внутрішнього боку засобу, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

δ_i – товщина будівельних шарів конструкції, м ;

λ_i – коефіцієнт теплопровідності будівельних шарів конструкції, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

δ_{is} – товщина теплоізоляційного шару, м ;

λ_{is} – коефіцієнт теплопровідності ізоляційного шару, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Таблиця 10.5. Розрахункові величини коефіцієнтів тепловіддачі

Поверхні	Коефіцієнт тепло- віддачі α , Вт/(м ² ·К)	Опір тепловіддачі R , м ² ·К/Вт
Зовнішні поверхні стін і безгорищних покриттів	23	0,073
Внутрішні поверхні приміщень без примусової циркуляції повітря (при батарейному охолодженні камер):		
- стіни	8	0,125
- підлоги і стелі	6–7	0,143–0,167
Внутрішні поверхні приміщень з помірною циркуляцією повітря (зберігання охолоджених вантажів)	9	0,111
Внутрішні поверхні приміщень з інтенсивною циркуляцією повітря (камери охолодження з заморожуванням)	11	0,091

Розрахункові величини коефіцієнтів тепловіддачі наведені в табл. 10.5.

Визначення товщини теплоізоляційного шару: чим більше значення коефіцієнта теплопередачі k_0 захисного засобу, тим більше теплоти буде проникати в охолоджуваний об'єм холодильника. Це зумовлює необхідність використовувати більш потужні, а отже, і більш дорогі холодильні установки. Зменшити теплоприлив можна шляхом зменшення величини R_0^{PT} , що досягається застосуванням більш ефективної теплоізоляції (малі $\lambda_{из}$) або збільшенням її товщини (більші величини $\delta_{из}$). Однак при цьому збільшуються витрати на теплоізоляцію. Тому при проектуванні захисних засобів конструкцій холодильника доцільно вибирати таку теплоізоляцію, а отже, таку розрахункову величину R_0^{PT} , щоб річні вихідні й експлуатаційні витрати були мінімальними. Цю величину R_0^{PT} називають економічно доцільною (R_0^{PT}). Розрахунок величини R_0^{PT} є досить складним, тому що для цього треба знати вартість обладнання, теплоізоляції, електроенергії, тривалість роботи холодильної установки та ін. Значення цих величин є різною для холодильників різної місткості та призначення. Тому величиною R_0^{PT} нині користуються при техніко-економічному порівнянні різних конструкцій холодильників, а за звичайних розрахунків товщини ізоляції

Таблиця 10.6. Коефіцієнти теплопередачі зовнішніх стін і покриття

Середньодобова температура повітря в районі будівництва, °С	Коефіцієнти теплопередачі зовнішніх стін і покриття, k_o^{nm} , Вт/(м ² ·К) за внутрішньої температури, °С						
	-40 до -30	-25 до -20	-15 до -10	-4	0	+4	+12
0 і нижче	<u>0,21</u>	<u>0,26</u>	<u>0,33</u>	<u>0,47</u>	<u>0,52</u>	<u>0,58</u>	<u>0,70</u>
	0,20	0,24	0,30	0,40	0,44	0,47	0,52
Від 0 до +9	<u>0,20</u>	<u>0,23</u>	<u>0,28</u>	<u>0,35</u>	<u>0,40</u>	<u>0,44</u>	<u>0,64</u>
	0,19	0,23	0,27	0,33	0,37	0,42	0,52
+9 і вище	<u>0,19</u>	<u>0,21</u>	<u>0,23</u>	<u>0,28</u>	<u>0,30</u>	<u>0,35</u>	<u>0,52</u>
	0,17	0,20	0,23	0,26	0,29	0,33	0,47

Примітка: 1. У чисельнику наведені величини коефіцієнтів теплопередачі для зовнішніх стін, у знаменнику – для безгорищних укрить.

2. Для горищних покриттів коефіцієнт теплопередачі треба приймати на 10% більше, ніж для безгорищних.

3. Якщо покриття екранізуються панельними батареями, коефіцієнт теплопередачі покриття треба збільшувати на 20%.

користуються нормативними (так званими «потрібними») величинами R_0^{PT} , які є близькими до величин R_0^{PT} і водночас однаковими для холодильників усіх видів і розмірів [13].

Величини R_0^{PT} для зовнішніх стін і безгорищних стель наведені в табл. 10.6, для внутрішніх стін і перегородок, які відокремлюють охолодження приміщення від неохолоджуваних і неопалюваних, а також для долівок на ґрунтах, що обігріваються, у табл. 10.5.

Величини коефіцієнтів R_0^{PT} для приміщень с температурами, які не наведені в табл. 10.5 і 10.6, приймають інтерполяцією.

Значення коефіцієнтів R_0^{PT} для перегородок між охолоджувальними приміщеннями наведені в табл. 10.5.

Знаючи величину R_0^{PT} , потрібну товщину теплоізоляційного шару можна визначити за формулою

$$\delta_{is}^{PT} = \lambda_i \left[\frac{1}{R_0^{PT}} - \left(\frac{1}{\alpha_s} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha} \right) \right], \quad (10.18)$$

отриманою з формули (2.1).

Після розрахунку товщини ізоляційного шару в разі використання плитних матеріалів може виявитися, що розрахункова ве-

личина не відповідає стандартній товщині плит, що випускають. У такому разі треба прийняти товщину ізоляційного шару, кратну стандартній товщині плити. Округлення товщини ізоляційного шару робиться, як правило, у бік збільшення, для того щоб дійсна величина коефіцієнта теплопередачі була не більшою, ніж наведена в таблиці (інакше виникає потреба в перевірці на випадіння вологи).

Якщо прийнята товщина ізоляційного шару відрізняється від розрахункової більше ніж на 10%, то треба визначити дійсну величину коефіцієнта теплопередачі за формулою

$$R_0^g = \frac{1}{\left(\frac{1}{\frac{1}{\alpha_s} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_e}} \right) + \frac{\delta_{iz.ш}}{\lambda_i}}, \quad (10.19)$$

де $\delta_{iz.ш}$ – прийнята товщина ізоляційного шару, м.

Термічний опір усіх шарів конструкції, крім теплоізоляційного шару, уже визначений раніше при розрахунку товщини теплоізоляційного шару і вдруге визначати не потрібно.

Перевірка захисних засобів конструкцій на випадіння конденсату. Умови невинипадіння конденсату. Якщо товщина ізоляції є недостатньою, то температура поверхні захисних засобів з боку приміщення з більш високою температурою може опуститися нижче від температури точки роси повітря в цьому приміщенні $t_{m,p}$, і на поверхні захисних засобів випадає конденсат у вигляді роси або інею. Це призводить до зволоження захисних засобів конструкцій та їх прискороеного руйнування. Тому за різниці температур у суміжних камерах вище 10 °С перегородки перевіряють на випадіння конденсату. Таку саму перевірку виконують і для зовнішніх стін та покриттів у камерах з плюсовими температурами зовнішнього повітря. Температуру внутрішньої поверхні захисних засобів конструкцій визначають за формулою

$$\tau_e = t_e - \frac{t_e - t_s}{R_0 \cdot d_e}. \quad (10.20)$$

Щоб не відбувалося випадіння конденсату, слід додержуватися умови:

$$\tau_o \geq t_{m,p}$$

Температуру точки роси повітря визначають за $i-d$ -діаграмою при розрахункових значеннях величин t_o і ϕ_o повітря в приміщенні з більш високою температурою.

Література: [1, с. 26–56; 325–326]; [3, с. 4–74; 320–327]; [4, с. 364–455]; [11, с. 372–380]; [20, с. 113–130]; [14, 16].

Питання для самоконтролю

1. З якою метою використовують штучний холод на переробних підприємствах?
2. Які статті витрат холоду в танковому відділенні?
3. З яких основних етапів складається процес заморожування?
4. Чому витрати холоду крізь огороження розраховуються для кожного огороження окремо?
5. Наведіть класифікацію статей витрат холоду в холодильній установці?
6. З якою метою для покриття огорожень холодильників використовуються ізоляційні матеріали?
7. Які критерії підбору холодильних машин і холодильних установок вам відомі?

Холодильна обробка та зберігання м'яса і м'ясопродуктів

- Загальні положення • Охолодження і підморожування • Заморожування і розморожування • Технологія і техніка обробки холодом

11.1. Загальні положення

Холодильна обробка й зберігання м'яса та м'ясопродуктів за низьких температур у наш час є одним з основних і найбільш перспективних методів консервування.

Холодильній обробці піддається вся сировина, яка перероблюється в м'ясній промисловості. Широке використання холоду пов'язане з багатьма позитивними характеристиками, притаманними цьому виду обробки. Холод забезпечує можливість швидкого консервування значних обсягів сировини, що надходить на підприємства, дозволяє тривалий час зберігати м'ясо зі збереженням усіх його властивостей та харчової цінності.

