

**Міністерство освіти і науки України**  
**Тернопільський національний технічний університет**  
**імені Івана Пулюя**

Кафедра обладнання  
харчових технологій

*Курс лекцій*  
**«ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА»**

для студентів денної та заочної форм навчання  
спеціальності  
Галузеве машинобудування

Тернопіль, 2016

Вітенько Т.М.

Курс лекцій «Холодильна техніка».— Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2016. - 152с.

Курс лекцій написаний відповідно до програми курсу. Розглянуто теоретичні основи штучного охолодження, особливості будови та технічного обслуговування парокомпресійних, тепловикористовуючих та газових холодильних машин, конструктивні відмінності основного та допоміжного обладнання холодильної техніки, пристрої регулювання та автоматизації. Наведено особливості роботи і обслуговування морозильних апаратів. Розглянено питання планування, ізоляції та комплектування холодильників харчових підприємств.

Автор: Вітенько Тетяна Миколаївна, професор, д.т.н.

Рецензент:

Атаманюк В.М., доктор техн. наук, завідувач кафедри XI

НУ “Львівська Політехніка”

Рекомендовано до друку вченою радою факультету машинобудування та харчових технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя

(протокол № 5 від \_17.02\_2016 р)

© Вітенько Т.М., 2016

## Зміст.

1. Теоретичні основи технологій довгострокового зберігання харчових продуктів.....	6
2. Фізичні принципи отримання низьких температур.....	15
2.1. Загальні відомості штучного охолодження.....	15
2.2. Фазовий перехід речовини.....	15
2.3. Адіабатичне дроселювання.....	16
2.4. Вихровий ефект.....	16
2.5. Термоелектричний ефект (ефект Пельтьє).....	17
2.6. Холодильні агенти і холодоносії.....	27
3. Робочі цикли холодильних машин. Побудова робочого циклу в термодинамічній діаграмі.....	29
3.1. Діаграми холодильних агентів.....	29
3.2. Принципові схеми парової холодильної машини та їхнє зображення на діаграмі.....	33
3.3. Схема холодильної машини з регенеративним теплообмінником і її зображення в діаграмі $h - \lg P$ .....	37
3.4. Схеми двохступневих холодильних машин і їхнє зображення в діаграмі $h - \lg P$ .....	39
3.5. Значення діаграми холодильних агентів для аналізу роботи холодильної установки і її обслуговування.....	45
4. Робочі процеси в компресорі. поршневі, роторні, відцентрові та гвинтові компресори.....	49
4.1. Індикаторна діаграма. Об'ємні втрати у компресорі.....	49
4.2. Поршневі компресори. Особливості будови.....	57
5. Конденсатори.....	65

5.1. Конденсатори водяного охолодження.....	65
6. Випарники.....	73
7. Пристрої для охолодження оборотної води.....	84
8. Ресивери.....	88
9. Масловіддільники й маслозбірники.....	89
10. Віддільники рідини.....	91
11. Проміжні посудини.....	92
12. Електронасоси для холодоагентів.....	93
13. Абсорбційні, паро ежекторні і газові холодильні машини.....	93
13.1. Абсорбційні холодильні машини.....	93
13.2. Пароежекторні холодильні машини.....	98
13.3. Газові холодильні машини.....	102
13.4. Вихрові труби.....	105
14. Безмашинні способи охолодження.....	106
14.1. Охолодження води кригою.....	106
14.2. Випарне охолодження.....	117
15. Холодильне технологічне обладнання.....	119
15.1. Класифікація холодильного технологічного обладнання.....	119
15.2. Повітряні морозильні апарати.....	120
15.3. Контактні морозильні апарати.....	130
15.4. Сублімаційні установки.....	143
Література.....	150

## 1. Теоретичні основи технологій довгострокового зберігання харчових продуктів

Оскільки сировина, напівфабрикати і готова продукція харчових виробництв є живильним середовищем для мікроорганізмів, то для запобігання їхнього псування потрібно створити такі умови, щоб мікроорганізми були знешкоджені або не могли розвиватись, а ферменти, що регулюють біохімічні процеси, були інактивовані. Засоби, які можна використовувати, умовно поділяють на три основні групи, що ґрунтуються на принципах:

- 1) біозу, тобто на підтриманні життєвих процесів у сировині і використанні її природного імунітету;
- 2) анабіозу, що передбачає уповільнення, пригнічення життєдіяльності за допомогою різних фізичних, хімічних і біохімічних факторів. За таких умов життєві процеси в сировині і напівфабрикатах, зазвичай зовсім припиняються;
- 3) абіозу, тобто на відсутності всіх життєвих процесів, як для мікроорганізмів, так і для середовища.

Незважаючи на таку класифікацію, жоден із зазначених принципів не використовують на практиці в чистому вигляді. На практиці реалізуються методи, що ґрунтуються на змішаних принципах. Проте щоразу можна спостерігати певну перевагу тих чи інших методів, що і визначає право використання цієї класифікації. Розглянемо детальніше технології довгострокового зберігання харчової сировини.

**Біоз.** Мета цього методу полягає у зберіганні плодів і овочів у свіжому вигляді без будь-якої спеціальної обробки. Вживають тільки заходи, спрямовані на підтримання нормальних життєвих процесів та деяке обмеження їхньої інтенсивності для зменшення втрат харчових речовин внаслідок дихання і втрат маси за рахунок випаровування вологи. Підтримання нормальних життєвих процесів і обмеження їхньої

інтенсивності досягають відповідним режимом складування і зберігання сировини. Зазвичай дбають про нормальний доступ повітря до окремих плодів. Невиконання цієї умови спричиняє порушення нормального дихання і настає так зване інтрамолекулярне дихання, за якого цукри сировини розкладаються на діоксид вуглецю і спирт за схемою:



Утворений спирт є отрутою для цитоплазми рослинних клітин і спричиняє їхню загибель.

Треба мати на увазі, що інтенсивність процесів дихання і випаровування вологи значно зростає з підвищенням температури. Суттєву роль у процесах зберігання відіграють умови, що забезпечують мінімум контактів із збудниками псування. Принцип біюзу використовується не як самостійний метод консервування, а як спосіб короткочасного зберігання сировини на першому етапі технологічного процесу.

**Анабіоз.** На цьому принципі ґрунтується ряд методів консервування. Розглянемо холодильне зберігання сировини і харчової продукції як таке, за якого принцип анабіозу використовується в найбільш чистому вигляді. Розрізняють три основні способи зберігання за низьких температур:

1. Зберігання в охолодженому стані, за якого температура підтримується на рівні, близькому до точки замерзання продукту. В цьому разі вся або більша частина початкової вологи залишається в продукті. Зазначимо, що розчинені в клітинній цитоплазмі речовини мають точку замерзання нижче 0°C.
2. Глибоке заморожування, за якого основна частина початкової вологи перетворюється на кригу.
3. Змішані методи, за яких низьку температуру використовують в поєднанні з іншими способами, наприклад з використанням діоксиду вуглецю для припинення дихання бактеріальних клітин.

Якщо розглядати лише низьку температуру, то її вплив на біологічні системи проявляється у гальмуванні:

- а) швидкості процесів обміну і поділу клітин;
- б) швидкості хімічних реакцій, в тому числі і реакцій, що каталізуються ферментними системами;
- в) руху речовин, що реагують внаслідок зміни в'язкості;

Сполучення цих факторів може призвести до значних порушень метаболічних процесів у живих тканинах і мікроорганізмах і втрати їхньої життєдіяльності. Так само вони можуть викликати значні зміни в неживих тканинах харчових виробів.

**Вплив низької температури на мікроорганізми.** Спроможність мікроорганізмів до виживання і розмноження за низьких температур, яка змінюється в дуже широких межах, часто зв'язана з їх попередньою історією та адаптацією. Так, більшість патогенних мікроорганізмів, активних при 37°C, стають неактивними при температурі замерзання і можуть повільно гинути в умовах глибокого заморожування, тоді як спорогенні мікроби можуть використовувати свій захисний механізм і залишатись неактивними протягом тривалого часу за дуже низьких температур. Деякі психрофільні мікроби залишаються активними при температурі нижче точки замерзання і можуть рости при -4 °C. Вони спричиняють псування охолоджених продуктів, що зберігаються, і можуть стати дуже небезпечними. Різні види і штами дріжджів, грибів і бактерій є активними за низьких температур і кожен продукт має свою типову мікрофлору. Серед цих бактерій найчастіше зустрічаються представники родів *Pseudomonas* і *Micrococcus*.

Зберігаючи продукти за низьких температур, слід мати на увазі що за температур нижче критичної всі метаболічні процеси гальмуються. Проте навіть за цих низьких швидкостей реакції, що викликані мікроорганізмами, можуть відігравати важливу роль, якщо тривають протягом кількох місяців зберігання продукту. На практиці загальна кількість мікроорганізмів поволі зменшується протягом кількох місяців. З цієї причини заморожування не може замінити стерилізацію.

За умови зниження температури на кожні 10°C швидкість більшості

хімічних і біохімічних реакцій знижується в 2-3 рази. Така закономірність зберігається не тільки для температур нижче точки замерзання. У водному розчині на швидкість реакцій впливають і інші фактори. Так, може підвищитися в'язкість, що призведе до обмеження руху рідини або матиме місце викристалізування криги, яке зумовлює підвищення концентрації розчинених реагуючих речовин. Розрахувати ці впливи, звичайно, неможливо, але встановлено, що багато реакцій розпаду протікають достатньо швидко навіть за  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що обмежує термін зберігання багатьох продуктів. Типовим прикладом може бути гідроліз тригліцеридних жирів ліпазами. Подібні реакції спричиняють дефекти структури харчової продукції і утворення гіркового смаку.

Більшість харчових продуктів, що зберігаються замороженими, мають у своєму складі водну фазу з порівняно низькою концентрацією розчинених речовин. Ці речовини зазвичай являють собою суміш глобулярних білків, неорганічних солей і різних органічних сполук, наприклад цукрів і нуклеотидів, що є живильними компонентами для мікроорганізмів.

У результаті охолодження нижче точки замерзання відбувається викристалізування криги, концентрація розчину збільшується. Це може викликати пригнічування життєдіяльності мікробних клітин, порушення їхнього метаболізму або активності води нижче рівня, за якого можлива їхня життєдіяльність.

Наведемо наближений розрахунок активності води замороженої системи, виведений з термодинамічних принципів, наприклад білкового гелю, за різних температур. Зміна вільної енергії від переохолодження води до криги описується рівнянням:

$$E = R \cdot T \cdot \ln \frac{a}{a_0} = R \cdot T \cdot \ln a , \quad (1.1)$$

де  $R$  — газова стала;  $T$  — абсолютна температура;  $a$  — активність льоду;  $a_0$  — активність переохолодженої води за такої самої температури, яку можна прийняти за одиницю (під активністю води розуміють відношення тиску



пари розчину до тиску пари чистої води).

Рівняння Гіббса-Гельмгольца зв'язує цю зміну вільної енергії відносно температури з ентальпією затвердіння криги:

$$\frac{d\left(\frac{\Delta E}{T}\right)}{dT} = \frac{-H_{\text{л}}}{T^2}, \quad (1.2)$$

де  $H_{\text{л}}$  – ентальпія затвердіння льоду.

Перетворивши цей вираз, одержимо:

$$\frac{d \ln a}{dT} = \frac{-H_{\text{л}}}{RT^2}. \quad (1.3)$$

Значення  $H_{\text{л}}$  можна виразити через  $H_0$  – тобто її величину за 0 °С, яка дорівнює 6025,2 Дж/моль, і різницю теплоємностей криги і води в межах даного діапазону температур:

$$H_{\text{л}} = H_0 - \Delta t \cdot \Delta C_p, \quad (1.4)$$

де  $\Delta t$  – зниження температури замерзання, °С;

$\Delta C_p$  – різниця між теплоємністю льоду і води (37,71 Дж/моль).

Отже,

$$T = 273 - \Delta t = T_0 - \Delta t. \quad (1.5)$$

Підставляючи ці вирази в умову (3), одержимо:

$$d \ln a = \frac{(H_0 - \Delta t \cdot \Delta C_p) \cdot d(\Delta t)}{R(T_0 - \Delta t)^2}. \quad (1.6)$$

Останній вираз можемо проінтегрувати, розгорнувши

$\frac{1}{(T_0 - \Delta t)^2}$  в такий ряд:

$$T_0^{-2} \left[ 1 + 2 \left( \frac{\Delta t}{T_0} \right) + 3 \left( \frac{\Delta t}{T_0} \right)^2 \text{ и т.д.} \right]. \quad (1.7)$$

Для температур до -30°С лише два перших члени є значущими, тому умова (1.6) спрощується:

$$d \ln a = \frac{1}{RT_0^2} \left[ 1 + 2 \left( \frac{\Delta t}{T_0} \right) \right] H_0 - \Delta t \cdot C_p \cdot d(\Delta t). \quad (1.8)$$

Підставляючи вказані значення відомих величин, одержимо:

$$\ln a = -(9,7 \cdot 10^{-3} + 10,3 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta t) \Delta t, \quad (1.9)$$

За умови переходу до десяткових логарифмів

$$\lg a = -4,21 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta t - 4,48 \cdot 10^{-6} (\Delta t)^2. \quad (1.10)$$

Цей вираз є загальним, якщо виходити тільки з  $\Delta t$ . Так, за  $-20^\circ\text{C}$  розрахункова величина « $a$ » становить 0,82, тобто нижче рівня, за якого може рости більшість бактерій, але в діапазоні для деяких дріжджів і грибів.

Результати, одержані таким розрахунком, є лише одним аспектом складної картини пригнічення росту мікробів і тому можуть дати неправильне уявлення. Зокрема, крім зміни активності води, очевидно, діють і інші фактори, які проявляються ще до початку утворення криги. Крім того, атмосфера в холодильнику часто наближається до межі насичення, тому мікроорганізми, що живуть на поверхні продукту (і частка яких у псуванні найбільш важлива), перебувають у кращих умовах щодо вологи, ніж ті, що містяться в глибинних шарах.

Встановлено, що на більшість продуктів сприятливо діє швидке, а не повільне заморожування і що продукти псуються під час коливань температури зберігання. Існує теорія, за якою величина кристалів криги є домінуючим фактором, і повільне охолодження чи коливання температури дає змогу утворюватися кристалам, які мають розміри, достатні для травмування стінок у клітинних тканинах. Цим можна пояснити структурні зміни в таких матеріалах, як м'ясо, риба, а також загибель мікробних клітин.

Вплив заморожування на біологічні тканини не можна пояснити тільки фізичним ушкодженням клітин кристалами криги. В багатьох випадках більш

важливим механізмом є денатурація білків, яка спричиняється підвищеною концентрацією солей. Денатурація часто є незворотним процесом і призводить до значних змін у структурі об'ємного матеріалу або життєздатності окремих клітин. Денатурація білка – це реакція, що регулюється часом і температурою. Вона залежить також від концентрації солей і рухомості реагуючих речовин. Для уникнення денатурації білків бажано температурний діапазон від  $-2$  до  $-8^{\circ}\text{C}$  проходити швидко.

Глибоке заморожування харчових продуктів переводить більшу частину вологи в твердий стан. Тому мікроорганізми, що живляться осмотичним шляхом, втрачають можливість харчування. Цій умові відповідає температура  $-18^{\circ}\text{C}$ .

Для визначення кількості вимороженої вологи за різних температур у наводяться складні рівняння. Проте існує доволі просте правило, за допомогою якого можна з достатньою точністю розрахувати кількість вимороженої вологи.

Відомо, що після досягнення точки замерзання зниження температури вдвічі призводить до вимерзання половини вологи, що залишилась. Якщо криоскопічна температура становила  $-2^{\circ}\text{C}$ , то за умови зниження температури до  $-4^{\circ}\text{C}$  вимерзне половина кількості вологи. За подальшого зниження температури до  $-8^{\circ}\text{C}$  за цим правилом вимерзне 75% води. Таким чином, за  $-16^{\circ}\text{C}$  кількість вимороженої вологи становитиме 87,5 %, за  $-32^{\circ}\text{C}$  - 93,8 %.

Оскільки температура замерзання багатьох видів сировини і харчових продуктів не нижча  $-2^{\circ}\text{C}$ , то очевидно, що за  $-18^{\circ}\text{C}$  основна кількість вологи буде виморожена (в овочах - 84-91 %, а в плодах - 71-80%).

Підкреслимо, що під час використання методу заморожування сировини і продукції принцип анабіозу стосується (і то не повною мірою) тільки мікроорганізмів, а плоди і овочі як живий організм гинуть. Зазначимо ще одну особливість методу заморожування, яка ускладнює і стримує його широке впровадження. Річ у тім, що після заморожування продукту до  $-18^{\circ}\text{C}$  слід підтримувати цю температуру доти, доки продукт не потрапить до

споживача. Якщо навіть на короткий час підвищити його температуру хоча б до  $-10^{\circ}\text{C}$ , то мікроорганізми повертаються до нормальної життєдіяльності, яку вже не припинити повторним зниженням температури до  $-18^{\circ}\text{C}$ .

Тому на всіх етапах зберігання, руху і реалізації продукції зазначена температура повинна підтримуватись.

**Зневоднювання заморожуванням.** Цим методом доцільно користуватись для зневоднювання профільтрованих цитрусових і ягідних соків і з меншим успіхом – для зневоднювання томатного соку і концентратів пектину. Основна складність під час використання цього методу полягає у потребі росту кристалів криги без значного включення в них соку і в такій формі, що забезпечує легке і швидке видалення. Це потребує повільного росту відносно великих і однорідних кристалів.

Існують методи, що ґрунтуються на використанні ступінчастого заморожування та контролю швидкості охолодження і перемішування з метою усунення такого переохолодження, за якого може утворитися багато дрібних кристалів. Наприклад, для одержання пивного концентрату на першому ступені охолодження до  $-12^{\circ}\text{C}$  заморожується 50% води з подальшим охолодженням для видалення ще 25% вологи. Це має переваги в тому, що виключається утворення білкової зависі і стає необов'язковим тривале зберігання або витримування пива на холоді. Аналогічний процес використовують і під час виробництва апельсинового соку. Смакові якості і міцність вин можуть бути посилені частковим заморожуванням. Його можна використовувати замість існуючих методів кріплення вин коньяком, особливо у виробництві хересу і портвейну. Відомо, що за якістю концентрати соків, одержані заморожуванням, у зв'язку з відсутністю теплового ушкодження і зменшення втрат ефірних олій, помітно перевищують аналогічні концентрати, які одержують шляхом випаровування під вакуумом. За таких умов краще зберігається аскорбінова кислота. Можна стверджувати, що високоякісні фруктові концентрати в майбутньому будуть готуватися цим способом.

Заморожування теоретично також може забезпечувати одержання визначеної концентрації цільового компоненту з меншими енергетичними витратами. Це впливає з різниці між теплотою випаровування (555,6 ккал/кг) і теплотою заморожування (80 ккал/кг). Інакше кажучи, для випаровування 1 кг води треба витратити приблизно в 7 разів більше енергії, ніж для її виморожування. Але ці переваги значно зменшуються через втрати цінних розчинених речовин, що входять до маси криги. Ці втрати можуть збільшуватись за збільшення концентрації і характеризуватись дуже великими цифрами за високої в'язкості остаточного продукту в кінці заморожування.

## **2. Фізичні принципи отримання низьких температур**

### **2.1. Загальні відомості штучного охолодження**

Для отримання низьких температур використовують фізичні процеси, що супроводжуються поглинанням теплоти. До таких процесів відносять:

- фазовий перехід речовини (плавлення, кипіння, сублімація);
- адіабатичне дроселювання газу з початковою температурою, що є меншою від температури верхньої точки інверсії;
- адіабатичне розширення газу з віддачею зовнішньої корисної роботи;
- вихровий ефект Ранка;
- термоелектричний ефект Пельтьє.

Діапазон низьких температур, що отримують для потреб підприємств харчової і переробної промисловостей умовно поділяють на ділянку помірно низьких ( до  $-153^{\circ}\text{C}$ , або  $120\text{K}$  ) і криогенних ( нижче  $120\text{K}$  ) температур.

### **2.2. Фазовий перехід речовини**

Цей процес відбувається з поглинанням значної кількості тепла. Найдоступнішою речовиною є крига, яка за атмосферного тиску плавиться за  $0^{\circ}\text{C}$  і має велику питому теплоту плавлення ( $335\text{ кДж/кг}$ ). Нижчу температуру плавлення аж до криогідратної (евтектичної), можна отримати якщо змішувати кригу з деякими солями.

Результат отримання низьких температур внаслідок кипіння речовин залежить від тиску в системі. Зі зменшенням тиску температура кипіння понижується і навпаки. Тобто використовуючи одну речовину можна отримати інтервал низьких температур. А використовуючи речовини з потрібними властивостями – любую іншу температуру. Цей спосіб використовують в основному для пониження температури води або вологих поверхонь.

Джерелом низької температури може бути тверда вуглекислота, що при атмосферному тиску має температуру сублімації  $-78,5^{\circ}\text{C}$  і питому теплоту  $574\text{кДж/кг}$ . Сублімація водяної криги при тиску нижче атмосферного, що використовують для сушіння харчових продуктів відбувається за температури нижче  $0^{\circ}\text{C}$ .

### 2.3. Адіабатичне дроселювання

Це процес незворотного розширення газу або рідини за умови його проходженні через пристрій з малим прохідним перерізом (дросель, пориста перегородка). Процес відбувається швидко, тому теплообміну з навколишнім середовищем не відбувається і ентальпія речовини не змінюється. Корисна робота не здійснюється так як робота проштовхування переходить у теплоту тертя.

Під час дроселювання реального газу внаслідок зміни внутрішньої енергії здійснюється робота проти сил взаємодії молекул. Це призводить до зміни температури газу.

Розглянемо механізм процесу дроселювання.

Під час проходження газу по трубопроводу в якому встановлено дроселюючий пристрій необхідно здійснити роботу  $L$ :

$$\begin{aligned}
 L &= L_1 - L_2 = FS_1 p_1 - FS_2 p_2 = Vp_1 - Vp_2 = Gv_1 p_1 - Gv_2 p_2 = G(v_1 p_1 - v_2 p_2) \\
 L &= (u_2 - u_1) \cdot G \\
 u_2 - u_1 &= v_1 p_1 - v_2 p_2 \\
 u_1 + v_1 p_1 &= u_2 + v_2 p_2
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Таким чином  $h_1 = h_2 = \text{const}$ .

У розрахунках часто використовують поняття диференційного дросельного ефекту – відношення нескінченно малої зміни температури реального газу за умови зміни його тиску на одиницю:

$$j = \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_{h=\text{const}} \quad (2.2)$$

Інтегральний дросельний ефект відповідає зміні тиску від  $p_1$  до  $p_2$ .

$$j_{\text{інт}} = \int_{p_1}^{p_2} j dp = \int_{p_1}^{p_2} \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_{h=\text{const}} \cdot dp \quad (2.3)$$

Дросельний ефект можна виразити у енергетичних одиницях, як різницю ентальпій стиснутого і розширеного газів.

**2.4. Вихровий ефект** (ефект Ранка-хилша англ. *Ranque-Hilsch Effect*) — ефект розділення газу чи рідини при закручуванні в циліндричній або конічній камері на дві фракції (рис. 2.1). На периферії утворюється закручений потік з більшою температурою а в центрі закручений охолоджений потік, причому обертання в центрі відбувається в інший бік, чим на периферії.

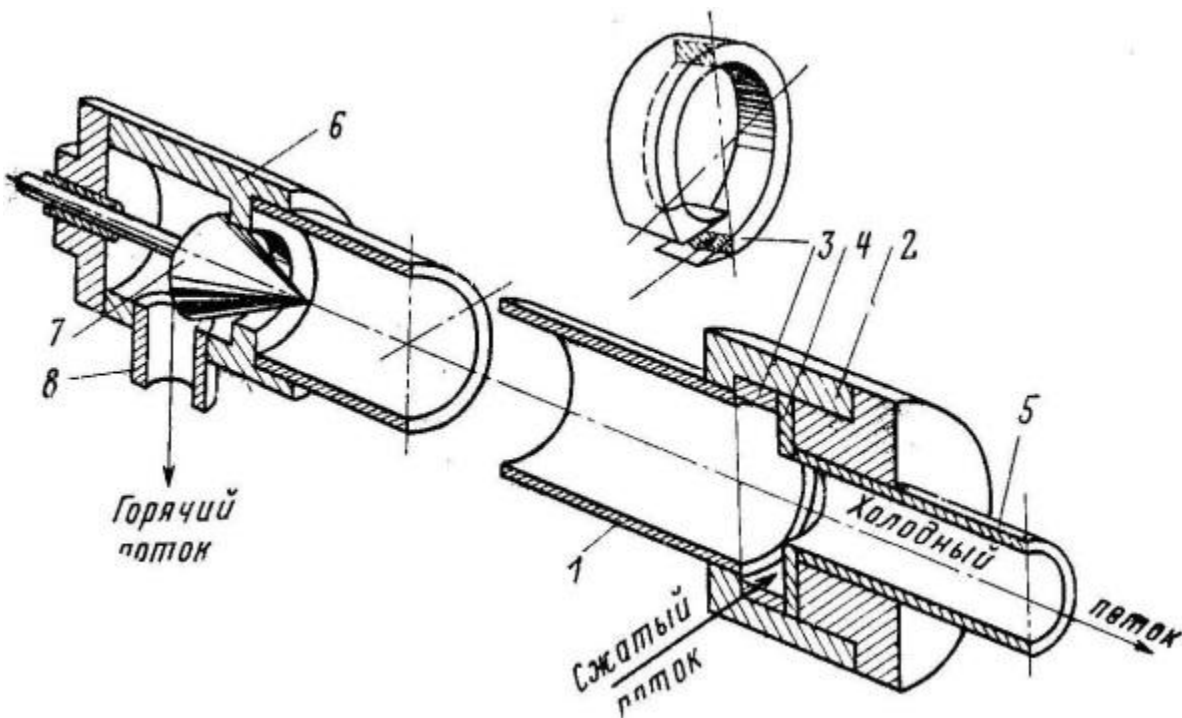


Рис. 2.1. Загальний вигляд вихрової труби: 1 - циліндрова труба; 2 - розподільна головка; 3 - сопловою відведення; 4 - діафрагма; 5 - труба холодного потоку;



6 - регулюючий вентиль; 7 - конус; 8 - труба гарячого потоку

Вперше ефект відкритий французьким інженером Жозефом Ранком в кінці 20-х років при вимірюванні температури в промисловому циклоні. В кінці 1931 грам Ж.Ранк подає заявку на винайдений пристрій, названий їм «Вихровою трубою» (у літературі зустрічається як труба Ранке). Отримати патент вдається тільки в 1934 році в Америці (Патент США № 1952281). В даний час реалізований ряд апаратів, в яких використовується вихровий ефект, вихрових апаратів. Це «вихрові камери» для хімічного розділення речовин під дією відцентрових сил і «вихрові труби», використовувані як джерело холоду. З 1960-х років вихровий рух є темою багатьох наукових досліджень.

На рис. 2.1 наведено загальний вигляд вихрової труби. Циліндрична труба 1 з'єднана з розподільчої головкою 2, яка містить соплове введення 3, діафрагму 4 і трубу холодного потоку 5. З протилежного боку розташований корпус регулюючого вентиля 6 з конусом 7 і трубою 8 гарячого потоку. Потік стисненого газу (наприклад, повітря) підводиться до сопла 3. У соплове введення і потім у вихровій трубі стиснений газ розширюється і поділяється на два потоки - холодний і гарячий. Холодний потік відводиться через діафрагму 4 по трубі холодного потоку. Гарячий потік відводиться через вентиль 6 по трубі гарячого потоку. Змінюючи положення конуса 7, можна змінювати витрати і температури холодного і гарячого потоків. Для зниження температури  $t$  необхідно витрат зменшити витрати холодного потоку (вентиль 7 відкривається). Для підвищення температури  $t$  гарячого потоку, навпаки, вентиль 7 прикривається.

**2.5. Термоелектричний ефект (ефект Пельтьє)** проявляється у тому, що на межі двох різнорідних матеріалів, під час проходження крізь них електричного струму, виділяється чи поглинається тепло (залежно від напрямку проходження струму). Це явище відкрив французький годинниковий майстер Жан Пельтьє.

Якщо контакт нагрівається, то ефект Пельтьє називають позитивним, якщо охолоджується — негативним.

На контакті двох речовин виникає контактна різниця потенціалів. Тому

для переходу через контакт носій заряду повинен або набрати певну енергію, або віддати її. У випадку, коли носій заряду набирає енергію, вона відбирається від теплових коливань ґратки, а у випадку, коли енергія віддається зарядом, то вона переходить у тепловий рух. Як наслідок, контакт або охолоджується, або нагрівається. Ефект Пельтьє властивий як металам, так і напівпровідникам. У напівпровідниках він виражений краще.

Ефект Пельтьє використовується в деяких холодильниках. Термоелектричні холодильники – це холодильники малої місткості, їхнє живлення передбачено з мережі 12 вольт, наприклад, від акумуляторів легкових автомобілів. При проходженні постійного струму в термобатареях один спай поглинає тепло, а протилежний його виділяє. Холод одержують за допомогою термоелементів. Охолоджуюча площа термоелемента спрямована всередину холодильника. Негативною рисою таких холодильників є висока вартість і велике споживання енергії.

Кількість теплоти, яка виділяється чи поглинається при проходженні електричного заряду через контакт пропорційна величині заряду, який проходить через контакт

$$Q = \Pi \cdot q, \quad (2.4)$$

де  $Q$  — кількість теплоти,  $q$  — величина заряду, який пройшов через контакт,  $\Pi$  — коефіцієнт Пельтьє.

Коефіцієнт Пельтьє можна подати у вигляді різниці коефіцієнтів Пельтьє двох речовин

$$\Pi_{12} = \Pi_1 - \Pi_2. \quad (2.5)$$

Якщо в тому ж самому ланцюгу створити в місці контакту різні температури, то між контактами утвориться різниця потенціалів і виникає струм. Величина термоелектрорушійної сили ( термоерс ) визначають за рівнянням:

$$E = a(T_2 - T_x), \quad (2.6)$$

де  $a$  - коефіцієнт термоерс, В/К;  $T_z$  і  $T_x$  - абсолютні температури гарячого і холодного контактів.

Виникнення термоерс було винайдено в 1834 р. Зеєбеком. Зв'язок між коефіцієнтами Пельтьє і Зеєбека встановлюють співвідношенням:

$$P = aT. \quad (2.7)$$

Як вихідний конструктивний модуль для ТОП застосовують термоелемент (ТЕЛ). Він складається з двох галузей, з'єднаних через комутаційні переходи струмопровідними шинами, що утворюють холодні і гарячі спаї. Шини виготовляють із міді або алюмінію, достатньої товщини, для того, щоб можна було знехтувати їхнім електричним опором. Елементи виготовляють із напівпровідникових матеріалів, причому один із матеріалів електронної провідності (n типу), інший - із матеріалів діркової провідності (p типу). Комутаційні переходи – це складні композиції матеріалів, призначені забезпечити малий електричний опір в місцях контактів шин з гілками, запобігти дифузії своїх компонентів у напівпровідники і бути достатньо еластичними для демпфірування термічних напруг.

Простими є плоскі ТЕЛи (рис. 2.2). Їхні елементи в поперечному перетині можуть мати форму квадрату, прямокутника, кола. За вказаного на рисунку напрямку постійного струму спай із сторони шини 1 охолідиться і буде виконувати роль холодного елемента, нижні спаї нагріваються і будуть гарячими елементами. Якщо інтенсивним тепловідведенням стабілізувати температуру гарячих спаїв, то температура холодного спаю понизиться до визначеного значення. Тепло  $Q_n^x$ , що поглинається за одиницю часу на холодному спаї ТЕЛа, можна визначити за формулою:

$$Q_n^x = \bar{a} T_x I, \quad (2.8)$$

де  $\bar{a} = a_{(+)} + a_{(-)}$  - сума абсолютних середніх значень коефіцієнтів термоЕРС в робочому інтервалі температур для діркової і електронної галузей ТЕЛа. На гарячому спаї ефект Пельтьє проявить себе виділенням тепла:

$$Q_n^2 = \bar{a} T_2 I, \quad (2.9)$$

Проходження струму по ділянках буде супроводжуватись також виділенням теплоти  $Q_{дж}$  відповідно до закону Джоуля - Ленца:

$$Q_{дж} = I^2 R, \quad (2.10)$$

де  $R$  - опір ТЕЛа, Ом .

$R$  за відомих довжини  $l$ , опорів  $\rho_n$  і  $\rho_p$  і перетинів  $S_n$  і  $S_p$  елементів ТЕЛа визначають за рівнянням:

$$R = l \left( \frac{\rho_p}{S_p} + \frac{\rho_n}{S_n} \right) \quad (2.11)$$

Встановлено, що в першому наближенні тепла  $Q_{дж}$  розподіляється між спаями порівну, тобто половина її поступає на холодний спай і половина - на гарячий.

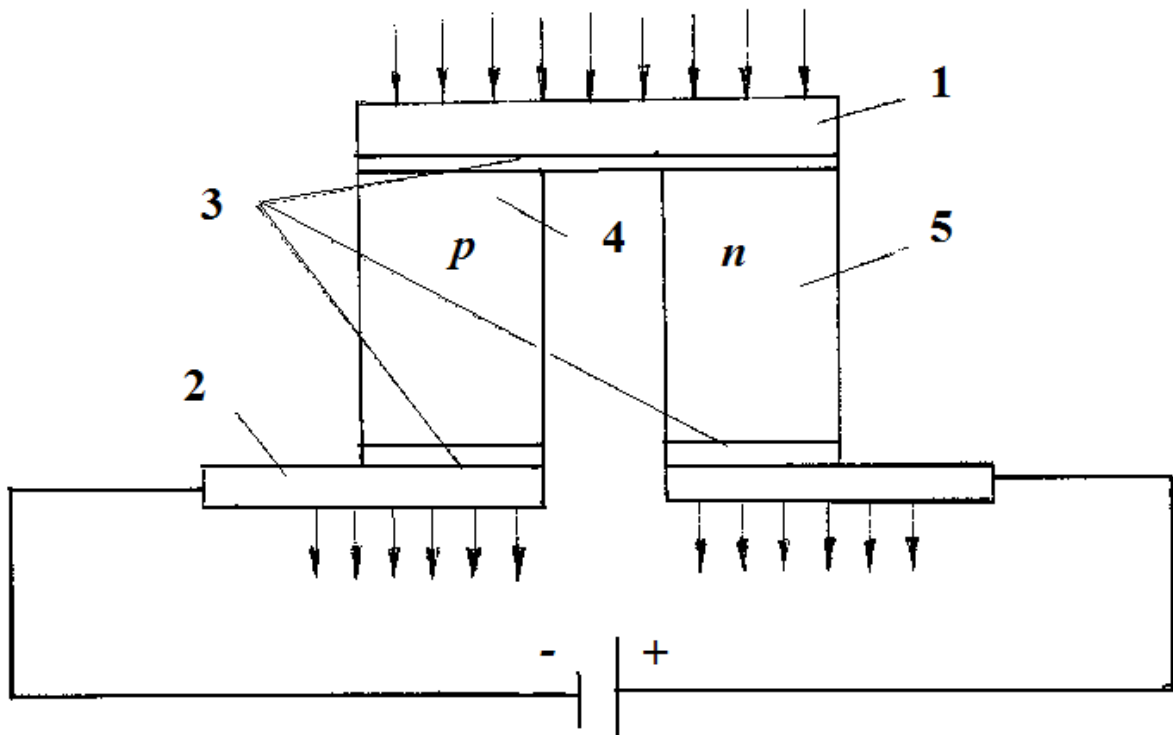


Рис 2.2. Схема напівпровідникового елемента: 1,2 – стрімопровідні шини; 3-комутаційні переходи; 4-елемент р-типу; 5-елемент n-типу.

Оскільки кількість теплоти Пельтьє пропорційно першому ступеню сили струму, а частина тепла Джоуля - квадрату сили струму, то після перевищення струмом оптимального його значення ефект охолодження зменшується і навіть може перейти в нагрівання (рис.2.3).

Оптимальну силу струму визначають за рівнянням :

$$I_{opt} = a \sqrt{T_x / R} . \quad (2.12)$$

Максимальна величина суми буде визначатись:

$$(- Q_n^x + 1/2 Q_{дж})_{max} = - a^2 T_x^2 / 2R = - P^2 / 2R . \quad (2.13)$$

Внаслідок різних температур на спаях виникає потік тепла від гарячих спайів до холодних:

$$Q_H = H (T_2 - T_1) ; H = 1 / l (H_p S_p + H_n S_n) , \quad (2.14)$$

де  $H_p$ ,  $H_n$  - питома теплопровідність ділянок, Вт/(м·к).

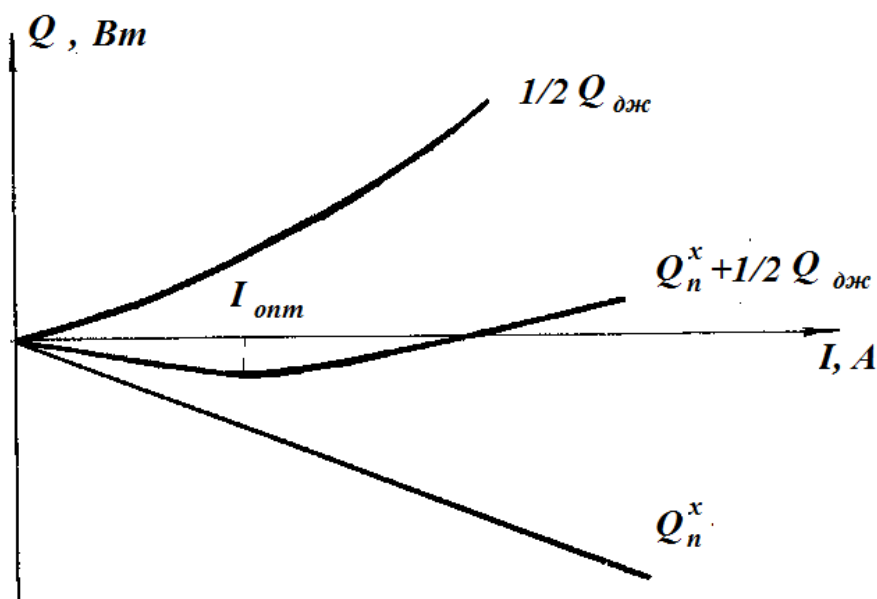


Рис 2.3. Залежність теплоти Пельтьє і теплоти, що належить ефекту Джоуля на холодний спай, від струму

Вздовж ділянок існує градієнт температур і їхні характеристики залежать від температури, тому в реальному ТЕЛе крім ефектів Пельтьє і Зеебека має місце і ефект Томпсона, відкритий ним в 1856 р. який полягає в поглинанні тепла по всій довжині елементів. Цю теплоту визначають за формулою:

$$Q_T = I \int_{T_c}^{T_h} \tau dT \quad (2.15)$$

де  $\tau$  - коефіцієнт Томпсона, пов'язаний з диференціальною термоерс  $d(T)$  співвідношенням:

$$\tau = T \frac{da}{dT} \quad (2.16)$$

Доведено, що вплив тепла Томпсона на тепловий баланс ТЕЛа можна врахувати, не враховуючи рівняння (2.15) і (2.16). Для цього потрібно значення коефіцієнта термоерс  $a$  прийняти рівним його середньому значенню  $\bar{a}$ , як це зроблено у рівняннях (2.8) і (2.9).

Аналогічно розраховують значення  $R$  і  $H$  за формулами (2.11) і (2.14).

Теплота  $Q_0$ , що підводиться до холодного спаю, (холодопродуктивність), і теплота  $Q_2$ , що відбирається від гарячого спаю, визначається рівняннями:

$$\begin{aligned} Q_0 &= Q_n^x - \frac{1}{2} Q_{дж} - Q_H = \bar{a} T_x I - \frac{1}{2} I^2 R - H \left( T_2 - T_x \right) \quad \text{і} \\ Q_2 &= Q_n^2 - \frac{1}{2} Q_{дж} - Q_H = \bar{a} T_2 I - \frac{1}{2} I^2 R - H \left( T_2 - T_x \right) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Якщо різниця є роботою, що створена струмом в одиницю часу, або потужність, яка надається ТЕЛу

$$N = Q_2 - Q_0 = Q_n^2 - Q_n^x + Q_{дж} = \bar{a} \left( T_2 - T_x \right) I + I^2 R \quad (2.18)$$

За холодопродуктивності  $Q_0 = 0$  (холодний спай теплоізований) і оптимального струму  $I_{\text{опт}}$ , що визначається рівнянням (2.12), одержимо максимальне значення різниці температур спаїв, що досягається ТЕЛОм,

$$C_2 - T_x \rightarrow_{\max} = \frac{1}{2} \frac{\bar{a}^2 T_x^2}{R_H} = \frac{1}{2} \frac{\bar{a}^2 \sigma}{H} T_x^2 = \frac{1}{2} Z T_x^2 \quad (2.19)$$

де  $\delta$  - електропровідність.

$$Z = \frac{\bar{a}^2}{R_H} = \frac{\bar{a}^2 \sigma}{H}. \quad (2.20)$$

Величина  $Z$  називається ефективністю речовини ТЕЛа, або його добротністю. Вона досягає максимального значення за співвідношення перетинів ділянок

$$m = \frac{S_n}{S_p} = \sqrt{\frac{H_p \rho_n}{H_n \rho_p}} \quad (2.21)$$

тоді

$$Z = \left( \frac{\bar{a}}{\sqrt{H_p \rho_p} + \sqrt{H_n \rho_n}} \right)^2 \quad (2.22)$$

Відношення  $Q_o$  до  $N$ , що характеризує ефективність роботи ТЕЛа, є його холодильним коефіцієнтом  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{Q_o}{N} = \frac{\bar{a} T_x I - \frac{1}{2} I^2 R - H \Delta T}{\bar{a} \Delta T I + I^2 R} \quad (2.23)$$

$$\Delta T = T_2 - T_x \quad (2.24)$$

Можна показати, що максимальне значення холодильний коефіцієнт буде мати за величини струму

$$I = \frac{\bar{a} \Delta T}{R(M-1)} \quad (2.25)$$

За таких умов:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{T_x \left( M - \frac{T_2}{T_x} \right)}{\Delta T (M+1)} \quad (2.26)$$

$$M = \sqrt{1 + 0,5Z \left( C_2 + T_x \right)} \quad (2.27)$$

Із формули (9) видно, що за  $\Delta T \rightarrow 0$  значення  $\varepsilon_{\max} \rightarrow \infty$ . За таких умов холодопродуктивність, що визначають за рівнянням

$$Q_{0\varepsilon_{\max}} = \frac{\bar{a}^2 \Delta T \left( C_x M - T_2 \right) M}{R \left( M - 1 \right)^2 \left( M + 1 \right)} \quad (2.28)$$

також прямує до нуля.