Переваги холодильного консервування:

- максимальне збереження природних властивостей і якості продукції;
- економічна ефективність.

Холодильна технологія дає найменші втрати сировини і готового продукту та є універсальною для всіх видів м'ясної сировини і продуктів. Крім того, у виробництві м'ясопродуктів холод використовується не як основний консервуючий фактор, а як додатковий технологічний (соління м'яса, використання замороженого м'яса при виробництві, наприклад, сирокочених ковбас тощо)

Холодильна обробка порівняно з іншими способами консервування є менш енергомісткою. Витрати енергії на 1 кг готового продукту при заморожуванні становлять 100 кВт·год (при стерилізації – 235, а при сушінні 660 кВт·год).

Для збереження якості сировини, обробленої холодом протягом усього шляху від виробництва до споживання повинні підтримуватися *стабільні температури*, тобто необхідно утворювати «*безперервний ланцюг холоду*». Холодильний ланцюг м'ясної промисловості складають: стаціонарні виробничі холодильники, залізничний і автомобільний рефрижераторний транспорт, холодильники торговельних мереж, побутові холодильники та ін.

У промисловій практиці використовуються такі способи холодильної обробки і зберігання м'яса:

- *охолодження* – температура на 1...4 °С вища за точку замерзання тканинної рідини; можливий строк зберігання – від 5 до 30 діб;
- *підморожування* – температура на 1...2 °С нижча від точки замерзання тканинної рідини; тривалість зберігання за обмеженого льодоутворення – близько 20 діб;
- *заморожування* – температура значно нижча від точки замерзання тканинної рідини; тривалість зберігання – від 6 до 12 місяців, а за сприятливих умов – до двох і більше років [1, 20].

Консервуюча дія холоду:

- сповільнення або пригнічення життєдіяльності мікрофлори;
 - зниження швидкості ферментативних реакцій;
 - зниження швидкості реакцій окиснення і гідролізу.
-

При зниженні температури в м'ясі сповільнюється швидкість фізико-хімічних і біохімічних процесів, порушується обмін речовин у мікробних клітинах. Унаслідок цього частина мікрофлори гине, а частина, що знаходиться в стані анабіозу, тимчасово втрачає здатність здійснювати шкідливу дію. При заморожуванні вода, що міститься в м'ясі, переходить із рідкого стану в твердий, тому не може бути використана мікроорганізмами для своєї життєдіяльності. Проте використання холоду протягом довгострокового періоду не забезпечує загибелі всієї мікрофлори, особливо споротворюючої, а токсини, які виробляються бактеріями, не руйнуються навіть за багаторазового заморожування і розморожування м'яса. Холодильна обробка не зупиняє процеси псування м'яса, хоча розвиток мікрофлори, а отже, процеси гниття різко пригальмовуються. Слід мати на увазі, що низькі температури не є засобом знешкодження м'яса, отриманого від хворих тварин: патогенна мікрофлора при заморожуванні залишається життєздатною [1, 2, 7, 13].

11.2. Охолодження і підморожування

Охолодження – це найбільш ефективний спосіб збільшення стійкості м'яса під час зберігання, оскільки він є технічно легкодосяжним, не викликає істотних змін смакових властивостей м'яса, у м'ясо не потрапляють сторонні речовини, як, наприклад, під час хімічного консервування [7, 13]. Охолодження не впливає на харчову цінність м'яса і м'ясопродуктів. Реалізація м'яса в охолодженому стані постійно збільшується.

Охолодженням називають процес швидкого зниження температури об'єкта до нижньої межі, за якої вода знаходиться в рідкій фазі. Кріоскопічна температура м'ясного соку коливається від $-0,6$ до $1,2$ °C. При охолодженні м'яса температура туші знижується від $36...37$ °C до -1 °C (не вище 4 °C).

Обмеження верхньої межі температури охолодження м'яса 4 °C обумовлюється тим, що вище за цю температуру можливий швидкий ріст мікрофлори, у тому числі *сальмонел*, які добре розвиваються в діапазоні $7-45$ °C. У разі зниження температури нижче ніж -1 °C м'ясо заморожується, різко змінюючи свої властивості.

Використання помірної холоду сприяє значному сповільненню біохімічних і хімічних процесів, що відбуваються в сировині, а також зниженню активності мікроорганізмів. Одночасно здійснюються і масообмінні процеси, які викликають випаровування вологи.

Способи охолодження м'яса. Існує кілька способів охолодження м'яса – повільне (одностадійне), швидке (двостадійне), надшвидке, або шокове.

Одностадійне охолодження – це спосіб охолодження м'яса, за якому зниження його температури від початкової до кінцевої ($+4$ °C) здійснюється в одній камері, тобто в одну стадію. Температура в камері встановлюється близькою до кріоскопічного значення. Інтенсифікація процесу досягається внаслідок збільшення швидкості руху повітря від $0,1$ до $2,0$ м/с та зниження температури в камері до $-3...-5$ °C.

Двостадійне (швидке) охолодження – це спосіб охолодження м'яса, за якому зниження температури до кінцевої ($+4$ °C) здійснюється у дві стадії в камерах охолодження і доохолодження. Спочатку туші надходять до камери охолодження з низькою температурою ($-4...-12$ °C) та інтенсивною циркуляцією повітря ($1-2$ м/с). Після досягнення на поверхні м'яса температури, близької до

кріоскопічної, здійснюється доохолодження за температури – 1...–1,5 °С та швидкості руху повітря 0,1–0,2 м/с.

Переваги швидкого (двостадійного) охолодження м'яса:

- зниження втрат м'яса;
- збільшення оборотності камер;
- низька мікробіологічна обсеменінність;
- гарний товарний вигляд.

При доохолодженні температура м'яса вирівнюється за всім об'ємом напівтуш [1]. М'ясо швидкого охолодження має гарний вигляд завдяки утворенню тонкої кірочки підсихання і збереженню яскравого кольору.

Сучасні підприємства використовують і багатостадійні методи охолодження, які значною мірою інтенсифікують процес. До них належать і тристадійний спосіб та охолодження за певною програмою.

Надшвидке (шокове) охолодження – це спосіб охолодження м'яса, який є основним на сучасних м'ясопереробних підприємствах. Туші відразу після забою надходять крізь наскрізний тунель, у якому піддаються дії низької температури повітря і високих повітряних потоків. При цьому температура на поверхні продукту швидко знижується, що сприяє відведенню більшої частини теплоти (до 40%) із продукту і значному зменшенню вагових втрат порівняно зі швидким охолодженням. При роботі з температурою повітря нижче 0 °С виникає небезпека заморожування тонкого шару на поверхні продукту.

Переваги шокowego охолодження м'ясних туш:

- мінімальні втрати маси;
- скорочення часу охолодження;
- зменшення виробничих площ.

Підморожування м'яса дозволяє збільшити термін зберігання м'яса і покращити умови транспортування без суттєвих змін його властивостей. Рекомендується підморожувати м'ясо, яке призначається для транспортування на невеликі відстані.

Переваги підморожування м'яса:

- збільшення терміну зберігання;
 - зменшення усушки;
 - зручність зберігання і транспортування.
-

При підморожуванні температура в поверхневих шарах м'яса зменшується на 1...2 °С нижче від криоскопічної (-2...-3 °С). Підморожують, як правило, парне м'ясо. Оскільки товщина підмороженого шару при цьому не перевищує 40 мм, то негативні наслідки льодотворення для структури тканини і стану білків є незначними [1].

Підморожують м'ясо в камері за температури повітря -30...-35 °С, а визріває м'ясо протягом 15-20 діб. При зберіганні м'яса значно знижується його мікробіальне псування, і перші ознаки ослизнення поверхні з'являються через 35-40 діб.

Підморожене м'ясо можна отримувати методом інтенсивного прискореного охолодження в установках тунельного типу. За температури повітря від -25...-30 °С, повітряних швидкостей від 2 до 4 м/с і часу знаходження в тунелі інтенсивного охолодження від 12 до 1,5 годин здійснюється замерзання 10% м'яса.

Зберігати і транспортувати підморожені м'ясні туші можна в штабелях 1,5-1,8 м заввишки без помітної деформації, що дозволяє майже вдвічі збільшувати завантаження камер та транспортних засобів.

11.3. Заморожування і розморожування

Заморожування. *Заморожування* – це консервування сировини за температур, які значно нижчі від криоскопічних температур тканинного соку, коли більша частина води, що міститься в біологічному об'єкті, перетворюється на лід. Замороженими вважаються продукти, в яких близько 80% вологи перетворено на лід. Необхідність заморожування м'яса з метою довготривалого зберігання обумовлена сезонністю заготівлі і забою тварин.

Заморожування є одним із найбільш дешевих методів довготривалого зберігання якості м'яса, його природних властивостей, харчової цінності та смакових якостей.

Сфера використання заморожування в м'ясній промисловості:

- накопичування сировини;
 - консервування ендокринноферментної сировини, субпродуктів, тушок птиці, деяких видів напівфабрикатів, готових до вживання страв;
 - стабілізація властивостей парного м'яса;
 - прискорення технології сирокочених ковбас.
-

Консервування методом заморожування ґрунтується на принципах *анабіозу*, тобто пригніченні, придушуванні діяльності мікроорганізмів та біохімічної активності тканинних ферментів.

Ферментативні процеси гідролізу білків тваринної сировини при- зупиняються за температури $-18...-20$ °С. Ферментативний гідроліз і окиснення тканинних ліпідів значно сповільнюються за температури $-25...-30$ °С.

Заморожування викликає зміни в тканинах м'яса, дещо знижуються після танення функціональні властивості і якість м'яса. Ці зміни здебільшого залежать від режимів холодильної обробки.

Відомості про фізичні основи льодоутворення та зміни м'яса під час заморожування докладно наведені в літературі [1, 20].

Розморожування. Заморожене м'ясо перед використанням або промисловою переробкою розморожують. Розморожування – це процес, зворотний заморожуванню, який полягає в таненні кристалів льоду і відновленні первинних властивостей м'яса. М'ясу передається певна кількість теплоти для підвищення його температури від первинної -18 до -1 °С. Процес здійснюють у таких умовах, які дозволяють отримати м'ясо, за своїми властивостями близьке до охолодженого. Проте повністю відновити первинні властивості м'яса при розморожуванні неможливо, оскільки зміни, що відбулися в процесі заморожування та його зберігання в замороженому стані, є незворотними [1, 2, 7, 11–15, 19, 20].

Основні технологічні завдання розморожування:

- досягнення найбільшої оборотності процесу;
 - зменшення втрат соку тканинами м'яса.
-

При розморожуванні в м'ясі відбуваються, перш за все, зміни, пов'язані з таненням кристалів льоду і поглинанням води тканинами м'яса. Чим більше вода, утворена при таненні кристалів льоду, поглинається тканинами, тим розморожене м'ясо за своїм станом ближче до охолодженого.

Найбільшу зворотність має м'ясо, заморожене в парному стані або на стадії визрівання протягом 5–7 діб після забою, тобто м'ясо з високою водозв'язувальною здатністю. Небажані зміни властивостей м'яса як при заморожуванні, так і при розморожуванні визначаються переважно денатурацією білків у межах температур від -1 °С до -5 °С.

Тому, чим швидше при заморожуванні чи розморожуванні проходять цю критичну зону температур, тим менше змінюються властивості м'яса.

Надто тривале розморожування разом із повільним заморожуванням сприяє інтенсивному відділенню клітинного соку і погір-

шує якість м'яса. Швидкість розморожування має дорівнювати приблизно швидкості заморожування.

Способи і режими розморожування. Залежно від температури розморожування може бути повільним, прискореним і швидким. Теплоносіями можуть слугувати повітря, пароповітряна суміш, вода, різноманітні розчини. Найгіршими теплофізичними властивостями володіє повітряне середовище, потім – пароповітряна суміш, а кращими – розсіл і вода.

При *повільному* розморожуванні в повітряному середовищі температура спочатку має становити 0–3 °С, потім її підвищують до 6–8 °С; при цьому відносна вологість повітря 90–95 °С, швидкість його руху 0,2–0,3 м/с. Наприкінці розморожування температуру знижують до 0 °С, а відносну вологість – до 70%. Тривалість розморожування, наприклад, напівтуш з яловичини становить за цього способу (методу) 3–5 діб залежно від маси туш і угодваності худоби.

Прискорене розморожування в повітряному середовищі здійснюється за температури в камері 20–25 °С, відносної вологості повітря 90–95%, швидкості руху повітря 0,2–0,5 м/с протягом 24–30 год.

Швидке розморожування досягається в пароповітряному середовищі за температури 20–25 °С, відносної вологості 90–95%, швидкості руху 1–2 м/с протягом 12–16 год.

При виборі способу розморожування слід урахувувати, що за підвищених температур розморожування активізується діяльність тканинних ферментів і мікрофлори, що може призвести до різкого погіршення якості м'яса.

Існуючі способи розморожування м'яса не є досконалими.

Повільне розморожування супроводжується втратами маси і може призвести до мікробіального псування. Швидке розморожування хоча й прискорює процес, але при ньому мають місце втрати м'ясного соку; під час обвалки і жилочки вони досягають 2%.

Зберегти якість м'яса за досить високої швидкості розморожування повітрям можна, якщо застосувати метод душування.

Наведені вище способи розморожування ґрунтуються на передачі теплоти до поверхні продукту із зовнішнього середовища шляхом теплообміну.

Перспективним способом розморожування є такий, за якого теплота, необхідна для цього, генерується в об'ємі замороженого продукту. В основі способів об'ємного розморожування лежать електричні властивості м'яса. Заморожене м'ясо має властивості слабких провідників і діелектриків, тому його розміщують у

змінне електричне поле, і воно розігрівається як діелектрик. Розморожування здійснюється в результаті об'ємного нагрівання. При цьому отримують продукцію високої якості: відсутні усушка, окиснення, втрати тканинного соку, знижується бактеріальне обсіменіння м'яса.

11.4. Технологія і техніка обробки холодом

Охолодження м'яса. М'ясо в тушах і напівтушах охолоджують у спеціально призначених для цієї мети камерах (тунелях), які обладнують підвісними шляхами, системами для штучного охолодження і циркуляції повітря. За технологічним принципом розрізняють камери охолодження циклічної та безперервної дії. Залежно від використаної системи повітря розподілу камери можуть бути з організованою і неорганізованою системою повітря розподілу. Важливою характеристикою є *паспортна температура* – середня температура в камері при охолодженні продукції. Після завантаження парного м'яса в камері не допускається підвищення температури повітря, яка при охолодженні має не перевищувати +1 °С порівняно з паспортною.

Висока якість м'яса при охолодженні забезпечується:

- належними санітарним станом камер;
 - сортуванням туш за видом, масою й угодваністю;
 - правильним розміщенням туш на підвісних шляхах;
 - використанням інтенсифікованих методів охолодження.
-

Камери *циклічної дії* використовують в основному для одностадійного охолодження м'яса та другої стадії двостадійного. Повітря в камері перед завантаженням її м'ясом охолоджують до температури на 3–5 °С нижче від паспортної. Оскільки тепловиділення в м'ясі в початковий період є максимальним, цей захід дозволяє виконати вимогу, щоб відхилення від середньої температури повітря в камері не перевищували певних значень.

У камерах *безперервної дії* м'ясо завантажують безперервно і синхронно з роботою конвеєра цеху забою тварин та роз'єднування туш. Туші і напівтуші за допомогою конвеєра переміщуються послідовно за всіма підвісними шляхами камери; тривалість проходження по камері повинна відповідати тривалості охолодження. Камери безперервної дії слугують головним чином для здійснення першої стадії двостадійного охолодження. Перед заванта-

женням камери та обладнання повинні бути приведені в належний санітарний стан, а за необхідності – продезінфіковані.

Сортування туш і напівтуш за масою та угодованістю і правильне їх розміщення сприяє рівномірному режиму охолодження. Ураховуючи те, що тривалість охолодження залежить від товщини туш та їх угодованості, треба передбачати окремі камери для яловичини нежирної і жирної, свинини та дрібної рогатої худоби. При охолодженні м'яса не слід допускати додаткового завантаження в камеру нових партій продукту.

М'ясні туші треба розміщувати на підвісних шляхах так, щоб вони не стикалися. На одному погонному метрі підвісного шляху розміщують 2–3 туші з яловичини або 3–4 зі свинини (напівтуші). Баранячі туші розміщуються на рамах по 10–20 шт., а туші яловичини – на гаках роликів підвісних шляхів, свинячі – на розногах або також на роликах. Внутрішні боки напівтуші повинні бути повернуті в бік холодного повітря, яке нагнічується.

Інтервал між окремими напівтушами становить 30–50 мм, що дозволяє холодному повітрю обдувати туші, які висять, і попереджати засмагання м'яса.

Завершення охолодження туші визначають за температурою в товщі м'яса, яку заміряють спеціальними термометром з довгою частиною занурювання (150–180 мм).

Заморожування м'яса. У промислових умовах м'ясо заморожують безпосередньо після первинної обробки в парному стані однофазним способом і після охолодження (двофазне заморожування).

Однофазне заморожування економічно більш виправдане, тому що має низку переваг. Заморожування м'яса і м'ясопродуктів можна здійснювати в різних охолоджувальних середовищах і різними методами.