Значення  $\varepsilon_{\max}$  і  $Q_{0\varepsilon_{\max}}$  відповідають режиму максимального холодильного коефіцієнта. Це режим максимальної економічності, оскільки на одиницю холодопродуктивності затрачається мінімум електроенергії.

Якісний характер залежностей  $\varepsilon_{\max} = f(\Delta T)$ ;  $Q_{0\varepsilon_{\max}} = f(\Delta T)$  подано на рис.2.4 (пунктирні криві).

Другим важливим режимом роботи ТЕЛа є режим максимальної холодопродуктивності  $Q_{0\max}$ . Відповідний цьому режиму значення холодопродуктивності визначають за рівнянням

$$Q_{0\max} = \frac{\bar{a}^2}{R} \left[ \frac{T_x^2}{2} - \frac{C_2 - T_x}{Z} \right]. \quad (2.29)$$

Якісний хід залежностей  $\varepsilon_{Q_{0\max}}$  і  $Q_{0\max}$  від різниці температур на спаях ТЕЛа показано на рис.2.4. Для забезпечення однакової холодопродуктивності і різниці температур на спаях за умови роботи в режимі  $\varepsilon_{\max}$  беруть більше число ТЕЛов в термобатарей, ніж у випадку режиму  $Q_{0\max}$ . Але режим  $\varepsilon_{\max}$  кращий з точки зору економії електроенергії, і тільки за малих споживаючих потужностей порядку 10-20 Вт використовують режим  $Q_{0\max}$ . Розрахунок ТОП складається з визначення теплотехнічних параметрів самого пристрою і розрахунку термоелектричної батареї (ТЕБ). При розрахунку ТЕБ звичайно задаються холодопродуктивності і перепад температур, величина робочої напруги, основні параметри матеріалу ділянки ( $\alpha, \delta, H$ ).



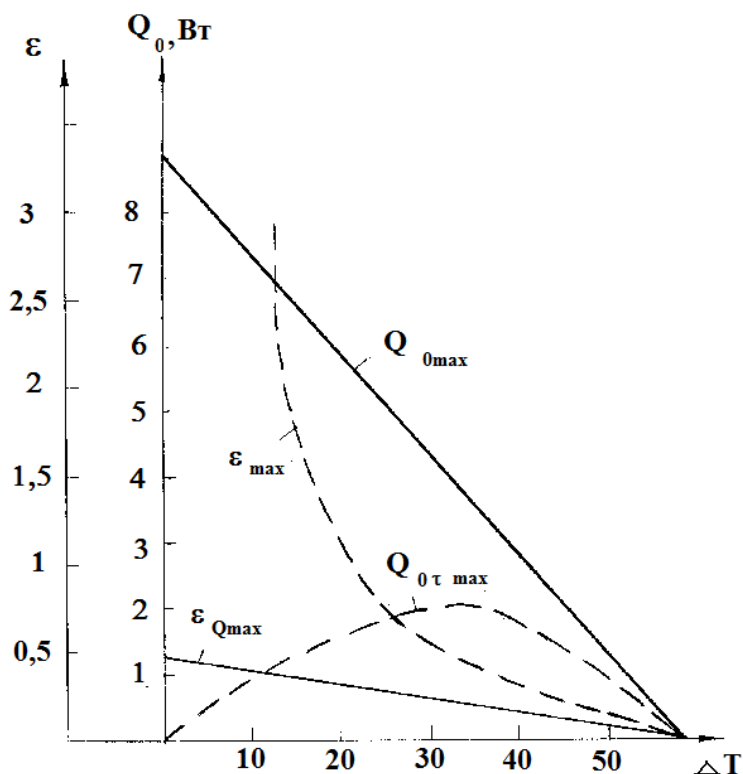


Рис 2.4. Якісний характер залежностей:  $\varepsilon_{\max} = f(\Delta T)$ ;  $Q_{0, \varepsilon_{\max}} = f(\Delta T)$ ;  $\varepsilon_{Q_{\max}} = f(\Delta T)$ ;  
 $Q_{0, \max} = f(\Delta T)$

Вибравши режим роботи ТОП з розрахунком фактору економічності і масогабаритних потреб, ТЕБ розраховують за відповідними цьому режиму рівняннями. Наприклад, для режиму максимального холодильного коефіцієнту за рівнянням (9) і вихідними даними визначають величину  $\varepsilon_{\max}$ . Після цього за холодопродуктивністю  $Q_0$  визначають ТЕБ потужність:  $N = Q_0 / \varepsilon_{\max}$

Використовуючи рівняння для спаду напруги на одному ТЕЛі, що відповідає режиму  $\varepsilon_{\max}$ ,

$$V_o = \bar{a} \Delta T M / (M-1), \quad (2.30)$$

можна визначити величину цього спаду, а потім одержати число ТЕЛів в ТЕБ.

$$N = V / V_o \quad (2.31)$$

де  $V$  - задана робоча напруга,  $B$  і  $V_o$  - спад напруги на одному ТЕЛі, В.

Величину оптимального струму, що живить ТЕБ, визначають шляхом ділення потужності на спад напруги на ній

$$V : I = N / V. \quad (2.32)$$

Опір ТЕЛа можна знайти з рівняння для визначення струму, що відповідає максимальному холодильному коефіцієнту, розв'язавши його відносно R :

$$R = \frac{\bar{a}\Delta T}{I(M-1)} \quad (2.33)$$

Опір ТЕБ буде рівним значенню R , помноженому на число ТЕЛів n. Геометричні розміри ділянок ТЕЛа визначають за рівнянням

$$\frac{l}{S} = \frac{\sigma R}{2} \quad (2.34)$$

За таких умов можливо використання ділянок любых розмірів із зберіганням співвідношення  $l/S$  , але практично висоту ТЕЛа приймають не менше 3мм, так як за менших значень починає відігравати помітну роль тепловий потік від гарячих спаїв до холодних.

Для режиму максимальної холодопродуктивності розрахунок проводять у тій же послідовності. Величини  $\varepsilon$ ,  $V_o$ , R визначають за рівняннями:

$$\varepsilon = \frac{1}{2T_2} \left( T_x - \frac{2\Delta T}{ZT_x} \right); \quad (2.35)$$

$$V_o = \bar{a}T_2 \quad ; \quad R = \frac{\bar{a}T_x}{I}. \quad (2.36)$$

ТОП не мають рухомих частин. Їхні ТЕБ в роботі безшумні, не потребують робочого тіла, роль якого в них виконує постійний електричний струм. Вони прості в експлуатації, за малих потужностей портативні. Робоча різниця температур на спаях реального ТЕЛа за вихідної температури 27-30°C, холодопродуктивності, відмінної від нуля, і значеннях добротності елементів

ТЕЛів  $Z = (3 \div 33) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  може бути рівною  $60^\circ\text{C}$ . За умови використання багатокаскадних ТЕБ ця різниця температур значно перевищує  $100^\circ\text{C}$  і може досягнути  $140^\circ\text{C}$  і більше. В енергетичному відношенні ТОП суттєво поступаються компресорним холодильним машинам і тільки за малої холодопродуктивності (порядку 20Вт), коли втрати компресорних холодильних машин значні, холодильний коефіцієнт ТОП може бути помітно вищим.

Але якщо розхід електроенергії не є основною потребою, і більш того, необхідні ті якості, які можуть бути забезпечені завдяки перевагам термоелектричного методу охолодження, успішно застосовують ТОП холодопродуктивністю декілька сотень Ват і в окремих випадках до декількох кВт. Термоелектричне охолодження використовують в термостатах, охолоджувачах рідин і газів, осушувачах повітря, побутових і транспортних холодильниках, кондиціонерах тощо.

**2.6. Холодильні агенти і холодоносії.** Розміри холодильної машини, конструкційний матеріал, із якого вона може бути виготовлена, і тиск при заданих умовах роботи визначаються властивостями холодильного агента. Тому до речовин, що використовуються в якості холодильних агентів, ставляться наступні вимоги:

- 1) висока критична температура, яка забезпечує можливість конденсації парів холодоагенту в конденсаторі за допомогою природних охолоджуючих агентів (вода, повітря);
- 2) велика теплота випаровування для того, щоби зменшити витрату холодильного агента, необхідний для досягнення заданої холодопродуктивності;
- 3) можливий менший питомий об'єм парів холодильного агента за тиску і температури випаровування, що зумовлює зменшення розмірів холодильної машини;
- 4) тиск парів повинен бути трохи вищий атмосферного через те, що легше запобігти витік холодильного агента, ніж підсмоктування повітря;
- 5) підсмоктування повітря погіршує теплопередачу в конденсаторі і

випарнику, підвищує робочий тиск і вносить в систему водяну пару, яка може замерзати в випарнику і приводити до утворення хімічно активних сполук.

- б) бажано помірний тиск пари при температурі конденсації для запобігання ускладнення конструкції і подорожчання апаратів і трубопроводів.

Поряд з цим холодильний агент не повинен бути хімічно агресивним і шкідливо впливати на організм людини; крім того, він повинен бути безпечним в пожежному відношенні, а також доступним і недорогим.

Холодильні агенти для установок з турбокомпресорами повинні володіти малою теплотою випаровування, так як турбокомпресори переважно виготовляються для стиснення значних кількостей холодоагенту.

В даний час найбільш поширеними холодоагентами, які задовольняють більшість з перерахованих вимог, є аміак і фреони. Значно рідше в якості холодоагентів використовують двоокис вуглецю і особливо рідко - сірчистий ангідрид і хлористий метил. Для отримання температур випаровування нижче - 70°C застосовують пропан, етан і етилен.

Перевагами аміаку як холодоагенту є: значна теплота пароутворення, невеликий надлишковий тиск його парів у випарнику і помірний тиск в конденсаторі. Разом з тим аміак горючий, отруйний, може утворювати з повітрям вибухонебезпечні суміші і викликати корозію міді і її сплавів в присутності вологи.

Фреони являють собою фтор хлорпохідні метану.

Фреони володіють невисоким тиском конденсації і випаровування, як правило, безпечні, пожежо- і вибухонебезпечні, а також не викликають корозії звичайних конструкційних матеріалів при робочих умовах. До числа їх недоліків відносяться дуже низька в'язкість, що зумовлює витік холодоагенту, і відносно висока взаємна розчинність фреонів і мастильних олів.

Двоокис вуглецю характеризується досить високою об'ємною холодопродуктивністю, що забезпечує високу компактність циліндра

компресора. Однак двоокис вуглецю має дуже низьку критичну температуру і високий тиск конденсації, що обмежує можливості його застосування як холодоагенту.

Суттєвим недоліком хлористого метилу і сірчистого ангідриду є низький тиск парів в випарнику. Крім того, сірчистий ангідрид володіє корозійними і токсичними властивостями.

В виробничих умовах холодильна установка переважно обслуговує декілька апаратів, для охолодження яких використовують проміжні холодоносії. В якості проміжних холодоносіїв застосовують холодильну ропу - водний розчин деяких солей, наприклад хлористого натрію, хлористого кальцію або хлористого магнію, які замерзають при низьких температурах. Холодильна ропа при допомозі насоса циркулює між випарником холодильної машини, де вона охолоджується, і апаратами – споживачами холоду, де вона віддає холод і сама нагрівається. Вибір ропи і її концентрація залежить від потрібної температури охолодження, причому ця температура повинна бути вище криогідратної точки, яка відповідає температурі замерзання ропи.

### **3. Робочі цикли холодильних машин. Побудова робочого циклу в термодинамічній діаграмі**

#### **3.1. Діаграми холодильних агентів**

Експлуатація холодильної установки неможлива без розуміння термодинамічних процесів, які відбуваються в ній. Вивчення окремих процесів, які входять в цикл парової компресійної машини, а також зв'язку між ними, їхнього взаємного впливу одне на одного може бути значно спрощено застосуванням термодинамічних діаграм холодильних агентів. Вміння використовувати діаграми необхідне також для контролю і аналізу параметрів діючих холодильних установок; настройки приладів автоматичного контролю і

регулювання; розрахунку і вибору холодильного устаткування при реконструкції і розширенні діючих установок.

Для кожного холодильного агента існують свої діаграми, але принцип їхньої побудови і користування ними однаковий. Найбільш часто використовуваними є діаграма ентальпія-тиск ( *$h - \lg P$  - діаграма*) і діаграма ентропія-температура ( *$S - T$  - діаграма*), з яких діаграма ентальпія-тиск більш зручна, і саме вона буде розглядатись надалі.

Штучне охолодження в парових холодильних машинах можливе внаслідок кипіння холодильних агентів за низьких температур, які змінюють свій агрегатний стан з рідкого в пароподібний. За таких умов відбувається поглинання тепла. Щоб процес штучного охолодження був замкненим і повторюваним, пару холодильного агента стискають, а потім конденсують шляхом охолодження. Таким чином, у холодильній машині відбуваються два процеси фазового переходу холодоагенту: з рідкого стану в пару – кипіння і з пари в рідину – конденсація.

Ділянка переохолодженої рідини означає, що влюбій її точці холодоагент знаходиться в рідкому стані за температури нижчої температури насичення за відповідного тиску.

Ділянка вологої пари відповідає процесам переходу рідини в пару чи з пари в рідину. В будь-якому випадку холодоагент виступає у вигляді парорідинної суміші, яка називається вологою парою. Таким чином, волога пара – це суміш насиченої рідини і насиченої пари, яка знаходиться або в стані кипіння, або в стані конденсації. Температура суміші насичених пари і рідини однакова і називається температурою насичення при визначеному тиску насичення.

Фазовий перехід від рідини до пари на діаграмі відбувається зліва на право, а з пари в рідину – з права наліво. Вміст пари у парорідинній суміші відображають лінії постійного паровмісту –  $x$ . Вони показують масову долю пари в парорідинній суміші в долях одиниці. На лінії насиченої рідини паровміст  $x=0$ , на лінії насиченої пари  $x=1$ , на ділянці вологої пари  $1 > x > 0$ .

Ділянка перегрітої пари відображає стан пари, температура якої вища температури насичення за відповідного тиску  $P$ .

На граничних кривих насичених рідини чи пари холодоагент має параметри насичення, але являє собою однорідну фазу, тобто або рідина, або пара.

Під час експлуатації дуже важливо відрізнити за показниками контрольно-вимірних приладів переохолоджену рідину від насиченої, а перегріту пару – від вологої або насиченої пари, так як від цього залежить ефективність і безпека роботи установки. При одному й тому ж тиску  $P$  насичена рідина, волога пара і насичена пара мають однакову температуру  $t$ , переохолоджена пара – більш низьку, а перегріта пара – більш високу. Таким чином, покази манометрів при всіх перерахованих станах будуть однакові, а термометрів – різні.

Діаграма ентальпія-тиск відображає шість параметрів холодильного агента, котрі подані у вигляді різних ліній. Цифрові значення основних параметрів наведені в часткових величинах, тобто віднесені до 1 кг холодоагенту, і проставлені на полі діаграми над відповідними кривими.

Лінії постійного паровмісту проходять тільки в ділянці вологої пари. Паровміст позначається символом  $x$ .

Лінії постійного тиску – ізобари – проходять через всі ділянки горизонтально. Логарифмічний масштаб в зображенні ізобар застосований через нерівномірності шкали тиску в ділянці вакууму і надлишкового тиску. Величина абсолютного тиску в МПа, проставлена на вертикальній шкалі зліва діаграми та позначена символом  $P$ .

Лінії постійних температур – ізотерми – в ділянці переохолодження проходять майже вертикально, в ділянці вологої пари – горизонтально. Тут ізотерми співпадають з ізобарами, так як фазовий стан холодоагент міняє при постійних значеннях  $t$  і  $P$ . В зоні перегрітої пари ізотерми ідуть похило вниз. Значення  $t$  в °С розміщені поряд з кривими постійної температури в ділянках переохолодження і перегріву, а також на кривих насиченої рідини і пари.

Лінії постійних часткових ентальпій (постійних тепло зберігачів)

проходять вертикаль. Частковою ентальпією називають повну енергію 1 кг робочого тіла, яка рівна сумі часткової внутрішньої енергії і потенціальної енергії тиску. Важливо відмітити, що в термодинамічному процесі при постійному тиску  $P$  зміна часткової ентальпії рівна частковій кількості підведеної теплоти. Це положення являється основою теплових розрахунків холодильного обладнання. Значення часткової ентальпії в кДж/кг проставлені на горизонтальній шкалі знизу і зверху діаграми і позначені символом  $h$ .

Лінія постійних часткових об'ємів – ізохори – позначені перерваними кривими, які проходять в ділянці вологої і перегрітої пари. В ділянці рідини ізохори не нанесені через сильно малий об'єм рідини порівняно з об'ємом пари, що важко подати в масштабі діаграми. Тому частковий об'єм рідкого холодоагенту по діаграмі не визначається. Його можна визначити по таблицях насичених парів холодоагенту. Значення часткових об'ємів у  $\text{м}^3/\text{кг}$  проставлені в ділянках вологої і перегрітої пари над відповідними кривими і позначені символом  $v$ .

Лінії постійних часткових ентропій – адіабати – проходять через поле діаграми по діагоналі. Ентропія – функція стану термодинамічної системи, що характеризує напрям протікання процесу теплообміну між системою і зовнішнім середовищем. Значення ентропії в кДж/(кг·К) наведені над відповідними кривими і позначені символом  $S$ .

Кожній точці на полі діаграми відповідає стан холодоагенту зі строго визначеними параметрами. Якщо дві точки з'єднати лінією, то вона вкаже на характер процесу, який протікає між двома станами. В деяких діаграмах холодоагентів середня частина діаграми в ділянці вологої пари може бути опущена, так як параметри в цій ділянці не цікаві для аналізу і розрахунку холодильних установок.



### 3.2. Принципові схеми парової холодильної машини та їхнє зображення на діаграмі

Для опису принципу дії парової холодильної машини застосовують теоретичний і дійсний цикли. Теоретичним вважається цикл, за якого пара холодоагенту з випарника засмоктується в компресор у насиченому стані за температури і тиску кипіння, а рідина з конденсатора поступає в регулюючий вентиль у насиченому стані за температури і тиску конденсації. Крім того, вважається, що в системі немає втрат тиску через опір трубопроводів і апаратів, а процес стискання в компресорі – адіабатичний (без теплообміну з навколишнім середовищем). Для експлуатації холодильних установок інтерес являє дійсний цикл холодильної машини, який буде розглянений нижче.

На рис.3.1. наведено принципову схему, яка складається з чотирьох основних елементів, з'єднаних трубопроводами в замкнуту герметичну систему і цикл холодильної машини. Розглянемо процеси, що забезпечують охолодження.

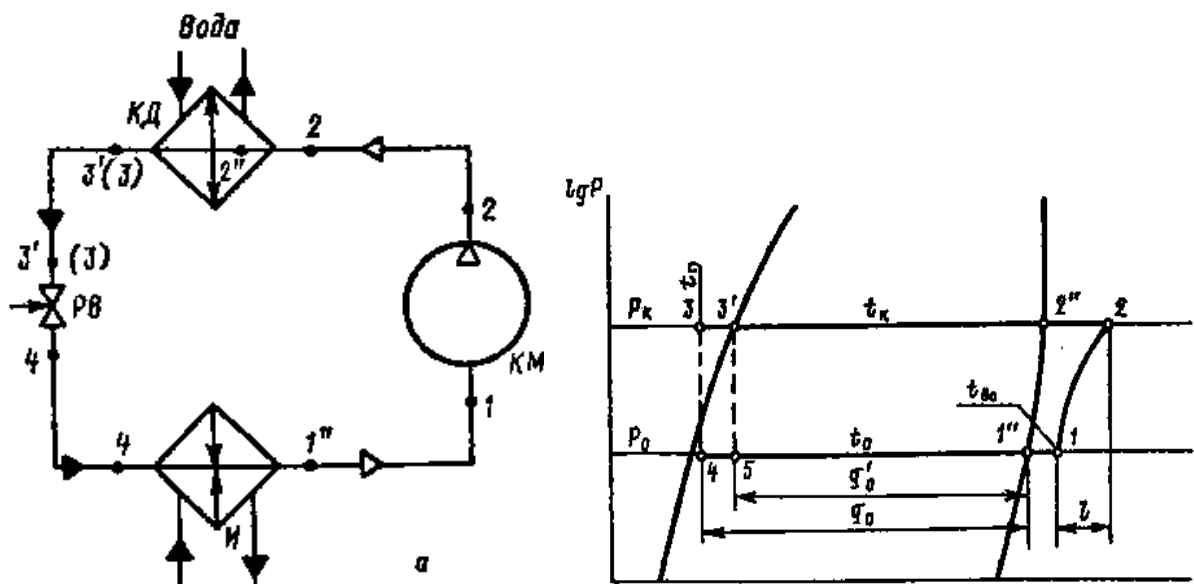


Рис.3.1. Принципова схема і цикл холодильної парокompресійної холодильної машини

В основі штучного охолодження лежить процес кипіння холодоагенту у випарнику. Він перетворюється з рідини в пару, поглинає певну кількість теплоти від об'єкту охолодження. За технічними вимогами необхідно, щоб холодоагент мав постійну і строго визначену температуру кипіння  $t_0$  що досягається підтриманням у випарнику визначеного і постійного тиску кипіння  $P_0$ . Крім того,  $t_0$  холодоагенту має бути нижче кінцевої температури охолоджуваного об'єкту.

Пара, яка утворюється під час кипіння, відкачується з випарника компресором **КМ**. У теоретичному циклі прийнято припущення, що з випарника в компресор поступає насичена пара, в дійсності з випарника може поступати волога, насичена або перегріта пара. Це залежить від інтенсивності теплотопокою до випарника і кількості перебуваючого в ньому рідкого холодоагенту. У всмоктувальному трубопроводі перед компресором пара додатково перегрівається за рахунок теплотопокою від навколишнього повітря і поступає в компресор у перегрітому стані. Перегрита пара перед компресором трохи знижує ефективність роботи установки, але є необхідною мірою для захисту компресора від роботи в режимі “вологого ходу” і пов'язаного з цим гідравлічного удару. В компресорі пара стискається, параметри  $t$  і  $P$  підвищуються, і гаряча пара високого тиску нагнітається через трубопровід у конденсатор **КД**.

У конденсаторі пара холодоагенту під час конденсації знову перетворюється в рідину, і цикл стає замкненим. За таких умов тепло від холодоагенту відводиться в конденсаторі водою або повітрям. Холодоагент охолоджується до температури насичення і конденсується за постійних температур  $t_k$  і тиску  $P_k$ .

У теоретичному циклі з конденсатора в регулюючий вентиль **РВ** поступає насичена рідина. В дійсному циклі в **РВ** може поступати як насичена, так і переохолоджена рідина, яка додатково переохолоджується в самому конденсаторі чи в спеціальних апаратах. У будь-якому випадку

переохолодження є позитивним процесом, так як збільшується холодопродуктивність установки. Рідина з високим тиском у насиченому чи переохоложеному стані поступає у **PВ**, де дроселюється в прохідному перетині відповідного розміру від  $P_k$  до  $P_0$ .

Під час дроселювання температура холодоагенту знижується до  $t_0$  за рахунок миттєвого випаровування частини рідини. Теплота випаровування відводиться від решти маси холодоагенту, температура котрого знижується. Так як тепло відводиться і передається всередині системи, то теплоємність речовини в процесі дроселювання залишається сталою. Оскільки частина рідини випаровується, то після **PВ** холодоагент являє собою парорідинну суміш. Пароутворення при дроселюванні називають дросельними втратами, оскільки, попадаючи разом з рідиною у випарник, пара не дає в ньому ефекту охолодження. Регулюючий вентиль призначений не тільки для дроселювання холодоагенту, але і для регулювання його подачі в випарник.

Холодильну систему можна умовно поділити на дві ділянки, тиск холодоагенту в яких різний. Сторона високого тиску починається від нагнітального об'єму компресора, проходить через конденсатор і закінчується в регулюючому вентилі. Всі трубопроводи, які знаходяться на цій ділянці установки, відносяться до сторони високого тиску. Манометри, встановлені на апаратах і трубопроводах високого тиску, показують  $P_k$  (або  $P$  нагнітання). Сторона низького тиску починається від регулюючого вентиля **PВ**, проходить через випарник і закінчується на засмоктуючій ділянці компресора. Всі трубопроводи, що знаходяться в цій частині системи, відносяться до сторони низького тиску. Мановакуумметри, які встановлені на них, показують  $P_0$  і  $P_{вс}$ .

Для побудови робочого циклу в діаграмі зазвичай задають параметри, а саме:  $t_0$ - температуру кипіння;  $t_k$  - температуру конденсації;  $t_{вс}$  - температуру всмоктування;  $t_{но}$ - температуру переохолодження. Цих параметрів достатньо для побудови на діаграмі повного циклу холодильної машини. Перш за все потрібно визначити по діаграмі (рис. 3.1) тиски  $P_0$  і  $P_k$  за відповідними

температурами і провести на діаграмі дві горизонтальні прямі – ізобари  $P_k$  і  $P_0$ .

Перетин ізобари тиску кипіння  $P_0$  з кривою насиченої пари встановлює стан холодоагенту на виході з випарника. Перегрів пари у всмоктувальному трубопроводі перед компресором відбувається за  $P_0$  до  $t_{6c}$ . Тому точка всмоктування (1) лежить на перетині ізобари  $P_0$  і ізотерми  $t_{6c}$  на ділянці перегрітої пари. Під час стиснення в компресорі тиск пари збільшується до  $P_k$ , а сам процес приймають адіабатним, тому точка (2) знаходиться на перетині адіабати, проведеної з точки 1, і ізобари  $P_k$ . Температуру цієї точки називають температурою нагнітання компресора. З компресора перегріта пара поступає у конденсатор, де спочатку охолоджується до стану насичення, а потім конденсується за постійної температури до стану насиченої рідини. Якщо в циклі має місце переохолодження рідини, то стан холодоагенту визначається точкою перетину ізобари  $P_k$  і ізотерми  $t_{no}$  на ділянці переохолодження рідини (3). Переохолоджена чи перенасичена рідина потрапляє в регулюючий вентиль **РВ** і дроселюється до тиску кипіння  $P_0$  за постійної ентальпії  $h=const$ . Лінії ізоентальпій проходять вертикально, тому точки 4(5) – стан перед випарником – вважають перетином вертикалі, опущеної з точки 3(3') і ізобари  $P_0$ . В стані вологої пари 4(5) холодоагент поступає в випарник, де кипить за постійних температур і тиску кипіння до стану насиченої пари (точка 1''). На цьому цикл замикається і повторюється. Таким чином, дійсний цикл холодильної машини складається з окремих, процесів, що відбуваються послідовно.

1'' – 1 – перегрів пари під час всмоктування в компресор при  $P_0=const$ ;

1 – 2 – адіабатичне стиснення в компресорі при  $P_k=const$ ;

2 – 2'' - усунення перегріву в конденсаторі при  $P_k=const$ ,  $t_k=const$ ;

2'' - 3' – конденсація пари в конденсаторі при  $P_k=const$ ;

3' – 3 – переохолодження рідини в конденсаторі при  $P_k=const$ ;

3 – 4 - дроселювання в РВ від  $P_k$  до  $P_0$  при  $h=const$ ;

4 – 1'' – кипіння рідини у випарнику при  $P_0=const$  і  $t_0=const$ .

За відомими параметрами вузлових точок циклу, можна визначити наступні показники:

- 1) питому холодопродуктивність холодоагенту, кДж/кг,  $q_0 = h_1'' - h_4$ ;
- 2) питому роботу стиснення в компресорі, кДж/кг,  $l = h_2 - h_1$ ;
- 3) питоме теплове навантаження на конденсатор, кДж/кг,  $q_k = h_2 - h_{3(3')}$ , залежно від того, де відбувається переохолодження;
- 4) холодильний коефіцієнт циклу  $\varepsilon = q_0/l = (h_1'' - h_4)/(h_2 - h_1)$ .

Холодильний коефіцієнт циклу — це ККД циклу, який подають у вигляді відношення теплоти, що поглинається від охолоджуваного об'єкту до енергії, витраченої при цьому компресором. Чим більше  $\varepsilon$ , тим вище ефективність циклу.

Приклад. Визначити параметри вузлових точок циклу і основні його показники для аміаку при  $t_0 = -10^\circ\text{C}$ ,  $t_k = +30^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{вс}} = 0^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{по}} = +25^\circ\text{C}$ .

Розв'язок: визначаємо параметри вузлових точок за термодинамічною діаграмою:

$$q_0 = h_1'' - h_4 = 1670 - 530 = 1140 \text{ кДж/кг}; l = h_2 - h_1 = 1900 - 1693 = 207 \text{ кДж/кг};$$

$$q_k = h_2 - h_3 = 190 - 530 = 1370 \text{ кДж/кг}; \varepsilon = q_0/l = 1370/207 = 6,61.$$

№ точки	$t, ^\circ\text{C}$	$P, 10^3$ Па	$h,$ кДж/кг	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$S,$ кДж/(кг·К)	$x$
1''	- 10	2,9	1670	0,42	8,96	1
1	0	2,9	1693	0,44	9,04	-
2	102	11,7	1900	0,148	9,04	-
2''	30	11,7	1705	0,11	8,48	1
3'	30	11,7	560	-	4,7	0
3	25	11,7	530	-	-	-
4	- 10	2,9	530	0,055	4,65	0,125

### 3.3. Схема холодильної машини з регенеративним теплообмінником і її зображення в діаграмі $h - \lg P$

Для холодильних установок, що працюють на хладачах R-12 і R-22, характерна наявність в схемі регенеративного теплообмінника **ТО** (рис.3.2.), в

якому відбувається теплообмін між рідиною, що потрапляє з конденсатора *КД* до регулюючого вентиля *РВ*, і паром, що потрапляє з випарника *В* до компресора *КМ*.

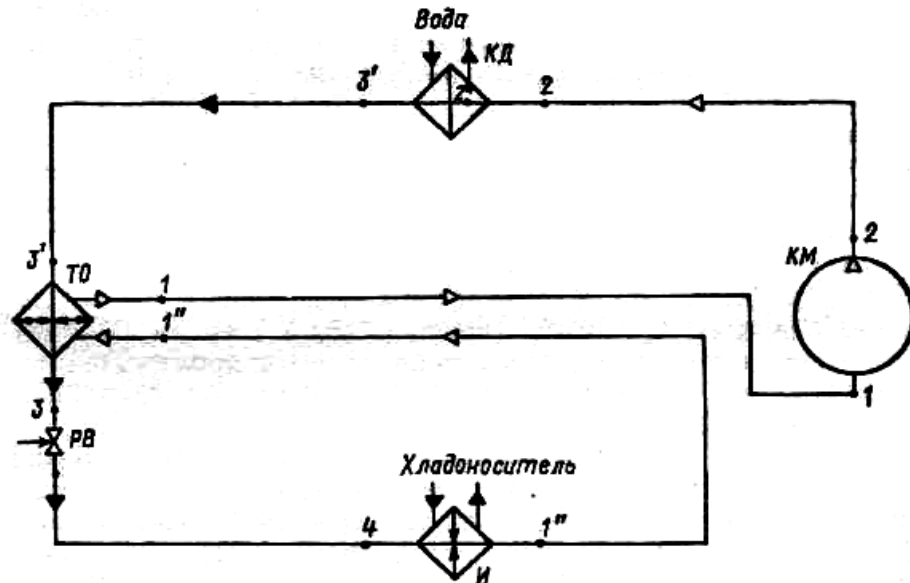


Рис.3.2. Принципова схема парокompресійної машини з регенеративним теплообмінником

Проходячи через теплообмінник, холодна пара поглинає теплоту від рідини і перегрівається, а рідина при цьому переохолоджується. Переохолодження рідини перед *РВ* є позитивним процесом, оскільки знижує дросельні втрати, збільшує питому холодопродуктивність холодоагенту. Перегрів пари перед компресором призводить до збільшення роботи стиснення, підвищення кінцевої температури нагнітання і збільшення теплового навантаження на конденсатор. Проте в дійсній холодильній установці перегрів пари перед компресором необхідний для її безпечної роботи. Крім того, для компресорів, що працюють на хладагтах R-12 і R-22, вигідно підтримувати вищу температуру перегріву, оскільки це зменшує об'ємні втрати і підвищує холодопродуктивність компресора, а наявність теплообмінника дає можливість заповнення випарника без виникнення умов гідравлічного удару. Це дозволяє краще організувати повернення масла з випарника в компресор. Цінність теплообмінника полягає в тому, що він забезпечує корисне переохолодження

рідини за рахунок необхідного для експлуатації перегріву пари. В регенеративному теплообміннику теплота, що віддається рідиною, повністю поглинається всмоктуваною парою.

Зображення циклів роботи парової машини з теплообмінником і без нього в координатах  $h - \lg P$  аналогічні (див. рис. 3.1. ). Різниця лише в тому, що процеси переохолодження  $3'-3$  і перегріву  $1-1''$  відбуваються в теплообміннику а, отже,  $h_3'-h_3=h_1-h_1''$ , звідки  $h_3=h_3'-h_1''+h_1$ . Оскільки кількість теплоти, що віддає рідина, дорівнює кількості теплоти, що сприймає пара, температура пари завжди підвищується більше, ніж знижується температура рідини, оскільки питома теплоємність пари менша ніж питома теплоємність рідини.

Так, для R-12 перегрів пари на кожні  $5^\circ\text{C}$  дає переохолодження рідини на  $3^\circ\text{C}$ . Теплообмін між рідиною і парою залежить від їхніх початкових параметрів, тому регенеративні теплообмінники ефективніші за більшої різниці температур:  $t_k$  і  $t_0$ .

Вживання регенеративних теплообмінників для аміачних холодильних установок недоцільне, оскільки величина перегріву пари на всмоктуванні в аміачних компресорах обмежена умовами їхньої експлуатації.

### 3.4. Схеми двохступеневих холодильних машин і їхнє зображення в діаграмі $h - \lg P$

Для отримання низьких температур в охолоджуванних об'єктах необхідні низькі температури кипіння  $t_0$ , тобто у випарнику доводиться підтримувати і низький тиск  $P_0$ . Це призводить до збільшення значення відношення тиску  $P_k/P_0$  і трьох небажаних явищ: збільшення температури нагнітання компресора, зростання об'ємних втрат в компресорі і збільшення дросельних втрат в регулюючому вентилі, що викликає зменшення холодопродуктивності установки. Для сучасних швидкохідних аміачних поршневіх компресорів температура нагнітання холодоагенту не повинна

перевищувати  $160^{\circ}\text{C}$ , оскільки подальше її підвищення приводить до порушення властивостей мастила, викликає його пригорання і самозагорання. Зниження продуктивності компресора за великих значень відношення тисків  $P_k/P_0$  пов'язано зі зменшенням коефіцієнта подачі. Встановлено, що за  $P_k/P_0 > 8$  доцільно застосовувати багатоступінчасте стиснення холодоагенту у двох (і більш) послідовно сполучених циліндрах або компресорах. Для обмеження зростання температури нагнітання після кожного ступеня стиснення пара холодоагенту охолоджується водою в проміжному холодильнику, або киплячим холодоагентом у теплообмінному апараті.

Найпоширенішою двохступеневою схемою є система стиснення зі змієвикою проміжною посудиною і проміжним охолодженням пари (рис. 3.3). Пара холодоагенту після стиснення в циліндрі низького тиску **ЦНТ** до проміжного тиску  $P_{np}$  поступає в проміжну судину **ПШ** нижче за рівень киплячого холодоагенту і охолоджується до стану насичення, проходячи через шар рідини.

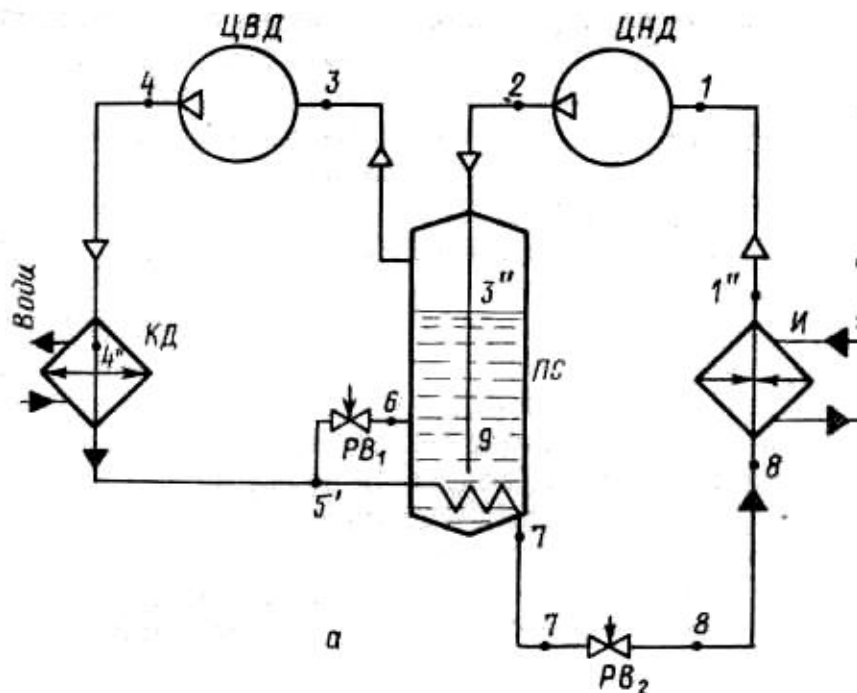


Рис.3.3. Принципова схема парокompресійної двоступеневої холодильної машини





високого тиску, а також переохолодження рідини перед  $P_{B_2}$  за рахунок кипіння рідкого холодоагенту за  $P_{np}$ .

Для аналізу роботи двохступеневих схем і побудови циклу в діаграмі необхідно визначити проміжний тиск  $P_{np}$ , визначають з рівності тиску в обох ступенях стиснення за формулою  $P_{np} = \sqrt{P_0 \cdot P_k}$ . Зазвичай на діаграмі (рис.3.4) проводять три ізобари:  $P_0$ ,  $P_{np}$  і  $P_k$  яким відповідають три температури насичення:  $t_0$ ,  $t_{np}$ ,  $t_k$ . Задають значення перегріву пари на всмоктуванні перед  $ЦНТ$ , та будують точку 1. З цієї точки проводять адиабату до тиску  $P_{np}$  — (точка 2). Далі у проміжній посудині пара охолоджується до стану насичення 3", а потім перегрівається у всмоктувальному трубопроводі (точка 3). Температуру перегріву пари перед  $ЦВТ$  слід приймати в межах  $+5...10^\circ\text{C}$ , тоді  $t_3 = t_{np} + (5...10^\circ\text{C})$ . З точки 3 проводять адиабату до перетину з ізобарою  $P_k$  (точка 4). Це кінцева температура нагнітання пари двоступеневого стиснення. З діаграми спостерігається, що за умови одноступеневого стиснення (процес 1–2'), кінцева температура нагнітання була б значно вище (порівняйте точки 2' і 4). Процес 4–5' відбувається в конденсаторі за  $P_k = \text{const}$ . Далі рідина високого тиску (точка 5') розділяється на два потоки. Частина її дроселюється в  $P_{B_1}$  (проводять ентальпію з точки 5' до перетину з ізобарою  $P_{np}$ ). Парорідинна суміш стану 6 потрапляє в проміжну посудину, де кипить за умови проміжних параметрів (процес 6—3"). Інша частина холодоагенту переохолоджується в змійовику  $ПП$  при тиску конденсації, тому точка 7, що визначає стан холодоагенту на виході зі змійовика, лежить на ділянці рідини. Температуру точки 7 визначають з виразу  $t_7 = t_{np} + (2...3^\circ\text{C})$ . Дроселювання в  $P_{B_2}$ , зображають вертикаллю, опущеною з точки 7 до перетину з ізобарою  $P_0$ . Парорідинна суміш стану 8 потрапляє у випарник, де кипить (процес 8-1). Вищеописані процеси подані на діаграмі (рис. 3.4.):

*1" – 1 – перегрів пари при всмоктуванні в ЦНТ за  $P_0 = \text{const}$ ;*

*1 – 2 – адиабатичне стиснення в ЦНТ від  $P_0$  до  $P_k$ ;*

- 2 – 3'' - перегрів пари при всмоктуванні в ЦВТ за  $P_{np} = const$ ;  
 3'' - 3 – перегрів пари при всмоктуванні в ЦВТ за  $P_{np} = const$ ;  
 3 – 4 – адіабатичне стиснення в ЦВТ від  $P_{np}$  до  $P_k$ ;  
 4 – 4'' – перегрів пари в конденсаторі за  $P_k = const$ ;  
 4'' – 5' – конденсація в конденсаторі за  $P_k = const$ ;  
 5' – 6 – дроселювання в  $PВ_1$  від  $P_k$  до  $P_{np}$  за  $h = const$ ;  
 6 – 3'' – кипіння в ПП за  $P_{np} = const$  і  $t = const$ ;  
 5' – 7 – переохолодження рідини в змійовику ПП за  $P_k = const$ ;  
 7 – 8 – дроселювання у  $PВ_2$  від  $P_k$  до  $P_0$  за  $h = const$ ;  
 8 – 1'' – кипіння у випарнику при  $P_0 = const$  і  $t_0 = const$ .

Слід зауважити, що масова подача компресора високого тиску  $M_2$  більша, ніж компресора низького тиску  $M_1$ , оскільки окрім пари, що поступає з компресора низького тиску в кількості  $M_1$ , в нього поступає ще і пара, утворювана при кипінні рідини в проміжній посудині. Водночас об'ємна холодопродуктивність компресора високого тиску в три рази менша через зменшення об'єму пари під час стиснення в компресорі низького тиску.

Масову подачу ЦНТ, кг/с, визначають за формулою

$$M_1 = Q_0 / q_0, \quad (4.1)$$

де  $Q_0$  – холодопродуктивність, кВт;

$q_0$  – питома холодопродуктивність, кДж/кг:

$$q_0 = h_1' - h_8 \quad (4.2)$$

Масову подачу ЦВТ, кг/с, знаходять із співвідношення

$$M_2 = M_1 (h_2 - h_7) / (h_3 - h_6). \quad (4.3)$$

Питому роботу стиснення ЦНТ, кДж/кг, визначають за рівнянням

$$l_1 = h_2 - h_1. \quad (4.4)$$

Питому роботу стиснення ЦВТ, кДж/кг

$$l_2 = h_4 - h_3. \quad (4.5)$$

Питоме навантаження на конденсатор, кДж/кг

$$q_k = h_4 - h_5. \quad (4.6)$$

Холодильний коефіцієнт

$$\varepsilon = q_0 / (l_1 + l_2).$$

Приклад. Визначити параметри вузлових точок циклу і питомі характеристики для аміачної двохступеневої машини з проміжною посудиною, якщо  $t_k = +30^\circ\text{C}$ ,  $t_0 = -40^\circ\text{C}$ ,  $t_{bc} = -30^\circ\text{C}$ .

Визначимо додаткові параметри:  $P_k = 11,7 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ;  $P_0 = 0,7 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ;  $P_k/P_0 = 16,7 > 8$ ;  $P_{np} = \sqrt{P_k \cdot P_0} = \sqrt{8,19 \cdot 10^5} = 2,86 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

Це приблизно відповідає:

$$t_{np} = -10^\circ\text{C}; t_3 = t_{np} + (5 \dots 10^\circ\text{C}) = -5^\circ\text{C}; t_7 = t_{np} + 3^\circ\text{C} = -7^\circ\text{C}.$$

Параметри вузлових точок циклу представлені в табл. 3.2.

**Таблиця 3.2**

Параметри вузлових точок циклу

№ точки	$t, ^\circ\text{C}$	$P, 10^5 \text{ Па}$	$h,$ кДж/кг	$v, \text{ м}^3/\text{кг}$	$S, \text{ кДж/кг}$	$X$
1''	- 40	0,7	1625	1,5	9,4	1
1	- 30	0,7	1650	1,6	9,48	-
2	+ 60	2,85	1835	0,55	9,48	-
3	- 5	2,85	1680	0,43	9,0	-
3''	- 10	2,85	1670	0,42	8,96	1
4	97	11,7	1880	0,15	9,0	-
4''	30	11,7	1705	0,11	8,48	1
5	30	11,7	560	-	4,7	0
6	- 10	2,85	560	0,06	4,75	0,14
7	- 7	11,7	380	-	-	-
8	- 40	0,7	380	0,15	4,15	0,11

Визначаємо питомі характеристики: питома холодопродуктивність  $q_o = h_1'' - h_8 = 1625 - 380 = 1245$  кДж/кг; питома робота ЦНТ  $l_1 = h_2 - h_1 = 1835 - 1650 = 185$  кДж/кг; питома робота ЦВТ  $l_2 = h_4 - h_3 = 1880 - 1680 = 200$  кДж/кг; теплове навантаження на конденсатор  $q_k = h_4 - h_5 = 1880 - 560 = 1320$  кДж/кг; холодильний коефіцієнт  $\varepsilon = q_o / (l_1 + l_2) = 1245 / 385 = 3,23$ .

### 3.5. Значення діаграми холодильних агентів для аналізу роботи холодильної установки і її обслуговування

Вище розглянуті різні цикли холодильних машин і визначені основні характеристики циклу, а саме: питома холодопродуктивність, питома робота компресора, питоме теплове навантаження на конденсатор і холодильний коефіцієнт або ККД циклу. Порівняння цих показників дає можливість оцінити ефективність роботи даних циклів. Так, збільшення холодопродуктивності і холодильного коефіцієнту є позитивним чинником, а підвищення навантаження на конденсатор або роботи стиснення — негативним. Важливим моментом при зображенні циклів в діаграмах є можливість порівняння окремих процесів або циклів холодильних машин між собою без знаходження числових значень параметрів. Це дуже зручно, коли важлива не кількісна, а якісна оцінка того або іншого процесу. Так, на рис.3.1. показані цикли з переохолодженням холодоагенту перед регулюючим вентилем (цикл  $1''-1-2-2''-3'-3-4-1''$ ) і без нього (цикл  $1''-1-2-2''-3'-5-1''$ ). Порівняння питомої холодопродуктивності  $q_o$  і  $q'_o$  наочно показує вигідність процесу переохолодження, тим паче, що робота компресора  $l$  від цього не змінюється, якщо переохолодження здійснюється шляхом теплообміну із зовнішнім середовищем. Для переохолодження в **ПП** потрібна витрата енергії в **ЦВТ**. Отже, процес переохолодження рідкого холодоагенту перед регулюючим вентилем може відбуватися в конденсаторі, водяному переохолоджувачі, теплообміннику або змійовику проміжної посудини, але у будь-якому випадку є вигідним для

холодильного циклу. Доцільність використання переохолодження залежить лише від суми додаткових витрат на його здійснення.

Складніше розв'язується питання щодо процесу перегріву пари холодоагенту перед компресором. Під час всмоктування компресором перегрітої пари збільшується робота стиснення і зростає температура нагнітання компресора, підвищується теплове навантаження на конденсатор, проте робота холодильної машини з перегрівом на всмоктуванні є необхідною умовою її безпечної експлуатації. Тому бажано використовувати цей процес з користю для холодильного циклу. Вплив перегріву пари на холодопродуктивність машини і холодильний коефіцієнт залежить від способу і місця перегріву пари в циклі, а також від того, чи створює корисне охолодження теплота, що поглинається всмоктуваною парою при її перегріві. Процес перегріву може відбуватися в одному місці, або в декількох з них одночасно: у випарнику; у всмоктувальному трубопроводі, змонтованому в охолоджуваному об'ємі; у всмоктувальному трубопроводі, змонтованому зовні охолоджуваного об'єму; у регенеративному теплообміннику. Якщо перегрів холодоагенту відбувається у випарнику, то це супроводжується корисним охолодженням об'єкту, проте, теплопередача через стінки випарника для пари менша ніж для рідини, і таке використання випарника є малоефективним. Тому надмірний перегрів пари у випарнику небажаний. Іноді певну ділянку всмоктувального трубопроводу вмонтовують в охолоджуваному просторі для перегріву в ньому всмоктуваної пари. Такий перегрів є корисним і дозволяє краще використовувати поверхню випарника при більшому заповненні його рідиною. Коли пара холодоагенту перегрівається у всмоктувальному трубопроводі зовні охолоджуваного простору, то корисного охолодження не відбувається, і, отже, такий перегрів потрібно обмежувати та покривати трубопровід теплоізоляцією. Перегрів пари у регенеративному теплообміннику є корисним, оскільки за таких умов відбувається переохолодження рідини

перед **PВ**.

Зображення в діаграмі циклу холодильної машини дає можливість зробити важливі для експлуатації висновки щодо впливу параметрів конденсації і кипіння на ефективність роботи установки. На рис.3.5. зображено три цикли роботи установки: нормальний режим 1–2–3–4; режим з підвищеними параметрами конденсації 1–2'–3'–4' і режим із зниженими параметрами кипіння 1''–2''–3''–4''.

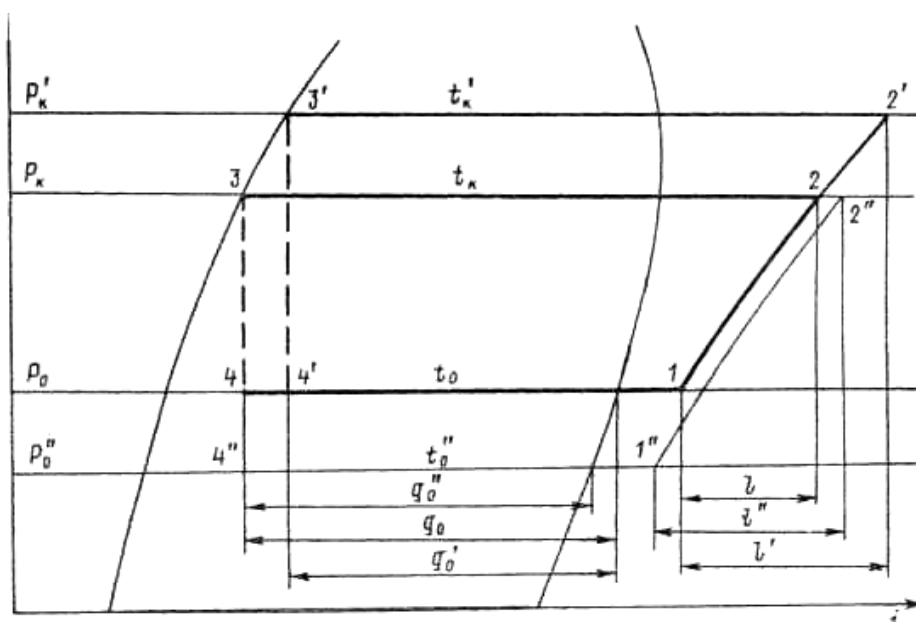


Рис 3.5. Аналіз роботи холодильної установки шляхом побудови циклу в діаграмі

З рисунка видно, що при підвищенні параметрів конденсації і пониженні параметрів кипіння знижується питома холодопродуктивність холодоагенту ( $q_o > q_o' \text{ і } q_o > q_o''$ ), а робота стиснення — збільшується ( $l < l' \text{ і } l < l''$ ). Тому при експлуатації стежать за тим, щоб холодильна установка працювала при мінімально можливих параметрах конденсації, і не допускають зниження параметрів кипіння.

Аналіз циклу холодильної машини за допомогою зображення в діаграмі дає можливість наочно показати взаємозв'язок роботи окремих елементів установки між собою, що далеко не завжди можна визначити за

свідченнями контрольно-вимірвальних приладів. Так, наприклад, зміна тиску і температури конденсації не викликає зміни параметрів кипіння, і, здавалося б, немає зв'язку між роботою випарника і конденсатора, проте, як показує діаграма, холодопродуктивність випарника змінюється так само, як і робота компресора.

Аналогічно можна прослідкувати за зв'язком між всіма елементами холодильної установки. Розуміння цього зв'язку дуже важливе при експлуатації установок, а також при проведенні їхньої реконструкції, або при розширенні виробництва і заміні застарілого устаткування новим. Будь-яка зміна у складі установки повинна бути узгоджена з іншими елементами і підтверджена розрахунками. Основою для розрахунку і вибору холодильного устаткування також є діаграма холодильних агентів.

До обов'язку персоналу, що обслуговує холодильні установки, належить фіксація робочих параметрів, головними з яких є параметри конденсації і кипіння. За відсутності двошкальних манометрів значення температури насичення можна визначити за допомогою діаграми, за відповідним тиском насичення або за таблицями.

Під час побудови циклу діючої холодильної установки в діаграмі для поршневого компресора можна визначити теоретичну температуру нагнітання і порівняти її з дійсною за показами термометра на стороні нагнітання компресора. Якщо дійсна температура вище теоретичної, то це свідчить про неполадки в компресорі; пониження дійсної температури нагнітання свідчить про роботу компресора «вологим ходом».



## 4. Робочі процеси в компресорі.

### поршневі, роторні, відцентрові та гвинтові компресори

#### 4.1. Індикаторна діаграма. Об'ємні втрати у компресорі

В харчовій промисловості при виробництві харчових продуктів часто використовують гази та їх суміші. Для переміщення їх по трубопроводам та апаратам, утворення вакууму застосовують компресорні машини. Залежно від властивостей газу та суміші, а також від необхідної продуктивності вибирають різні види компресорних машин. Компресорні машини – це машини, які призначені для переміщення та стиснення газів. Класифікацію цих машин проводять в залежності від ступеня стиснення (рис.4.1).

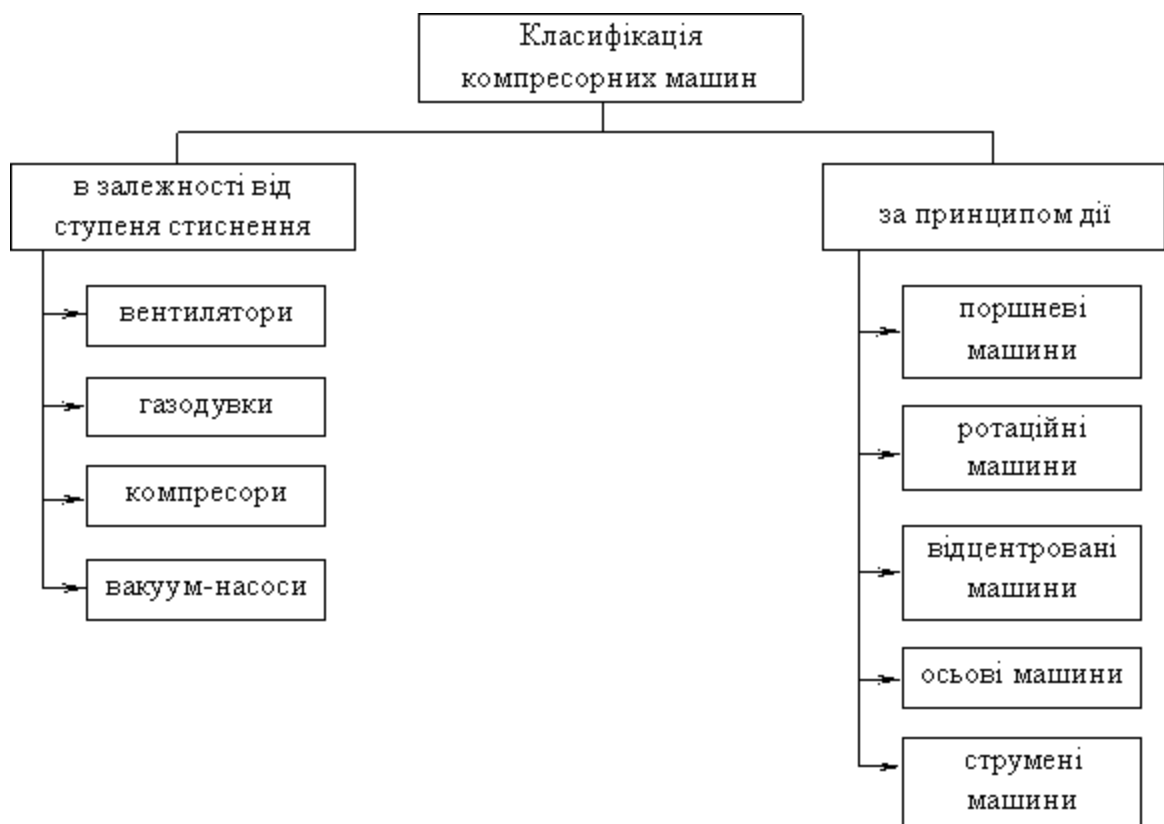


Рис.4.1. Класифікація компресорних машин

Ступінь стиснення – це відношення тиску  $P_2$ , який утворює компресорна машина, до тиску, при якому здійснюється всмоктування газу  $P_1$ .

За принципом дії компресорні машини підрозділяються на поршневі, ротаційні, відцентровані, осьові та струменеві. У поршневих машинах стиснення газу відбувається завдяки зменшенню об'єму, в якому знаходиться газ, при повернено - поступовому русі поршня. Стиснення газу в ротаційних машинах зумовлено зменшенням об'єму, в якому знаходиться газ, за рахунок обертання ексцентрично розташованого ротора. У відцентрованих машинах стиснення газу здійснюється під дією інерційних сил, що виникають при обертанні робочого колеса. В осьових машинах газ стискується при русі його уздовж осі робочого колеса. В струменевих машинах стиснення газу здійснюється за рахунок кінетичної енергії струменя допоміжної рідини або пари.

**Процеси стиснення газів.** Кінцевий тиск газу при стисненні залежить від умов теплообміну газу з навколишнім середовищем. Теоретично можливі два процесу стиснення:

- 1) ізотермічний процес; коли все тепло, що виділяється при стисненні, повністю відводиться, і температура газу залишається незмінною;
- 2) адіабатичний процес, коли теплообмін газу з навколишнім середовищем повністю відсутній, і все тепло, що виділяється при стисненні, витрачається на збільшення внутрішньої енергії газу, підвищуючи його температуру.

Насправді при стисненні газу разом із зміною його об'єму та тиску відбувається зміна температури, і одночасно частина тепла, що виділяється, відводиться в навколишнє середовище. Такий процес стиснення газу називається політропічним.

Теоретична потужність, що витрачається на стиснення газу в компресорі, визначається за рівняннями:

для ізометричного стиснення

$$N_{m,iz} = P_1 \cdot V_1 \cdot \ln \frac{P_2}{P_1}, \quad (4.1)$$

для адіабатичного стиснення

$$N_{m.ad} = \frac{k}{k-1} \cdot P_1 \cdot V_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right], \quad (4.2)$$

для політропічного стиснення

$$N_{m.n} = \frac{m}{m-1} \cdot P_1 \cdot V_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right], \quad (4.3)$$

де  $V_1$  – подача за умов всмоктування, м<sup>3</sup>/с;

$P_1$  та  $P_2$  – початковий та кінцевий тиск газу, Н/м<sup>2</sup>;

$k$  – показник адіабати (відношення теплоємності при постійному тиску до теплоємності при постійному об'ємі, визначається за довідником;

$m$  – показник політропи, який залежить від природи газу та умов теплообміну з навколишнім середовищем.

Найбільш економічним вважається процес ізотермічного стиснення. За таких умов все тепло, що виділяється при стисненні, відводять шляхом охолодження газу.

Температура газу  $T_2$  після стиснення визначається за наступними формулами:

для ізометричного процесу

$$T_2 = T_1, \quad (4.4)$$

для адіабатичного процесу

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (4.5)$$

для політропічного процесу

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} . \quad (4.6)$$

**Принцип дії поршневого компресора.** При ході поршня (2) зліва направо в циліндрі (1) утворюється розрідження унаслідок чого всмоктувальний клапан (3) відкривається і газ всмоктується в порожнину циліндра. При цьому нагнітальний клапан (4) закритий. Поршень з'єднано з шатуном (5) і кривошипом (6), на валу якого встановлений маховик (7). При русі поршня справа наліво газ, що знаходиться в циліндрі, стискається до тиску, достатнього для подолання зусиль нагнітального клапана, який при цьому відкривається і стислий газ виштовхується з циліндра в нагнітальний трубопровід. Потім цикл повторюється.

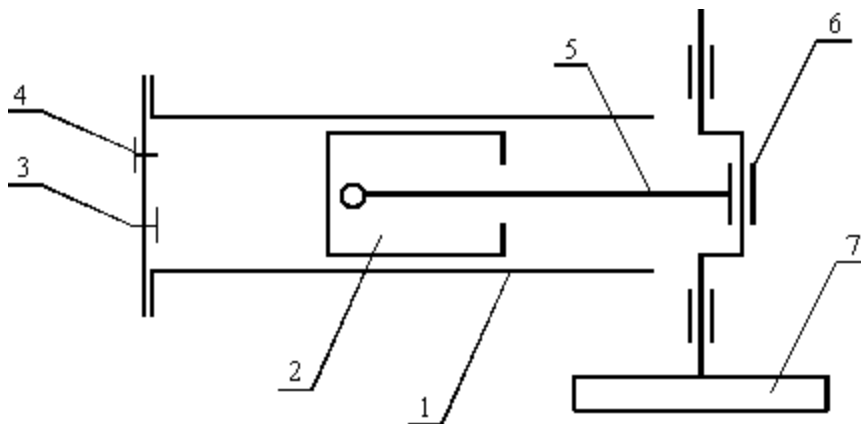


Рис. 4.2. Поршковий компресор

Всмоктування газу починається не у момент зрушення поршня з мертвої точки, а дещо пізніше. Між поршнем і кришкою циліндра завжди залишається газ (шкідливий простір), який стиснутий до тиску в нагнітальному патрубку. Тому, щоб почалося всмоктування, цей тиск повинен бути нижче за тиск у всмоктувальному трубопроводі. Таким чином, до початку всмоктування

поршень повинен пройти деякий шлях.

Реальний процес характеризується індикаторною діаграмою (рис. 4.3), де прийняті наступні позначення:

$V_0$  – повний об’єм циліндра компресора,  $\text{м}^3$ ;  $V_1$  – об’єм, який проходить поршень,  $\text{м}^3$ ; – дійсній об’єм газу, який всмоктується компресором за один хід поршня,  $\text{м}^3$ ;

$\epsilon \cdot V_1$  – об’єм шкідливого простору,  $\text{м}^3$ ;  $V_e$  – дійсний об’єм газу, що подається,  $\text{м}^3$ .

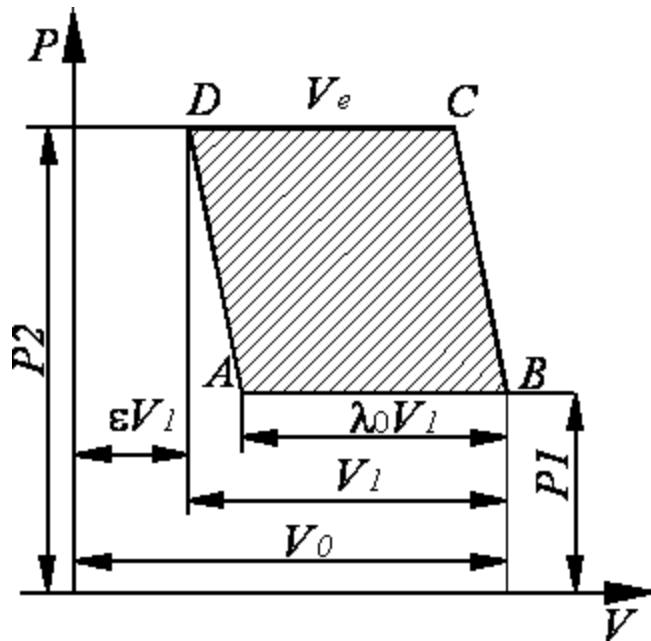


Рис. 4.3. Індикаторна діаграма

Відношення об’єму газу, який фактично всмоктується, до об’єму, що описується поршнем  $V_1$ , називається об’ємним коефіцієнтом компресора

$$\lambda_0 = \frac{V_e}{V_1}. \quad (4.7)$$

При збільшенні об’єму шкідливого простору та ступені стиснення газу величина  $\lambda_0$  зменшується. Якщо  $\lambda_0=0$ , то точка A зміщується вправо до точки B, а точка C до точки D (рис. 4.3). Це показує на те, що процес стиснення газу здійснився.

Відношення об'єму газу, що фактично подається компресором  $V_e$ , до об'єму, який проходить поршень  $V_1$ , називається коефіцієнтом подачі

$$\lambda = \frac{V_e}{V_1}. \quad (4.8)$$

Коефіцієнт подачі можна прийняти залежно від об'ємного коефіцієнту за наступної формулою:

$$\lambda = (0,8 \div 0,9) \cdot \lambda_0. \quad (4.9)$$

Теоретичну подачу, або об'єм, який проходить поршень, можна визначити за рівнянням:

$$V_h = 0.785 D^2 S n z / 1000,$$

де  $V_h$  – робочий об'єм циліндра, л/с;  $D$  – діаметр циліндра, см;

$S$  – хід поршня, см;  $n$  – кількість циліндрів.

Дійсний об'єм газу  $V_{e1}$ , що подається компресором для кожного тиску, визначають наступним чином. При підвищенні тиску в ресивері від 0 до 1 (за манометром  $\Delta P=1$  кгс/см<sup>2</sup>) буде подано повітря об'ємом:

$$V_{e1} = V_p \cdot P_1 = V_p \cdot 1 = V_p, \quad (4.11)$$

де  $V_p$  - сумарний об'єм ресивера, м<sup>3</sup>.

При підвищенні тиску в ресивері від 1 до 2 (за манометром  $\Delta P=1$ ):

$$V_{e2} = (P_1 + 1) \cdot V_p - V_{e1} = P_1 \cdot V_p + V_p - V_p = P_1 \cdot V_p = V_p \quad (4.12)$$

При підвищенні тиску в ресивері від 2 до 3 (за манометром  $\Delta P=1$ )

$$V_{e3} = (P_1 + 2) \cdot V_p - V_{e1} - V_{e2} = P_1 \cdot V_p + 2V_p - P_1 \cdot V_p - V_p = V_p, \quad (4.13)$$

тобто нагнітання в ресивер об'єму газу, який дорівнює об'єму ресивера,

підвищує тиск у ньому на 0,1МПа. Тоді дійсна подача компресора для кожного проміжку тиску ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) буде визначатися за рівнянням:

$$V_e = a \cdot \frac{V_p}{\Delta\tau}, \quad (4.14)$$

де  $a$ — число, що показує, скільки об'ємів  $V_p$  подає компресор за час  $\Delta\tau$  при зміні тиску від  $P_1$  до  $P_2$ ; ця величина пропорційна зміні тиску в кінці та на початку стиснення (за манометром  $P_2 - P_1$ );

$\Delta\tau$  - час нагнітання при зміні тиску від  $P_1$  до  $P_2$ , с.

Об'ємні втрати, що обумовлені мертвим об'ємом оцінюють об'ємним коефіцієнтом  $\lambda_c$ :

$$\lambda_c = \frac{V_h - V_{c1}}{V_h} = 1 - V_{c1} / V_h, \quad (4.15)$$

де  $V_{c1}$ —об'єм, що характеризує розширення пари, яка залишається у мертвому просторі при русі поршня до нижньої мертвої точки і зменшує корисний об'єм, що описує поршень компресора до величини  $V_1$ .

Для всмоктування пари в циліндр тиск в ньому повинен бути нижчим ніж тиск на лінії всмоктування, а при виштовхуванні пари тиск в циліндрі повинен перевищувати тиск на лінії нагнітання. Це пояснюється наявністю втрат тиску при всмоктуванні  $\Delta p_{вс}$  і нагнітання  $\Delta p_n$ , в тому числі і в клапанах. Об'ємні втрати внаслідок дроселювання оцінюють коефіцієнтом дроселювання

$$\lambda_{dp} = 1 - \left[ \left( 1 + \frac{V_c}{V_h} \right) \Delta p_{вс} / \lambda_c \right], \quad (4.16)$$

$$\Delta p_{вс} = p_0 - p_{вс} / p_0$$

де  $\Delta p_{вс}$ —відносна величина втрати тиску всмоктування в каналах ( $\Delta p_{вс} = 0,02 - 0,05$ ).

Оскільки при роботі компресора стінки циліндра нагріваються, то й пара під час всмоктування нагрівається, її питомий об'єм збільшується, а маса

зменшується. Ці втрати враховує коефіцієнт нагріву

$$\lambda_w = T_0 / T_k, \quad (4.17)$$

де  $T_0$  і  $T_k$  – температури кипіння і конденсації.

Дійсний об'єм пари холодильного агента, що поступає в компресор, тобто його об'ємну продуктивність визначають за рівнянням

$$V_D = V_h \lambda = V_h \lambda_c \lambda_{op} \lambda_z \lambda_w, \quad (4.18)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт подачі;  $\lambda_z$  – коефіцієнт густини, який враховує втрати холодоагента від нещільностей в поршневих кільцях і клапанах ( $\lambda_z = 0,96$ – $0,98$ ).

Продуктивність компресора повинна бути такою, щоб забезпечити відсмоктування пари з випарника з такою ж інтенсивністю з якою він утворюється при кипінні. Якщо компресор не встигає відсмоктувати пару, то її надлишкова кількість буде створювати підвищений тиск у випарнику, що в свою чергу буде впливати на температуру. Якщо продуктивність компресора буде недостатньою, то тиск у випарнику буде понижуватись. В обох випадках холодопродуктивність машини буде зменшуватись. Продуктивність компресора у свою чергу залежить від роботи випарника і конденсатора. У випадку підвищення температури кипіння збільшується густина газу, що всмоктується і зростає коефіцієнт подачі.

Холодопродуктивність компресора – це умовне поняття, що визначається масою пари холодоагента, що всмоктується за одиницю часу. Холодопродуктивність можна виразити рівнянням

$$Q_0 = m q_0, \quad (4.19)$$

де  $Q_0$  – холодопродуктивність, кДж/с; кВт;  $m$  – масова витрата холодоагента, кг/с;  $q_0$  – питома холодопродуктивність, кДж/кг



Індикаторні втрати оцінюють індикаторним коефіцієнтом корисної дії  $\eta_i$ ,

Який являє собою відношення теоретичної потужності  $N_a$ , що витрачається на стискання холодоагента масою  $G_a$  до індикаторної потужності  $N_i$ , що відповідає площі індикаторної діаграми. Індикаторна потужність стиснення у компресорі можна визначити з рівняння

$$\begin{aligned} N_i &= G_a l / \eta_i \\ G_a &= Q_0 / q_0 \end{aligned} \quad (4.20)$$

де  $G_a$  – масова продуктивність компресора, кг/с;  $\eta_i$  – індикаторний коефіцієнт корисної дії компресора ( $\eta_i = 0,79 - 0,84$ );  $Q_0$  – паспортна холодопродуктивність компресора, кВт;  $q_0$  – питомий тепловий потік, кДж/кг.

Втрати на тертя в рухомих частинах компресора (корінних і шатунних підшипниках, пальці, на валу) оцінюють механічним К.К.Д.

$$\eta_m = N_i / N_e \quad (4.21)$$

Потужність, що підводиться до валу компресора, називають ефективною. Вона визначається як сума індикаторної потужності і потужності, що витрачається на тертя.

$$N_e = N_i + N_{тр} \quad (4.22)$$

## 4.2. Поршневі компресори. Особливості будови

**Типи компресорів.** Поршневі компресори діляться по числу всмоктувань і нагнітань за один подвійний хід поршня на компресори простої (одинарного) і подвійної дії. За один подвійний хід поршня компресор простої дії виконує одне всмоктування і одне нагнітання, компресор подвійної дії – два всмоктування і два нагнітання. Ступенем стиснення називається частина компресорної машини, де газ стискається до кінцевого або проміжного (перед

надходженням на наступну ступінь) тиску.

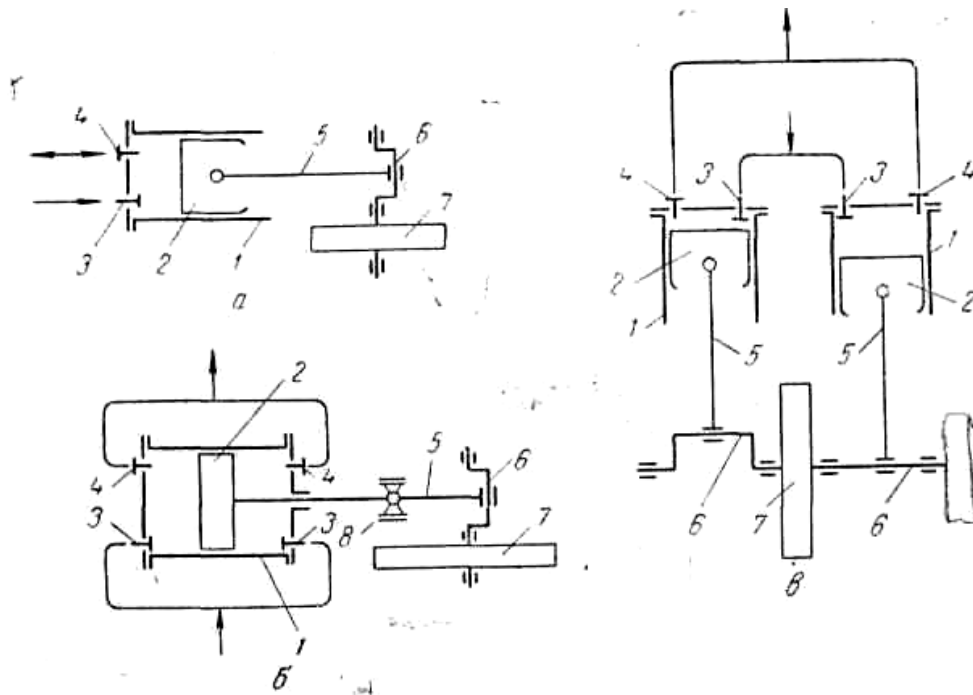


Рис. 4.4. Схеми одноступінчатих поршневих компресорів: а – одноциліндровий простої дії; б – одноциліндровий подвійної дії; в – двоциліндровий простої дії: 1 – циліндр; 2 – поршень, 3 – всмоктувальний клапан; 4 – нагнітальний клапан; 5 – шатун; 6 – кривошип; 7 – маховик; 8 – повзун (крейцкопф)

За числом ступенів поршневі компресори підрозділяються на одноступінчасті і багатоступінчаті, які, у свою чергу, можуть бути горизонтальними і вертикальними.

**Одноступінчасте стиснення.** В одноступінчатому компресорі газ стискається до кінцевого тиску в одному або декількох циліндрах, що працюють паралельно. В останньому випадку одноступінчаті компресори називаються багатоциліндровими.

Одноступінчатий горизонтальний компресор простої дії (Рис.4.4.а) має циліндр 1, в якому пересувається поршень 2, забезпечений поршневими кільцями ущільнювачів (на рисунку не показані). Циліндр 1 закритий з одного боку кришкою, в якій розташовані всмоктувальний клапан 3 і нагнітальний клапан 4. Поршень сполучений безпосередньо з шатуном 5 і кривошипом 6, на

валу якого встановлений маховик 7. При такому з'єднанні поршня з шатуном відпадає необхідність у встановленні повзуна (крейцкопфа). Компресори з безпосереднім з'єднанням шатуна з поршнем називають бескрейцкопфними.

Під час руху поршня зліва направо в просторі між кришкою циліндра і поршнем створюється розрідження. Під дією різниці тисків у всмоктувальній лінії і циліндрі відкривається клапан 3 і газ поступає в циліндр. Під час руху поршня справа наліво всмоктувальний клапан закривається, а газ, що знаходиться в циліндрі, стискається поршнем до деякого тиску, при якому відкривається клапан 4 і газ виштовхується в нагнітальний трубопровід. Потім цикл повторюється знову.

В одноступінчатому компресорі подвійної дії (Рис.4.4. б) газ в циліндрі 1 поперемінно стискається по обидві сторони поршня 2. За один подвійний хід поршня відбувається двічі всмоктування і двічі нагнітання. Циліндр забезпечений двома всмоктувальними клапанами 3 і двома нагнітальними клапанами 4. Компресори подвійної дії мають складнішу будову, але володіють майже удвічі більшою продуктивністю, ніж компресори простої дії тих же габаритних розмірів і тієї ж ваги. Збільшення продуктивності досягається також у багаточиліндрових компресорах простої або подвійної дії. Двоциліндровий компресор простої дії (рис. 4.4. в) є по суті двома компресорами простої дії з приводом від одного колінчастого валу з кривошипамі, зсунутими один щодо одного на кут  $180^\circ$  або  $90^\circ$ .

Для відведення тепла стінки циліндрів компресорів, а іноді і кришки циліндрів забезпечуються сорочками, через які пропускають охолоджуючу воду. Хоча таким шляхом і не вдається повністю відвести тепло, що виділяється при стисненні, охолодження істотно зменшує витрати енергії на стиснення газу.

Вертикальні одноступінчаті компресори мають ряд переваг перед горизонтальними: вони більш швидкохідні (для горизонтальних компресорів  $n=100-240$  об/хв, для вертикальних  $n=300-500$  об/хв і більш) і, отже, більш продуктивні, займають меншу виробничу площу; поршні і циліндри

вертикальних машин зношуються значно менше. При горизонтальному розташуванні циліндра, особливо великого діаметра, відбувається нерівномірне одностороннє зношування поршня під дією сили тяжіння. Це призводить до необхідності зменшувати швидкість руху поршня.

Для зменшення нерівномірності подачі і пом'якшення поштовхів газ після стиснення в поршневих компресорах заздалегідь направляють в збірник (ресивер), де він одночасно очищається від мастила і вологи.

### **Багатоступеневе стиснення.**

Багатоступеневе стиснення застосовують для отримання високого тиску газу. Процес здійснюють у багатоступінчастих компресорах, в яких газ проходить послідовно ряд ступенів, поступово стискаючись до кінцевого тиску. Між ступенями газ піддають охолодженню в проміжних холодильниках. Об'єми циліндрів поступово зменшуються від першого до останнього ступеня.

Розрізняють багатоступінчаті компресори із ступенями стиснення в окремо встановлених циліндрах (рис.4.5. а, б, в), зі ступенями стиснення в одному циліндрі і диференціальним поршнем (рис.4.5. г). При У-подібному встановленні циліндрів (рис.4.5. е).

Багатоступінчаті компресори зі ступенями стиснення в окремо встановлених циліндрах можуть бути однорядного (Рис.4.5.а) і дворядного (Рис.4.5.б) виконання з розташуванням циліндрів по одну сторону валу. Такі компресори мають велику вагу і габаритні розміри, оскільки значні неврівноважені сили інерції, що виникають при роботі цих машин, не дозволяють виготовляти їх з великим числом оборотів колінчастого валу. Тому останнім часом одержали широке використання опозитні компресори з взаємно протилежним напрямом руху поршнів. Циліндри цих компресорів розташовуються по обидві сторони колінчастого валу.

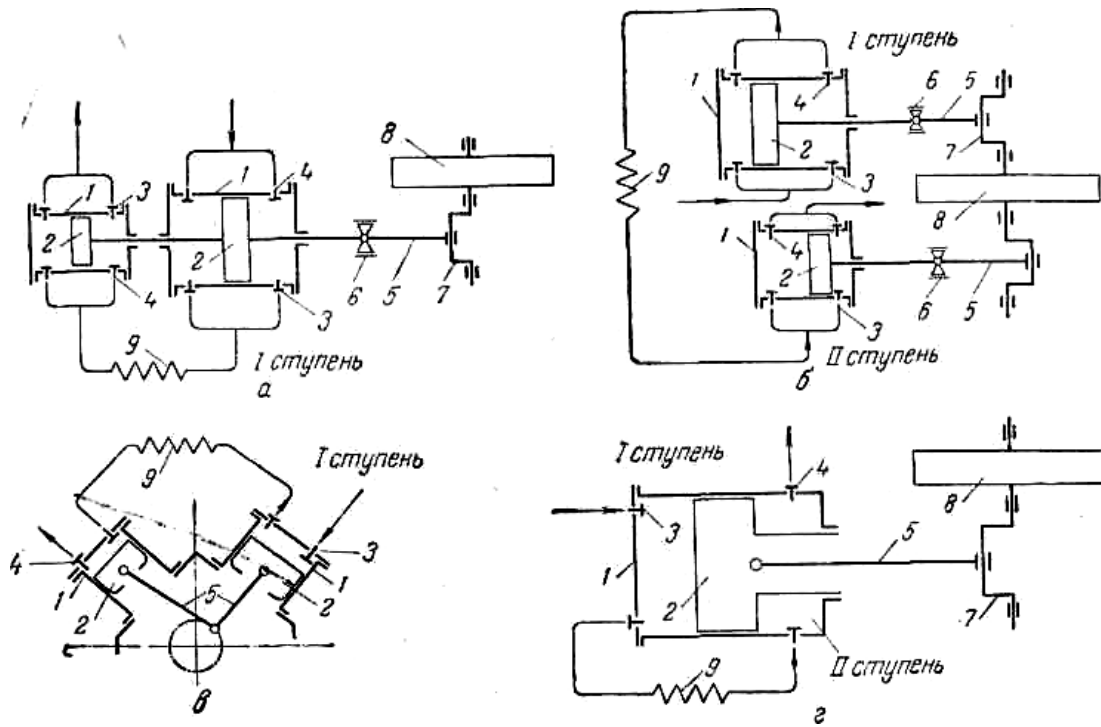


Рис.4.5. Схеми багатоступінчатих поршневих компресорів:

а, б, в – із ступенями стиснення в окремих циліндрах (а - однорядного виконання, б - дворядного виконання, в – з У-подібним розташуванням циліндрів); г– з диференціальним поршнем; 1 - циліндр; 2 – поршень; 3 – всмоктувальний клапан; 4 – нагнітальний клапан; 5 – шатун; 6 – повзун (крейцкопф); 7 – кривошип; 8 - маховик; 9 – проміжний холодильник.