Переваги однофазного заморожування:

- скорочення тривалості процесу на 40–43%;
 - зменшення втрат маси у 2–2,5 рази;
 - ефективне використання холодильних камер;
 - скорочення витрат праці і транспортування;
 - більш висока якість м'яса.
-

За видом охолоджувального середовища розрізняють: заморожування в повітрі, розсолах і киплячих холодоагентах. Застосовують апарати як з проміжним холодоносієм (розсолем), так і з безпосереднім охолодженням (холодоагентами).

За характером контакту між продуктом і охолоджувальним середовищем розрізняють *безпосередній контакт* між продуктом і середовищем, і *безконтактний*, коли теплообмін здійснюється крізь непроникну і теплопровідну перегородку.

При виборі способу заморожування основними критеріями є збереження високого рівня якості продукту, його властивостей, складу, форми і розмірів визначають швидкість і глибину заморожування.

Високі швидкості тепловідведення потрібні при заморожуванні ендокринно-ферментної сировини, напівфабрикатів та готових страв. При заморожуванні м'ясних туш і відрубів інтенсивність тепловідведення не має великого значення для їх якості, тому що різниця в структурі тканин за об'ємом унаслідок особливостей кристалоутворення в периферійних і центральних зонах практично не піддається упорядкуванню.

Заморожування в повітряному середовищі. Повітря є найбільш універсальним проміжним середовищем для відведення теплоти від продукту. Швидкість заморожування при використанні повітря залежить від температури, швидкості його циркуляції та розмірів продукту. Заморожування в повітряному середовищі використовують для холодильної обробки м'яса у вигляді туш, напівтуш і четвиртин, субпродуктів, тушок птиці та м'ясопродуктів.

Камери для заморожування м'яса обладнують бічними і поточними батареями безпосереднього випаровування холодоагенту, або батареями і повітроохолоджувачами, або тільки повітроохолоджувачами [3, 6, 8–12, 14, 18, 22]. Залежно від організації технологічного процесу камери застосовують для одно- або двофазного заморожування м'яса. Камери однофазного заморожування відрізняються від камер двофазного заморожування більшим тепловим навантаженням, що потребує більших площ для охолоджувальних установок (приладів).

М'ясо для заморожування розміщують на підвісних шляхах або стічних піддонах.

Більш прогресивним є спосіб прискореного заморожування з використанням *камер тунельного типу* або заморожування в *спеціальних швидкоморозильних апаратах зі швидкорухомим повітрям, що має низьку температуру*. У тунельних морозильних установках, де батареї охолодження розміщені між рядами підвісних шляхів, заморожують м'ясні туші і напівтуші, а в швидкоморозильних апаратах – відруби, блоки і дрібні шматки

м'яса, тушки птиць, ендокринну сировину, субпродукти та інші м'ясопродукти [1].

Переваги камер тунельного типу:

- прискорення процесу заморожування (14–16 годин для м'ясних напівтуш);
 - зменшення усушки на 40–50%;
 - безперервність технологічного процесу;
 - можливість автоматизації і програмування процесу.
-

Заморожування м'яса в блоках має низку переваг порівняно із заморожуванням у тушах і напівтушах. Для отримання блоків туші поділяють на окремі шматки, укладаючи шматки м'яса на кістках або в обваленому вигляді в металеві форми або в синтетичну полімерну плівку. Блоки спрямовують на заморожування до швидкоморозильних апаратів. Тривалість заморожування блоку безкісткового м'яса масою 25 кг за температури -35°C до температури в середині блоку -8°C становить 4–5 годин.

У блоках можна заморожувати субпродукти, ендокринно-ферментну сировину, меланж [20].

Конструкції сучасних швидкоморозильних установок дуже багато (більш докладно див. у [6–11]).

Заморожування в плиткових морозильних апаратах. Поряд із повітряними морозильними апаратами використовуються плиткові апарати. Продукт розміщують між рухомими плитами, крізь які здійснюється тепловідведення, тому що в плитах циркулює холодоагент або теплоносій (розсіл). Одночасно робиться підпресування продукту, що забезпечує гарний контакт з охолоджувальною поверхнею і сприяє інтенсифікації теплообміну. Такий спосіб є найбільш прийнятним для заморожування в блоках м'яса, субпродуктів, фаршу, ендокринно-ферментної сировини, меланжу. Заморожені в цих апаратах продукти мають правильну форму, що полегшує їх упакування і забезпечує ефективне використання об'єму камер зберігання продукції. Питома продуктивність плиткових морозильних апаратів з 1 м^2 площі на 66% вище питомої продуктивності повітряних морозильних апаратів.

Переваги плиткових морозильних апаратів:

- висока швидкість заморожування;
 - висока продуктивність;
 - зменшення енерговитрат;
 - зручність упакування продукції.
-

Апарати характеризуються високим рівнем механізації й ефективністю. Установки пульсуючого типу (роторні морозильні апарати) працюють із заданими циклами в автоматичному режимі. Заморожування продуктів здійснюється за програмою, що враховує вид продукту, товщину блоків, температуру і вид холодоагенту. Завантаження й розвантаження продуктів механізовані.

Заморожування в рідких киплячих і некиплячих середовищах. Заморожування в рідкому середовищі можна виконувати контактним і безконтактним способами.

При контактному заморожуванні продукт безпосередньо стикається з рідким середовищем. Цей спосіб не набув поширення – заморожують лише рибу.

Безконтактне заморожування застосовується в тому разі, якщо продукт упаковується. Цей спосіб набув широкого використання у зв'язку з розвитком сучасної техніки упакування, особливо під вакуумом. При використанні пакувальних матеріалів із полімерних плівок, які є абсолютно герметичними і щільно прилягають до продукту, типу «друга шкіра», створюють гарні умови для теплообміну, збільшується коефіцієнт тепловіддачі. Унаслідок цього значно скорочується тривалість заморожування – від 25 до 125 хв залежно від товщини продукту. Швидке тепловідведення дозволяє отримувати високу якість продукції. Цим способом заморожують птицю і м'ясні продукти невеликих розмірів.

Переваги безконтактного заморожування в рідких середовищах:

- скорочення тривалості процесу;
 - відсутність втрат маси;
 - висока якість продукції;
 - скорочення виробничих площ.
-

У м'якоті рідких охолоджувальних некиплячих середовищ використовують водянні розчини хлористого натрію або кальцію певної концентрації, а також суміш води з пропіленгліколем за температури не вище ніж -20°C . Після заморожування розчини видаляються водою.

Низькі температури заморожування можна одержувати в результаті кипіння холодоагентів. Як холодоагенти використовують рідкий азот, фреон, діоксид вуглецю.

Використання як охолоджувального агента рідкого азота обумовлене його нетоксичністю, бактерицидними властивостями і низькою температурою кипіння $-195,8^{\circ}\text{C}$. З метою запобігання розтріскування продукту внаслідок інтенсивного відведення теп-

логи температура його периферійної частини під час заморожування не повинна бути нижче ніж -30°C . Ефективним з погляду якості продукту з цієї причини є його заморожування шляхом зрошування рідким азотом або його паром.

Інформація про вплив фреону і діоксиду вуглецю докладно висвітлена в літературі [1, 20].

Література: [1, с. 255–297]; [8, с. 245–287]; [11, с. 364–455]; [20, с. 113–130].

Питання для самоконтролю

1. Роль холодильних технологій у м'ясній промисловості.
2. Назвіть способи холодильної обробки м'яса і м'ясопродуктів.
3. Охарактеризуйте процеси, які відбуваються в м'ясі при його охолодженні.
4. Охарактеризуйте охолоджувальне середовище і способи охолодження м'яса.
5. Охарактеризуйте сутність і мету підморожування м'яса.
6. Надайте порівняльну характеристику способів заморожування м'яса.
7. Охарактеризуйте процеси зберігання і способи розморожування замороженого м'яса.

Холодильна обробка та зберігання молока і молокопродуктів

- Загальні положення • Охолодження молока • Заморожування молока • Технологія і техніка обробки молока холодом

Ключові слова: молоко, молокопродукти, охолодження, заморожування, установки охолоджувальні, технологія охолодження, зберігання, холодильні установки.

12.1. Загальні положення

Молоко високої якості неможливо одержати без охолодження. Воно є одним з основних факторів збереження якісних показників свіжонаданого молока. Дані численних досліджень, проведених у нашій країні і за кордоном, а також досвід роботи багатьох господарств свідчать, що в неохолоджену молоці швидко збільшуються кислотність та кількість мікроорганізмів (табл. 12.1), що значно погіршує його санітарну якість [6, 7].

Обробка молока розпочинається відразу після видоювання, його фільтрують і охолоджують. Це дозволяє збільшити термін його зберігання. Свіжовидане молоко має температуру $+37^{\circ}\text{C}$ (температура тіла корови). За такої температури за дві години імунні тіла руйнуються, і в молоці починають розвиватися мікроорганізми.