Опозитні компресори добре динамічно урівноважені, завдяки чому швидкість обертання колінчастого валу може бути збільшена в 2-2,5 рази і тим самим підвищена продуктивність машини. Вага таких компресорів, а також електродвигунів до них на 50-60% менше ніж компресорів з розташуванням циліндрів по одну сторону валу при значному зниженні габаритних розмірів. Компресор з диференціальним поршнем може мати декілька ступенів стиснення, утворених поверхнею циліндра і поршнем змінного (диференціального) перетину. Співвідношення між перетинами поршня залежить від ступеня стиснення на кожній ступені.

Для установки опозитних компресорів потрібна менша площа і невеликі фундаменти. Звичайно диференціальний поршень застосовують в машинах

малої і середньої продуктивності – для двухступінчастого стиснення. В крупних машинах у зв'язку з малим відношенням довжини поршня до діаметра можливе заклинювання диференціального поршня. У-подібне встановлення циліндрів дає змогу значно зменшити площу, що займає машина, і забезпечити безпосереднє з'єднання її з електродвигуном. Ступінь стиснення в кожному ступені компресора вибирають таким, щоб найбільш ефективно використовувати об'єм циліндрів, збільшити об'ємний коефіцієнт компресора і понизити витрату енергії на стиснення, а також температуру газу в кінці стиснення.

**Роторні і відцентрові компресори.** У компресорах цього типу зміни об'єму забезпечуються ротором, що здійснює обертовий рух. Залежно від конструкції робочої камери компресори можуть бути пластинчастими, гвинтовими, шестерними

У пластинчастому компресорі робоча камера утворюється (рис. 4.6) корпусом і ексцентрично розташованим відносно до нього ротором, що має рухомі або гнучкі пластини; в рідинно-кільцевому – кільцем рідини, корпусом і ексцентрично розташованим по відношенню до нього ротором;

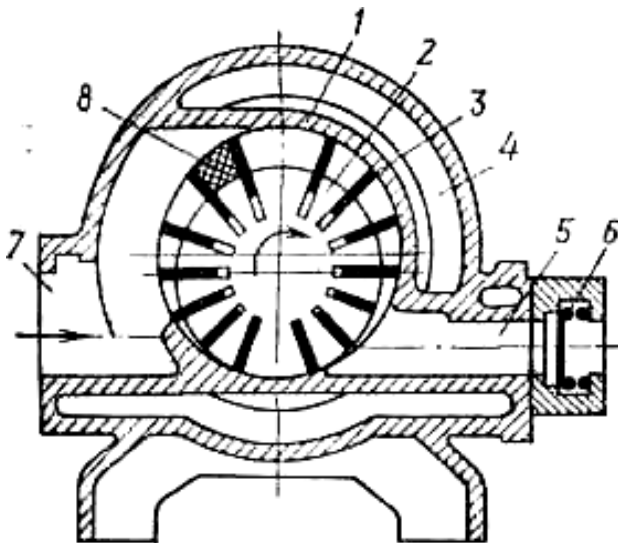


Рис. 4.6. Схеми роторного пластинчастого компресора: 1- корпус; 2 - ротор; 3 - пластина; 4 - сорочка; 5, 7- нагнітальний і всмоктувальний патрубки; 6 - клапан; 8 - камера стиснення

у гвинтовому (рис.4.7) – корпусом і гвинтоподібними роторами, що мають різні профілі зубів; в шестерному – корпусом і шестерними роторами, що мають зв'язані профілі.

Гвинтові компресори можуть бути двох типів: сухого стиснення і маслозаповнені. В машинах сухого стиснення газ охолоджується за допомогою сорочок в корпусі, а також проміжного і кінцевого холодильників. В маслозаповнених компресорах газ охолоджують уприскуванням масла або води в робочі порожнини гвинтів.

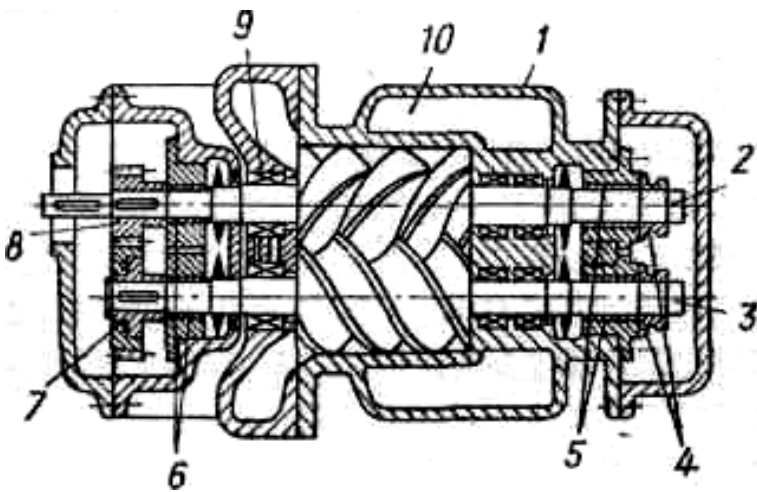


Рис. 4.7. Схема гвинтового компресора: 1- корпус; 2 - ведучий гвинт; 3 - відомий гвинт; 4 - напольгливий підшипник; 5, 6 - опорні підшипники; 7, 8-синхронізуючі шестерні; 9 - ущільнення; 10 - порожнина для циркуляції охолоджуючої рідини

Турбокомпресори. В компресорах цього типу прискорення потоку відбувається внаслідок його взаємодії з ґратами лопаток, що обертаються. За напрямом потоку в меридіональній площині колеса турбокомпресори діляться на радіальні, осьові, діагональні і вихрові. Якщо в радіальному турбокомпресорі потік направлений від центру до периферії, його називають відцентровим; якщо від периферії до центру – доцентровим.

У відцентрових компресорах (рис.4.8) тиск газу створюється під дією відцентрових сил, що виникають в газовому потоці, що обертається.

Відцентрові машини мають наступні переваги порівняно з поршневыми: газ не забруднюється маслом, оскільки воно подається тільки в підшипники; завдяки великій частоті обертання досягається висока продуктивність; плавний хід поршня і відсутність вібрацій дають змогу споруджувати полегшені фундаменти; унаслідок рівномірної подачі газу відпадає необхідність в ресиверах. До недоліків відцентрових компресорів можна віднести погіршення техніко-економічних показників при збільшенні ступеня стиснення. Відцентрові компресори можуть бути з горизонтальним і вертикальним роз'ємом корпусом і відрізняються діапазоном створюваного тиску: перші є машинами низького і середнього тиску і створюють тиск до 7МПа при продуктивності до  $10\text{м}^3/\text{с}$ ; другі розвивають тиск до 35МПа при максимальній подачі  $10\text{м}^3/\text{с}$

Для забезпечення продуктивності від  $25\text{м}^3/\text{с}$  і вище разом з відцентровими застосовують і осьові компресори (рис. 4.8), принцип дії яких полягає в перетворенні половини кінетичної енергії в енергію тиску на лопатках ротора, а решти половини – на лопатках статора.

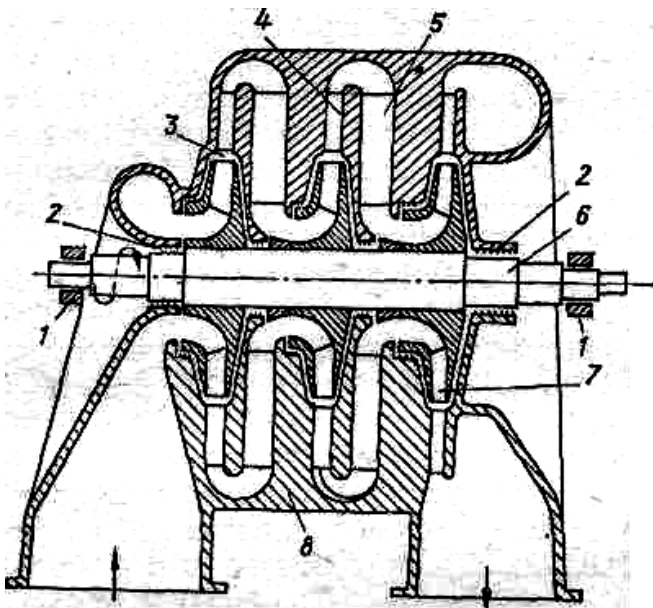


Рис.4.8. Схема відцентрового компресора: 1–підшипник, 2–ущільнення, 3–безлопатковий дифузор, 4–лопатковий дифузор, 5–зворотній направляючий апарат, 6–ротор, 7–робоче колесо, 8–корпус



Ряди лопаток статора служать для збільшення кінетичної енергії і тиску, а також для спрямування газу, що стискається, на роторних лопатках. Осьові компресори мають більш високі ККД, меншу масу і менші габарити, ніж радіальні.

## 5. Конденсатори

Конденсатори холодильних машин служать для передачі теплоти холодильного агента охолоджуючому середовищу. В конденсаторі газоподібний холодильний агент охолоджується, зріджується і утворена рідина переохолоджується. За способом охолодження конденсатори поділяють на апарати з водяним і повітряним охолодженням.

До спеціальних конструкцій відносять випаровувачі-конденсатори каскадних холодильних машин і конденсатори з охолодженням технологічним продуктом.

За принципом відведення теплоти конденсатори з водяним охолодженням поділяються на проточні, зрошувальні і випарні. До проточних конденсаторів відносяться: горизонтальні і вертикальні кожухотрубчасті, пакетно-панельні і елементні.

### **Вимоги, що ставляться до конструкції конденсатора:**

- 1) конструкція повинна забезпечувати швидке видалення конденсату з поверхні теплопередачі;
- 2) повинен здійснюватись випуск повітря і інших сконденсованих газів;
- 3) необхідно забезпечити видалення масла в аміачних апаратах.

### **5.1. Конденсатори водяного охолодження**

Для конденсаторів з водяним охолодженням застосовують 2 системи водопостачання: проточну і оборотну.

**Горизонтальні кожухотрубчасті конденсатори.** Ці апарати використовують у

аміачних і хладонових холодильних системах у великому інтервалі продуктивності. Розглянемо конструкцію кожухотрубчастого конденсатора(рис. 5.1).

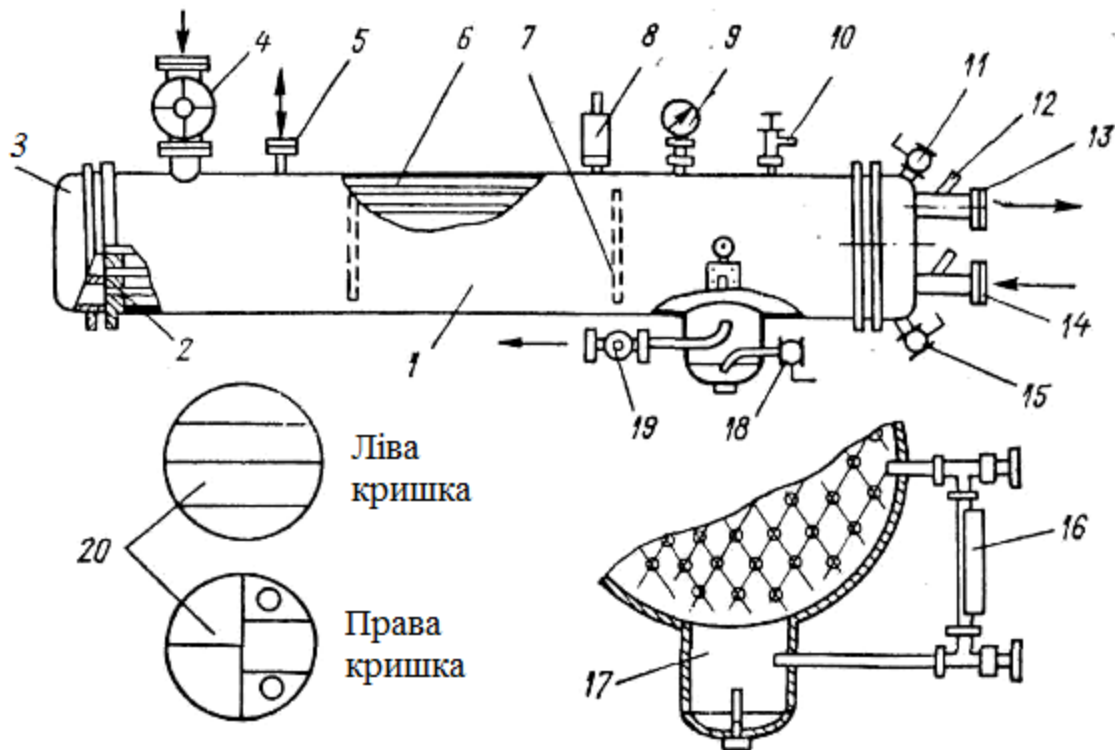


Рис. 5.1 .Горизонтальний кожухотрубчастий конденсатор

До циліндричного кожуха 1 з обох сторін приварені трубні решітки 2, в яких розвальцьовані труби 6, що утворюють поверхню теплопередачі. До фланців трубних решіток на болтах прикріпленні кришки 3 з внутрішніми перегородками 20. Пори аміаку потрапляють у верхню частину кожуха через вентиль 4 і конденсуються у міжтрубчастому просторі апарату. Рідкий аміак випускають з теплозбірника 17 через вентиль 19. Мастило, що потрапляє в конденсатор з парами агента, як більш тяжка субстанція осаджується в маслозбірнику 17 і періодично видаляється через вентиль 18. У середині корпуса приварені перегородки 7, що запобігають вібрації труб від пульсації пари. Охолоджуючу воду подають у нижній патрубок 14, вона протікає всередині труб і витікає через патрубок 13. Конденсатор оснащений патрубком для приєднання врівноважувальної лінії 5, запобіжним клапаном 8, манометром

9, вентилем для випуску повітря 10, вказівником рівня 9. Вентилі 11 і 15 служать відповідно для випуску повітря і зливу води. В патрубках для води вварені термометрові гільзи-12. Поверхнева густина теплового потоку, віднесена до площі внутрішньої поверхні, складає для таких апаратів  $5800\text{--}6500\text{Вт/м}^2$  за середньої різниці температур  $5\text{--}60^\circ\text{C}$ .

Аміачні конденсатори застосовують також для роботи на холодоагенті R22, але в більшості випадків фреонові машини комплектуються спеціальними апаратами, що мають деякі особливості. Для виготовлення теплообмінних труб таких конденсаторів застосовують труби з міді МЗ, що мають зовнішні накатані або насадні пластинчасті ребра.

Конструкція горизонтального хладонового конденсатора показана на рис.5.2.

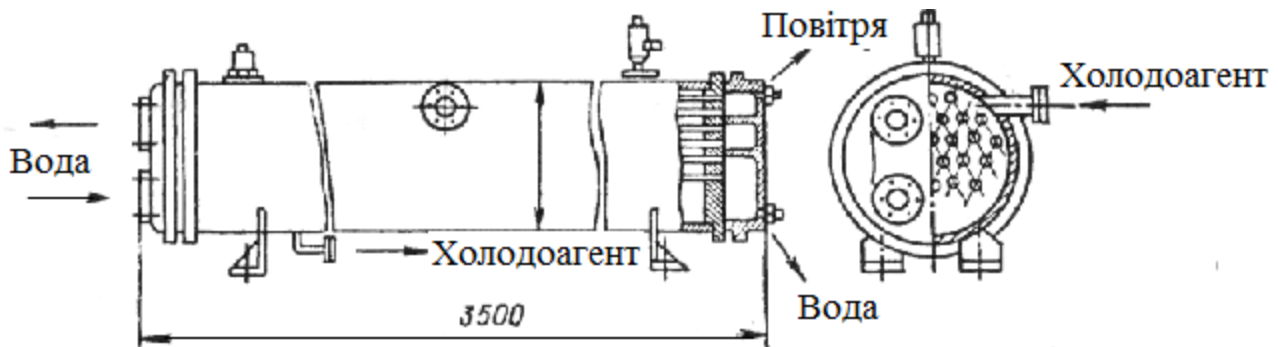


Рис. 5.2. Горизонтальний кожухотрубчастий хладоновий конденсатор

Конденсатори такої продуктивності мають, як правило кожухозмієвидну конструкцію. На рис. 5.3 наведено конденсатор КТР-3 з площею зовнішньої поверхні  $3\text{м}^2$ . Вісім  $n$  подібних трубок 4 зі сталевими оцинкованими ребрами розвальцьовані в трубній решітці 2. Кожух апарата виготовлений зі сталеві суцільнонатягненої труби 1 діаметром  $194\times 7\text{мм}$  та заварений з одного боку днищем 5. З другого боку до кожуху кріпиться трубна решітка і чавунна лита кришка 3 з внутрішніми перегородками і двома різьбовими отворами для введення і відведення води, яка протікає в апараті по чотирьох ходах. Нижню

частину таких конденсаторів використовують, як реверс для збирання рідини, тому її залишають вільною від труб.

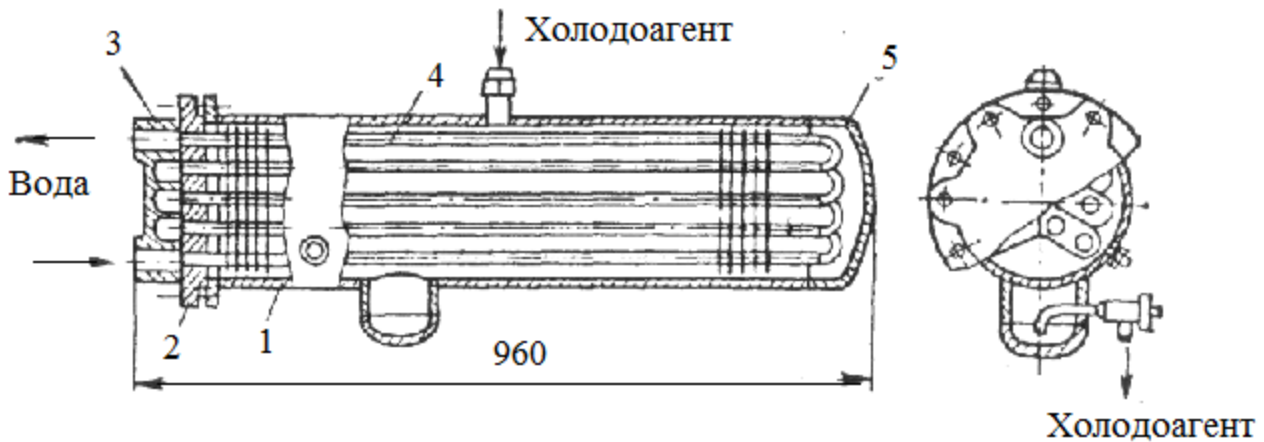


Рис. 5.3. Кожухозмієвидні конденсатори

**Вертикальні кожухотрубчасті конденсатори.** Ці апарати відрізняються від попереднього типу вертикальним розміщенням кожуху і труб (рис.5.4) і способом розподілення води.

До кожуха 7 з двох сторін приварені трубні решітки 2, в яких розвальцьовані гладкі сталеві труби-3 діаметром 57x3,5мм. Пари аміаку потрапляють у міжтрубчастий простір через патрубок, що розміщений в верхній частині кожуха. Конденсат стікає по зовнішній поверхні і витікає через патрубок, вварений на 80мм вище нижньої трубної решітки. На верхній трубній решітці встановлений водорозподільний бак 10 з циліндричною перегородкою 12. Охолоджуючу воду подають зверху в кільцевий простір водорозподільного бака, звідки через прорізи в перегородці вона надходить до труб теплопередаючого пучка. В кожну трубку встановлена пластмасова насадка 11, на боковій поверхні якої вковані спіральні канали, завдяки яким вода стікає плівкою по внутрішній поверхні труб, не заповнюючи їхнього перерізу. Повіревідділювач під'єднаний до апарату через патрубок 4, який призначений для періодичного видалення масла. Конденсатор має запобіжний клапан 8, вентиль для випуску повітря 9, манометр 6 і патрубок для приєднання

врівноважувальної лінії 5.

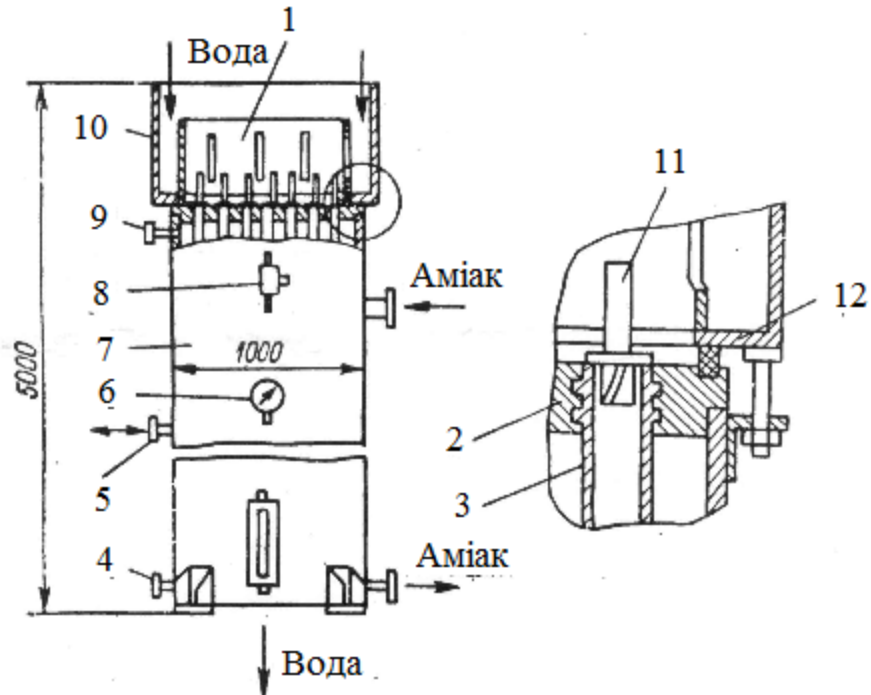


Рис. 5.4 - Вертикальний кожухотрубчастий конденсатор

**Зрошувальні конденсатори.** Конструкція серійного зрошувального аміачного конденсатора (рис. 5.6) передбачає плоскі змійовикові (секції), виконані з 14 горизонтальних трубок діаметром 57x3,5мм. Пери аміаку через патрубков-2 потрапляють у розподільчий колектор і звідти в нижні трубки секцій. Під час руху догори аміак конденсується і видаляється через проміжні відведення в вертикальний стояк 6, звідки його зливають у реверс 4, що з'єднаний з верхньою частиною конденсатора зрівноважувальною лінією-5. Подача парів аміаку в нижню трубну секцію запобігає попаданню мастила в верхні трубки і зменшує їхній термічний опір. Проміжне відведення конденсату з труб кожної секції 4, 8, 10, 12 виключає затоплення нижньої частини змійовика, що підвищує інтенсивність теплопередачі.

Воду подають насосом у водоприймальний бак 1 і далі у водорозподільні жолоби, що розміщені під кожною секцією. Вітікаючи з жолобу, вода рівномірно зрошує труби і заливається в піддон. З піддону частину нагрітої води відводять на

дренаж, а частину після добавлення свіжої води – на рециркуляцію. Розхід зрошувальної води на кожну секцію складає 10-12м<sup>3</sup>/год.

До переваг зрошувального конденсатора відносять менший розхід металу, простоту в виготовленні і надійність в роботі. Є і суттєві недоліки зокрема: громіздкість, необхідність встановлення в відкритому просторі, доброго нагляду за водорозподільними пристроями, забруднення зрошувальної води.

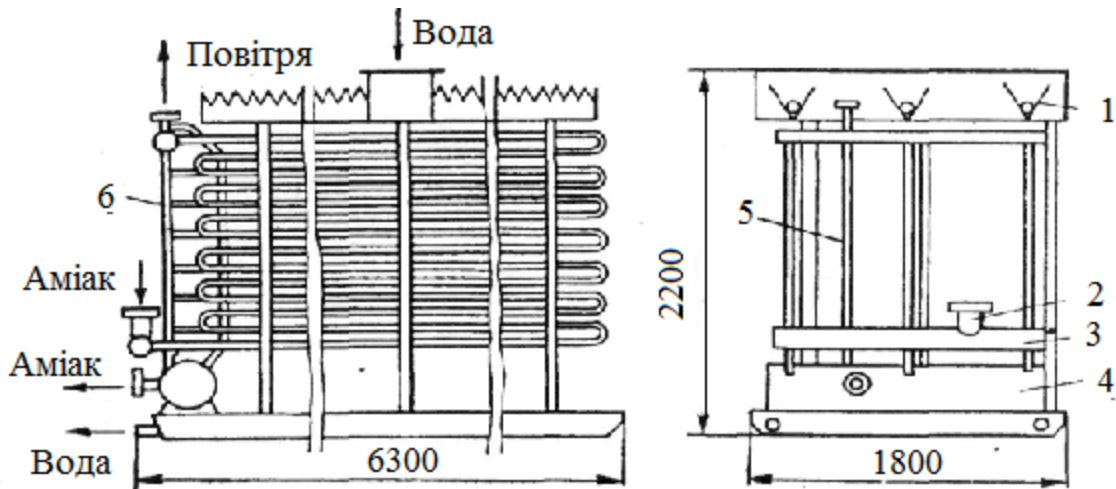


Рис. 5.6. — Зрошувальний конденсатор.

**Випарні конденсатори.** В цих конденсаторах вентилятори забезпечують примусовий рух повітря знизу вгору. Парі аміаку поступають у конденсатор 2, і через масловідділювач потрапляють в секцію конденсатора 5. Воду з фільтрувальної камери 7 насосом 6 подають у зрошувальний пристрій 4, що виконаний у вигляді труби з форсунками або отворами. Вентилятори 1, встановлені на верхній конфузорній ділянці кожуху. Регулюючий клапан 8, передбачений для підтримування постійного рівня води.

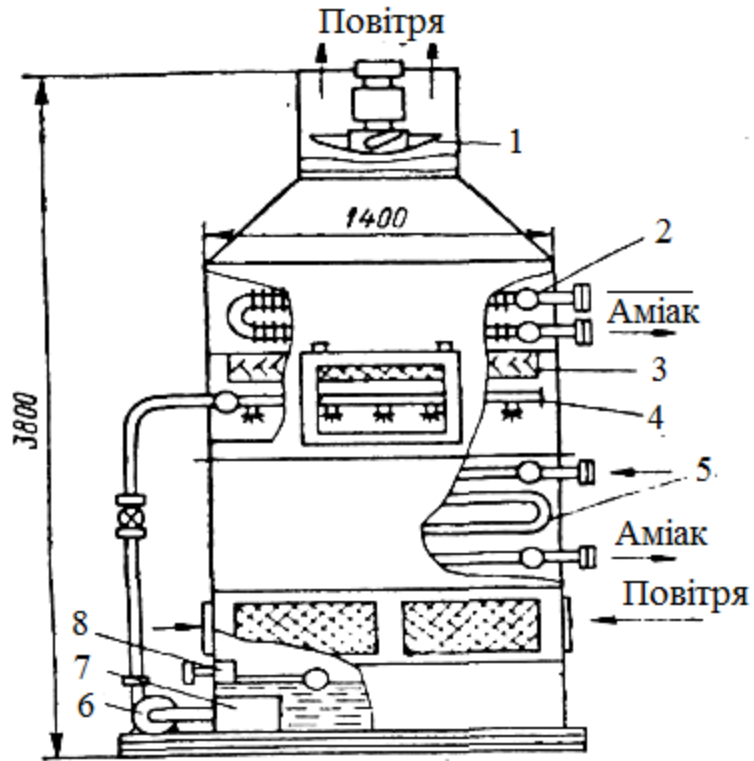


Рис. 5.7 Випарний конденсатор

**Пакетно - панельні конденсатори.** Апарат (рис.5.8) складається з декількох

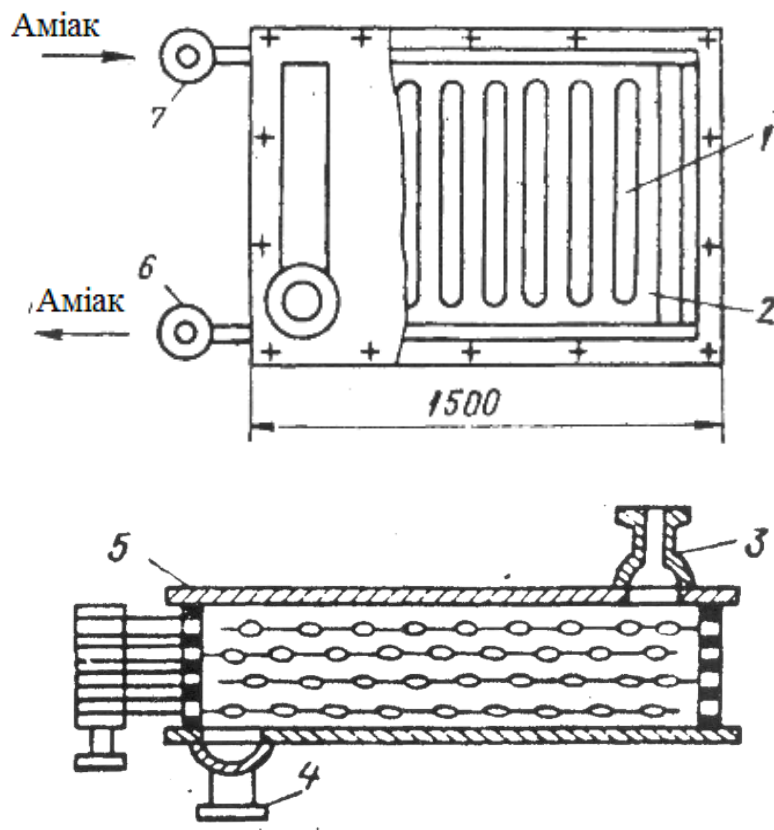


Рисунок. 5.8. Пакетно-панельний конденсатор

секцій, основними елементами яких є панель 2. Кожна панель утворена двома однаковими листами. Листи зварені між собою суцільним з'єднанням. Таким з'єднанням в панелі утворюється ряд вертикальних каналів 1, в яких відбувається конденсація аміаку. Воду через патрубок 3 подають між секціями і видаляють через патрубок 4. Послідовний рух води між секціями забезпечують вертикальні шпарини між кромкою і вертикальним стояком рами. Полозиції: 5-плоска кромка; 6,7-паровий і рідинний колектори.

**Повітряні конденсатори.** Фреонові конденсатори для малих і середніх холодильних машин однотипні за конструкцією. Апарат складається з одної або декількох секцій, з'єднаних послідовно кулачками або п-колекторами. Пар холодоагенту потрапляє зверху до 1 секції або до парового колектора, а рідину видаляють знизу з останньої секції або з колектора

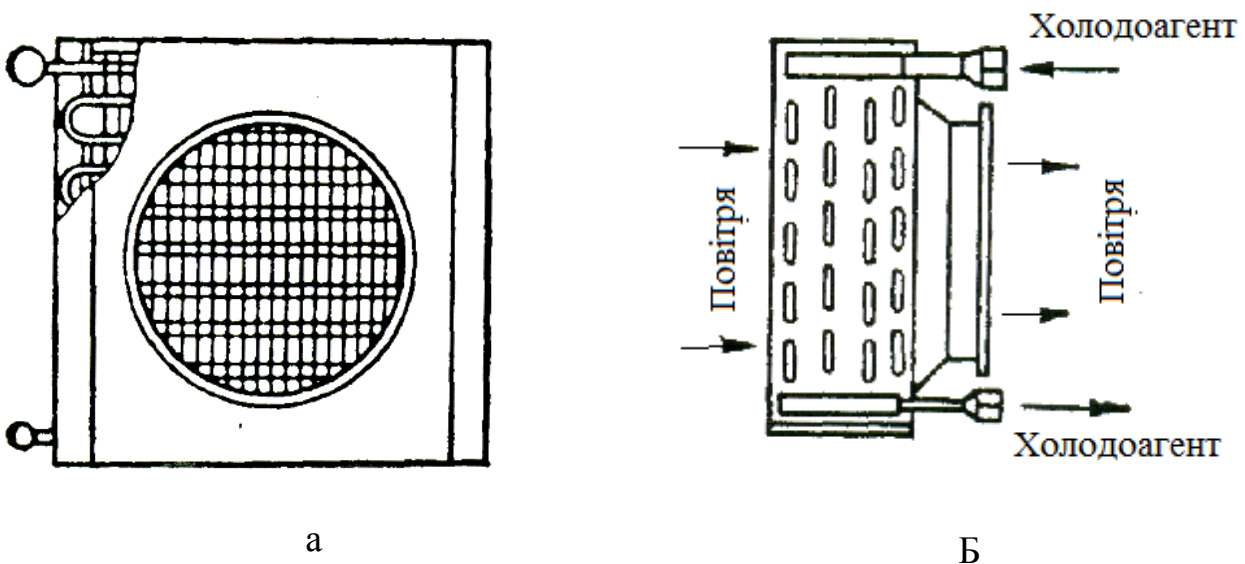


Рис.5.9. Повітряний фреоновий конденсатор (а). Повітряний конденсатор з зигзагоподібним розміщенням секцій (б).



## 6. Випарники

Випарники використовують для охолодження рідких холодоносіїв і рідких технологічних середовищ.

За конструктивним призначенням випарники поділяють на кожухотрубчасті, кожухозмієвикові, панельні та пластинчасті.

Залежно від умов циркуляції охолоджувальної рідини розрізняють випарники двох типів:

- 1) з закритою системою циркуляції охолоджувальної рідини, що циркулює за допомогою насоса, до них відносять кожухотрубчасті;
- 2) з відкритим рівнем охолоджувальної рідини, циркуляція якої забезпечується підкачуванням, до них відносять панельні.

За характером заповнення холодоагентом випарники поділяють на заповнені і незаповнені. До останніх відносяться зрошувальні і кожухотрубчасті з кипінням у трубах.

Випарники поділяють також на групи залежності від того, на якій поверхні відбувається кипіння холодоагенту: в міжтрубчастому просторі (кожухотрубчасті, заповнені, зрошувальні) або всередині труб і каналів (кожухотрубчасті з кипінням у трубах, пластинчасті, панельні).

За характером руху холодоагенту можуть бути випарники з природною і примусовою його циркуляцією.

### **Кожухотрубчасті випарники заповненого типу.**

Заповнені кожухотрубчасті випарники зараз є найбільш розповсюдженим типом апаратів у холодильних установках середньої і великої продуктивності. В цих апаратах холодоагент кипить на зовнішній поверхні труб (гладких або ребристих), а холодоносіїв циркулює всередині труб.

Кожухотрубчасті випарники мають деякі переваги порівняно з апаратами інших типів. До них відносять: закриту систему циркуляції холодоагенту, що забезпечує меншу його аерацію і внаслідок цього меншу корозію обладнання, більшу компактність, відносно високу теплову ефективність і інші. Серйозним

недоліком кожухотрубчастих випарників є небезпека замерзання холодоносія в трубах за умови припинення його циркуляції.

Кожухотрубчастий випарник – це циліндричний горизонтально розташований барабан (кожух, обичайка) з плоскими днищами — решітками, в яких розвальцьовують або вварюють труби. Труби можуть бути прямими, U-подібними або звернутими в змійовик. Холодоносій (розсіл) потрапляє в труби випарника через кришки, які прикручують на площадках до фланців трубних решіток і приєднують з допомогою патрубків до зовнішньої мережі холодоносія.

Для зручності виконання ревізії і очистки внутрішньої поверхні труб без демонтажу розсольних ліній деколи виконують кожухотрубчасті випарники з розсольними камерами, що мають патрубки і окремі з'ємні кришки.

Холодоносій зазвичай подають до нижнього штуцера і видаляють від верхнього. Парорідинна суміш після регулюючого вентиля потрапляє в міжтрубчастий простір випарника. В верхній частині випарника передбачений вільний від труб простір, який служить сухопарником.

### **Аміачні випарники.**

Характеристики аміачних кожухотрубчастих випарників середньої продуктивності наведено в таблиці 6.1.

Загальний вигляд кожухотрубчастого випарника подано на рис.6.1. В апаратах цього типу використовують суцільні гладкі сталі (Ст2 і Ст3) труби. Пучок труб шаховий гексагональний.

Обичайку випарника виготовляють із сталі електрозварних або завальцьованих з листової сталі труб. Кришки апарата зазвичай литі та чавунні.

Чавунні решітки виготовляють із вуглецевої або легованої сталі. Їхню товщину розраховують з умов міцності. Кріплення труб в решітці здійснюють за рахунок розвальцьовання кінців труб. Мастило, що потрапляє в випарник, періодично видаляють через масловідстійник, розташований у нижній частині апарата.

Статичний рівень рідкого аміаку в випарнику повинен підтримуватись на висоті, приблизно рівній  $0,8D$ .

Таблиця 6.1

## Випарники кожухотрубчасті аміачні

Марка	Площа поверхні, м <sup>2</sup>	Габарити			Розміри кожуха	Маса, кг
		Довжина	Ширина	Висота		
50ИТГ	51/40,6	3580	1075	1590	600x8	1665
63ИТГ	67,9/54,2	4580	1075	1590	600x8	2013
80 ИТГ	85/68	5580	1075	1590	600x8	2464
125ИТГ	121/97	4670	1310	1950	800x8	3605
160ИТГ	152/121	5670	1310	1950	800x8	4329
200 ИТГ	194/155	4800	1493	2270	1000x8	5656
250ИТГ	242/194	5800	1493	2270	1000x8	6316
315 ИТГ	300/240	6820	1310	2270	1000x8	7860
500 ИТГ	594/500	7355	2715	2955	1600X16	23800
630 ИТГ	759/650	7340	2985	3200	1800 x20	29760
800 ИТГ	1010/850	9345	2985	3200	1800 x20	37620

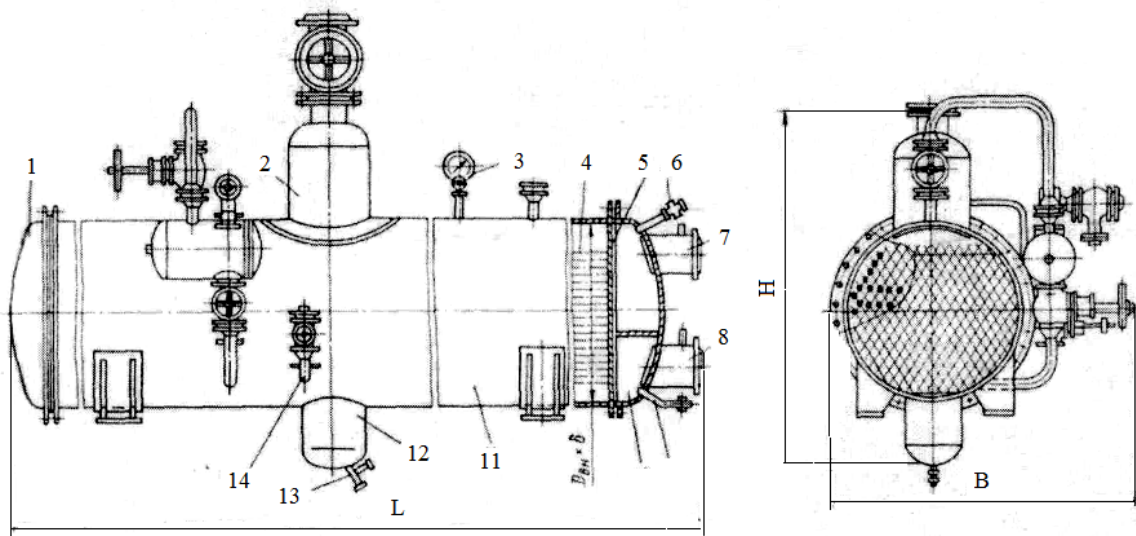


Рис.6.1. Аміачний кожухотрубчастий випаровувач заповненого типу: 1, 10 - кришки; 2 - сухопарник; 3 - манометр; 4 - труби; 5 - трубна решітка; 6 - вентиль для випуску повітря; 7, 8 - штуцера для введення і відведення розсолу; 9 - злив розсолу; 11 - корпус; 12 - масловідстійник; 13 - кран для видалення мастила; 14 - патрубок для входу рідкого аміаку

### Фреонові випарники.

Основні характеристики фреонових випарників наведено в таблиці 2, а загальний вигляд подано на рис. 2. У фреонових кожухотрубчастих випарниках використовують мідні труби з накатаними зовнішніми ребрами. Коефіцієнт ребрування труб  $\lambda = 3,4$ . Труби в пучку розміщують у вершинах рівностороннього трикутника. Кінці труб розвальцьовують у трубних решітках.

У випарниках, що використовують за температур кипіння вище - 40°C основні деталі виготовляють із сталі марки Ст3 відповідно ГОСТ380-71.

Рівень заповнення міжтрубчастого простору рідиною в фреонових випарниках нижчий, ніж у аміачних, так як під час кипіння фреонів відбувається спінування рідини через присутність у ній розчиненого мастила.

**Таблиця 6.2**

Випарники кожухотрубчасті, горизонтальні, фреонові, заповненого типу.

Марка	Холодоагент	Площа робочої поверхні	Діаметр кожуха,мм	Довжина кожуха,мм	Число труб
ИТР-12	R12	12/3.7	325	1415	70
ИТР-18	R12	18/5.3	325	1665	84
ИТР-35	R12	35/10.6	426	1940	145
ИТР-50	R12	50/15.5	525	1985	207
ИТР-70	R12	70/21.0	530	2240	249
ИТР-105	R12	100/33.0	600	3700	237
ИТР-210	R12	209/68.0	800	3730	484
ИТР-400	R12	390/134.0	1200	3870	920
ИТР-65	R22	65/19.0	500	2435	210
ИТРН-80	R22	77/25.0	600	3100	218
ИТР-35Н	R22	35/13.0	500	3000	123

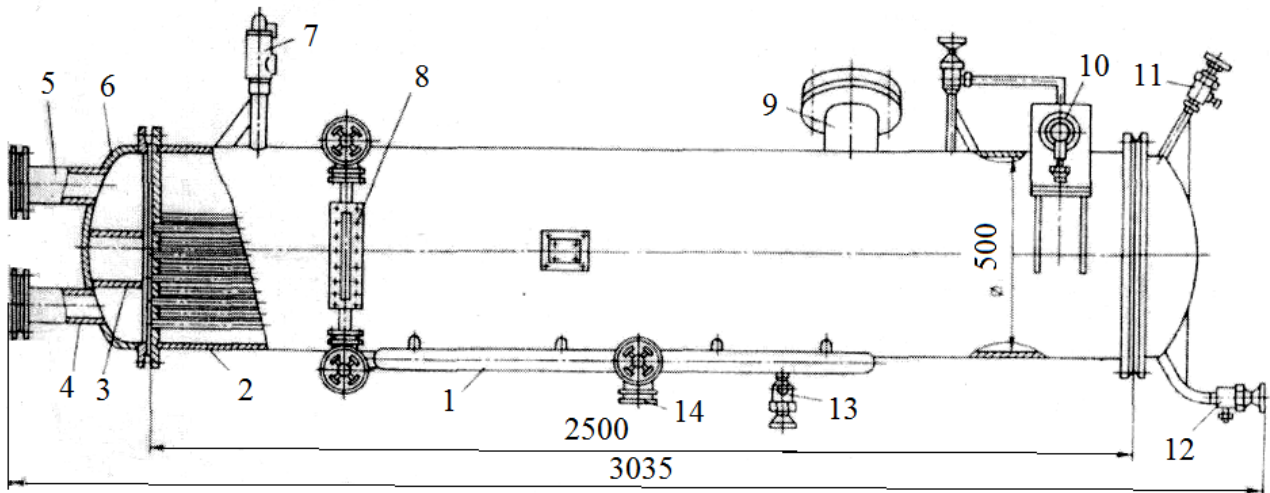


Рис.6.2. Фреоновий кожухотрубчастий випарник заповненого типу: 1 - рідинний колектор; 2 - обичайка; 3 - перегородки; 4, 5 - штуцера для введення і відведення розсолу; 6 - кришка; 7 - запобіжний клапан; 8 - показник рівня; 9, 14 - штуцера для виходу і входу холодоагенту; 10 - манометр; 11 - кран для спуску повітря; 12 - кран для спуску розсолу; 13 - вентиль для спуску масла

За оптимальних умов роботи випарника пара, яка відводиться з нього має показник паровмісту  $x=0,98-1,0$ . Відсмоктування з випарника вологої пари з наступним її осушуванням в регенеративному теплообміннику забезпечує часткове відведення мастила з апарата.

### Кожухотрубчасті зрошувальні випарники.

У кожухотрубчастих зрошувальних випарниках розсіл, як і в затоплених, циркулює всередині труб, а холодильний агент стікає по зовнішній їхній поверхні у вигляді тонкої плівки. Конструкції цих випарників позбавлені деяких суттєвих недоліків, що притаманні заповненим: вони не вимагають великої кількості холодоагенту для заповнення; гідростатичний стовп рідини в них малий і практично не впливає на роботу апарата.

За інтенсивністю теплопередачі ці апарати дещо переважають заповнені за рахунок вищого коефіцієнта теплопередачі. За умови, якщо частина поверхні теплопередачі апарата не змочена рідиною, інтенсивність теплопередачі суттєво

понижується. Через це питанню рівномірного зрошення поверхонь труб у конструкції апаратів приділяється велика увага.

Деякі закордонні фірми виготовляють і використовують ці апарати для поршневих і трубокомпресорних машин. Апарати цього типу, що виготовляються в США, працюють на фреонах R11, R12, R113 і R114. Відсутність вільного рівня рідкого холодоагенту в працюючому зрошувальному випарнику забезпечує доцільність його використання в судових холодильних установках.

### **Кожухотрубчасті випарники з кипінням холодоагенту всередині труб.**

У випарниках цього типу холодоагент кипить всередині труб, а холодоносій циркулює у міжтрубчастому просторі. За рахунок встановлених у обичайках перегородок забезпечують відносно високу швидкість поперечного обтікання пучка труб холодоносієм. Ці апарати можуть мати два конструктивних виконання:

1) з U- подібними трубками, закріпленими в одній решітці, що дає змогу запобігти термічним напругам у трубках; 2) з прямими трубками, закріпленими в трубних решітках з двох сторін.

Трубки можуть бути гладкі і поребрені (ззовні і зсередини). Відсутність холодоносія в них забезпечує можливість використання кожухотрубчастих випарників із внутрішньо- трубним кипінням для отримання низьких кінцевих температур холодоносія, який за відсутністю не замерзає і не призводить до руйнування труб. Це особливо важливо при охолодженні води.

Великою перевагою цих випарників, особливо у випадку використання внутрішньо- перебраних труб, є малий об'єм холодоагенту. Разом з тим малий об'єм, пов'язаний з малою інерційністю апарату. Внаслідок цього ускладнюється регулювання живлення випарника. На рис.6.4. і 6.5. подано конструкції кожухотрубчастих випарників з кипінням холодоагенту всередині труб, прямих і U-подібних. Основні розміри апаратів з прямими трубами приведені в таблиці 6.3.

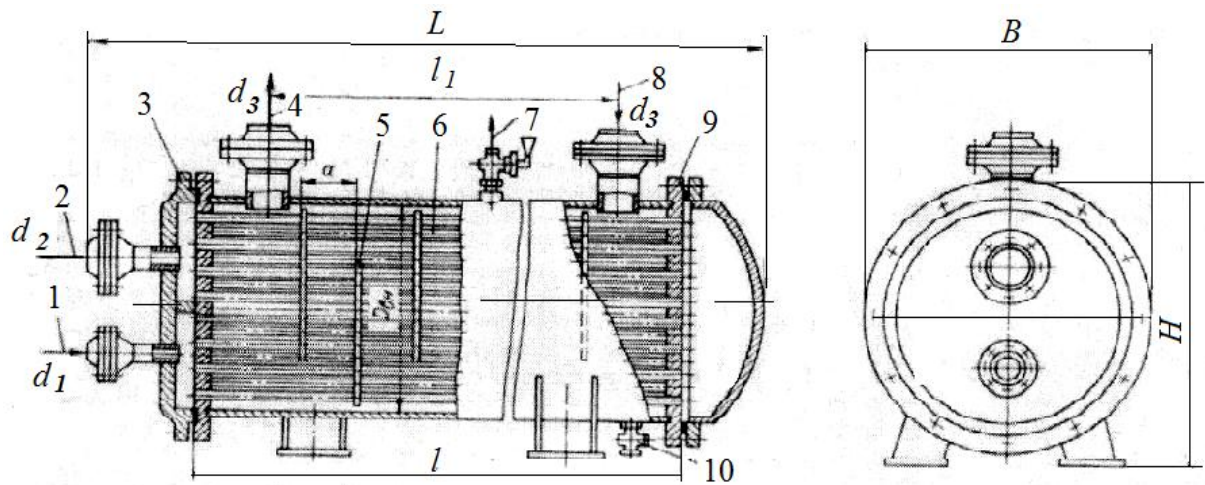


Рис.6.4. Кожухотрубчастий випарник з кипінням холодоагенту всередині прямих труб: 1, 2- вхід і вихід холодоагенту; 3 - кришка; 4, 8- вхід і вихід розсолу; 5 - поперечні перегородки для розсолу; 6 — теплообмінні труби; 7 — кран для спуску повітря; 9 - трубна дошка; 10 - вентиль для зливу розсолу

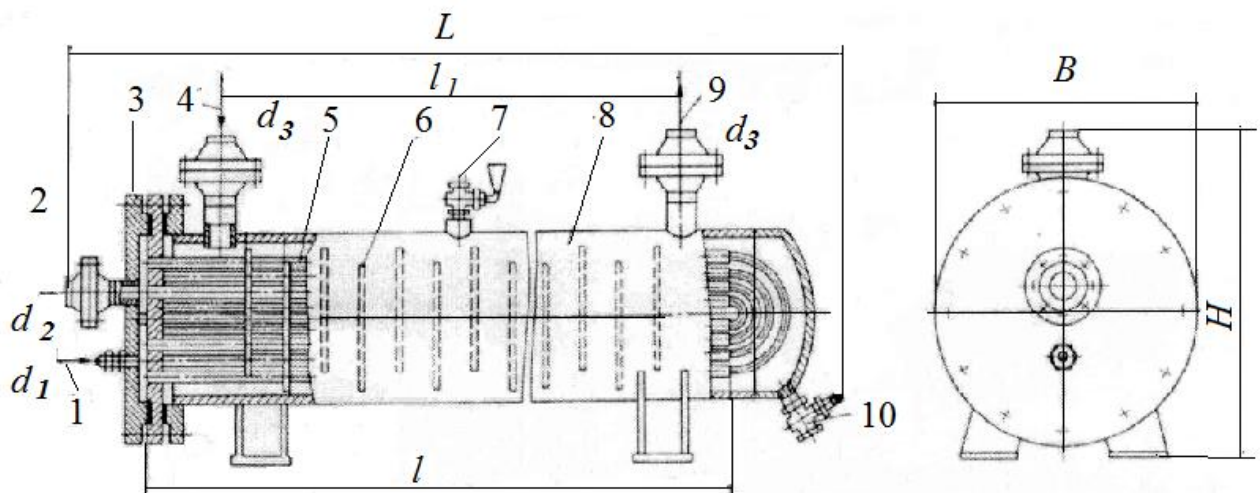


Рис. 6.5. Кожухотрубчастий випарник з внутрішнім кипінням холодоагенту в U-подібних трубах: 1, 2 – підведення і відведення холодоагенту; 3 - кришка; 4, 9 – підведення і відведення розсолу; 5 - теплообмінні труби; 6 - поперечні перегородки для розсолу; 7 - кран для випуску повітря; 8 - обичайка; 10 - вентиль для зливу розсолу

Поверхня теплопередачі виконана з мідних труб із внутрішніми ребрами у вигляді зіркоподібної вставки. Коефіцієнт ребрування  $\beta=2,52$ . Труби в апараті мають гексагональне розташування з кроком 22мм. Обичайку апарата, розподільчу камеру та торцеві кришки виготовляють зі сталі (СтЗсп). Трубні решітки – зі сталі Ст5сп. Ці випарники призначені для роботи в інтервалі температур кипіння  $-30 < t_0 < 5^\circ\text{C}$  з холодоагентами R22, R12, R502. Як холодоносії використовують: воду, водні розчини хлористого кальцію (при рН=6,5-9,5), етиленгліколь і інші низькозамерзаючі рідини, що не викликають корозії системи на стороні холодоносія.

Таблиця 6.3

Випарники кожухотрубчасті з внутрішньо- поребраними трубами.

Марка	Площа поверхні, м <sup>2</sup>	Габарити			Число труб	Довжина труб, мм	Маса, кг
		Довжина, мм	Ширина, мм	Висота, мм			
ИТ20	24,8/59,5	3600	1075	744	128	3000	1080
ИТ30	32,4/76,5	3620	1100	806	174	3000	1293
ИТ65	70,0/176	3770	1265	1030	375	3000	2251
ИТ100	136/362	3866	1276	1370	732	3000	3310
И24	9,5/24	2290	520	500	72	2000	430
ИЗО	12/30,1	2295	520	500	110	2000	520
И40	16/40,2	2325	550	538	120	2000	535
И50	20/49,5	2825	550	538	120	2500	620

### Панельні випарники.

Основні технічні характеристики панельних випарників подано в табл.6.5. Панельний випарник (рис. 6.7) – це заповнений холодоносієм прямокутний металевий чи залізобетонний бак, в який встановлено випарні секції



панельного типу і мішалка, що створює циркуляцію холодоносія. Кожна секція

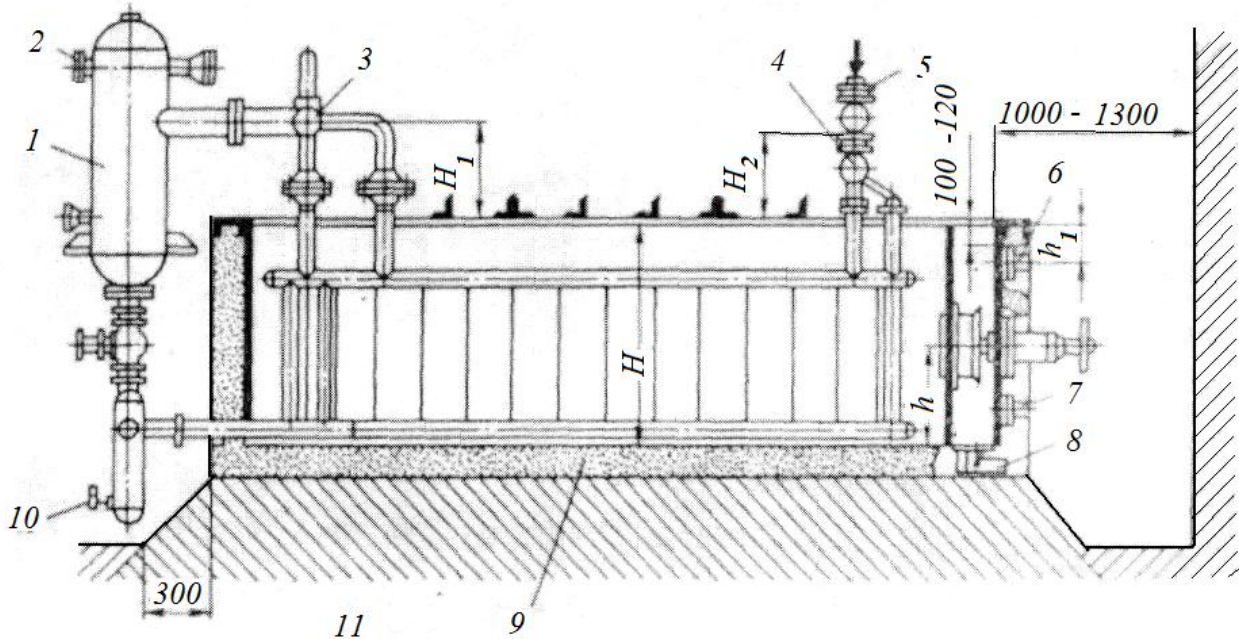


Рис.7. Панельний аміачний випарник ІП: 1 - віддільник рідини; 2 - патрубок для відведення парів аміаку; 3, 4 - збірний і розподільний колектори; 5 - патрубок для введення рідкого аміаку; 6 - перелив розсолу; 7 - патрубок для відведення розсолу; 8 – злив розсолу; 9 - ізоляція; 10 - вентиль для зливання мастила; 11 – запобіжний клапан

складається з двох горизонтальних колекторів діаметрами 32x3,5 і 57x3,5 мм і двох вертикальних стояків розміром 25x2,5мм, що створюють прямокутну секцію з ввареними в неї штампованими зварними панелями. Кипіння холодильного агенту відбувається в нижньому колекторі і вертикальних каналах панелей. За інтенсивністю внутрішньої циркуляції ці апарати дещо поступаються вертикально-трубчастим. Разом з цим панельні апарати мають ряд переваг порівняно з вертикально-трубчастими, зокрема: 1) водночас із загальним зменшенням маси на 25-30% знижується в 5-6 раз витрата суцільних труб, вартість яких майже втричі вища, ніж вартість листового матеріалу; 2) разом із загальним зменшенням маси на 25-30% знижується в 5-6 раз витрата суцільних труб, вартість яких майже втричі вища, ніж вартість листового матеріалу;

3) зменшується об'єм апарату за холодоагентом, що призводить до зменшення об'єму ресиверів.

Таблиця.6.5

## Характеристики панельних випарників

Марка	Площа поверхні,	Габаритні розміри бака, мм			Число секцій
		L	B	H	
40ИП	40	3470	735	1050	8/5
60ИП	60	3670	1060	1050	12/5
90ИП	90	3670	1045	1050	18/5
ШИП	120	6100	1115	1200	12/10
180ИП	180	6100	1625	1200	18/10
240ИП	240	6100	2135	1200	24/10
320ИП	320	6100	2815	1200	32/10

**Випарники - конденсатори каскадних холодильних машин.**

Відомо, що отримання температур від  $-80^{\circ}\text{C}$  і нижче в багатоступінчастих машинах виявляється ускладненим через дуже низький тиск парів робочого тіла в випарнику. В таких випадках доцільно використовувати каскадні холодильні машини з використанням різних холодоагентів в окремих каскадах. У нижньому каскаді зазвичай використовують агент високого тиску (R13 або отриманий в останній час R503), у верхньому - агент, що використовують в холодильних машинах з помірними температурами кипіння (аміак, R22, R12, R502). Температура конденсації в нижньому каскаді повинна бути в межах від  $-30^{\circ}$  до  $0^{\circ}\text{C}$ , більш високі значення температури є небажаними, так як при цьому значно зростає тиск конденсації R13.

Верхній та нижній каскади зв'язані між собою апаратом випарник-конденсатор, у якому пара холодоагенту, що циркулює в нижньому каскаді, конденсується за рахунок охолодження його холодоагентом, що кипить у верхньому каскаді.

Під час зупинки машини рідкий R13 кипить, тиск пари різко зростає. В

зв'язку з цим в нижній частині каскаду передбачено розширювальна ємність, куди за підвищення температури перекачують холодоагент R13 з апаратів. Цю ємність використовують і для зберігання R13.

Таблиця 6.6

## Характеристики каскадних холодильних машин

Марка	Діаметр умовного переходу штуцера, мм			Ємність по аміаку, м <sup>2</sup>	Маса, кг
	Для аміаку		Для холодоносія		
	Вхід	Вихід			
40ИП	20	65	100	0,223	1500
60ИП	20	100	100	0,332	2180
90ИП	20	100	150	0,497	3000
120ИП	40	150	200	0,501	4000
180ИП	40	150	250	0,744	5530
240ИП	40	200	250	1,008	7130
320ИП	40	200	300	1,340	9440

На рис.6.8. наведено кожухотрубчастий випарник - конденсатор КДИ-105 для фреонової каскадної машини ФКМ 25-90А, що працює з використанням R22 у верхньому каскаді і R13 - в нижньому.

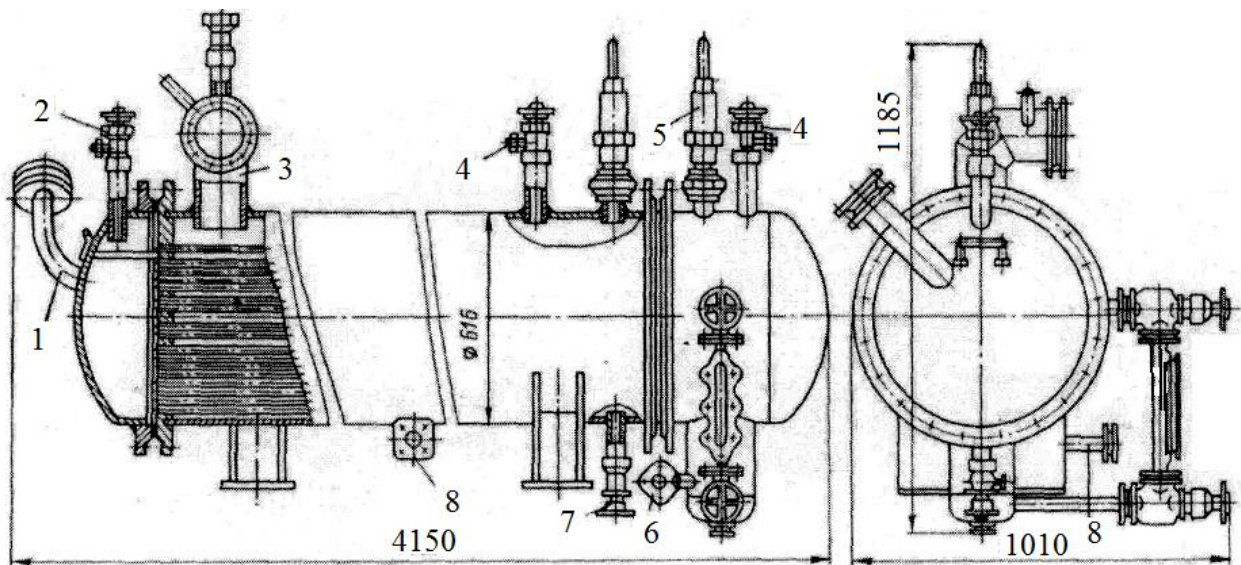


Рис.6.8. Випарник конденсатор КДИ-105: 1 - підведення парів R13; 2 - випуск повітря; 3 - відведення парів R22; 4 - вентиль до манометра; 5 - запобіжний клапан; 6 - відведення рідкого R13; 7 - випуск масла; 8 - підведення рідкого R22

Конденсація R13 відбувається всередині труб, а кипіння R22 - у проміжному просторі. Для забезпечення зливу конденсату R13 апарат встановлюють у агрегаті з невеликим нахилом (1:30) в бік ємності для збирання рідини. Всі деталі апарата (за виключенням труб) виконані з корозійностійкої сталі марки Х18Н9Т. Труби апарата (їхня загальна кількість 245) - мідні, ззовні поребрині; кінці – розвальцьовані в трубних решітках, які приварених до корпусу. Найбільший робочий тиск  $15 \cdot 10^2$ кПа, пробний  $19 \cdot 10^2$ кПа.

## 7. Пристрої для охолодження оборотної води

Вартість води для охолодження - одна з основних експлуатаційних витрат. Скоротити їх дає змогу вживання оборотного водопостачання. Вода охолоджується у відкритих басейнах і вентиляторних градирнях за рахунок часткового її випаровування. Після цього її подають на охолодження конденсаторів, маслоохолоджувачів гвинтових агрегатів і сорочок поршневіх компресорів. Басейни (рис.7.1) працюють за принципом фонтанів. Відкриті градирні обгороджують жалюзійними ґратами.

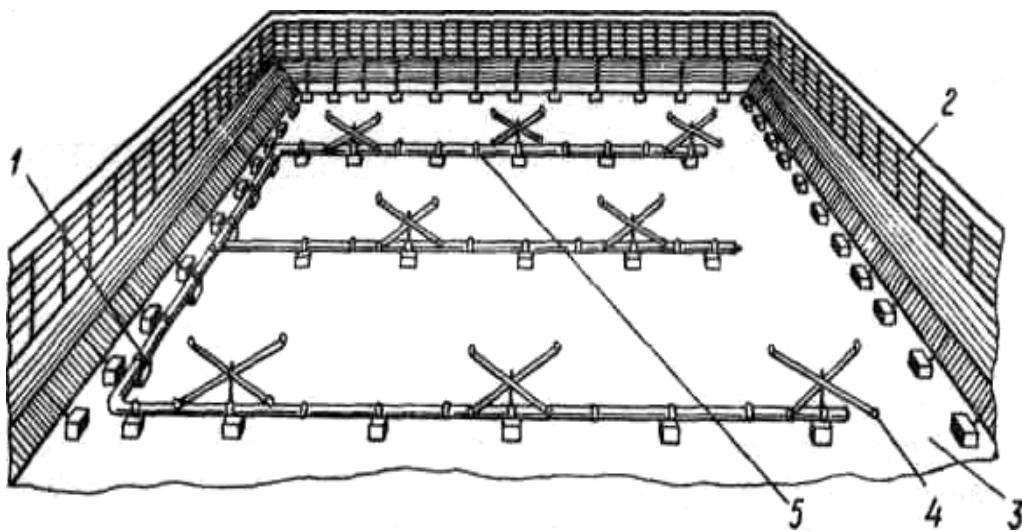


Рис.7.1. Відкритий басейн: 1 - колектор; 2 - жалюзійні ґрати; 3- піддон басейну; 4 - форсунка; 5 - труба підведення води до форсунок

Вода в них розбризкується форсунками з висоти 2-4 м. Ефективність охолодження води в градирнях вища, ніж у басейнах, за рахунок тривалішого контакту води з повітрям. Найбільше поширення набули плівкові вентиляторні градирні, в яких повітря вентилятором продувається або через зрошувані водою насадки, виготовлені з дерева або пластмас за принципом протитечії (рис.7.2 і 7.3).

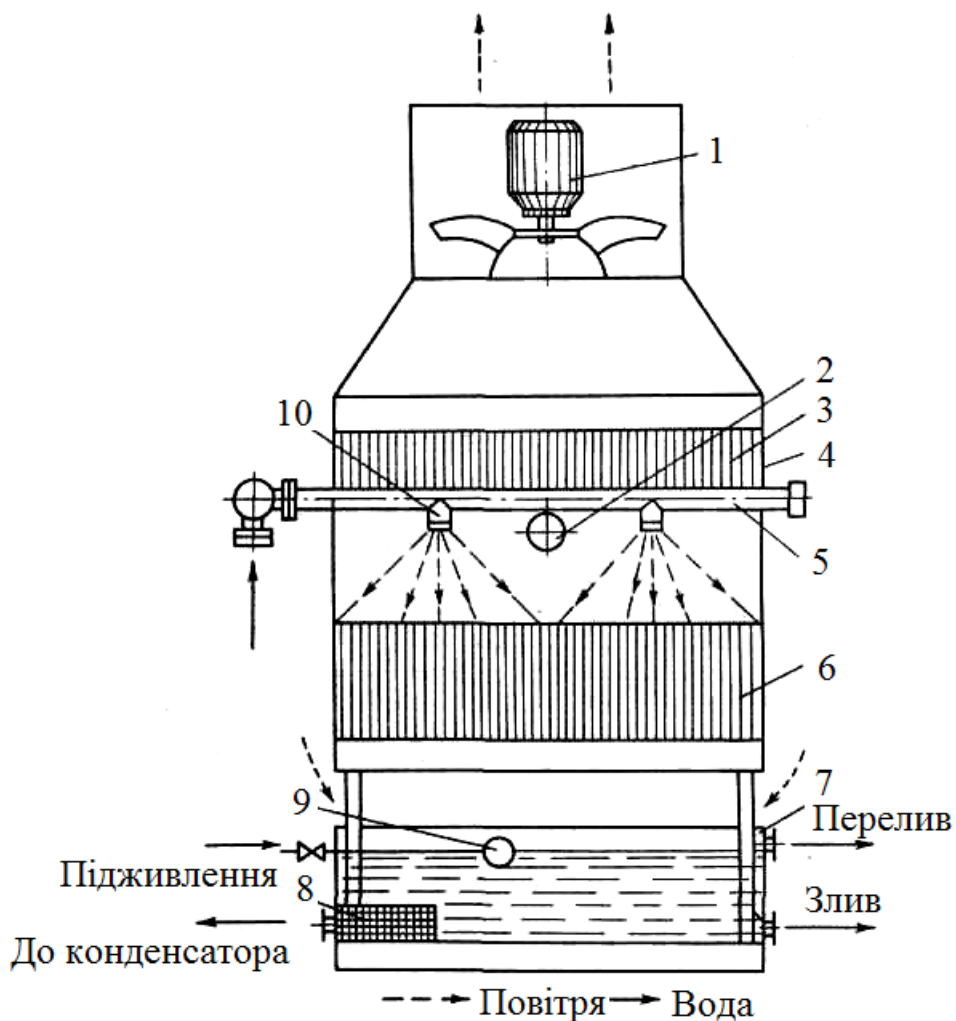


Рис.7.2. Вентиляторна градирня.

- 1- електровентилятор; 2 - оглядове вікно; 3 - краплевідбійний шар;  
 4 - кожух; 5 - водорозподільний пристрій; 6 - зрошувані насадки;  
 7 - водозбірний бак; 8 - фільтр; 9 - пристрій поплавця; 10 - форсунка

Під градирнею встановлюють водозбірний резервуар. Вентиляторні градирні випускають з нижнім і верхнім розташуванням вентиляторів. Нижче

розташування є кращим з точки зору довговічності електродвигунів вентиляторів. Слід зауважити, що габарити вентиляторних градирень значно менше ніж

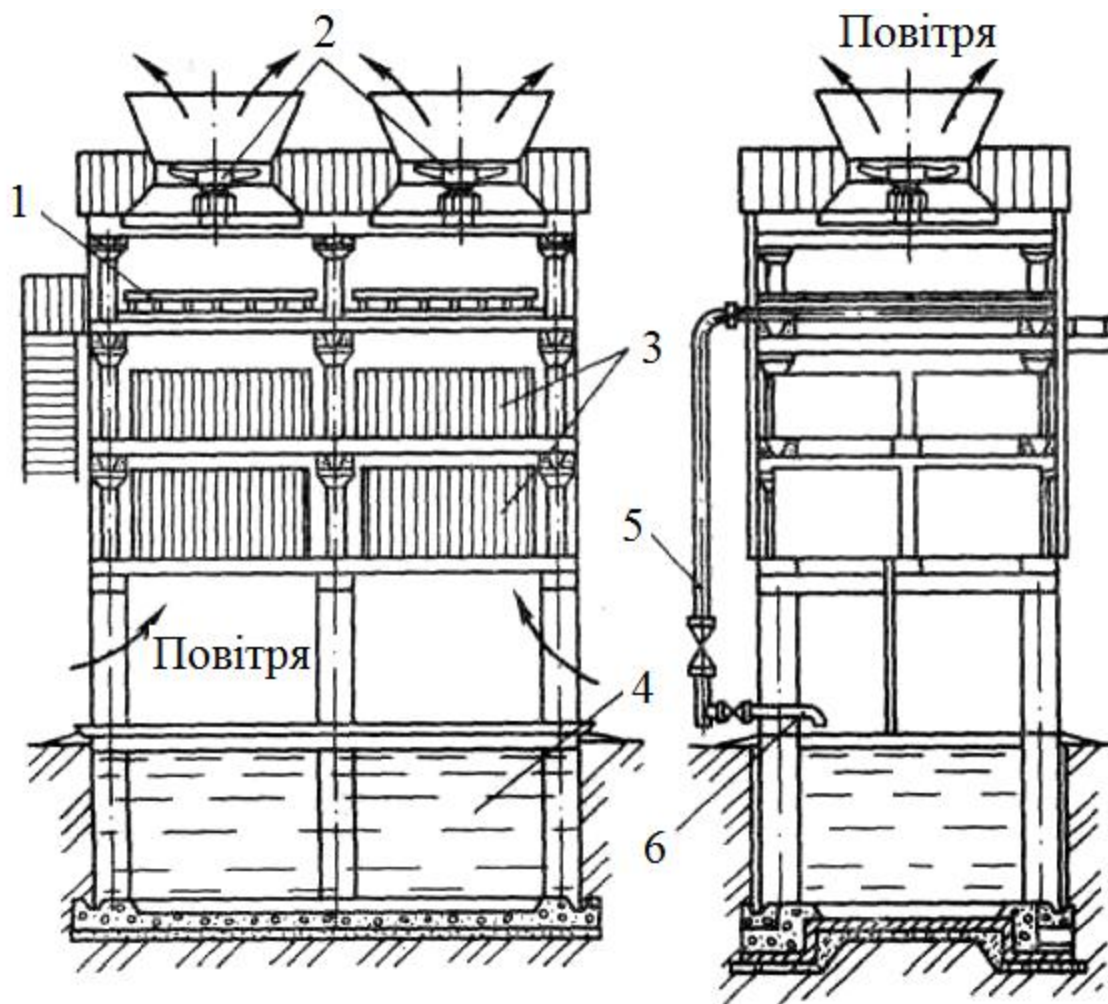


Рис.7.3. Вентиляторна градирня: 1 - зрошувальний пристрій;  
2 - вентилятори; 3 - зрошувані насадки; 4-водозбірний басейн;  
5-трубопровід подачі води до зрошувального пристрою;  
6 - трубопровід зливу води в басейн

відкритих. Недоліком плівкових вентиляторних градирень є ймовірність обвалення щитів насадки під вагою льоду в холодну пору року, тому при підключенні градирні перемикають подачі води безпосередньо в піддон градирні. Характеристики вентиляторних градирень, подано в табл. 7.1.

Градирні можуть розміщуватися зовні приміщень, на дахах будівель, а також

усередині будівель, повітря за таких умов необхідно виводити назовні. Для всіх апаратів охолодження оборотної води повинно бути організовано підживлення свіжою водою з розрахунку 2-4 % від кількості циркулюючої. Воду доцільно подавати в піддон апарату, автоматизуючи цей процес за допомогою пристрою поплавця. Періодично необхідно здійснювати повну заміну оборотної води на свіжу для видалення солей, що нагромаджуються.

Таблиця 7.1

## Технічні характеристики градирень

Марка або кількість секцій	Розташування вентилятора	Тепловий потік за різниці температур 5°C, кВт	Густина теплового потоку, кВт/м <sup>2</sup>	Витрата охолоджуваної води, кг/с	Потужність вентиляторів, кВт	Габарити, м	
ГПВ-80	Верхнє	93	54,0	4,44	1,85	1,5*1,5*2,2	
ГПВ-160		186	48,0	8,88	3,7	2,2*2,2*2,5	
ГПВ-320		372	57,0	17,76	6,4	3,5*2,2*2,4	
2	Нижнє	232	58,0	11,1	2,2	2,0*2,0*6,5	
4		464	58,0	22,2	4,4	2,0*4,0*6,5	
6		»	696	58,0	33,3	6,6	2,0*6,0*6,5
2		928	58,0	44,4	6,0	4,0*4,0*6,8	
3		1392	58,0	66,6	9,0	4,0*6,0*6,8	
3	Верхнє	1950	40,6	93,3	30,0	4,0*12,0*10,5	
4		2600	40,6	124,4	40,0	4,0*16,0*10,5	
5		3250	40,6	155,6	50,0	4,0*20,0*10,5	
6		3900	40,6	186,7	60,0	4,0*14,0*10,5	
4		4455	69,6	213,3	40,0	4,0*16,0*10,6	
5		5568	69,6	266,7	50,0	4,0*20,0*10,0	
6		6682	69,6	320,0	60,0	4,0*24,0*10,0	

## 8. Ресивери

Ресивери служать для збирання рідкого холодоагенту. Залежно від виконуваних функцій розрізняють лінійні, дренажні, циркуляційні і захисні ресивери. Лінійні – служать для збирання рідини після конденсатора і забезпечення необхідного потоку рідини до регулюючого вентиля. Вони є апаратами високого тиску, горизонтального типу, можуть розміщуватися в приміщенні цеху або зовні нього. Дренажні ресивери використовують для зливу в них рідкого холодоагенту з випарної системи під час відтаювання камерних приладів або під час ремонтних робіт. Апарати покривають шаром теплоізоляції і встановлюють у приміщенні. Марки горизонтальних ресиверів позначають: РЦЗ і РД, вертикальних - РДВ. Циркуляційні ресивери є частиною насосно-циркуляційних схем.

Вони призначені для збирання рідкого холодоагенту і відносяться до апаратів низького тиску. Циркуляційні ресивери покривають шаром теплоізоляції і розміщують у машинному відділенні так, щоби забезпечити самопливне зливання рідини в них з випарної системи з одного боку і необхідний напір перед насосом з іншого. Марки апаратів вертикальних апаратів РДВ, горизонтальних - РВЦЗ, РЦЗ і РД; зокрема ресивери типа РДВ, РВЦЗ і РЦЗ (рис.8.1.) можуть суміщати функції віддільників рідини. Всі циркуляційні ресивери під час монтажу рекомендують забезпечувати вертикальною трубою - стояком діаметром 250-300мм для збільшення кавітаційного запасу.



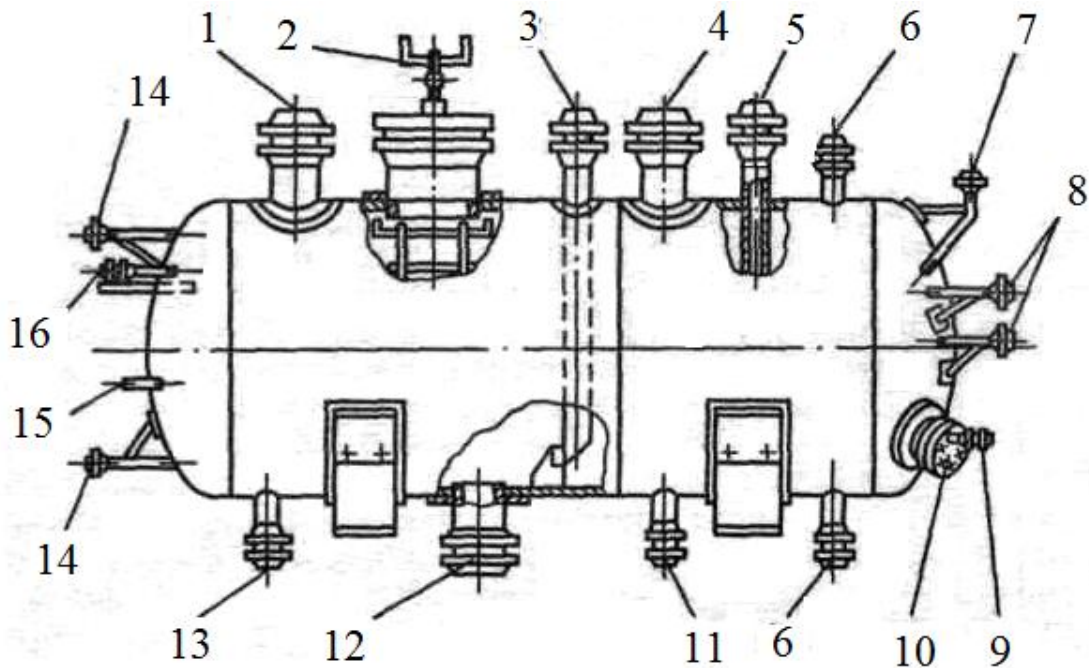


Рис.8.1. Ресивер РЦЗ:

Захисні ресивери застосовують у безнасосних схемах охолодження для захисту компресорів від гідравлічних ударів під час надходженні рідини з випарної системи. Їх встановлюють на засмоктуючому боці компресора і покривають теплоізоляцією.

## 9. Масловіддільники і маслозбірники

Масловіддільники служать для відділення мастила від холодоагенту після компресора і служать буферною ємністю, що згладжує пульсацію пари, під час нагнітання. З компресора мастило потрапляє в систему у вигляді крапель різного розміру і в пароподібному стані. З підвищенням температури нагнітання збільшується вміст мастила в пароподібній фазі. За принципом дії масловіддільники ділять на промивні (барботажні) та інерційні.

У барботажних масловіддільниках під час проходження пари холодоагенту через шар рідкого холодоагенту затримуються не тільки краплі мастила, але й відбувається конденсація масляної пари. В результаті ефективність відділення мастила становить

85-90%. Недоліки масловіддільників такого типу: великі розміри і металомісткість; необхідність заглиблення відносно конденсатора не менше ніж 1,5 м; неможливість повернення мастила в картер компресора.

У даний час барботажні масловіддільники зняті з виробництва. В інерційних масловіддільниках використовують принципи зменшення швидкості пари, повороту потоку, фільтрації, охолодження, відцентрових сил. Поєднання більшої частини цих принципів використано в циклонних масловіддільниках (рис.9.1).