У молоці, охолоджену відразу після видоювання до $+10^{\circ}\text{C}$, вони розвиваються за 24 год, а в охолоджену до 0°C – за 48 год (коли закінчується бактерицидна фаза).

Для якісного і довгострокового зберігання молока застосовують також його заморожування. Як для охолодження, так і заморожування молока залежно від його кількості визначають необхідні: кількість холоду, джерела холоду та засоби отримання холоду.

Таблиця 12.1. Вплив охолодження молока на його кислотність і вміст у ньому мікроорганізмів (за М. Ф. Яременко)

Зберігання молока, год	Кислотність молока, °Т			Кількість мікроорганізмів в 1 мл молока (тис.) за температури охолодження, °С	
	неохолод- женого	охолод- женого до 18 °С	охолод- женого до 13 °С		
				15	25
Свіже	17,5	17,5	17,5	9	0
3	18,3	17,5	17,5	36	350
6	20,9	18,0	17,5	40	4200
9	22,5	18,5	17,5	120	7320
12	скисання	19,0	17,5	—	—
25	—	—	—	500	87 000

Забезпечення молочних цехів холодом. Для визначення джерел холоду та вибору холодильних установок (машин) відповідної холодопродуктивності потрібно знати загальну потребу в холоді для охолодження молока або молочних продуктів. З цієї метою визначають, яка кількість молока від добового надою підлягає охолодженню за одне доїння, встановлюють температуру молока перед охолодженням і після нього.

Перед охолодженням температуру молока приймають 33–35 °С, а після нього 10 °С.

Необхідну кількість холоду (кал) визначають за формулою

$$Q = M \cdot C \cdot (t_1 - t_2), \quad (12.1)$$

де M – кількість молока, що підлягає охолодженню, кг;

C – питома теплоємність молока [ккал/(кг·град)] (для молока приблизно 0,94; знежиреного молока – 0,95; вершків – 0,85);

t_1 і t_2 – температура молока до охолодження і після охолодження відповідно, °С.

Розраховану за формулою (12.1) величину збільшують на 5–10% для компенсації втрат холоду в трубопроводах.

Втрати холоду за одну годину визначають діленням загальної кількості холоду на час доїння.

Кількість холоду, необхідного для окремого молока, визначають також за цією формулою. Тільки замість загальної кількості молока застосовують потужність апарата й отриманий результат переводять у ккал/кг.

Для забезпечення молочних цехів холодом використовують холодну воду, лід і штучний холод, який одержують за допомогою холодильних машин (установок) [6, 12].

12.2. Охолодження молока

Охолодження молока водою. Ефективність охолодження молока водою залежить від її температури. Водою з температурою 5–9 °С на зрошувальному охолоджувачі можна охолодити молоко до 12 °С, а на пластинчастому – до 10 °С. Якщо температура води вища за ту, до якої потрібно охолодити, у воду додають лід.

За ступенем зниження температури молока розрізняють: нормальне охолодження (до 6–10 °С); глибоке охолодження (до 2–6 °С); заморожування (до –12...–25 °С) [6]. При охолодженні змінюється стан окремих складових молока, у першу чергу речовин з *гідрофобними зв'язками*, які під час охолодження послаблюються (табл. 12.2). Охолодження зумовлює підвищення в'язкості і густини молока (докладно див. літературу [6; 7; 12–16]).

Охолодження молока за допомогою льоду. Щоб перетворити 1 кг льоду на воду, потрібно витратити 80 ккал теплоти. За

Таблиця 12.2. Стан компонентів молока при охолодженні

Компонент	Зміна компонента	Наслідки змін компонента
Казеїн	Дезагрегація міцел	Зниження здатності до зсідання під дією сичужного ферменту. Збільшення тривалості зсідання, одержання слабого згустку
Молочний жир	Часткова кристалізація тригліцеридів у жирових кульках та фосфоліпідів у мембранах	Утворення вільного жиру та його ліполіз
Солі кальцію	Збільшення вмісту розчинних форм	–
Вітаміни	Зменшення вмісту (А, Е) та водорозчинних (С, В) вітамінів на 10–30% при зберіганні охолодженого молока протягом трьох діб	Зниження вмісту вітамінів у молоці
Ферменти	Десорбція ферментів з оболонки жирових кульок та міцел казеїну в плазму молока внаслідок послаблення гідрофобних зв'язків	Підвищення активності ферментів у плазмі молока, зв'язаних з оболонками жирових кульок та міцелами казеїну (ксантинооксидаза, ліпаза, протеїнази, лужна фосфатаза та ін.)

Таблиця 12.3. Зміни температури охолодженої суміші залежно від концентрації кухонної солі (за М.Ф. Яременком) [6; 12; 16]

Кількість кухонної солі, %	Температура суміші, °С	Кількість кухонної солі, %	Температура суміші, °С
2	-1,1	14	-9,1
4	-2,4	16	-10,5
6	-3,5	18	-12,1
10	-6,1	22	-15,2
12	-7,5	24	-16,9

допомогою льоду можна охолодити продукти до більш низької температури, до льоду додають кухонну сіль або інші речовини (табл. 12.3).

Потрібну кількість льоду для охолодження продуктів визначають за нормативами, встановленими для підприємств молочної промисловості. Зокрема, на 1 т молока і молочних продуктів потрібна така кількість льоду, м³:

Молоко сире	1,2
Молоко пастеризоване	1,5
Вершки	2,0
Сир	3,0
Сметана з пастеризованого молока	4,0
Кефір	1,5

Потребу льоду розраховують на період, протягом якого його використовують. Так, у північних і східних районах він триває сім, а в південних – дев'ять місяців.

У розрахунках зважають на втрати льоду в процесі його зберігання і використання. Вони залежать від типу льодника, якості термоізоляції, догляду за льодом під час зберігання і становлять 35–90%. Тому кількість заготовленого льоду має бути в 1,5 рази більшою за розрахункову потребу в ньому.

Лід заготовляють кількома способами: виймаючи з водойм, шаровим намерзанням на горизонтальних майданчиках, тонкошаровим намерзанням під дією гідромеханічного обладнання, з використанням льодогенераторів та іншими способами (див. тему 7).

Штучні джерела холоду. Останнім часом для вироблення холоду широко використовують компресійне холодильне обладнання (установки) [1–5]. При цьому різко скорочуються витрати праці

на вироблення холоду і охолодження молока. Холодильні установки компактні, займають мало місця. Їх застосування значно знижує втрати води. Для її відведення не потрібні каналізація, резервуари для скидання використаної води, і молоко охолоджується до більш низьких температур та зберігається протягом 1–1,5 доби. Холодильні установки зручно застосовувати з охолоджувальними апаратами і ємностями для зберігання молока.

Вода – найпоширеніший холодоносіє при охолодженні молока на фермах. В апаратах воду не можна охолоджувати нижче за +1,5...2 °С, оскільки вона може замерзати. Водні розчини солей натрію, магній і кальцій хлоридів певної концентрації не замерзають за температури нижче –21,3 °С.

У прифермерських молочних цехах застосовують холодильні установки: МХУ-12, МХУ-8П, МХУ-8С.

Більш поширені холодильні агрегати: ХМ-ФВ-20 і ХМ-ФУ-40 продуктивністю 20 і 40 тис. ккал/г; аміачні ХМ-АВ-22 і ХМ-АУ-45 холодопродуктивністю 22 та 45 тис. ккал/г [12–16].

Як холодоагенти використовують фреони і аміак.

Фреон (дифтордихлорметан) – безбарвний газ зі специфічним запахом, неотруйний, не горить, не вибухає.

Під атмосферним тиском кипить за температури близько 30 °С, замерзає при –155 °С. Дуже текучий, проникає крізь пори металу, розчиняє гуму, дуже ліпкий. Його зберігають і транспортують у сталевих балонах із написом чорною фарбою, зокрема «Фреон-12».

Аміак – безбарвний газ із різким задушливим запахом. Гранічно допустима його концентрація в повітрі робочих приміщень 0,025 мг/л. Він добре розчиняється у воді. Деталі, які стикаються з аміаком, виготовляють зі сталі, оскільки мідь та її сплави він руйнує. За атмосферного тиску аміак кипить при 33,4 °С, а у твєрдий стан переходить при –77,7 °С.

12.3. Заморожування молока

Заморожування молока є одним зі способів його консервування. Таке молоко добре зберігається і легко транспортується.

Заморожування молока необхідно проводити швидко за температури –25 °С, щоб не змінити його хімічний склад і властивості (усі складові частини молока швидко замерзають, не проходить їх розшаровування, не утворюється концентрований розчин солей та молочного цукру, який викликає коагуляцію білків). При

Таблиця 12.4. Стан основних компонентів молока при повільному заморожуванні [6; 7].

Молоко і його компоненти	Зміна компонентів	Наслідки зміни компонентів
Молоко	Розшарування	Збільшення вмісту сухих речовин у незамерзлій частині молока
Молочний жир	Кристалізація гліцеридів, дестабілізація оболонок жирових кульок	Виділення вільного жиру, збільшення втрат жиру в процесі обробки
Казеїн	Дезагрегація місел	Утворення пластівців
Ферменти	Активізація плазменної ліпази, ксантинооксидази, сульфогідролоксидази	Посилення ліполізу, погіршення смаку
Лактоза	Кристалізація лактози за температури нижче -20°C	Зниження стабільності колоїдної системи молока

Примітка. Температура замерзання молока нижча від температури замерзання води і становить $-0,54\dots-0,57^{\circ}\text{C}$.

повільному заморожуванні і температурах не особливо низьких ($-5\dots-10^{\circ}\text{C}$) спочатку замерзає майже вся вільна вода, а у воді, яка замерзла, концентруються цукор і солі, які викликають часткову або повну коагуляцію білків після дефростації (розморожування).

Крім зміни хімічного складу окремих шарів замороженого молока, змінюються також їхні фізичні властивості (густина, в'язкість, кислотність та ін.) та стан окремих компонентів молока (табл. 12.4). Вплив процесу заморожування молока докладно наведений у літературі [2; 5].

Таблиця 12.5. Залежність температури замерзання молока від кількості долитої води

Температура замерзання молока, $^{\circ}\text{C}$	Долимо до молока води, %	Температура замерзання молока, $^{\circ}\text{C}$	Долимо до молока води, %
-0,55	0,0	-0,49	10,9
-0,54	1,8	-0,48	12,7
-0,53	3,6	-0,47	14,5
-0,52	5,4	-0,46	16,4
-0,51	7,3	-0,45	18,2
-0,50	9,1	-0,44	20,0

Температура замерзання натурального молока – величина до-
сить постійна, тому за цим показником визначають його натура-
льність. Метод визначення температури замерзання молока (*кри-
оскопія*) застосовується для контролю якості молока при фальси-
фікації його водою (табл. 12.5) [6; 7].

Визначення температури замерзання молока проводять за до-
помогою спеціального приладу, використовуючи термометр Бек-
мана.

12.4. Технологія і техніка обробки молока холодом

Свіжонадоєне молоко згідно з ГОСТ 13264-88, ДСТУ 3662-97 піс-
ля очищення від механічних домішок охолоджують до темпера-
тури 8 °С не пізніше ніж через дві години після закінчення доїн-
ня. При доїнні корів на доїльних установках з молокопроводами
молоко охолоджується в потоці на пластинчастих охолоджувачах.
Молоко, охолоджене на пластинчастому охолоднику за допомо-
гою води, треба доохолоджувати на спеціальних холодильних
установках або в резервуарах-охолоджувачах.

У разі відсутності холодильних установок молоко охолоджу-
ють у басейнах з проточною холодною водою або льодосольовою
сумішшю в металевих бідонах (рис. 12.1). Таке охолодження мо-
лока є найпростішим, дешевим і доступним на невеликих фермах.

Численні дослідження свідчать про те, що водою можна охо-
лоджувати молоко до температури, яка буде на 3–4 °С вищою, ніж

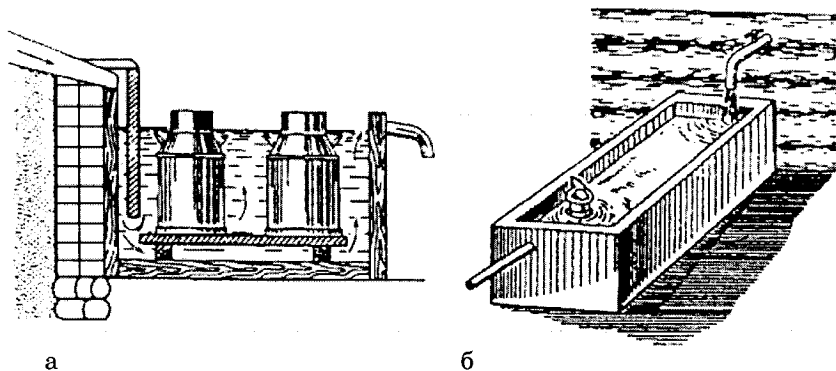


Рис. 12.1. Басейни для охолодження молока проточною джерельною водою (а) та проточною водопровідною (б) водою

Таблиця 12.6. Норми витрати льоду і залежність температури охолодної суміші від кількості добавленої до неї солі (за Н.В. Барабанциковим) [6]

Продукція	Орієнтовані норми витрат льоду за рік на 1 т продукції, м ³	Питома вага солі, % до маси тіла	Температура суміші, °С
Молоко сире	1,2	5	-3,1
Молоко пастеризоване	1,5	10	-6,2
Простокваша, кефір	1,5	20	-13,7
Кисломолочний сир	3,0	25	-17,8

температура води. Якщо врахувати, що навіть джерельна вода має температуру не вище 8–10 °С, то охолодити молоко водою до температури, яка необхідна, практично неможливо. У зв'язку з цим доцільно використовувати воду з добавлянням до неї льоду. Найефективнішими є льодосоляні суміші, які забезпечують охолодження молока до 2–3 °С (табл. 12.6).

У господарствах найкраще користуватися *компресійними холодильними машинами*. Добре зарекомендували себе лінії, які складаються з холодильних машин (установок) охолодних апаратів і місткостей для зберігання молока [6].

Промисловість випускає для ферми холодильну установку (див. попередні наведені дані) МХУ-12, у якій є бак – акумулятор холоду місткістю 900 л. У ньому міститься терморегулятор, який за температури 2 °С вимикає, а за 2,5 °С вмикає двигуни компресора та вентилятора.

Цей режим забезпечує можливість охолодження 300 кг молока протягом години з 33 до 8 °С. Для збільшення холодопродуктивності установки місткістю 2000 кг протягом двох годин потрібно холодильну машину запустити за п'ять годин до моменту охолодження молока і після встановлення на «лід» наморозити шар його завтовшки близько 20 мм на панелях випарника.

На тваринних комплексах та у великих господарствах використовують фреонові холодильні машини, холодопродуктивність яких наведена вище.

Щоб зменшити витрати води на охолодження конденсаторів, влаштовують бризкальні басейни і відкриті градирні [6; 12–16].

Література: [1, с. 142–216]; [5, с. 162–185]; [11, с. 364–455]; [16, с. 108–130]; [17, с. 102–106].

Питання для самоконтролю

1. Чому неможливо одержати молоко високої якості без його охолодження?
2. Як охолоджують свіжонадоєне молоко в господарствах за відсутності холодильних установок?
3. Яку роль відіграють холодильні технології в молочній промисловості?
4. Чому охолоджене молоко зберігає свої природні властивості більш тривалий термін, ніж неохолоджене?
5. Назвіть новітні технології обробки молока холодом.
6. Охарактеризуйте процеси, які відбуваються в молоці під час його охолодження?
7. До якої температури слід охолоджувати молоко, якщо проміжок у часі між охолодженням і доставкою його на молокозавод не перевищує шести годин?

КОРОТКИЙ ТЕРМІНОЛОГІЧНИЙ СЛОВНИК

- Агент холодильний** (холодоагент) – робоча речовина *холодильної машини*, яка при кипінні або в процесі розширення відбирає *теплоту* від охолоджувального об'єкта, а потім після стиснення передає її охолоджуваному середовищу (воді, повітрю та ін.)
- Агрегат холодильний** – конструктивне об'єднання в єдину складальну одиницю всіх або частини елементів *холодильної машини*. Агрегат має загальну раму або загальний каркас, але в деяких випадках він монтується на одному з вузлів (елементів), що входить до його складу, наприклад, один із теплообмінних апаратів.
- Апарат теплообмінний** (теплообмінник) – апарат, у якому відбувається теплообмін між двома або кількома *теплоносіями* чи між теплоносієм і поверхнею твердого тіла.
- Адіабата** (від грец. *adiabatos* – неперехідний) – лінія, яка зображує на будь-якій термодинамічній діаграмі оборотний *адіабатичний процес*. Характер перебігу даного процесу залежить від *показника адіабати* (k), що дорівнює відношенню питомих (або молярних) теплоємностей газу за умови постійного тиску і постійного об'єму ($p = \text{const}$; $V = \text{const}$).
- Величини екстенсивні** (адитивні) – величини, значення яких є пропорційними кількості речовини, що знаходиться в даній частині системи або в усій системі (внутрішня енергія, кількість енергії, робота, кількість теплоти, ентропія, об'єм та ін.).
- Величини інтенсивні** – величини, значення яких не змінюються, якщо розглядати будь-яку частину *термодинамічної системи* окремо від самої системи: температура, тиск, напруга силового поля тощо.
- Величини калоричні** – це термодинамічні величини (енергія, кількість *теплоти*, кількість роботи, *ентропія*, *ентальпія* тощо), які виражають в одиницях енергії.
- Величини термічні** – це величини (температура, тиск, коефіцієнт термічного розширення тощо), фізична сутність яких не пов'язана з поняттям енергії.
- Випарник** (теплообмінний апарат) – апарат для випаровування рідини (робочого тіла). У холодильній техніці є основним елементом