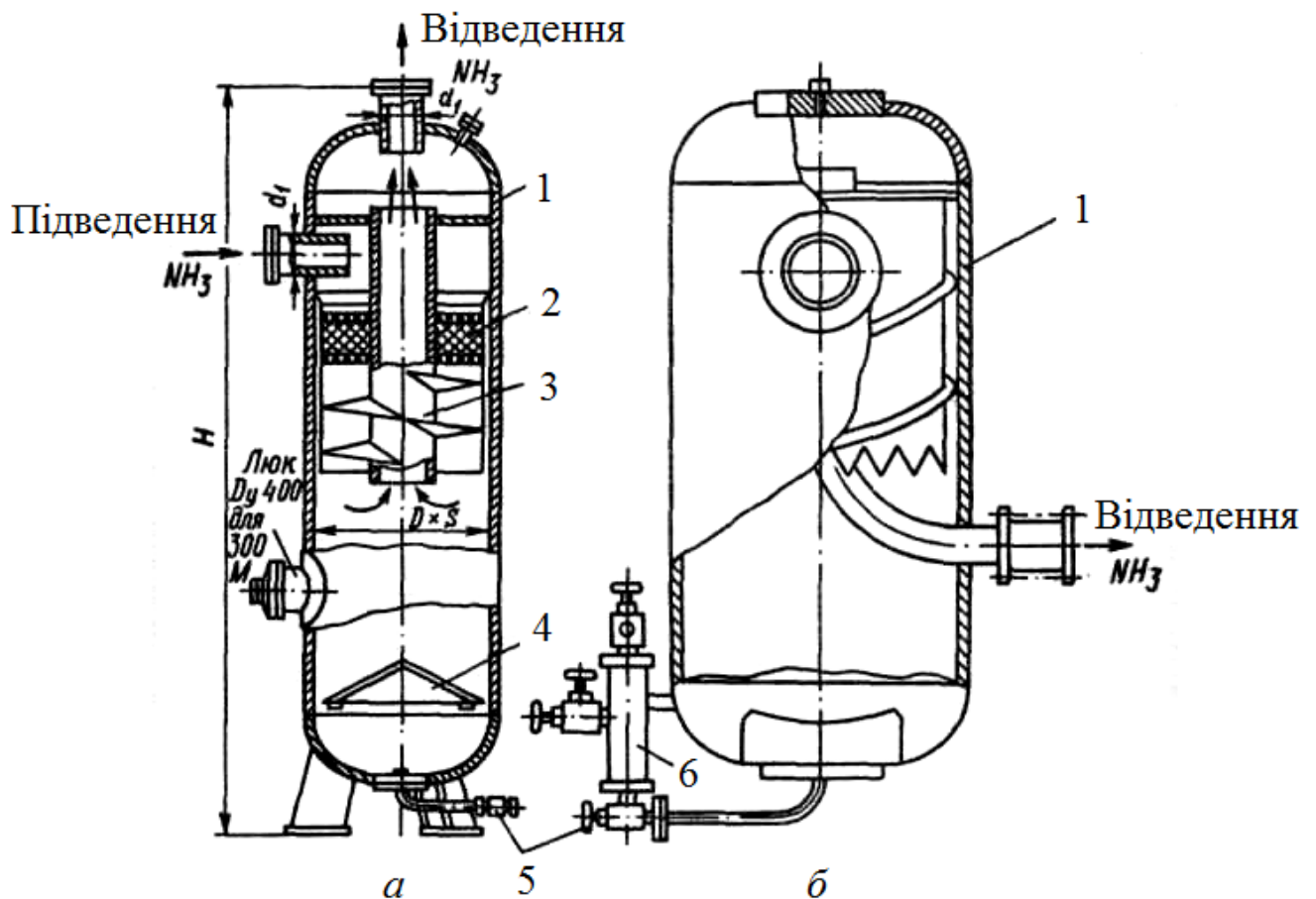


Рис.9.1. Циклонні масловіддільники: а - тип М; б - тип МО: 1 - кожух; 2 - сітчасте набивання; 3 - спіральний направляючий апарат; 4 - конічний відбійник; 5 - вентиль зливу мастила; 6 - пристрій поплавця повернення масла в картер;  $H$  - висота масловіддільника;  $d_1$  - діаметр патрубку впускання.

Для збільшення ефективності роботи циклонних масловіддільників доцільно охолодження пари, що нагнітає поршневий компресор. Під час

охолодження пари у форконденсаторі випарного конденсатора або в технологічних апаратах, що використовують теплоту перегрітої пари, відбувається часткова конденсація мастила і збільшення розміру його крапель. Зливають мастило зі всіх апаратів і судин через маслосбірники.

## 10. Віддільники рідини

Віддільники рідини призначені для уловлювання і відділення крапель рідкого холодоагенту, що потрапляють з випарної системи разом з парою. Відділення рідини відбувається за рахунок повороту потоку холодоагенту в апараті та зменшення його швидкості до 0,5 м/с (рис.10.1).

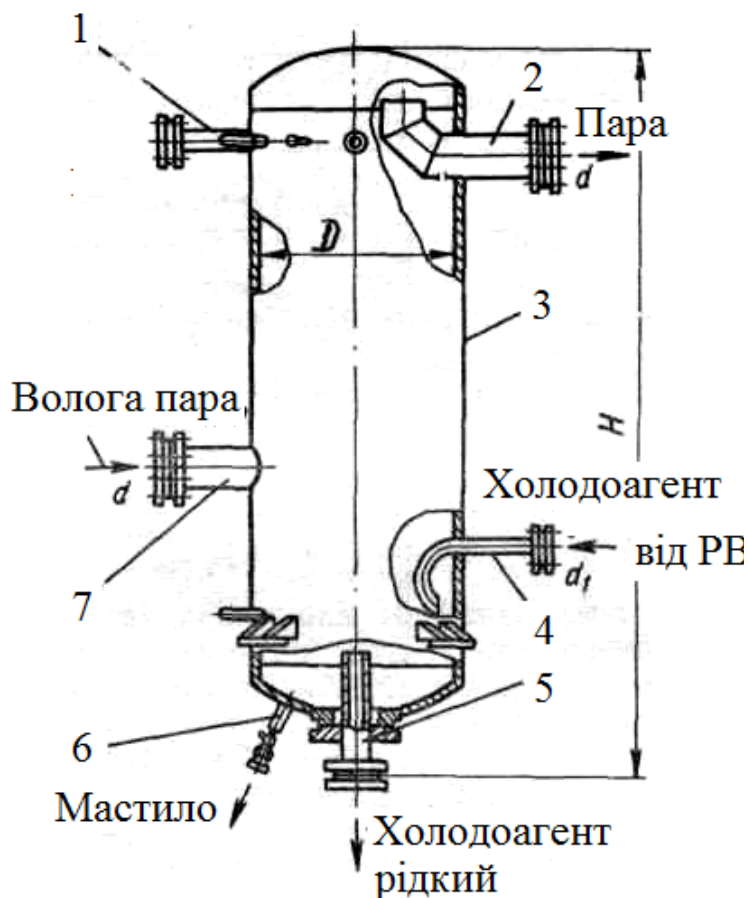


Рис.10.1. Віддільник рідини:

- 1 - патрубок приєднання до парової зрівняльної лінії;
- 2 - патрубок відведення пари до компресора; 3 - кожух;
- 4 - патрубок підведення холодоагенту від РЕ;
- 5 - патрубок зливання рідкого холодоагенту; 6 - вентиль відведення мастила;
- 7 - патрубок підведення вологої пари з випарника;  $H$  - висота ВР;  $d$  і  $d_1$  - діаметри патрубків

Це є необхідною умовою забезпечення сухого ходу компресора. У віддільниках рідини типу ОЖ у нижній частині передбачений змієвик для обігріву мастила гарячою парою холодоагенту. Апарати обов'язково покривають теплоізоляцією.

## 11. Проміжні посудини

У проміжній посудині (рис.11.1) відбувається охолодження пароподібного аміаку між ступенями стиснення в багатоступінчастих холодильних машинах і переохолодження рідкого холодоагенту після конденсації за рахунок кипіння рідини в робочому об'ємі апарату.

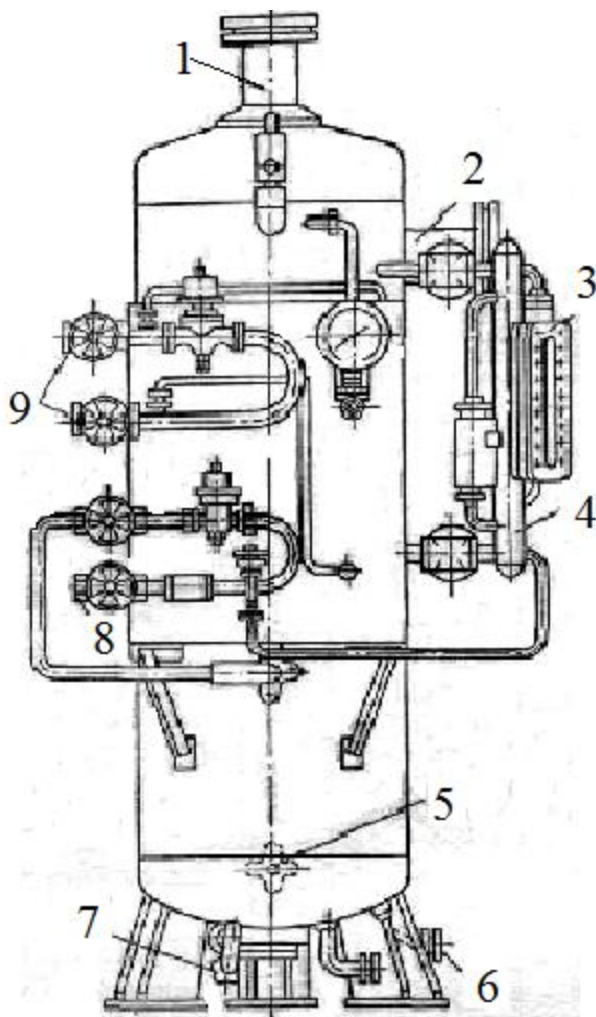


Рис.11.1. Проміжна посудина:  
 1 - патрубок підведення пари від ЦНТ; 2 - патрубок відведення пари до ЦВТ; 3- оглядове скло Клінгера; 4 - зрівняльна колонка; 5- патрубок зливання мастила; 6 - патрубки підведення й відведення рідкого холодоагенту в змійовик; 7 - патрубок зливання аміаку; 8 - вентиль підведення рідкого холодоагенту для поповнення посудини; 9- вентилі для приєднання апарату до трубопроводів всмоктування і нагнітання.

Охолодження пари, стиснутої в компресорі низького тиску, відбувається до стану, близького до насичення. Перегрів пари на всмоктуванні компресора високого тиску повинен становити  $5...10^{\circ}\text{C}$ . Переохолодження в змійовику проміжної посудини триває до температури, яка на  $2...3^{\circ}\text{C}$  перевищує температуру кипіння в апараті. В конструкції посудині передбачено

краплевітбійники. Випуск мастила здійснюють через маслосбірник. Поверхня проміжної посудини обов'язково теплоізолюється

## **12. Електронасоси для холодоагентів**

Герметичні насоси застосовуються в насосних схемах для циркуляції аміаку і хладонів. Такі конструкції виключають втрати холодоагенту, що неминучі в сальникових насосах. Елементи вбудованого електродвигуна відокремлені від перекачуваної рідини тонкостінними (0,5мм) гільзами. Охолодження електродвигуна і мастила підшипників здійснює циркулююча рідина.

### **Насоси для води і холодоносія**

Для перекачування води і холодоносія застосовують консольні відцентрові насоси типу «К». Залежно від умов експлуатації напірний патрубок може бути розгорнений на 90, 180 і 270°.

Змащування кулькопідшипників здійснюється густим мастилом ЦИАТИМ 201 (ГОСТ 6267-74).

## **13. Абсорбційні, пароежекторні і газові холодильні машини**

### **13.1. Абсорбційні холодильні машини**

Робота абсорбційних холодильних машин (рис. 13.1) відрізняється від компресорних тим, що відведення теплоти від охолоджуваного тіла до навколишнього середовища здійснюється шляхом витрат зовнішньої енергії у вигляді тепла, а не роботи. Робочим тілом в абсорбційній холодильній машині є бінарний розчин речовин, що мають різні нормальні температури кипіння. Низькокипляча речовина є холодильним агентом, а висококипляча – абсорбентом (поглиначем). Найбільш відомими бінарними розчинами є аміак – вода і вода – бромистий літій. Причому аміак в першому розчині і вода в другому є

холодильними агентами.

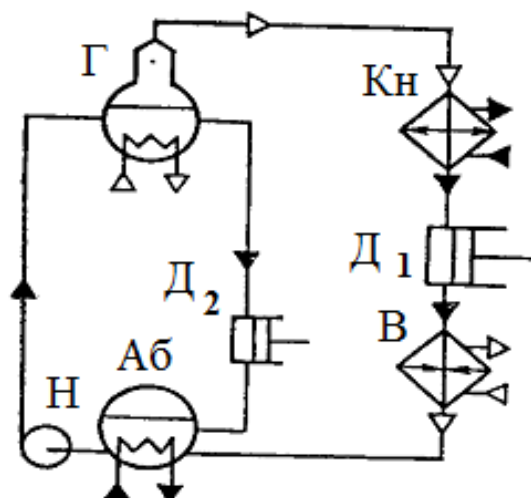


Рис.13.1. Функціональна схема найпростішої абсорбційної холодильної машини

Машина працює наступним чином. У випарнику  $B$  до холодильного агента підводиться теплота  $Q_0$ . В результаті холодильний агент кипить за температури  $T_0$  і тиску  $p_0$ . Утворена пара холодильного агента надходить у абсорбер  $Аб$  і поглинається абсорбентом. Процес абсорбції супроводжується виділенням тепла  $Q_{аб}$ , яке відводиться у навколишнє середовище за температури  $T_{нс}$ . Розчин за тиску  $p_0$  з абсорбера подається насосом  $Н$  в генератор  $Г$ , де тиск  $p_Г$ , є вищим. У генераторі холодильний агент википає з розчину за температури  $T_Г$  і тиску  $p_Г$  внаслідок підведення теплоти  $Q_Г$ . Пара холодильного агента потрапляє в конденсатор  $Кн$  і конденсується за температури  $T$  тиску  $p$  внаслідок відведення теплоти  $Q$ . Рідкий холодильний агент із конденсатора надходить через детандер  $Д_1$  у випарник.

Абсорбент із генератора  $Г$  через детандер  $Д_2$  надходить у абсорбер. Таким чином, у абсорбційній машині, як і в паровій компресорній, низьку температуру отримують під час кипіння холодильного агента, що потрапив у випарник через детандер із конденсатора. Таким чином холодильний агент подають із випарника в конденсатор після абсорбції і випаровування. Для здійснення випаровування потрібне підведення зовнішньої теплоти за температури вищої від температури навколишнього середовища.

Ідеалізація розглянутої абсорбційної холодильної машини полягає в наступному: в генераторі повністю розділяється розчин на холодильний агент і абсорбент; у генераторі, конденсаторі, випарнику та абсорбері процеси здійснюються за постійної температури без зовнішніх і внутрішніх втрат від незворотності; робота, підведена до насоса, що подає розчин в генератор, рівна роботі, відведеної від детандерів, так як об'ємні подачі речовин і рівниці тисків однакові.

Тепловий баланс такої машини обчислюють за рівнянням:

$$Q_0 + Q_{\Gamma} = Q + Q_{аб} . \quad (13.1)$$

Ефективність роботи абсорбційної холодильної машини визначають тепловим коефіцієнтом

$$\zeta = Q_0 / Q_{\Gamma} . \quad (13.2)$$

Холодильну машину можна розглядати як систему, в якій здійснюються одночасно прямий і зворотній цикли. В прямому циклі внаслідок перенесення теплоти від джерела високої температури  $T$  до навколишнього середовища виконується робота, а в зворотному – ця робота витрачається на передачу тепла від джерела низької температури  $T_0$  до навколишнього середовища.

Ефективність прямого циклу оцінюють термічним коефіцієнтом:

$$\eta = L / Q , \quad (13.3)$$

а зворотного – холодильним коефіцієнтом

$$\varepsilon = Q_0 / L . \quad (13.4)$$

Тоді, з врахуванням цих рівнянь залежність можна подати у вигляді:

$$\zeta = \eta \cdot \varepsilon . \quad (13.5)$$

Для зворотного циклу Карно тепловий коефіцієнт визначають за залежністю

$$\zeta^{зв} = \frac{T_{Г} - T_{Н.С.}}{T_{Г}} \cdot \frac{T_{0}}{T_{Н.С.} - T_{0}} \quad (13.6)$$

Аналіз цього рівняння засвідчує, що за однакових температур джерел  $T_0$  і  $T_{Н.С.}$  термодинамічна ефективність роботи абсорбційної машини нижча, ніж компресорної, так як величина  $(T_{Г} - T_{Н.С.}) / T_{Г}$  є меншою одиниці.

Схема реальної абсорбційної холодильної машини протилежно до ідеальної включає дроселюючі (регулюючі) вентиля **ДВ** на заміну детандерів, регенеративний теплообмінник **ТР**, ректифікаційну колону **РК**, вмонтовану в генератор **Г**, а іноді і в дефлегматор **Де** (рис.13.2). Заміна детандерів регулюючими вентилями викликана тими ж причинами, що й у парових холодильних машинах: корисна робота детандера є незначною за величиною, а в експлуатації дроселюючі вентиля є простішими.

Введення в склад абсорбційної холодильної машини теплообмінника для нагрівання міцного і охолодження слабкого розчинів дає змогу зменшити незворотні втрати в прямому циклі. Так, міцний розчин поступає в генератор з вищою температурою, а відтак, витрата теплоти в ньому зменшується. Слабкий розчин надходить у абсорбер з нижчою температурою, тому кількість теплоти, яку потрібно відвести з абсорбера, зменшиться. Ректифікатор і дефлегматор збільшує концентрацію пари холодильного агента, яка виходить з генератора, що підвищує ефективність зворотного циклу. В ректифікаційній колоні пара холодильного агента та міцний розчин контактують у насадці. В результаті тепломасообміну концентрація пари збільшується.



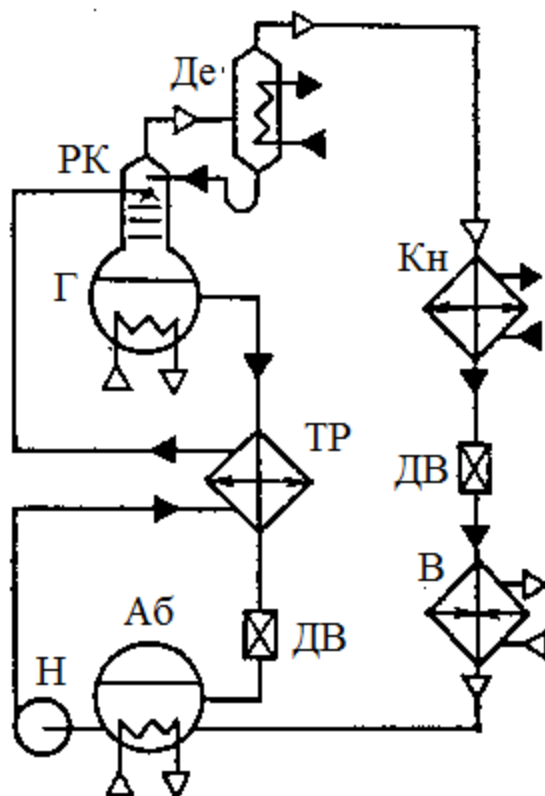


Рис.13.2. Функціональна схема реальної абсорбційної холодильної машини

Далі пара надходить в дефлегматор, де внаслідок охолодження водою її концентрація ще збільшується, а конденсат (флегма), що утворюється, стікає назад в генератор.

Робота реальної абсорбційної холодильної машини супроводжується втратами внаслідок незворотності процесів теплообміну і абсорбції, тертя під час руху середовищ, дроселювання холодильного агента і абсорбента, роботи, підведеної до насоса, тощо. Тому мірою термодинамічної досконалості абсорбційної холодильної машини є відношення дійсного теплового коефіцієнта до теплового коефіцієнта ідеальної машини.

$$\eta = \zeta / \zeta^{36} . \quad (13.7)$$

Робочі процеси, що протікають в абсорбційних водоамічних і бромистолітєвих холодильних машинах аналогічні. Але є ряд конструктивних особливостей, пов'язаних із відмінностями у властивостях холодильних агентів і

абсорбентів. Наприклад, в бромистолітійєвих абсорбційних машинах нема ректифікатора, так як нормальні температури кипіння холодильного агента і абсорбента суттєво відрізняються, а процеси в апаратах здійснюються за тиску нижчого за атмосферний. Різні й галузі їхнього застосування.

Водоаміачні машини використовують для одержання відносно низьких температур (до  $-70^{\circ}\text{C}$ ), а бромистолітійєві – для вищих. Можливість використання абсорбційних машин визначається наявністю достатньо недорогих високопотенційних джерел теплоти: відпрацьована пара ТЕЦ, гаряча вода тощо, що є побічними продуктами основного виробництва на підприємствах харчової (м'ясокомбінат, молочний завод) промисловості.

У зв'язку з тим, що економія паливно-енергетичних ресурсів набуває все більш актуального значення, сфера використання абсорбційних машин розширюється. Найбільш перспективними є виробництво за наявності ТЕЦ і котелень, комплексне утримання низьких і високих температур; отримання води температурою  $7-12^{\circ}\text{C}$  за рахунок джерел теплоти температурою  $70-170^{\circ}\text{C}$ .

### 13.2. Пароежекторні холодильні машини

Робота пароежекторних холодильних машин, як і абсорбційних, забезпечується підведенням теплоти високого потенціалу від зовнішнього джерела. Холодильний агент здійснює сумісні прямий і зворотній цикли. Найчастіше ним є вода, проте можна використовувати аміак і хладони. Циркуляцію холодильного агента здійснює ежектор, у якому потік активної пари, що витікає з великою швидкістю з генератора, відводить (ежектуює) пасивну пару з випарника і стискає холодильний агент до тиску конденсації (рис.13.3). Активна пара стану 1, що утворюється в генераторі  $G$  за умови підведення високопотенційної теплоти в прямому циклі, поступає в ежектор  $E$ . У ежекторі, вона розширюється і змінює свій стан на 2. За таких умов потенціальна енергія пари перетворюється в кінетичну енергію потоку, який, ежектуює пасивну пару

стану 9 з випарника **B**. Після змішування пари станів 1 і 9 в камері змішування ежектора створюється пара стану 3. У дифузорі ежектора, де кінетична енергія пари перетворюється в потенціальну. Далі пара потрапляє в конденсатор **Кн** (точка 4). Процес стиснення суміші в дифузорі, можна розглядати як два процеси: стиснення активної пари (процес 2-11) і пасивної пари (процес 9-10). У конденсаторі пара конденсується (процес 4-5) шляхом передачі тепла у навколишнє середовище. Частина конденсату стану 5 у кількості, що дорівнює масовій подачі пасивної пари, потрапляє через дросельний вентиль **ДВ** у випарник (процес 5-8), де кипить (процес 8-9), та відводить теплоту від проміжного холодоносія (води). Волога пара стану 9 відводиться в камеру змішування дифузора. Іншу частину конденсата в кількості, рівній масовій подачі активної пари, насосом **Н** нагнітають у генератор (процес 5-6), де вона нагрівається (процес 6-7). Утворена в процесі кипіння (процес 7-1) пара стану 1 надходить в ежектор **E**. Далі процеси повторюються

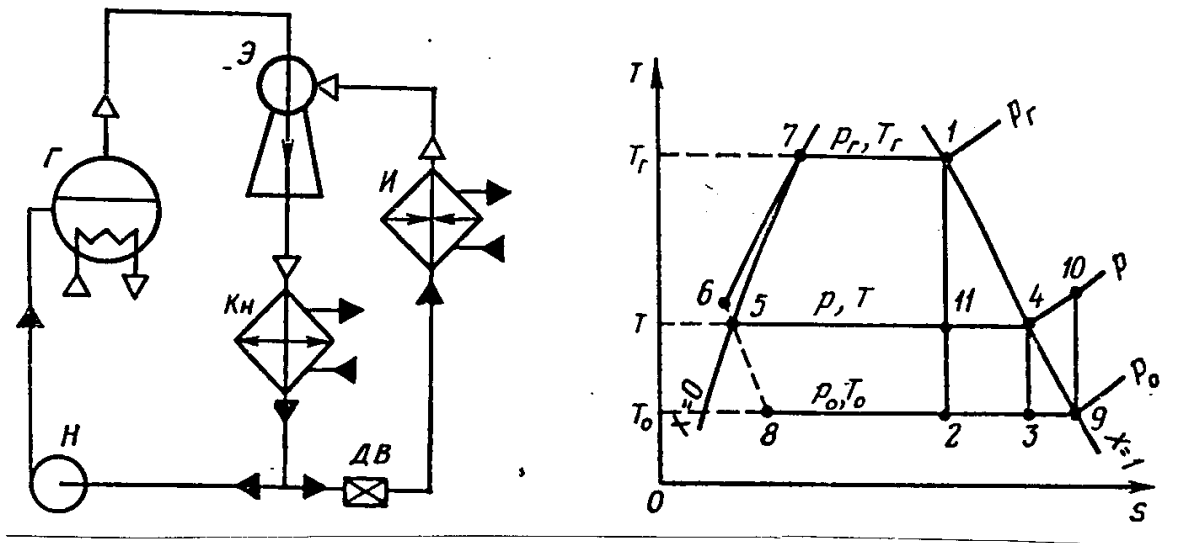


Рис.13.3. Функціональна схема водяної пароежекторної холодильної машини та її теоретичний цикл

В ежекторі сполучаються процеси прямого і зворотнього циклів: робота прямого циклу створюється в соплі (процес 1-2), підводиться до зворотнього

циклу в камері змішування (процес 2-3-9) і витрачається у зворотному циклі в дифузорі (процес 3-4). У пароежекторній холодильній машині відбувається прямий 1-11-5-6-7-1 і зворотній 9-10-5-8-9 цикли.

Для термодинамічного аналізу роботи пароежекторної холодильної машини необхідно знати співвідношення масових подач активної  $M$  і пасивної  $M_0$  пари. Враховуючи, що для відведення 1кг пасивної пари з випарника витрачається  $a_T$  активної пари, отримаємо коефіцієнт витрачання (кратність циркуляції) активної пари

$$a_T = M/M_0. \quad (13.8)$$

Вважаючи, що робота прямого циклу

$$L = (h_1 - h_{11}) - (h_5 - h_6), \quad (13.9)$$

без втрат підводиться в зворотному циклі

$$L_0 = h_{10} - h_9, \quad (13.10)$$

отримаємо

$$a_T L = L_0, \quad (13.11)$$

або

$$a_T = (h_{10} - h_9) / (h_1 - h_{11}) - (h_6 - h_5). \quad (13.12)$$

Тепловий баланс пароежекторної холодильної машини буде мати вигляд

$$q = q_0 + q_T + q_H, \quad (13.13)$$

де  $q = (1 + a_T) \cdot (h_4 - h_5)$  – відведене тепло в конденсаторі;  $q_0 = h_9 - h_8$  - питома масова холодопродуктивність;  $q_T = a_T(h_6 - h_5)$  - підведене тепло в генераторі ;  $q_H = a_T(h_6 - h_5)$  тепловий еквівалент роботи насоса.

Термічний коефіцієнт прямого циклу

$$\eta = L / q_{\Gamma} = \frac{(h_1 - h_{11}) - (h_6 - h_5)}{a_T (h_1 - h_6)} \quad (13.14)$$

Холодильний коефіцієнт прямого циклу

$$\varepsilon = q_0 / L_0 = \frac{h_9 - h_8}{h_{10} - h_9} = \frac{h_9 - h_8}{a_T (h_1 - h_{11}) - (h_6 - h_5)} \cdot \quad (13.15)$$

Термодинамічна ефективність роботи машини може бути оцінена тепловим коефіцієнтом, який визначають як відношення теплоти, відведеної у зворотному циклі, до теплоти, підведеної в прямому циклі:

$$\zeta = \frac{q_0}{a_T q_{\Gamma}} = \frac{q_0 L}{q_{\Gamma} L_0} = \varepsilon \eta \quad (13.16)$$

Реальні схеми пароежекторних машин окрім основних елементів, що виконують цикл, містять допоміжні ежектори, які відводять з машини повітря (пароповітряну суміш), що проникає через нещільності системи, і подають холодну пару з випарника в камеру змішування. Внаслідок незворотних втрат термодинамічна ефективність реальної пароежекторної машини є нижча, ніж ефективність теоретичної. Величину досконалості пароежекторної реальної машини оцінюють за відношенням до ідеальної машини

$$\eta = \zeta / \zeta^{36} \quad (13.17)$$

Пароежекторні холодильні машини використовують переважно для охолодження води (5-15°C), яку використовують для кондиціонування повітря на підприємствах, де є дешеві джерела високопотенціального тепла. Ці машини є прості за конструкцією, надійні та безпечні в експлуатації.

### 13.3. Газові холодильні машини

Газовими холодильними називають машини, в яких холодильним агентом є речовини, які знаходяться в газоподібному стані і не змінюють свій агрегатний стан під час здійснення циклу. Холодильним агентом в таких машинах часто є повітря, і тоді їх називають повітряними холодильними машинами, їх використовують для отримання відносно низьких температур (від  $-80$  до  $-120^{\circ}\text{C}$ ), де ефективність їхньої роботи близька до парових холодильних машин.

Питома масова холодопродуктивність повітря значно менша ніж, киплячого холодильного агента в циклі парової холодильної машини. Тому для забезпечення роботи повітряних (газових) холодильних машин потрібне велике масове надходження холодильного агента, що зумовлює застосування відцентрових компресорів і детандерів, які мають високу продуктивність за невеликих габаритів. Цикл роботи повітряної холодильної машини наведено на рис.13.4. Повітря з температурою  $T_1$ , що дорівнює температурі тіла, яке охолоджується, потрапляє в компресор  $K_m$  і адіабатно стискається від тиску  $p_1$  до тиску  $p_2$  (процес 1-2). Компресор нагнітає повітря в теплообмінник  $TO$ , в якому повітря охолоджується від температури  $T_2$  до  $T_3$  (процес 2-3), шляхом передачі тепла оточуючому середовищу, наприклад воді. Потім повітря адіабатно розширюється в детандері  $D$  від тиску  $p_3$ : до  $p_4$  (процес 3-4) та виконує корисну роботу. Далі холодоагент потрапляє до об'єкту, що охолоджується  $Ob$ , де нагрівається від температури  $T_4$  до  $T_1$  (процес 4-1), шляхом поглинання тепла від охолоджуваного тіла, наприклад повітря. З охолоджуваного об'єкту повітря потрапляє в компресор, і далі цикл повторюється. Питома масова холодопродуктивність 1кг повітря (холодильного агента) в S–T діаграмі вимірюють площею під процесом 1-4. Математично її розраховують за залежністю:

$$q_0 = h_1 - h_4 = c_p (T_1 - T_4). \quad (13.18)$$

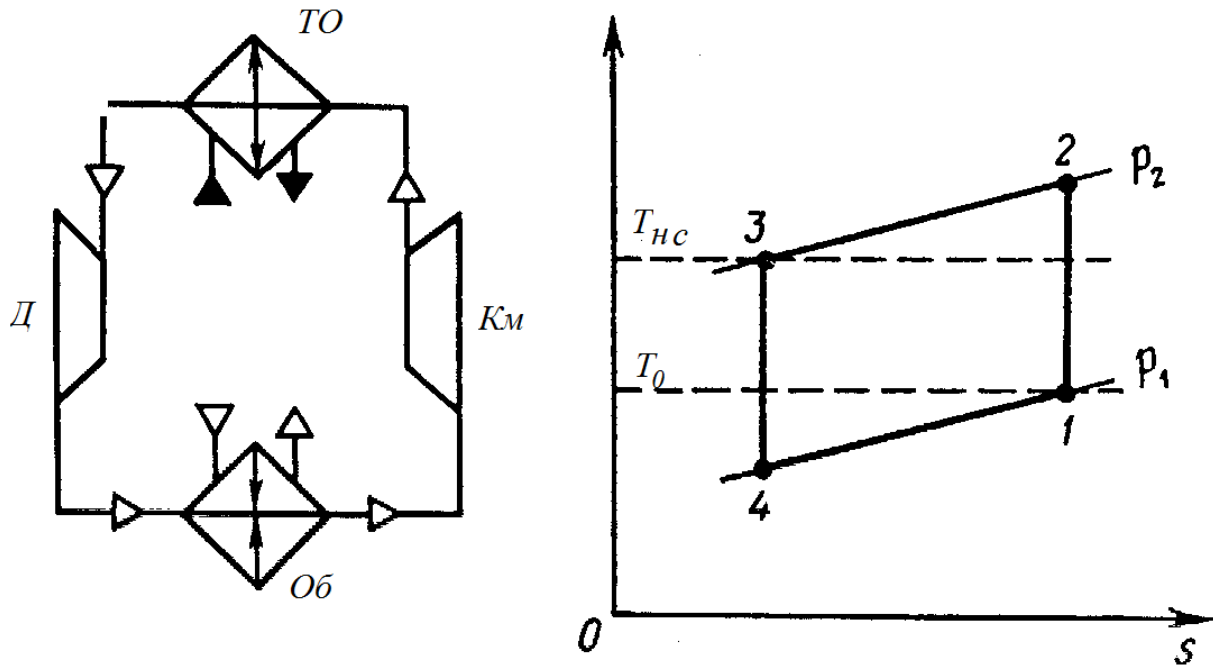


Рис.13. 4. Функціональна схема повітряної холодильної машини та цикл її роботи

Кількість теплоти, відведеної від 1 кг повітря, вимірюють площею під процесом 2-3 і визначають за допомогою рівняння

$$q = h_2 - h_3 = c_p(T_2 - T_3). \quad (13.19)$$

Робота циклу рівна різниці робіт компресора і детандера

$$l = l_k - l_p = (h_2 - h_1) - (h_3 - h_4), \quad (13.20)$$

або з теплового балансу

$$l = q - q_0 = (h_2 - h_3) - (h_1 - h_4) = c_p(T_2 - T_3) - c_p(T_1 - T_4). \quad (13.21)$$

Холодильний коефіцієнт циклу

$$\varepsilon = q_0/l = c_p(T_1 - T_4) / [c_p(T_2 - T_3) - c_p(T_1 - T_4)]. \quad (13.22)$$

Якщо припустити, що повітря є ідеальним газом, тобто  $c_p = const$ , то справедливе рівняння

$$\varepsilon = (T_1 - T_4) / (T_2 - T_3) - (T_1 - T_4) , \quad (13.23)$$

або

$$\varepsilon = (T_1 - T_4) / T_1(T_2/T_1 - 1) - T_4(T_3/T_4 - 1) . \quad (13.24)$$

Для адиабатичних процесів стиснення і розширення повітря, відношення абсолютних температур можна записати у вигляді

$$T_2/T_1 = T_3/T_4 = (p_2/p_1)^{\frac{n-1}{n}} , \quad (13.25)$$

де  $n$  - показник адиабати.

Тоді:

$$\varepsilon = T_1/(T_2 - T_1) = T_4/(T_3 - T_4) , \quad (13.26)$$

а коефіцієнт зворотності циклу  $\eta = \varepsilon / \varepsilon^{36}$ .

За постійних температур зовнішніх джерел  $T_0 = const$  і  $T_{н.с} = const$  цикл повітряної холодильної машини дає великі незворотні втрати. Цей цикл термодинамічно доцільний, якщо наявні джерела змінної температури, наприклад, якщо повітряна холодильна машина здійснює комбінований цикл, охолоджує та нагріває одночасно.

За принципом отримання низьких температур виділяють два типи повітряних холодильних машин. До першого типу відносять машини, ефект охолодження в яких досягають завдяки розширенню повітря з виконанням зовнішньої корисної роботи в розширювальній машині-детандері. Прикладом таких машин можуть бути повітряні холодильні машини серії ТХМ, які використовують для швидкого заморожування сировини і деяких видів продуктів рослинного походження.

У машин другого типу ефект охолодження є результатом розширення повітря без віддачі корисної роботи. На цьому базується робота вихрових труб.



### 13.4. Вихрові труби

У холодильниках використовують різні конструкції вихрових труб, робота яких базуються на одній і тій самій схемі. Основу її складає циліндрична труба (рис.13.5), що розділена діафрагмою на дві частини: холодну і гарячу. Гаряча частина труби має дросельний вентиль, перед яким розміщена хрестовина, що спрямовує гарячий потік. Хрестовина дозволяє зменшити оптимальну довжину гарячої частини труби.

Принцип дії вихрової труби полягає в наступному. Через сопло подають стиснене повітря, яке закручується в трубі та розділяється на два потоки з різними температурами. Холодний потік, прямує через отвір у діафрагмі в холодну частину труби, а гарячий – у протилежний бік до хрестовини і вентиля. Шари повітря, що обертаються поблизу осі, охолоджуються внаслідок передачі ними частини кінетичної енергії периферійним шарам. Периферійні шари нагріваються внаслідок тертя, на подолання якого затрачається значна частина кінетичної енергії. Режим роботи вихрових труб залежить від відношення діаметра отвору діафрагми до діаметра труби. Масова частка холодного повітря, що рівна відношенню масової витрати холодного потоку до всієї витрати, залежить як від відношення діаметра отвору діафрагми до діаметра труби, так і від налаштування дросельного вентиля. Температури, потоків, що виходять з вихрової труби залежать не тільки від відношення діаметрів отворів діафрагми і труби, але і від тиску, температури стиснутого повітря перед соплом, і конструктивних особливостей самої труби.

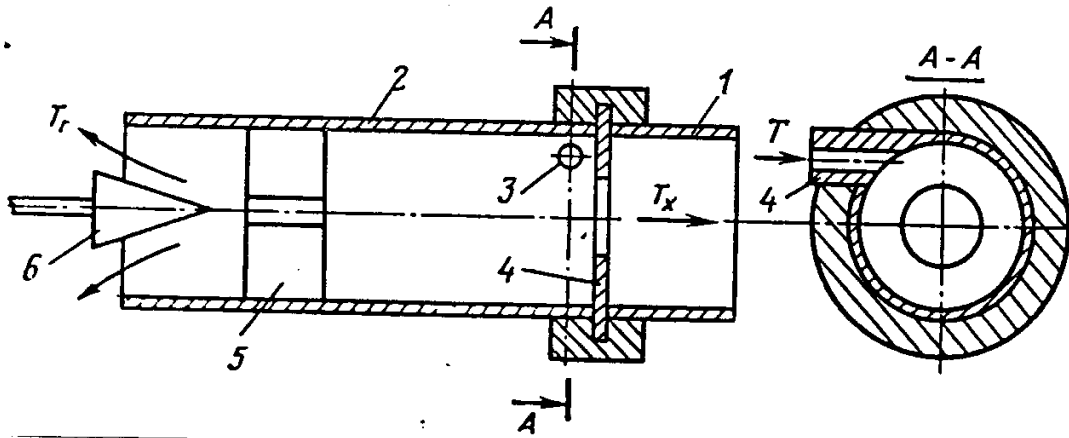


Рис. 13.5. Схема вихрової труби: 1-холодна частина; 2-гаряча частина; 3-сопло; 4-діафрагма; 5-хрестовина; 6- дросельний вентиль.

## 14. Безмашинні способи охолодження

### 14.1. Охолодження водяною кригою

Крига як джерела холоду людина використовує з давніх часів. На сьогодні, не дивлячись на розвиток машинного охолодження, охолодження кригою широко застосовують у різних галузях техніки й народного господарства. Цьому сприяє як доступність криги, так і її властивості, зокрема, велика теплота плавлення і достатньо низька температура розтоплення. Охолодження кригою обумовлено тепловіддачею охолоджуючого середовища до поверхні криги. При цьому температура її плавлення повинна бути нижче температури охолоджуючого середовища. Кількість теплоти  $Q_{кр}$  ( в кДж), яка може бути відведена з допомогою криги і крижаної води, можна визначити з рівняння:

$$Q_{кр} = Q_{нкр} + Q_{ткр} + Q_{нкр} = C_{кр} G t_{кр} + q_{пл} G + C_{в} G t_{в}, \quad (14.1)$$

де  $Q_{нкр}$  - теплота, затрачена на нагрівання криги від температури  $t$  до  $0^{\circ}\text{C}$ ;

$Q_{ткр}$  - теплота, потрібна для плавлення криги;

$Q_{\text{нв}}$  - теплота , необхідна для нагрівання крижаної води до температури  $t$  ;

$C_{\text{кр}}$  ,  $C_{\text{в}}$  - масові теплоємності криги і води , кДж/( кг \* К ) ;

$G$  - маса криги ( води ) , кг ;

$q_{\text{пл}}$  - теплота плавлення криги , кДж/кг.

Крижане охолодження здійснюють трьома способами : безпосереднім охолодженням із використанням води як проміжного теплоносія та з використанням повітря як проміжного теплоносія .

### **Безпосереднє охолодження водяною кригою.**

У цьому випадку охолоджуваний об'єкт знаходиться у прямому контакті з кригою . Використовують подрібнену дрібнощматкову кригу, яка має велику поверхню теплообміну ( до  $30\text{м}^2$  на  $1\text{м}^3$  криги до подрібнення ). Подрібнену кригу розміщують навколо охолоджуваного об'єкту або, якщо це можливо, об'єкт пересипають кригою . Такий спосіб охолодження застосовують для зберігання овочів і фруктів .

### **Охолодження з використанням води як проміжного теплоносія**

Цей спосіб охолодження здійснюється використанням криги для одержання крижаної води і охолодження нею об'єкту. Вода при цьому циркулює від охолоджуваного об'єкту до криги і навпаки. Вона може безпосередньо контактувати з кригою або через стінки теплообмінника, наприклад, змієвидного або пластинчатого типу. Коефіцієнт тепловіддачі від води до поверхні криги становить  $116\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$  . Такий спосіб охолодження використовують у молочній промисловості.

### **Охолодження з використанням повітря як проміжного теплоносія за звичайного або механічного його переміщення**

Цей спосіб заснований на відведенні теплоти від охолоджуваного об'єкту до повітря, а від нього - до криги. За звичайної циркуляції повітря крига може розміщуватись у ємкостях - кишнях, що мають шпарини або гофровані огороження для підвищення поверхні теплообміну. Коефіцієнт тепловіддачі до поверхні криги за звичайної циркуляції можна прийняти  $7\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$  . У випадку примусової подачі повітря, створеної вентилятором, повітря циркулює

через шар дробленого криги. Теплообмін у цьому випадку значно інтенсифікується. Коефіцієнт тепловіддачі зростає до  $17 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Такий спосіб охолодження можна використати у тих випадках, коли необхідно за високої відносної вологості повітря (95%) одержати температуру, від  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  і вище.

### **Криго-сольове охолодження**

Криго-сольове охолодження дає змогу досягнути температури нижчі ніж при охолодженні чистою кригою. В його основі лежить використання криги в суміші з деякими солями. В такій суміші одночасно і паралельно протікають процеси розчинення солі з утворенням розсолу і плавлення криги з утворенням води й подальшим розчиненням солі. На плавлення криги і розчин солі витрачається теплота суміші, внаслідок чого її температура знижується. Найнижча температура суміші визначається криогідратною точкою, що характеризується термодинамічною рівновагою трьох фаз: розсіл (розчин), сіль і крига. Криогідратній точці відповідає евтектична концентрація солі. Така суміш називається евтектиком. Із подальшим підвищенням складу солі в суміші температура її плавлення не знижується, а підвищується. Потрібно мати на увазі, що плавлення криго-сольових сумішей супроводжується зміною їхньої температури внаслідок зміни концентрації солі у розчині. Виняток складають суміші, що відповідають евтектичним концентраціям солей. У цьому випадку евтектична крига плавиться за постійної й найнижчої для суміші криги і солі температури.

За криго-сольового охолодження частіше всього використовують суміш подрібненого криги і натрію хлориду. Криогідратній точці такої суміші відповідає температура  $-21,2^\circ\text{C}$  за концентрації солі в розчині 23,1%. Криго-сольовою сумішшю можна охолоджувати першим і третім способами, прийнятими для водневої криги. Коефіцієнти тепловіддачі від повітря до суміші мають ті ж значення, що й для чистого криги. Крім того, використовують спосіб охолодження розсолем, що утворюється під час плавлення суміші. Циркуляцію розсолу можна забезпечити насосом (рис.14.1)

або різницею об'ємних мас розсолу (рис.14.2), зумовлених зміною його концентрації під час плавлення криги.

В установку першого типу кригу, періодично завантажують у генератор холоду, зрошують зверху розсолем, що надходить з охолоджуючої батареї. В нижню частину генератора холоду стікає охолоджуючий розсіл з нижчою концентрацією солі через плавлення криги. Для підтримання концентрації розсолу частину теплового холодоносія після охолоджуваної батареї подають у бачок з сіллю - концентратор, через який насичений розсіл перетікає в генератор холоду. Концентратор періодично поповнюється сіллю. Перед завантаженням установки кригою і сіллю використаний (теплий) розсіл зливають через вентиль, розміщений в нижній частині генератора холоду. Різниця температур розсолу в охолоджуючій батареї і повітря в охолоджуваному об'ємі становить 6 - 8°C.

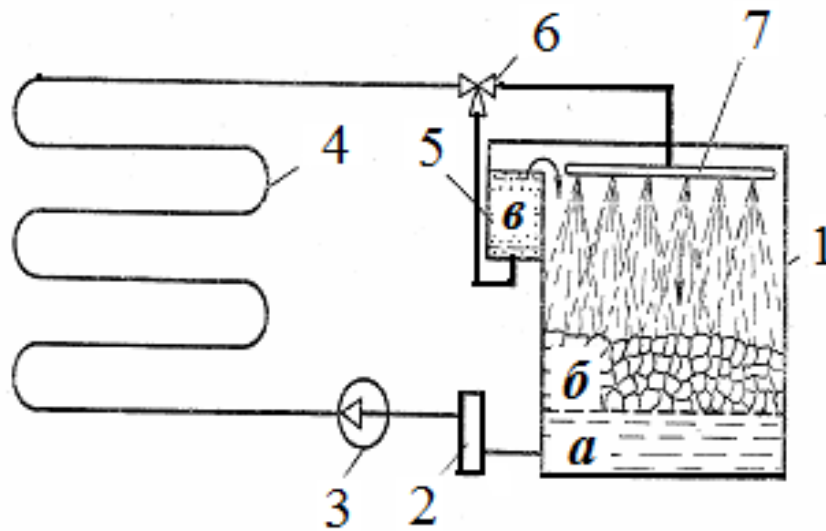


Рис. 14.1. Схема установки розсільного охолодження з насосною циркуляцією:

- 1– генератор холоду; 2 – фільтр; 3 – насос; 4 – охолоджуюча батарея; 5 – концентратор розсолу; 6 – регулюючий вентиль; 7 – зрошувач (колектор);  
а) розсіл; б) крига; в) сіль

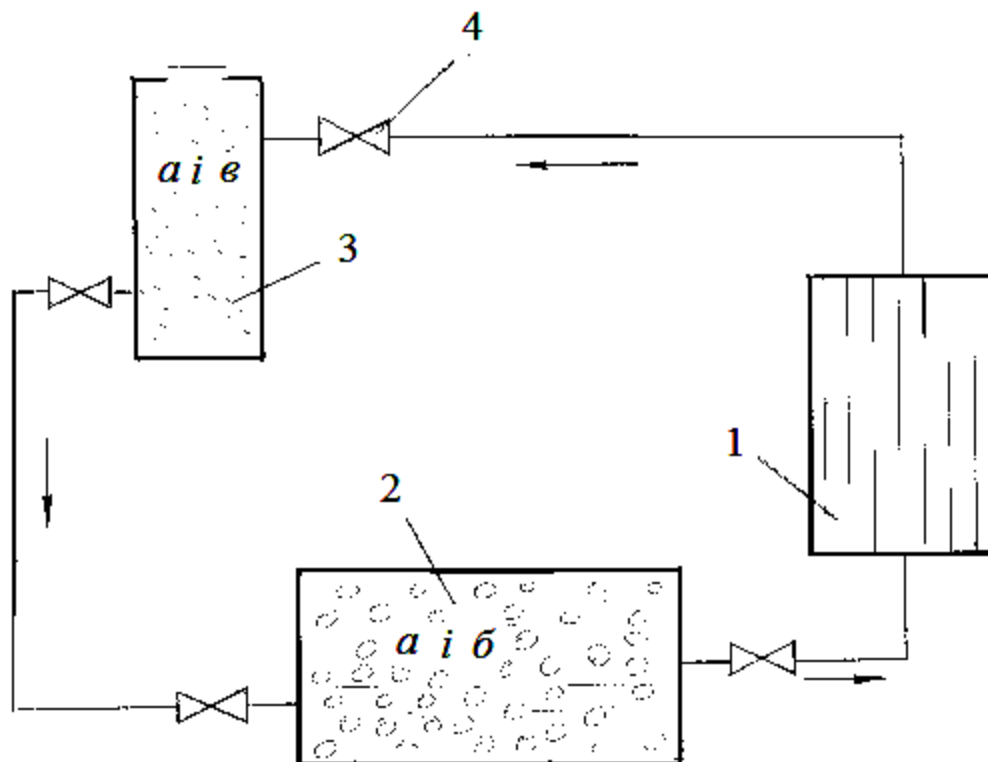


Рис.14.2. Схема установки розсільного охолодження з самостійною циркуляцією: 1-охолоджувальна батарея; 2 – генератор холоду; 3 – концентратор розсолу; 4 – регулюючий вентиль; а) розсіл; б) крига; в)сіль

У схемі з самоциркуляцією найбільшу густину розсіл набуває в концентраторі, де він насичується сіллю. В генераторі холоду концентрація розсолу зменшується за причини його розбавлення теплою водою, і він виштовхується до охолоджуючої батареї більш концентрованим розсолем, що надходить з концентратора. В охолоджуючій батареї розсіл підігрівається, його густина зменшується і піднімається до концентратора. Експлуатація такої установки, як і установки першого типу, забезпечують шляхом періодичного завантаження кригою і сіллю та відведенні відпрацьованого розсолу.

### **Охолодження холодоаккумуляторами з евтектичним розчином**

Евтектики – це однорідна суміш криги і солі, що мають низьку температуру плавлення та достатньо високу теплоту плавлення, що залежать від виду солі ( табл.14.1).

## Властивості солей

Сіль	склад солі у розчині, %	густина розчину, кг/м <sup>2</sup>	температура плавлення, °С	теплота плавлення, кДж/кг	Теплоємність розчину, кДж/(кг·К )
сульфат натрію	3,8	1030	-1,2	336	3,4
сульфіт цинку	27,2	1250	-6,5	214	3,2
хлорид калію	19,5	1150	-11,1	299	3,3
хлорид натрію	23,1	1170	-21,2	237	3,3
хлорид кальцію	29,9	1280	-55,0	213	2,6

Евтектичну кригу одержують також з водяного розчину пропіленгликолю. Температура плавлення такої криги залежить від концентрації пропілен-гліколю і коливається в межах ( від - 3 до - 50°С). Розчином заповнюють 90 - 94% об'єму металевих ємностей різної форми, які після заморожування розчину за температури нижчої температури плавлення евтектика використовують як холодоакумулятори, що розміщують у охолоджуючому об'ємі. Під час поглинання теплоти, що відводиться від охолоджуваного об'єкту, евтектик розплавляється за постійної температури. Тривалість підтримання температури плавлення евтектика залежить від кількості підведеної теплоти і ємності холодоакумулятора. В такому випадку методика визначення кількості теплоти, що поглинається не відрізняється від методики для криги, яка подана вище. Холодоакумулятори використовують багатократно. Для цього після відігрівання їх знову заморожують. Холодоакумулятори широко застосовують для охолодження невеликих

теплоізолюваних контейнерів. Доцільно їх використовувати також у співставленні з машинним охолодженням. У години найбільшого навантаження на холодильне обладнання вони можуть служити додатковим джерелом холоду.

Розрізняють звичайну і штучну водневу кригу. Звичайну кригу одержують з водойм, де вона намерзає в зимовий період, а також шляхом пошарового намерзання її на горизонтальних площадках у період морозів. Для цього використовують спеціальні установки з форсунками для дрібнокрапельного розбризкування води, оскільки це збільшує поверхню теплообміну води з повітрям і швидкість її охолодження. Тому вода швидко замерзає.

Штучну водневу кригу отримують на заводах і в цехах на кригогенераторах - теплообмінних апаратах для замороження води з відведенням теплоти за рахунок роботи компресорної холодильної машини. Розрізняють кригогенератори з проміжним теплоносієм - розсолем і конструкції безпосереднього охолодження. В кригогенераторах першого типу розсіл, охолоджений внаслідок контакту з випарником холодильної машини до температури - 10°C, подають у бак до встановлених на ньому металевих ємкостей - кригоформ, що заповнені водою. Внаслідок відведення теплоти від води розсолем вона замерзає. Кригоформи після утворення криги занурюють на декілька хвилин у теплу воду. Крига біля стінок форми підтоплюється, і крижаний блок легко з неї виймають. Потім його відправляють у сховище. Апарат такої дії називається кригогенератором блокової криги.

Розсіл використовують і в кригогенераторах шматкової криги. Охолоджений розсіл подають у циліндричний оборотний теплообмінник - барабан, стінки якого виготовляють з тонкого металу. Зовні барабан омивають водою. Крига намерзає на зовнішній поверхні барабана шаром 4-5мм. У верхній частині всередині барабана встановлений валик, який незначно деформує поверхню барабана, завдяки чому намерзла крига відколюється (рис. 14.3).

Продуктивнішими та економічними є кригогенератори безпосереднього охолодження. Серед них є кригогенератори трубчастої, снігової, блокової криги



тощо. В кригогенераторах трубчастого типу (рис.14.4) крига утворюється всередині труб вертикального кожухотрубного випарника, в міжтрубному просторі якого кипить рідкий аміак. Бак з водою розташовують під кожухом апарату. З нього воду насосом подають у водорозподільну установку до верхніх отворів труб. У отвори вставляють насадки, завдяки яким вода, що потрапляє в труби, закручується і плівкою стікає по їхній внутрішній поверхні, частково замерзаючи. Воду, що не замерзла збирають у бак, звідки її знову подають у водорозподільну установку. Намерзання криги відбувається до товщини 4-5мм.

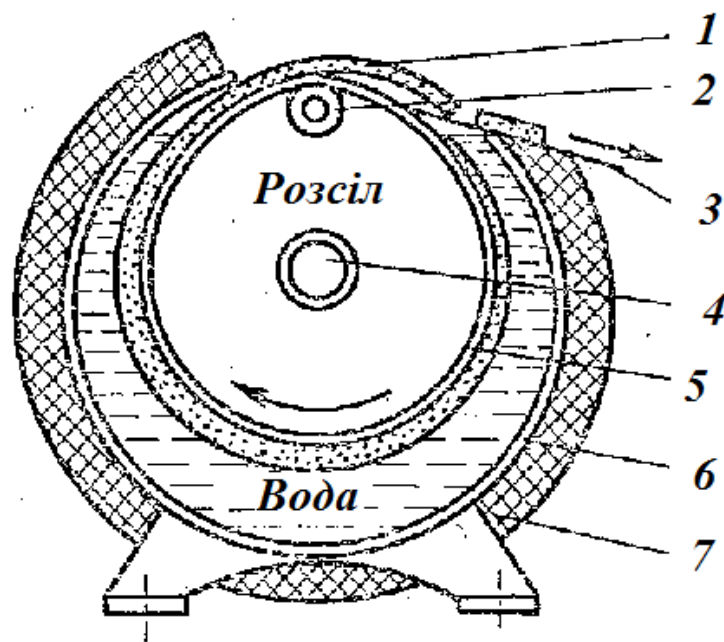


Рис 14.3. Кригогенератор криги у формі луски: 1- крига; 2-деформуючий ролик; 3-кригоскат в бункер; 4-похилий вал з подачею розсолу; 5-циліндр; 6-кожух кригогенератора; 7-теплоізоляція

Втрату води в баці поповнюють з часом. По закінченні наморожування криги, зупиняється як подача рідкого аміаку в апарат так і відсмоктування пари. Насос зупиняється й тим самим припиняється циркуляція води. В апарат з нагнітаючої сторони компресора подають гарячу пару аміаку, що витісняє рідкий аміак із міжтрубного простору в ресивер і прогріває стінки труби. Кригові циліндри підтоплюються біля стінок труб, втрачають з ними зв'язок і силою ваги опускаються вниз, спираючись у стіл, що розміщений біля нижньої

трубної решітки. Встановлений між столом і трубною решіткою поворотний ніж відрізає циліндрики і вони через кригоскат потрапляють на транспортер, що переміщує їх у кригосховище.

Кригогенератор лускової криги безпосереднього охолодження в принципі працює так, як і попередня конструкція. Але через вал барабана в цьому випадку циркулює аміак. Робочим органом кригогенератора снігової криги є циліндр, всередині якого встановлена рифлена втулка. Між втулкою і стінкою циліндра є площина в якій кипить аміак. Всередині втулки на валу обертаються лопатки з різцями.

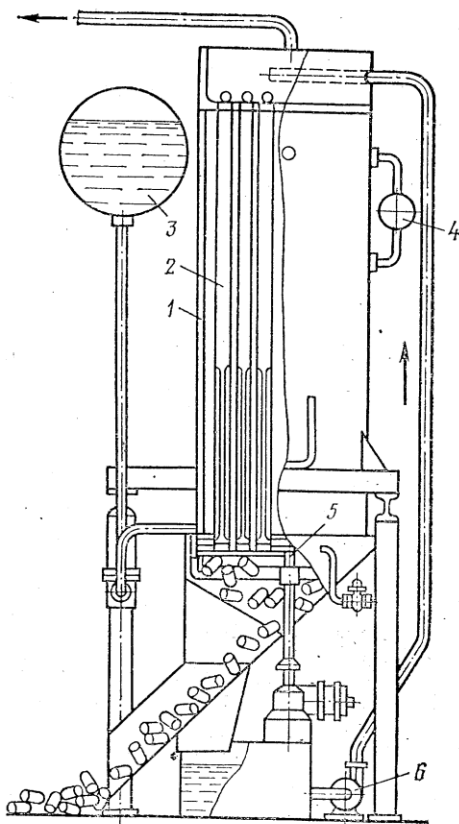


Рис. 14.4. Кригогенератор трубчастої криги. 1-кожух кригогенератора; 2-труба кригогенератора; 3-збірник аміаку; 4-поплавковий регулюючий вентиль; 5-механічний ніж; 6- насос для подачі води

Всередину втулки подають воду, яка охолоджується і намерзає на рифленій поверхні. Утворену кригу зрізають обертовими різцями. Суміш криги і води виштовхується з циліндра і підпресовується у формах. Крижана вода повертається у апарат для заморожування (рис. 14.5).

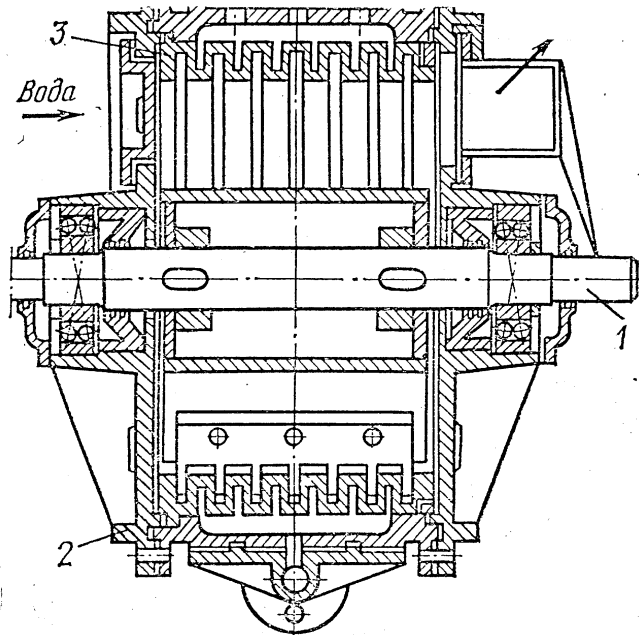


Рис 14.5. Кригогенератор снігового криги: 1- вал; 2-циліндр; 3-втулка

Кригогенератори блокової криги безпосереднього охолодження мають кригоформи з подвійними стінками, всередині кипить аміак. Воду заливають у кригоформи, де вона й замерзає.

#### **Охолодження сухою кригою.**

Суша крига - це вуглекислота в твердому стані. Якщо за атмосферного тиску до твердої вуглекислоти відвести теплоту, то вона сублимує, тобто перейде в газоподібний стан, минаючи рідку фазу. З цим пов'язана назва "суша крига", яка закріпилась за твердою вуглекислотою. Охолодження сухою кригою базується на тепловіддачі охолоджуваного середовища сухій кризі. Для порівняння холодопродуктивності сухої і водяної криги вважають, що для охолодження тіла до  $0^{\circ}\text{C}$  використовується і теплота перегрівання пари, що утворюється під час сублимації сухої криги. Холодопродуктивність сухої криги за  $0^{\circ}\text{C}$  в цьому випадку становить  $637\text{кДж/кг}$ , що в 1,9 раз більше, ніж у водяної криги. За об'ємною холодопродуктивністю перевага сухої криги виявляється ще більш значною. Об'ємна маса сухої криги залежно від способу її промислового виробництва становить  $1300 - 1500\text{кг/м}^3$ . Тому об'ємна холодопродуктивність сухої криги перевищує значення цієї характеристики

водяної криги в 2,95 раз. Це дає змогу за умови використання сухої криги в стільки ж разів скоротити об'єм, що займає генератор холоду. Суха крига дає змогу одержати широкий діапазон низьких температур. У суміші з ефіром можливо одержати температуру до  $-100^{\circ}\text{C}$ . Проте вартість сухої криги значно вище водяної (не менше ніж у 10 раз), що враховують під час вибору джерела холодопостачання. Суху кригу широко застосовують під час перевезення і продажу морозива та для охолодження транспортних засобів, а також у різних галузях промисловості, медицині і лабораторній практиці. Охолодження сухою кригою здійснюють безпосереднім контактом з охолодженим об'єктом або з використанням проміжного теплоносія, зазвичай повітря. В останньому випадку суху кригу подрібнюють і засипають у металеві ємкості - кишені, через які циркулює повітря, що переносить теплоту від охолоджуваного об'єкту до поверхні криги, де він охолоджується. Циркуляція повітря може бути посилена застосуванням вентиляторів.

Суху кригу виробляють у вигляді блоків на спеціалізованих заводах або в цехах холодокомбінатів і підприємств, технологічні процеси яких пов'язані з виділенням вуглекислоти. Виробництво складається з трьох стадій: одержання чистої газоподібної вуглекислоти та твердої з рідкої. Найбільший вплив на вартість сухої криги має перша стадія, так як складність її залежить від якісного і кількісного складу вихідної газової суміші. З цієї точки зору кращими сировинними джерелами вуглекислоти являються газоподібні відходи спиртових і гідролізних заводів (до 98% за масою), заводів синтетичного аміаку (85 - 90% вуглекислого газу). До 40% вуглекислого газу за об'ємом містять димові гази печей цементних заводів. Вуглекислий газ є також побічним продуктом металургійних і машинобудівних заводів, ряду хімічних і нафтопереробних виробництв. Найменшу кількість вуглекислого газу (9 - 16%) містять димові гази котелень ТЕЦ і промислових виробництв.

## 14.2. Випарне охолодження

Випарне охолодження засноване на явищі пароутворення на поверхні рідини за температури нижчої від температури її кипіння і нормального атмосферного тиску. На перетворення рідини в пару витрачається певна кількість теплової енергії - теплота пароутворення ( випаровування ). Завдяки цьому можна понизити температуру охолоджуваного об'єкту , що має вологу поверхню. Теплота пароутворення для різних рідин різна. Наприклад , за 20°C для води вона становить 2455кДж/кг , для етилового спирту - 831 кДж/кг, для ефіру етилового - 377 кДж/кг, для бензолу - 394 кДж/кг. В техніці найчастіше для випарного охолодження використовують воду як доступну, не шкідливу і дешеву рідину з великою теплою пароутворення .

Швидкість випаровування води з поверхні на повітрі залежить від парціального тиску водяної пари в ньому, швидкості руху повітря й величини самої поверхні . Кількість випарованої води визначають із виразу:

$$G_{\text{вип}} = \beta_{\text{вип}} (p'' - p_v) F \tau \quad (14.2)$$

де  $\beta_{\text{вип}}$  - коефіцієнт випаровування, кг/(м<sup>2</sup>·Па·с);  $p''$  - тиск насичення за температури поверхні рідини, Па;  $p_v$  - парціальний тиск водяної пари в навколишньому повітрі, Па;  $F$  - поверхня рідини , м<sup>2</sup>;  $\tau$  – тривалість процесу випаровування, с.

Коефіцієнт залежить від швидкості руху повітря. Теплоту, що витрачається на випаровування визначеної кількості рідини  $Q_{\text{вип}}$  знаходять за рівнянням:

$$Q_{\text{вип}} = G_{\text{вип}} \cdot r , \quad (14.3)$$

де  $r$  - скрита теплота пароутворення .

Вода може випаровуватись в результаті відведення від неї теплоти, а також підведення теплоти до неї ззовні, що залежить від співвідношення температури води і навколишнього середовища. Кількість теплоти, яка

відводиться від вологої поверхні при випаровуванні або підводиться до неї для тих же цілей, можна визначити із виразу:

$$Q_{\text{вип}} = \sigma (h_i - h_n) F \cdot \tau \quad (14.4)$$

де  $\sigma$  - коефіцієнт вологопереходу,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  $h_i$  – ентальпія повітря, насиченого водяною парою за температури вологої поверхні,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $h_n$  - ентальпія навколишнього повітря,  $\text{Дж}/\text{кг}$ .

Залежно від зовнішніх умов теплообміну теплоту пароутворення можна використати для пониження температури вологої поверхні і усунення (зменшення) впливу зовнішніх теплотоків, що викликають підвищення температури об'єктів. Перший випадок характеризується тим, що температура вологої поверхні вище температури навколишнього повітря і потік тепла відповідно направлений від поверхні до повітря. За таких умов до теплопередачі конвекцією і радіацією, характерної для сухих поверхонь, для вологої поверхні додається теплопередача внаслідок випаровування вологи. Таким чином охолодження вологої поверхні відбувається інтенсивніше. Такий спосіб охолодження використовують для пониження температури води (під час її дрібнокрапельного розбризкування для збільшення поверхні тепло- і масообміну) в системах зворотного водопостачання й охолодження поверхні теплового обладнання і теплообмінних апаратів.

Другий випадок характеризується тим, що температура вологої поверхні нижче температури навколишнього повітря, але вище точки роси. Потік тепла буде напрямлений до поверхні, а теплопередача може здійснюватись за рахунок конвективної й радіаційної складових теплообміну. Частина або весь потік тепла буде витрачатись на випаровування рідини з поверхні. За таких умов температура вологої поверхні буде підтримуватись на визначеному рівні який дещо нижчий температури навколишнього повітря і значно нижчий температури сухої поверхні. Рідина буде випаровуватись у результаті зовнішнього підведення тепла.

В холодильній техніці для охолодження продуктів і кругових об'ємів холодильного транспорту використовують також ефект випарного охолодження, що виникає під час розпилення рідин за допомогою форсунок (наприклад, рідких вуглекислоти і азоту) з нижчими ніж потрібно для охолодження продуктів чи повітря температурами кипіння.

## **15. Холодильне технологічне обладнання**

### **15.1. Класифікація холодильного технологічного обладнання**

Холодильне технологічне обладнання призначено для створення і підтримування в охолоджуваних об'єктах температури, вологи, швидкості руху охолоджуваного середовища, а іноді тиску та визначеного газового складу середовища.

Складність задач, які вирішуються на виробництві під час збереження харчових продуктів, що швидко псуються, зумовлюється відмінністю продуктів за розмірами, формою, механічними, теплофізичними та іншими властивостями. Тому виникає необхідність створення різних за розмірами і призначенням об'єктів, оснащених холодильним технологічним обладнанням, що відрізняється за конструкцією, способом відведення теплоти від продукту, видом охолоджуючого середовища, а іноді вакуумним, газогенеруючим і сорбційним обладнанням, а також засобами механізації та автоматизації робочих операцій завантаження, транспортування і вивантаження продукту.

Розрізняють три види холодильних об'єктів: камеру, тунель і апарат. Холодильний апарат призначений для холодильного оброблення харчових продуктів, зазвичай, невеликої товщини. На відміну від камери і тунелю всі його елементи жорстко з'єднані в єдину конструкцію. Апарати в найбільшій мірі відповідають сучасним виробничим і технологічним вимогам, так як можуть здійснювати холодильне оброблення продуктів швидко, безперервно, в

автоматичному режимі та з мінімальними втратами маси продуктів.

Апарати виготовляють на спеціалізованих заводах, що забезпечує їхню високу якість і мінімальні витрати під час монтажу та налаштування.

У промисловості використовують апарати різноманітних типів, які відрізняються за способом відведення теплоти від продукту; середовищем, що безпосередньо сприймає теплоту від продукту (повітря, вуглекислота, тощо); типом приладу для транспортування продукту в процесі холодильного оброблення (механічний конвеєр, повітряний потік) та ін. Холодильні апарати застосовують переважно для заморожування продуктів, тому їх називають морозильними.

Тепломасообмінні апарати, що підтримують в заданих межах декілька параметрів повітря (температуру, вологість, швидкість руху повітря тощо) під час холодильного оброблення та зберігання харчових продуктів відносять до технологічних кондиціонерів. Консервування харчових продуктів сублимаційним методом здійснюють за допомогою сублимаційних установок.

## **15.2. Повітряні морозильні апарати**

Повітряні морозильні апарати, в яких теплота від продукту сприймається повітрям і передається поверхні охолоджуючих приборів, з'явилися першими і зараз є найбільш поширеними. Повітря – природне і достатньо інертне середовище. Його можна використовувати для холодильного оброблення всіх харчових продуктів в широкому інтервалі температур, швидкості руху і тиску. Вказані переваги повітря в значній мірі визначають універсальність застосування та простоту конструкції апарата. Недоліками повітря є відносно низька здатність акумулювати теплоту та схильність до поглинання вологи.

Повітряний апарат являє собою пристрій, що має теплоізоляційну огорожу, всередині якої розташовані випарники (повітреохолоджувачі), системи подачі повітря, транспортування продукту, автоматичного управління і регулювання. Теплоізоляційна огорожа складається з плит, що мають шар (80 –



120мм) теплоізоляційного матеріалу (пінополістирол, пінополіуретан), зовнішнє і внутрішнє облицювання з листового метала (оцинкована сталь, алюміній) чи пластика. Таке облицювання надає плиті жорсткості та міцності, а також є пароізоляцією і захистом від механічних пошкоджень теплоізоляційного матеріалу.

Випарник виготовляють з ребристо-трубних елементів із змінним кроком ребрування, що зменшуються за ходом руху повітря від 20–30 до 10–15мм. Таке виконання випарника пов'язане з тим, що в процесі холодильного оброблення продукт втрачає багато вологи, яка у вигляді морозі осідає на поверхні випарника. Причому морозь випадає нерівномірно за глибиною, а на перших за ходом руху повітря рядах труб, зменшуючи міжреберний простір і площу живого перерізу повітреохолоджувача. Змінний крок ребрування тим самим забезпечує зберігання номінальної площі живого перерізу повітреохолоджувача за довжиною. Іноді перші ряди труб повітреохолоджувача виконують з гладких труб і виділяють у самостійну секцію, з поверхні якої можна відтоплювати морозь незалежно від інших секцій. Система подачі повітря передбачає вентилятори (осьовий, відцентровий) і повітрерозподільники (канал, жалюзі, відображувачі). Вид системи залежить від аеродинамічного опору рухові повітря і взаємного розташування випарника і продукту. Залежно від комплектації останніх, повітря може циркулювати вздовж або впоперек об'єму, зайнятого продуктом і системою транспортування. Довжина циркуляційного контуру і в першу чергу ділянки контакту з продуктом повинна бути по можливості меншою, так як при цьому аеродинамічний опір та величини зміни швидкості руху повітря і його температури будуть меншими. Такий режим забезпечить рівномірне охолодження продукту і менші його втрати внаслідок випаровування вологи, так як здатність повітря поглинати вологу збільшується з підвищенням його температури. Вид системи транспортування продукту залежить в основному від цільового призначення апарата (асортименту заморожуваних продуктів) і його продуктивності. Це можуть бути візки (етажерки), конвеєр безперервної

або періодичної дії, потік повітря (флюїдизаційний шар) або комбінація з вказаних засобів транспортування, наприклад конвеєр та потік повітря.

**Візкові апарати.** Апарати, в яких продукти розміщують на візках, застосовують для заморожування різних за формою й розмірами продуктів, які поступають на оброблення у відносно невеликих кількостях. Апарати є універсальними, простими та надійними в експлуатації, але потребують значних затрат ручної праці (рис. 15.1).

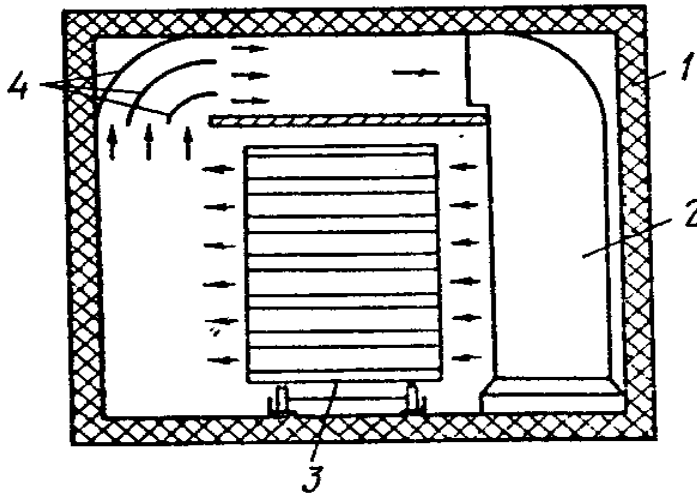


Рис. 15.1. Візковий апарат: 1 – теплоізоляційна огорожа;  
2 – повітреохолоджувач; 3 – візок; 4 – відображувачі

Усередині теплоізоляційної огорожі знаходяться повітреохолоджувачі, візки, передбачено канал у верхній частині апарату для організації поперечного руху повітря. Повітря з каналу всмоктується вентиляторами, циркулює через повітреохолоджувачі, а далі обдуває продукти і потрапляє в канал.

Продукт (м'ясо, риба, птиця, овочі) вивантажують на металічні противні (лотки) з зазором, необхідним для циркуляції повітря, і встановлюють на візок. Візок по рейках ( вручну або конвеєром ) надходить в апарат через завантажувальні двері, і одночасно виштовхується інший візок вже з замороженим продуктом. З цього візка знімають противні, виймають продукт, який за потреби спаковують і направляють на зберігання. Деякі види не запакованих продуктів (м'ясо, риба) примерзають до лотка. В цьому випадку

лоток нагрівають, опускаючи його на деякий час в теплу воду. Після санітарної обробки противні і візок повертають для завантаження.

**Конвеєрні морозильні апарати.** Для заморожування відносно великої кількості продуктів, близьких за формою та розмірами, використовують апарати в яких продукт транспортується конвеєром, що може бути різного типу: ланцюговий, лотковий, пластинчатий, стрічковий з електричним або гідравлічним приводом, діючий неперервно або циклічно. Ці апарати в порівнянні з візковими мають вищу продуктивність та вищий рівень механізації і автоматизації трудомістких операцій. Вони легко вписуються в склад технологічних ліній. Апарат такого типу, оснащений циклічно рухомих конвеєром (рис.15.2), призначений для заморожування

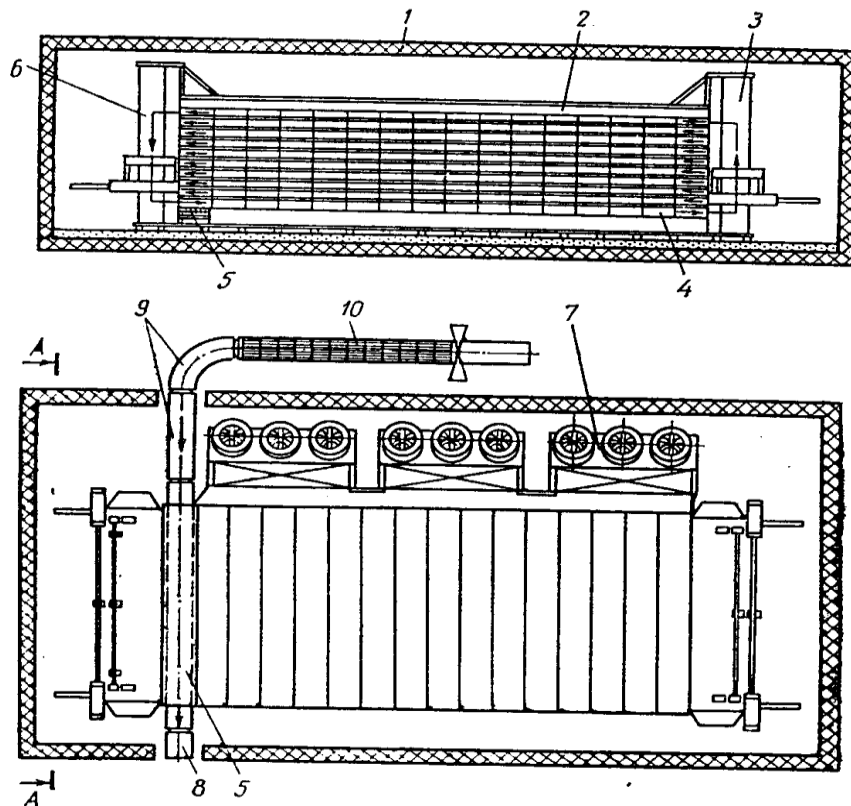


Рис.15.2. Апарат з циклічно рухомих конвеєром: 1–теплоізоляційна огорожа; 2 – стелаж; 3 – завантажувальний пристрій; 4 – каретки; 5 – рольганговий конвеєр; 6 – вивантажувальний пристрій; 7 – повітроохолоджувач; 8 – розвантажувальний конвеєр; 9 – завантажувальний конвеєр; 10 – накопичувальний конвеєр з рахунковим пристроєм

крупношматкових продуктів (м'ясо, риба, птиця, готові страви) в упаковці (картонна коробка, блок-форма) і може працювати в автоматичному режимі. Продукт заморожування знаходиться в каретках (робоча довжина 4,7 м), бічні стінки яких виконані з алюмінієвого листа, а дно – зі сталюї оцинкованої сітки. Каретки розміщені в горизонтальних направляючих стелажах у охолоджуваному об'ємі.

Апарат має значну кількість механізмів для горизонтального і вертикального переміщення кареток, робота яких скоординована, і виконується автоматично за попередньо заданою програмою. Повітреохолоджувачі, виконані з сталюих, поплакованих алюмінієм труб з алюмінієвими ребрами, розміщують вздовж стелажа на мінімальній відстані від продукту. Каретки, що розміщені в стелажі, утворюють канали для руху повітря. Це забезпечує мінімальні затрати електроенергії на роботу вентиляторів.

Тривалість заморожування м'яса в блок-формі товщиною 60 мм становить 5–6 год., а в картонній коробці товщиною 150 мм – 16–20 год.; продуктивність апарата – відповідно 7 і 3 т/год., габаритні розміри 30×9×5,5 м. Аналогічним за типом конвеєра є апарат ГКА-4, який називають гравітаційним. У ньому продукт заморожується, знаходячись також в каретках. Каретка, що містить два противна з продуктом, подається спочатку на верхню полицку стелажа, а потім послідовно проходить всі полицки, причому перехід з однієї полицки на іншу здійснюється під дією сили гравітації (звідси і назва апарата), та з замороженим продуктом виводиться з останньої полицки. За температури повітря  $-30 \div -35^{\circ}\text{C}$  і швидкості його руху 4–8 м/с тривалість заморожування продукту (м'ясо, риба) становить 4–6 годин. Продуктивність апарата – 25 т на добу.

Застосування циклічно рухомого конвеєра дає змогу компактно вирішити конструкцію апарата та збільшити його працездатність, так як відсутні безперервно рухомі елементи. Водночас конструкція і технічне обслуговування ускладнюється. Повітряні апарати з неперервним конвеєром різного типу (стрічковий горизонтальний і спіральний, ланцюговий) поширені найбільш

широко, так як дають змогу вести заморожування продукту різної форми, в упаковці і без неї, неперервно і в автоматичному режимі.

В апарат із стрічковими горизонтальними конвеєрами (рис.15.3) продукт через завантажувальне вікно подається на верхній стрічковий сітчастий конвеєр, обминає ділянку інтенсивного охолодження і, рухаючись вздовж апарата, по жолобу переводиться на середній конвеєр.

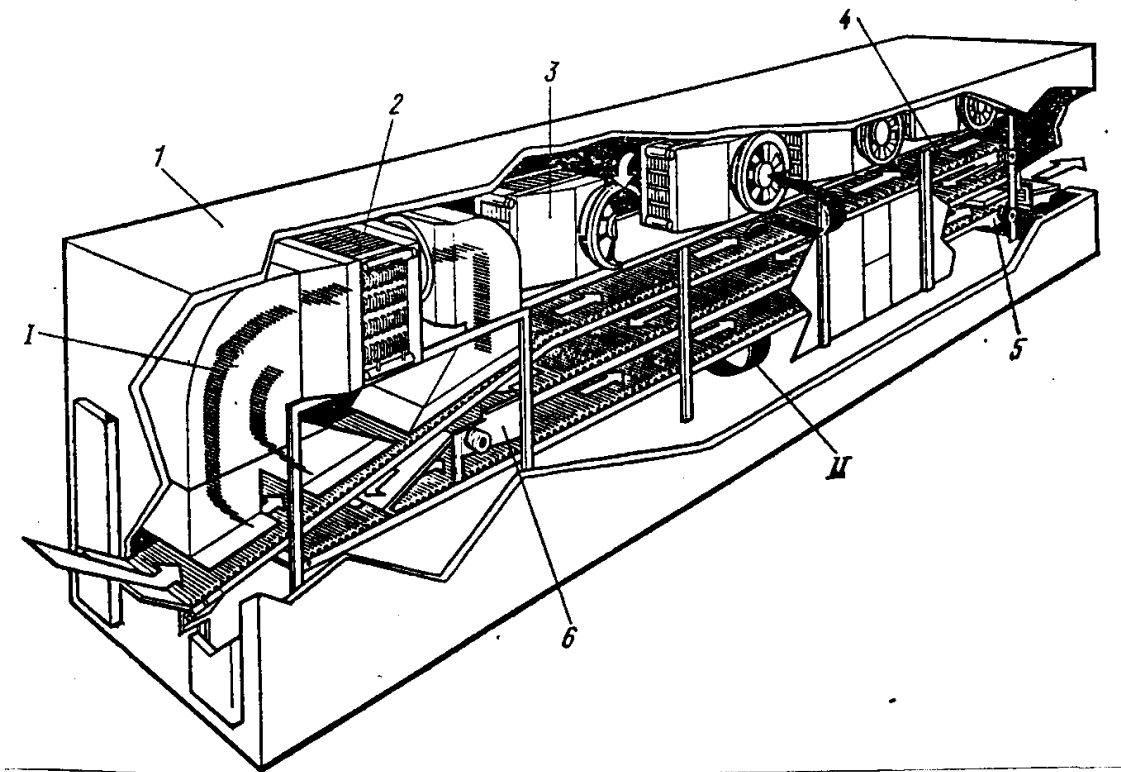


Рис. 15.3. Апарат з лінійними горизонтальними конвеєрами:  
 1 – теплоізоляційна огорожа; 2 – повітроохолоджувач повздовжнього циркуляційного контуру I; 3 – повітроохолоджувач поперечного циркуляційного контуру II; 4 – верхній конвеєр; 5 – нижній конвеєр;  
 6 – середній конвеєр.