- холодильних машин (установок), призначений для безпосереднього (або за рахунок розсолу) охолодження *холодильних камер*.
- Вологомір** – пристрій для визначення вологості газів, рідин і твердих тіл (у тому числі сипких, а також деревини, зерна, харчових продуктів тощо). Вологість повітря звичайно вимірюють *гігрометрами* і *психрометрами*.
- Вологість повітря** – вміст у повітрі водяної пари. Найбільш сприятливою для людини в помірних кліматичних умовах є *відносна вологість* 40–60%.
- Гігрометр** (від грец. *hugrys* – вологий і ... метр) – пристрій для визначення абсолютної чи відносної *вологості повітря* (див. також *Вологомір*).
- Детандер** (від фр. *detandre* – ослаблювати, послаблювати) – поршнева або турбінна машина для охолодження газу (пари) шляхом його розширення зі здійсненням зовнішньої роботи. Використовується переважно в установках для зниження і розділення газів.
- Евтектика** – (від грец. *eutektos* – легко плавиться) – рідинна система (розчин або розплав), що знаходиться при даному тиску в рівновазі з твердими фазами.
- Ентальпія** (від грец. *enthálpō* – зігріваю) – функція H стану *термодинамічної системи*, що дорівнює сумі *внутрішньої енергії* U системи і добутку тиску p на об'єм робочого тіла V системи: $H = U + pV$ (в *ізобаричному процесі* ($p = \text{const}$) перетворення ентальпії дорівнює кількості *теплоти*, що передається системі). Одиниця ентальпії (у СІ) – *Джоуль* (Дж).
- Ентропія** (від грец. *entropia* – поворот, перетворення) – функція S стану *термодинамічної системи*, яка характеризує напрямок перебігу процесу *теплообміну* між системою і зовнішнім середовищем, а також напрямок перебігу мимовільних процесів у *замкнутій системі*. Одиниці ентропії (у СІ) – *Джоуль* та *Кельвін* (Дж/К).
- Ізоляція холодильна** – матеріал з малим *коефіцієнтом теплопровідності*, який використовується в *холодильній техніці* для ізоляції огорожувальних конструкцій й інших охолоджуваних об'єктів, а також низькотемпературного обладнання та трубопроводів *холодильних установок* з метою зменшення притоку *теплоти* із навколишнього середовища та втрат холоду.
- Ізотерма** (від ізо... і грец. *therme* – теплота) – лінія, що зображує на термодинамічній діаграмі стану рівноважний термодинамічний процес.
- Камера холодильна** – збірна охолоджувальна ємність, оточена теплоізованими щитами. Призначена для охолодження й зберігання швидкокопсувних продовольчих товарів.

Коефіцієнт холодильний – безрозмірна величина, яка застосовується в термодинаміці для характеристики енергетичної ефективності оборотних колових процесів – циклів холодильних установок.

Компресор холодильний – вузол (елемент), що входить до складу холодильної парокompресорної машини; слугує для відсмоктування парів *холодильного агента* (холодоагента) із *випарника* і нагнітання їх у *конденсатор*. Одна з найважливіших характеристик компресора – забезпечувана ним *холодопродуктивність установки*, яка за заданого холодоагента й температурного режиму роботи *холодильної машини* пропорційна об'ємній (масовій) *продуктивності* холодильного компресора.

Конденсатор (від лат. *condenso* – ущільнюю, згущую) – *теплообмінник* для здійснення переходу речовини із газоподібного (пароподібного) стану в рідкий або кристалічний; використовується в *холодильній техніці* для *конденсації* робочої речовини.

Мастила холодильні (рефрижераторні мастила) – технічна назва групи компресорних мастил, які використовуються для змащування *холодильних машин* (фреонових, аміачних, вуглекислотних) і турбохолодильників.

Машина холодильна – апарат, який слугує для відведення *теплоти* від охолоджуваного об'єкта (тіла) за температури більш низької, ніж температура навколишнього середовища; використовується для отримання температур від 10 до -150°C (область більш низьких температур належить до *криогенної техніки*).

Машина холодильно-газова – пристрій для отримання низькотемпературного холоду (як правило, в інтервалі 12–150 К) шляхом *розширення стисненого газу* (азот, водень, гелій, неон, повітря тощо).

Параметри стану (функції стану) – фізичні величини, значення яких однозначно обумовлюється станом системи і не залежить від її *первинного стану* (передісторії).

Процес адіабатичний (адіабатний) – *термодинамічний процес*, за якого відсутній *теплообмін* між системою, що здійснює процес, і навколишнім середовищем.

Процес ізотермічний – *термодинамічний процес*, який здійснюється за *постійної температури* ($T = \text{const}$). Приклади ізотермічних процесів: кипіння хімічно однорідної речовини, плавлення хімічно однорідного тіла за постійного тиску ($p = \text{const}$) тощо.

Процес термодинамічний – це зміна стану *термодинамічної системи* в результаті її взаємодії з навколишнім середовищем.

Розсіл холодильний (теплоносії холодильні) – холодоносії, рідкі або газоподібні речовини, які використовуються в *холодильних установках* як проміжне середовище для перенесення *теплоти* від охолоджуваного тіла до киплячого у *випарнику* *холодильної машини* *холодильного агента* (холодоагента) – натрій хлориду (для

температур до $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$); магній хлориду (до $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$), кальцій хлориду (до $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$); у низькотемпературних установках використовуються *антифризи і фреони*: водяні розчини пропіленгліколю (до $-47\text{ }^{\circ}\text{C}$), етиленгліколю (до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$), фреон-30 (до $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$), фреон-11 (до $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$) тощо.

Система термодинамічна – це сукупність мікрочастинок, яка є об'єктом термодинамічного аналізу в кожному конкретному випадку.

Стан термодинамічної системи – це сукупність фізичних величин, за якими можна відрізнити дану систему від іншої, а також простежити за змінами, що виникають в системі під час її взаємодії з навколишнім середовищем.

Температура (від лат. *temperatura* – розмірний, належне змішування, нормальний стан) – фізична величина, яка характеризує стан термодинамічної рівноваги макроскопічної системи.

Температура абсолютна (термодинамічна) – це величина (ТК) стану термодинамічної системи, яка є пропорційною кінетичній енергії поступального руху частинок робочого тіла. Визначається: $T = t + 273,16$, де t – температура за шкалою Цельсія (для вимірювання абсолютної температури застосовують рідинні термометри, термопари, пірометри тощо).

Температура замерзання розчинів – температура початку кристалізації твердої фази з розчину. Ця температура є нижчою від температури замерзання чистого розчинника, тому що *парціальний тиск* пари розчинника над розчином завжди нижче, ніж тиск пари над самим розчинником за однакової температури. Постійну температуру замерзання мають *евтектики*.

Температура кипіння ($T_{\text{кип}}$, T_s) – температура рівноважного переходу рідини в пару за постійного зовнішнього тиску.

Температура кипіння розчинів – температура початку переходу рідкої фази даного складу в пару. Ця температура, як правило, є нижчою від *температури конденсації*, за якої пара того самого складу починає конденсуватися в рідку фазу.

Температура криогенна (від грец. *krýos* – холод, мороз, лід і *genos* – рід, походження) – температура нижча за 120 K .

Температура криоскопічна (*температура замерзання розчинів*) – температура початку кристалізації твердої фази з розчину. Ця температура є нижчою, ніж температура замерзання чистого розчину, оскільки *парціальний тиск* завжди менший, ніж тиск пари над самим розчином за тієї самої температури.

Теплота (кількість теплоти) – *кількість теплоти*, що отримується чи віддається системою при *теплообміні* (за незмінних зовнішніх параметрів системи: об'єму, тиску, температури тощо). Поряд із температурою теплота є мірою зміни *внутрішньої енергії U* системи. Одиниця виміру (у СІ) – *Джоуль* (Дж).

Теплообмін – це передача енергії в результаті обміну хаотичним неспрямованим рухом макрочастинок: *кількість енергії*, що при цьому передається, називається *кількістю теплоти*, або *теплотою*.

Теплота пароутворення – це *кількість теплоти* (q , Дж/кг), необхідної для перетворення 1 кг киплячої рідини в суху насичену пару (q , Дж/кг) за постійного тиску.

Техніка криогенна – техніка отримання і використання *криогенних температур* (нижче 120 К).

Техніка холодильна – галузь техніки, що охоплює питання отримання й використання *штучного холоду* в області температур від 10 до -150 °С. Отримання більш низьких температур є завданням *криогенної техніки*.

Тиск абсолютний – це результат ударів об стінку мікрочастинок робочого тіла, що хаотично рухаються. Чисельно абсолютний тиск (p , Па) дорівнює силі, що діє на одиницю площі поверхні тіла в напрямку внутрішньої нормалі до неї.

Тіло чорне (абсолютно чорне тіло) – фізичне тіло, яке за будь-якої температури повністю поглинає електромагнітні випромінювання будь-якої довжини хвиль. Визначається *термодинамічною температурою* і не залежить від матеріалу тіла.

Точка води потрійна – це величина, яка характеризує *стан рівноваги* між трьома фазами: льодом, рідиною і паром. Вона дорівнює 273,16 К ($+0,01$ °С). $1/273,16$ частка інтервалу між цими двома *реперними точками* відліку за термодинамічною температурною шкалою, становить *один градус Кельвіна* – 1 К. Якщо $T = 0$ К, припиняється тепловий рух молекул.

Точка роси – це температура, до якої необхідно охолодити повітря або інший газ, щоб водяна пара, яка в ньому міститься, досягла стану *насичення*. За цієї температури в повітрі і на предметах, які з ним стикаються, відбувається *конденсація* водяної пари (*випадення роси*). Це одна з основних характеристик вологості повітря і вимірюється конденсаційним *гігрометром*.

Установка холодильна – комплекс обладнання для отримання й підтримання в охолоджуваних приміщеннях, тілах або речовинах температур, які є нижчими за температуру навколишнього середовища. Холодильна установка має одну або кілька *холодильних машин*, а також необхідні допоміжне обладнання і пристрої (системи енерго-, водо- і тепlopостачання; управління; контролю тощо), що забезпечують нормальну роботу цих машин. За своєю *холодопродуктивністю* установки умовно поділяють на *малі* (нижче 30 тис. ккал/год), *середні* (від 30 до 50 тис. ккал/год) і *потужні* (вище 500 тис. ккал/год).

- Фреони** (хладони) – технічна назва насичених ациклічних галагенопохідних вуглеводнів (C_n, H_x, F_y, Cl_2, Br), у яких атоми водню замінені атомами хлору і фтору.
- Фризер** (від лат. *freezer*, від *freeze* – заморожувати) – машина для збивання і заморожування суміші напівфабрикатів у вигляді *моролива*.
- Холод штучний** – результат охолодження деякого середовища або тіла (об'єкта) нижче від температури навколишнього середовища, отриманий внаслідок відведення від них певної кількості *теплоти*.
- Холодильник** – споруда або обладнання для зберігання харчових або інших продуктів за температури нижче, ніж температура навколишнього середовища.
- Холодильник домашній** – апарат, призначений для короткотермінового зберігання харчових продуктів у домашніх умовах шляхом їх *штучного охолодження*. Залежно від типу холодильної машини домашні холодильники поділяють на *компресорні, абсорбційні і термоелектричні*.
- Холодильник промисловий** – споруда, призначена для охолодження, заморожування й зберігання швидкопсувних харчових та інших продуктів за низьких температур. Великий холодильник функціонує як самостійне підприємство і складається з: охолоджуваного приміщення (сховища) з автомобільними і залізничними платформами; машинного та конденсаторного відділення *холодильної установки*; градирні; резервуарів і насосної станції оборотного водопостачання; адміністративного корпусу, побутового корпусу та інших будівель і споруд. Сьогодні існує понад 10 типів промислових холодильників.
- Холодопродуктивність** – *кількість теплоти*, що віднімається від охолоджуваного об'єкта за одиницю часу за допомогою *холодильної машини*, яка вимірюється у Вт (ккал/год). Холодопродуктивність залежить від *потужності* обладнання (машини), температурних умов його роботи і *холодильного агента* (або теплоносія), що використовують.
- Цикл холодильний** – оборотний *термодинамічний процес*, у результаті якого *теплота* переходить від тіла з меншою температурою до тіла з більшою температурою внаслідок витрати роботи. На практиці набули поширення холодильні цикли, засновані на *випаровуванні* рідини (речовини); використанні *ефекта Джоуля – Томпсона*; розширення робочого тіла в *детандері*. Одним із найбільш енергетично вигідних (див. *Коефіцієнт холодильний*) є *оборотний цикл Карно*.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Основна

1. Алексеев, Г. Н. Общая теплотехника : учеб. пособие / Г. Н. Алексеев. – М. : Высш. школа, 1980. – 552 с.
2. Техническая термодинамика : учебник / [В. И. Крутов, С. И. Исаев, И. А. Кожин и др.]; под ред. В. И. Крутова. – [3-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Высш. шк., 1991. – 384 с.
3. Теплотехніка : підручник / [Б. Х. Драганов, О. С. Бессараб, А. А. Долінський та ін.]; за ред. Б. Х. Драганова. – [2-ге вид., перероб. і доп.]. – К. : Фірма «ІНКОС», 2005. – 400 с.
4. Шеляков, О. П. Технологічне обладнання і холодильна техніка : підручник / О. П. Шеляков. – К. : Вища шк., 1996. – 503 с.

Додаткова

5. Винникова, Л. Г. Технология мяса и мясных продуктов : учебник / Л. Г. Винникова. – К. : Фирма «ИНКОС», 2006. – 600 с.
6. Кравців, Р. Й. Молочна справа : навч. посібник / [Р. Й. Кравців, В. І. Хоменко, Я. Ю. Островський]; за ред. В. І. Хоменка. – К. : Вища шк., 1998. – 279 с.
7. Маньковський, Л. Я. Технологія переробки молока : навч. посібник / [Л. Я. Маньковський, Р. Й. Кравців, Г. О. Богданов]. – Львів : Сполом, 2003. – 541 с.

Методична література

8. Гоголин, А. А. Проектирование холодильных сооружений / [А. А. Гоголин, Д. Г. Рютов, И. А. Головин и др.]; под ред. А. А. Гоголина. – М. : Пищ. пром-сть, 1978. – 248 с.
9. Лозовський, А. П. Теплові процеси і обладнання для переробки сільськогосподарської продукції : навчально-методичне видання / А. П. Лозовський, О. Ф. Серіков. – Полтава : РВВ «Terra», 2008. – 104 с.
10. Лозовський, А. П. Методичні рекомендації для виконання лабораторних робіт (основи холодильних технологій) / А. П. Лозовський, О. М. Іванов. – Полтава : РВВ «Terra», 2010. – 32 с.
11. Манербергер, А. А. Основы проектирования мясной и птицеперерабатывающей промышленности / [А. А. Манербергер,

- М. Г. Плотичер, А. П. Шопенский, Б. П. Эйнштейн]. – М. : Пищ. пром-сть, 1965. – 384 с.
12. Машины, оборудование, приборы и средства автоматизации перерабатывающих отраслей АПК. Каталог. Т I, ч. IV. Холодильное оборудование / [И. В. Степанова]. – М. : НИИТЭИИТО, 1989. – 80 с.
 13. Примеры расчетов по курсу «Холодильная техника» / [Г. Д. Авенин и др.]. – М. : Агропромиздат, 1983. – 183 с.
 14. Свердлов, Т. З. Курсовое и дипломное проектирование холодильных установок и систем кондиционирования воздуха / Т. З. Свердлов, Б. К. Явнель. – М. : Пищ. промышленность, 1978. – 264 с.
 15. Холодильные машины и аппараты. Каталог / [под ред. А. В. Быкова]. – М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1986. – 224 с.
 16. Чумак, И. Г. Холодильные установки / [И. Г. Чумак, В. П. Чепуренко, С. Ю. Ларьяновский и др.] ; под ред. И. Г. Чумака. – М. : Агропромиздат, 1981. – 495 с.

Навчальне видання

**Лозовський Анатолій Петрович
Іванов Олег Миколайович**

Основи холодильних технологій

Навчальний посібник

Головний редактор В.І. Кочубей
Технічний редактор Є.В. Грищенко
Дизайн обкладинки і макет В.Б. Гайдабрус
Комп'ютерна верстка О.І. Молодецька, А.О. Литвиненко

Підписано до друку 30.03.2015
Формат 60x84 ¹/₁₆. Папір офсетний.
Друк офсетний. Ум. друк. арк. 8,7. Обл.-вид. арк. 7,1.
Додрук. Замовлення № Д15-04/11

Відділ реалізації
Тел./факс: (0542) 65-75-85
E-mail: info@book.sumy.ua

ТОВ «ВТД «Університетська книга»
40009, м. Суми, вул. Комсомольська, 27
E-mail: publish@book.sumy.ua
www.book.sumy.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 489 від 18.06.2001

Віддруковано на обладнанні ВТД «Університетська книга»
вул. Комсомольська, 27, м. Суми, 40009, Україна