Далі продукт потрапляє на нижній конвеєр і, заморожений, вивантажується через розвантажувальне вікно. Кожен з конвеєрів має індивідуальний привід, тому швидкість руху стрічки може регулюватися в широкому діапазоні, що забезпечує заморожування продуктів різної товщини.

Повітроохолоджувачі, що розміщені вздовж конвеєрів, забезпечують поперечний рух повітря. Холодніше повітря спрямоване на нижній конвеєр, де розташовано продукт з найбільш низькою температурою. В апараті передбачені два циркуляційних повітряних контури: поздовжній у ділянці завантаження продукту і поперечний в решті об'єму апарата. Перший контур забезпечує швидке охолодження продукту, що особливо необхідно під час надходження продукту з високою температурою поверхневого шару, наприклад обсмаженого. Водночас, він перешкоджає проникненню теплого повітря через вікно завантаження. Продуктивність заморожування обсмажених рибних паличок становить 1,7т/год., габаритні розміри 11×4,1×4,2 м.

Апарат із стрічковим спіральним конвеєром показаний на рис. 15.4. Сітчаста стрічка з продуктом, ковзаючи по направляючим, піднімається по спіралі вздовж барабана, що обертається, і приводить її в дію за рахунок сили тертя. В верхній частині апарата стрічка виходить за межі охолоджуючого контуру для вивантаження замороженого продукту і знову повертається до завантажувальної сторони, пройшовши попередньо санітарну обробку.

Повітря в апараті рухається зверху вниз через всі яруси сітчастої стрічки конвеєра, поступово нагріваючись і насичуючись вологою, тому втрата маси продуктів є нижчою, ніж у апаратах з горизонтальним потоком повітря. Продуктивність апарата зі стрічкою шириною 0,9 м становить для: котлет – 2,5 т/год., рибних паличок – 3,5 т/год., готових страв – 2,2 т/год.; тривалість заморожування – відповідно 22,17 і 130 хв. Габаритні розміри апарата 10,7×7,8×4,5 м.

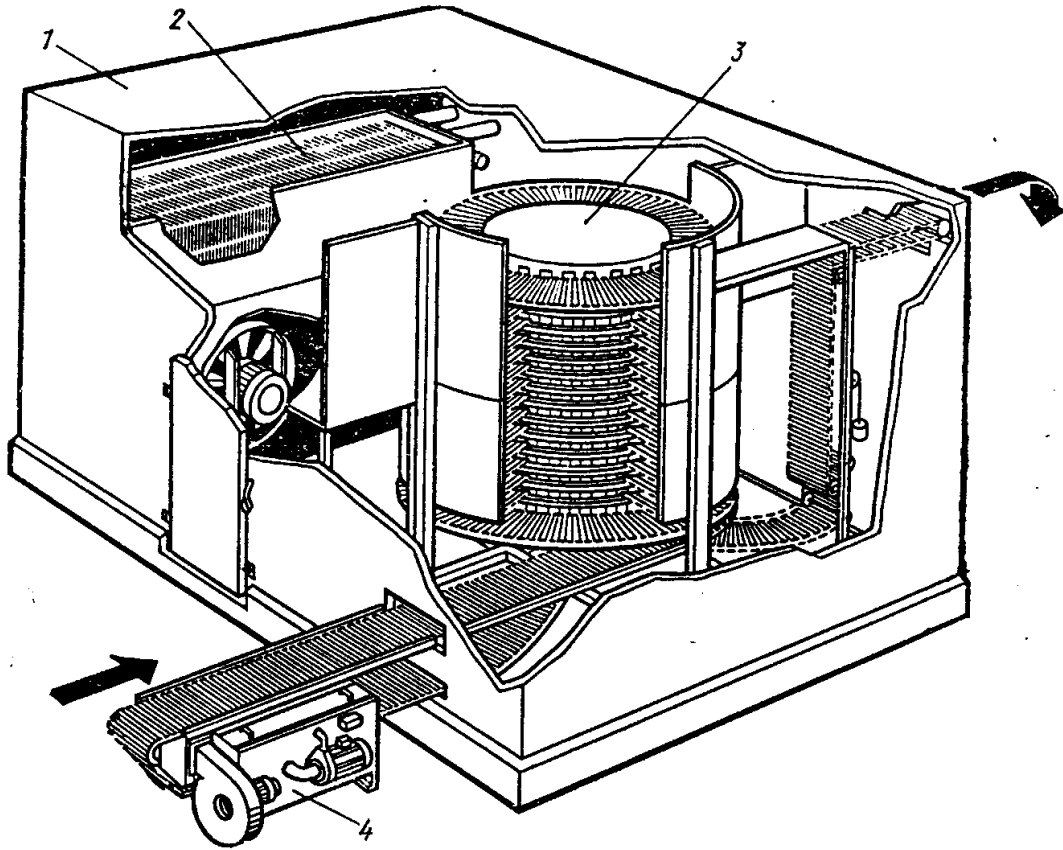


Рис. 15.4. Апарат з стрічковим спіральним конвеєром:  
 1 – теплоізоляційна огорожа; 2 – повітроохолоджувач; 3 – барабан;  
 4 – пристрій для санітарної обробки стрічки конвеєра

Апарат, що має три конвеєра: два для транспортування продукту в вертикальній площині і горизонтальний для завантаження і вивантаження, представлений на рис.15.5. Продукт розміщується ( вручну чи автоматично ) на листах з нержавіючої сталі, які захоплюються швидкодіючими затискачами горизонтального конвеєра і подаються в апарат. Безперервно рухомий конвеєр апарата підхоплює листи за бічні краї і транспортує їх на верх. У крайньому верхньому положенні листи переводяться автоматично на подібний конвеєр, що транспортує листи донизу. Досягнувши нижнього положення, листи з замороженим продуктом захоплюються затискачами горизонтального конвеєра і усуваються з апарата. Продукт знімається, а листи повертаються на

завантаження. Повітроохолоджувачі, що розміщені вздовж апарата, максимально наближені до продукту, а листи з продуктом організують рух потоку повітря. Апарат є компактним, наприклад, за однакової продуктивності він займає у виробничому приміщенні площу на 20% і об'єм на 40% менші, ніж апарат із спіральним стрічковим конвеєром.

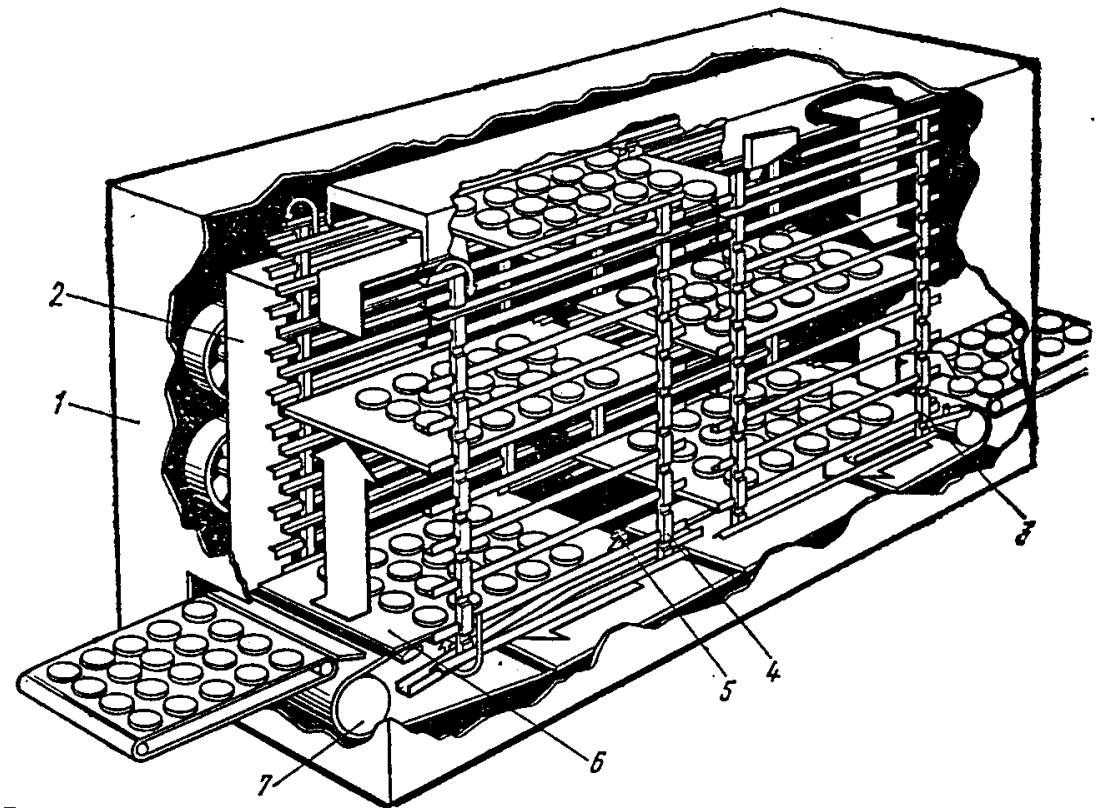


Рис. 15.5. Апарат з вертикальними і горизонтальними конвеєрами :

1 – теплоізоляційна огорожа; 2 – повітроохолоджувач; 3 – вертикальний конвеєр, що опускає продукт; 4 – вертикальний конвеєр, що піднімає продукт; 5 – швидкодійний затискач; 6 – лист з продуктом;  
7 – горизонтальний конвеєр

Деякі продукти (м'ясо, риба тощо) можна формувати без втрати їхньої якості і заморожувати у вигляді блоків. Для цієї мети застосовують металічні блок-форми, які кріпляться на ланцюговому конвеєрі апарата. Поверхня продукту ізолюється від контакту з рухомим повітрям, що зменшує швидкість випаровування вологи, а відповідно, і величину втрати маси продукту. Апарати



з блок-формами широко застосовують на судах для заморожування риби.

**Флюїдизаційні апарати.** Апарати, в яких продукт заморожується у висхідному потоці повітря, у зваженому стані, називаються флюїдизаційними. В апаратах такого типу забезпечується швидке заморожування, незначні втрати маси (0,5–0,7%), висока якість продуктів з ніжною консистенцією, неперервність виробничого процесу. Слід зауважити, що для забезпечення флюїдизаційного шару продукт повинен мати невеликі розміри: товщину до 40 мм і довжину до 125 мм, а його форма повинна наближатись до сферичної.

Продукт в апараті може транспортуватися тільки в потоці повітря у лотках з перфорованим дном і на сітчастій стрічці конвеєра. Апарат із стрічковим конвеєром є універсальним, оскільки дає змогу заморожувати й відносно важкі шматки продукту в щільному шарі.

Апарат, що подано на рис.15.6, використовують для заморожування овочів (зелений горошок, кубики моркви), фруктів (шматочки яблук), ягід (полуниця, смородина) та інших продуктів.

Продукт після миття подають у завантажувальний механізм, що має вібраційну решітку для вилучення води. Тут він підсушується, що запобігає його замерзанню, і далі потрапляє в першу ділянку апарата, де підморожується у флюїдизаційному шарі. Здобувши достатню механічну міцність, продукт надходить у другу ділянку, в якій доморожується в щільному шарі на сітчастій стрічці конвеєра, після чого вивантажується з апарата.

Швидкість руху конвеєрів першої та другої ділянок може незалежно змінюватись, забезпечуючи заморожування продуктів з різною товщиною і початковою температурою. Кожна ділянка має автономну систему подачі повітря. В ділянці підморожування осьові вентилятори подають повітря через секції випарника знизу на продукт. Пройшовши шар продукту, повітря повертається на всмоктувальну сторону вентиляторів.

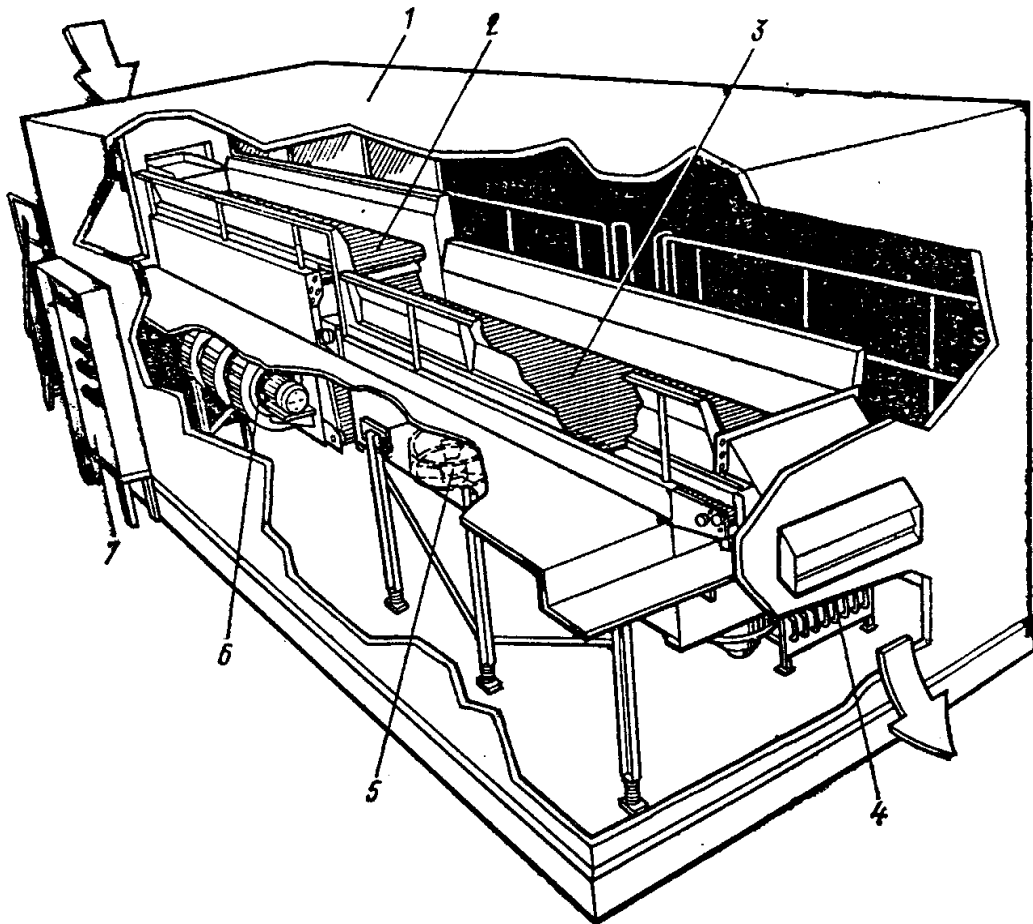


Рис. 15.6. Апарат флюїдизаційний :

1 – теплоізоляційна огорожа; 2 – перфорований піддон; 3 – сітчаста стрічка конвеєра; 4 – повітроохолоджувач; 5 – осьовий вентилятор; 6 – відцентровий вентилятор; 7 – щит керування

### 15.3. Контактні морозильні апарати

Апарати, в яких продукти заморожуються, під час безпосереднього контакту з охолоджуваною металічною поверхнею або рідиною (холодоносієм, холодильним агентом), називаються контактними. В цих апаратах за умови доброго теплового контакту з продуктом різниця температур між продуктом і холодильним агентом буде меншою, чим у повітряних апаратах, а густина теплового потоку — більшою. Під час заморожування продукт омивається тільки з однієї сторони практично нерухомим повітрям, отже, всихання

продукту буде меншим, ніж у повітряних апаратах.

Порівняння питомих показників роботи апаратів із заморожуванням продукту повітрям і на поверхні засвідчує, що для заморожування 1кг продукту від поверхні потрібно відвести в 1,4 –1,5 рази меншу кількість теплоти, затратити в 1,3 –1,5 разів менше електроенергії, а осушення продукту скорочується в 3–5 рази.

Проте ефективну роботу апарата при заморожуванні продукту на поверхні можна забезпечити дотримуючись ряду умов : площа зіткнення охолоджуючої поверхні з продуктом повинна бути максимальною, а термічний опір зони їх контакту — мінімальним. Тому продукт повинен мати правильну геометричну форму і бути підпресованим тиском 15–70кПа, що практично виключає наявність повітряних прошарків в зоні контакту. На тривалість заморожування продукту впливає також інтенсивність тепловіддачі від стінки до холодильного агента. В зв'язку з цим не розсольне, а безпосереднє охолодження киплячим холодильним агентом (R717, R12, R22, R502) є переважним, так як воно скорочує тривалість заморожування продукту в середньому на 25%. На тривалість заморожування впливає термічний опір продукту. Тому його товщина повинна бути пов'язана з температурою кипіння чи навпаки: чим інтенсивніший тепловідведення, тим меншою повинна бути товщина продукту.

Незапакований вологий продукт (м'ясо, риба) під час заморожування примерзає до поверхні металу. Тому, якщо не приймають заходи зі зменшення сил зчеплення, то для вивантаження продукту ділянка контакту замороженого продукту і металеві поверхні нагрівають за шляхом подавання гарячої пари холодильного агента. В зв'язку з цим ускладнюється виробничий процес, збільшуються енергетичні затрати, підвищується температура продукту. Заходами, що суттєво знижують сили зчеплення продукту з металом, є упаковка продукту, протиадгезійне покриття поверхні металу (поліетилен, фторопласт), низька температура кипіння холодильного агента ( $-60^{\circ}\text{C}$  і нижча).

Продукт у апараті може заморожуватись, за умови одно- чи

двостороннього контакту з поверхнею плити барабана і стрічки конвеєра. В зв'язку з цим розрізняють плиткові, барабанні та стрічкові апарати.

**Плиткові апарати.** Комплектація випарника з плит дає змогу раціонально відводити теплоту, так як в теплообміні беруть участь дві сторони продукту і плити. Плити можна розміщувати горизонтально, вертикально і радіально на валу, що обертається.

В апаратах з горизонтальними плитами важче, чим в інших плиткових, механізувати операції завантаження і вивантаження продукту. Тому вони, зазвичай, періодичної дії. Апарат з горизонтальними плитами періодичної дії, призначений для заморожування продукту, в тому числі і упакованого, в коробки висотою 15–75мм (рис. 15.7) має несущий металічний каркас, теплоізоляційну огорожу. В середині розміщуються плити з алюмінієвого сплаву, що обмежено переміщуються за допомогою гідравлічного приводу.

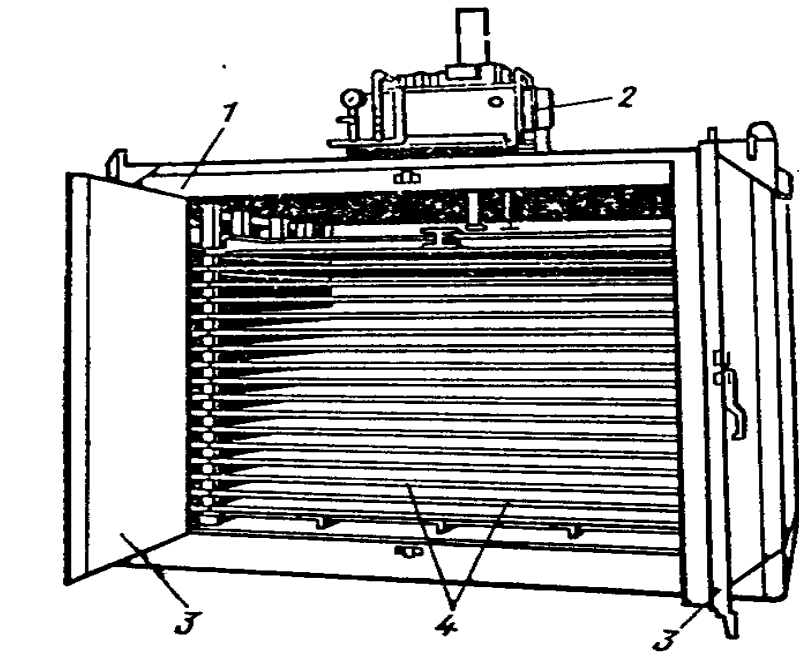


Рис. 15.7. Плитковий апарат: 1 – теплоізоляційна огорожа;  
2 – гідравлічний привід; 3 – ствірки; 4 – морозильні плити

Продукт в блоках і коробках, висота яких повинна бути однаковою,

розвантажують між плитами. Для створення достатнього контакту з продуктом плити завантаженого апарата зближують на відстань, що дорівнює висоті обмежувачих пластин, але дещо меншу первинної висоті продукту. Величину зазору між плитами можна регулювати. Дверні ствірки апарата закривають, і включають систему охолодження. Після закінчення процесу заморожування відключається система охолодження, відкриваються дверні ствірки, розсуваються плити і продукт вивантажують. Апарат приблизно раз в тиждень зупиняють для розморожування поверхні плит. Тривалість заморожування за температури кипіння холодильного агента – 40°C блоку рибного філе висотою 25 мм становить 50 хв., за умови пакування в полімерну плівку і 65 хв., якщо рибне філе запаковано в картонну коробку з полімерною плівкою. Габаритні розміри цього апарата становлять 2,62×2,01×2,35м.

Апарати з горизонтальними плитами АМП використовують переважно в рибній промисловості. На багатьох м'ясо-комбінатах країни для заморожування запакованих блоків м'яса застосовують апарати ФМБ з вертикальними плитами продуктивністю 2т/доб.

**Роторні апарати.** Роторні апарати характеризуються кращими техніко-економічними показниками порівняно з плитковими. Продукт в роторних апаратах заморожується практично неперервно, що збільшує продуктивність і забезпечує сталість теплового навантаження на холодильну установку. Радіальне розташування плит та їхнє обертання сприяє рівномірному розподілу холодильного агента по плитах, тому продукт заморожується рівномірно. Випускають декілька модифікацій роторних апаратів. Універсальний апарат УРМА має найкращі техніко-економічні показники (рис. 15.8). Апарат має теплоізоляційну огорожу. У робочому об'ємі встановлено ротор з морозильними секціями; системи охолодження, дозування, завантаження і вивантаження, автоматичного керування. Кожна секція включає три плити із алюмінієвого сплаву з прямокутними каналами для циркуляції холодильного агента.

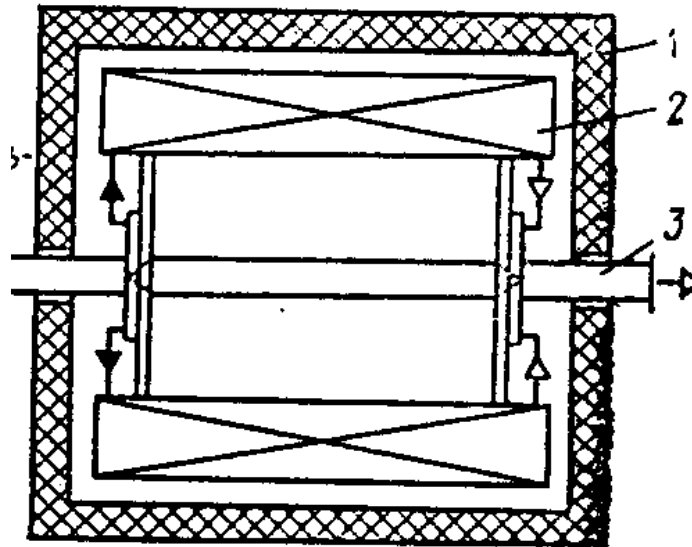


Рис.15.8. Роторний апарат УРМА : 1 – теплоізоляційна огорожа; 2 – секція з морозильними плитами; 3 – вал ротора

Холодильний агент із циркуляційного ресивера подають насосом через торець вала ротора. Він розподіляється по плитах, відводиться через другий торець і потрапляє в циркуляційний ресивер. Між середньою (нерухомою) і бічними плитами в комірках передбачено дві окантовки з продуктом. Окантовка — це рамка з алюмінієвого профілю, в якій формуються чотири блоки продукту. Вона також є бічною гранню плити. Плити в секції з'єднані між собою пружинами, які забезпечують підпресування продукту.

Апарат працює тактами. Оператор вкладає в окантовку пакувальний матеріал, завантажує дозу продукту (м'ясо, сир, меланж), формує та пакує блоки. Підготовлену окантовку подають у завантажувальний пристрій. Секцію з замороженим продуктом встановлюють у відповідне положення. Окантовка з продуктом, підготовлена до заморожування, надходить в секцію, що закривається. Такт завершений, і механізм повороту переводить ротор у положення для вивантаження (завантаження) наступної комірки. Таким чином, кожна секція послідовно — спочатку верхня комірка, а потім нижня — розвантажується і завантажується за один оберт ротора.

Продуктивність апарата за температури кипіння холодильного агента – 40°C

становить 650 кг/год. Питомий розхід холоду – 419 кДж/кг. Габаритні розміри 5,0×5,2×2,02м.

**Барабанні апарати.** Для заморожування напівфабрикатів з вологою поверхнею і пастоподібних продуктів застосовують барабанні апарати, в яких продукт заморожується на поверхні барабана, що обертається. Апарат, що наведено на рис.15.9, має теплоізоляційну огорожу, барабан із нержавіючої сталі з каналами для циркуляції холодильного агента, що розміщені вздовж циліндричної утворючої, ніж для зколювання продукту, електричний привід, завантажувальний та розвантажувальний конвеєри.

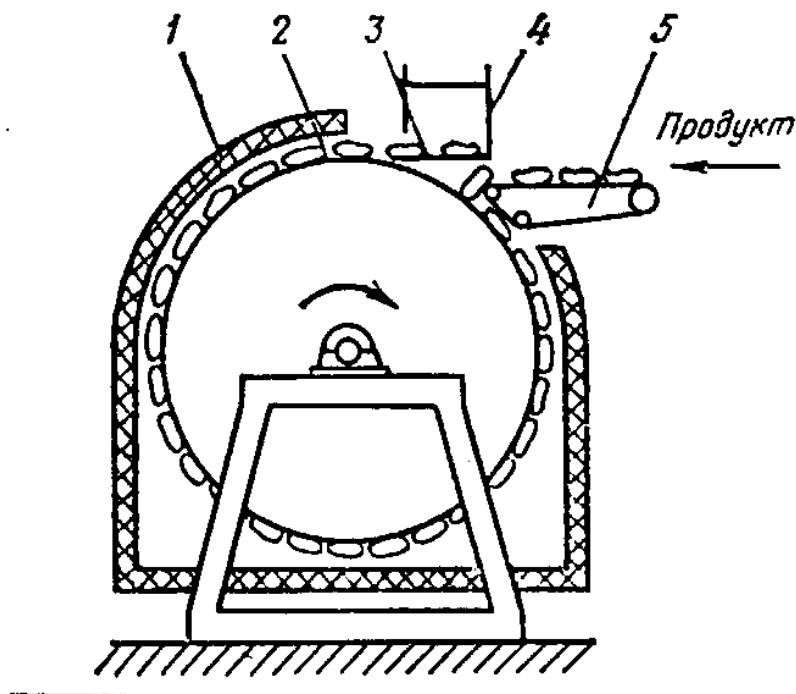


Рис. 15.9. Барабанний апарат: 1 – теплоізоляційна огорожа; 2 – барабан, що обертається; 3 – ніж; 4 – розвантажувальний конвеєр; 5 – завантажувальний конвеєр

У апарат продукт подає завантажувальний конвеєр. Він притискається стрічкою конвеєра до поверхні барабана і приморожується. За оберт барабана продукт повністю заморожується, сколюється ножем у верхній точці і надходить у розвантажувальний конвеєр. Швидкість обертання циліндра можна змінювати

(один оберт — 5–20 хв.) залежно від виду і товщини заморожуваного продукту. Відповідно змінюється і продуктивність (150–250кг/год.) апарата.

**Стрічкові апарати.** В стрічкових апаратах продукт заморожується на конвеєрній гладкій стрічці з нержавіючої сталі. В охолоджуваній частині апарата під стрічкою розташовано ємності, заповнені холодоносієм. Рухомі стрічка конвеєра “плаває” на поверхні холодоносія. Таке заповнення ємностей забезпечується безперервною подачею охолодженого у випарнику холодоносія. Подавальні форсунки розташовані нижче рівня, тому холодоносій перемішується, що дає змогу підтримувати його сталу температуру. Тривалість заморожування рибного філе товщиною 13мм становить 10хв., рублених шніцелів – 7хв. Деякі моделі таких апаратів оснащують повітроохолоджувачами, що обдувають продукт на стрічці. В результаті продуктивність апарата збільшується приблизно на 25%. Існують апарати, в яких продукт заморожується під час контакту з двома рухомими стрічками конвеєрів (рис.15.10).

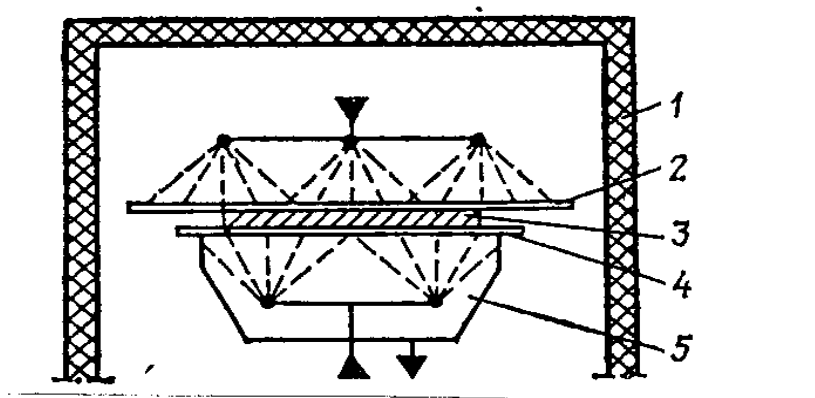


Рис. 15.10. Схема заморожування продукту за умови контакту з двома сталевими стрічками: 1 – теплоізоляційна огорожа; 2 – стрічка верхнього конвеєра; 3 – продукт; 4 – стрічка нижнього конвеєра; 5 – ємність з холодоносієм

Продуктивність апарата за умови двостороннього відведення теплоти від продукту в 2–3 рази більша, ніж при односторонньому, за інших рівних умов.



**Занурені (імерсійні) апарати.** Апарати, в яких продукти заморожуються в рідині (холодоносії), називаються зануреними.

Заморожування продуктів в холодоносії характеризується інтенсивнішим відведенням теплоти, порівняно з металічною поверхнею. Водночас виникають труднощі, що пов'язані з небажаним проникненням охолоджуваної речовини (холодоносія) в продукт, із дотриманням санітарно-гігієнічних умов, з підтримуванням концентрації холодоносія та відсутністю доступних нетоксичних і інертних рідин. Це обмежує використання такого способу.

З появою полімерних пакувальних матеріалів, не проникних для холодоносіїв, застосування контактного заморожування в рідких середовищах розширилось. У холодоносіях переважно заморожують продукти значної товщини і неправильної форми (тушки птахів, крупношматкове м'ясо), що запаковані в термоусадкову полімерну плівку, яка повинна прилягати до поверхні продукту. Як холодоносії вибирають речовини, що дозволені до використання органами охорони здоров'я і ті що відповідають відповідним вимогам. Температура замерзання повинна бути нижчою за робочий інтервал температур не менш як на  $10^{\circ}\text{K}$ , так як поблизу температури замерзання різко збільшується в'язкість речовин, яка впливає на теплопередачу і величину роботи. Питома теплоємність повинна бути по можливості більшою, а в'язкість – меншою. Тому вид холодоносія потрібно вибирати після техніко-економічного аналізу варіантів. Найбільше цим вимогам відповідають водяні розчини натрію хлориду, пропіленгликолю і кальцію хлориду. Нижньою межею застосування холодоносіїв є температури:  $-15^{\circ}\text{C}$ ,  $-40^{\circ}\text{C}$  і  $-45^{\circ}\text{C}$  відповідно.

Апарати для заморожування продукту в холодоносії достатньо інтенсивні, наприклад, за температури  $-25^{\circ}\text{C} \div -30^{\circ}\text{C}$  тушки птиці заморожуються у 7–8 разів швидше, ніж у повітряних апаратах.

Схема досить простого за конструкцією апарата такого типу подана на рис. 15.11. У нижній частині теплоізолюваного корпусу знаходиться ємність, заповнена 50%-вим розчином пропіленгликоля, в якій розміщений випарник

аміачної холодильної машини з мішалкою. Над випарником нижче рівня холодоносія встановлені дві сітчасті перегородки, що утворюють канал, по якому рухається заморожуваний продукт. У верхній частині корпуса над ємністю знаходиться конвеєр, тягові ланцюги якого обладнані поперечно розташованими вертикальними решітчастими пластинами, які, рухаючись між сітчастими перегородками, транспортують продукт через ємність з холодоносієм.

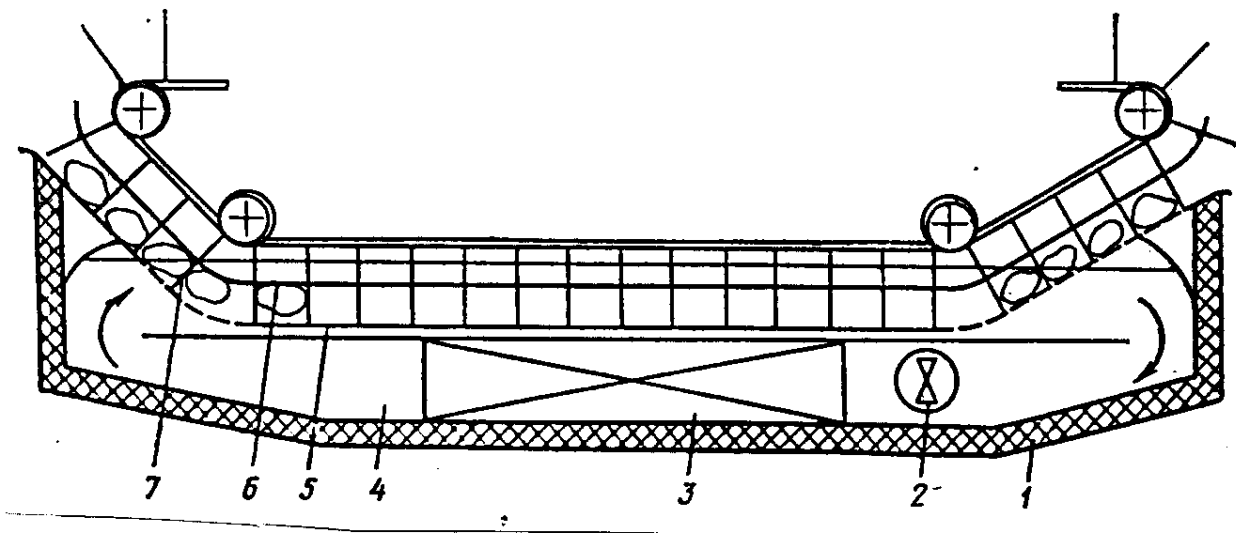


Рис. 15.11. Занурений ( імерсійний ) апарат:

1 – теплоізоляційна огорожа; 2 – мішалка; 3 – випарник; 4 – ємність з холодоносієм; 5 – нижня сітчаста перегородка; 6 – верхня сітчаста перегородка; 7 – решітчасті пластини конвеєра

Шматки м'яса товщиною 22–46мм, запаковані в плівку під вакуумом, подають з пакувального автомата до завантажувального вікна і скидаються в апарат. М'ясо падає в канал, утворений двома сітчастими перегородками, захоплюється пластинами конвеєра і транспортується під рівнем холодоносія, так як верхня перегородка перешкоджає його спливанню. Не доходячи до краю ємності, м'ясо виводиться з холодоносія для того, щоб вилучити з поверхні пропіленгликоль. Далі продукт надходить в інший конвеєр, де зрошується водою впродовж 1хв.

Особливий інтерес заслуговує заморожування продуктів в речовинах під час зміни їхнього фазового стану (кипіння, сублімації), так як інтенсивність тепловідведення від продукту за таких умов різко зростає. Апарати такого типу прості за конструкцією, компактні ( займають площу в 6 разів меншу за однакової продуктивності), споживають електроенергію в 10 разів меншу, прості в обслуговуванні, швидко виходять на робочий режим. Продукт в них заморожується швидко, що забезпечує його найвищу якість і невелику величину втрат маси ( до 0,5%). Але за причини великих експлуатаційних затрат, пов'язаних в основному з високою вартістю охолоджуючої речовини, в таких апаратах доцільно заморожувати ті продукти, натуральні якості яких можна зберегти тільки за швидкого заморожування і низьких температур, наприклад рослинні продукти з ніжною консистенцією (малина, полуниця, цитрусові). Як охолоджуючі речовин переважно застосовують рідини: азот, вуглекислоту і хладони.

**Азотні апарати.** Рідкий азот як дешевший і доступний агент застосовується найширше. За атмосферного тиску він кипить за температури – 195,8°С і має сховану теплоту пароутворення 199,8кДж/кг. Він інертний по відношенню до продуктів і конструкційних матеріалів.

Апарати мають легкий несучий каркас, теплоізоляційну огорожу, системи транспортування продукту, подачі та відведення газу, охолодження, автоматичного керування і регулювання. Система охолодження складається з ємностей для зберігання рідкого азоту, насоса, контрольно-вимірювальних і регулюючих пристроїв. Продукт в апараті може заморожуватися під час занурення в рідкий азот, зрошення ним в потоці газоподібного азоту або комбінації цих методів. З термодинамічної точки зору заморожувати продукт з позитивною температурою в об'ємі рідкого азоту не доцільно через велику різницю температур. Крім того, за великого температурного напору виникає плівковий режим кипіння азоту, за якого коефіцієнт тепловіддачі різко зменшується, оскільки в ділянці контакту утворюється газовий прошарок. Охолоджуюча здатність азоту реалізується приблизно на 50%, оскільки корисно

використовується тільки прихована теплота фазового переходу, а газ за температури, близької до температури кипіння, відводиться в оточуюче повітря. Тому питома витрата рідкого азоту на заморожування є значною (2кг і більше на 1кг продукту). Крім того є велика імовірність розтріскування і деформації продукту внаслідок внутрішніх напруг, що виникають через нерівномірне за об'ємом льодоутворення.

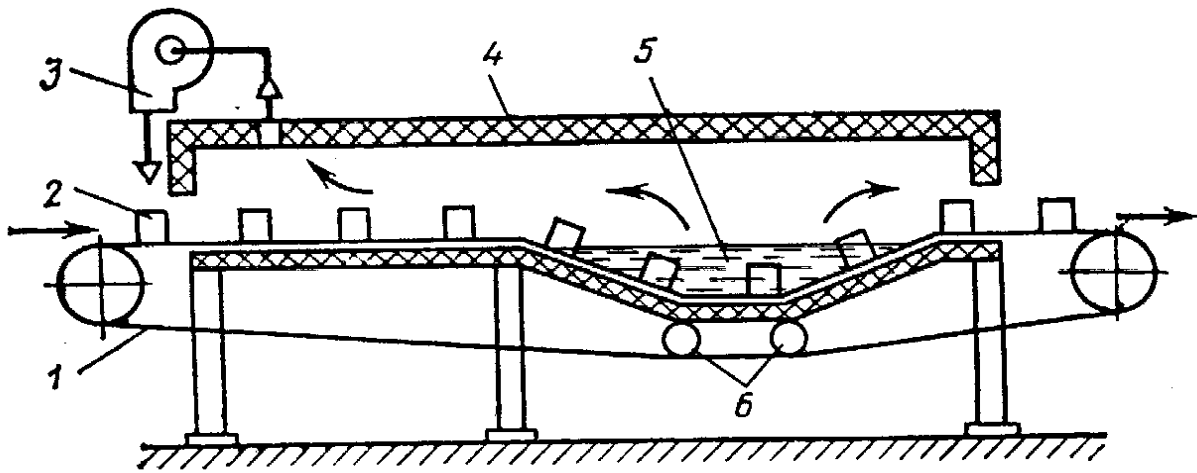


Рис. 15.12. Азотний апарат із двома ділянками заморожування:

1 – конвеєр; 2 – продукт; 3 – вентилятор; 4 – теплоізоляційна огорожа;

5 – ємність з рідким азотом; 6 – направляючі ролики конвеєра

Економічно вигідніше заморожувати продукт у апараті з двома ділянками: попереднього заморожування за допомогою газоподібного азоту і доморожування в рідкому азоті. Продукт конвеєром подається в першу ділянку, в якій 30–40% теплоти відводиться потоком газоподібного азоту. Потім продукт транспортується через ємність з рідким азотом, доморожується і виводиться з апарата. Газоподібний азот вилучається з апарата за допомогою вентилятора і нагнітається в ділянку вікна завантаження, створюючи завісу на шляху теплого повітря. Витрата рідкого азоту в таких апаратах зменшується, але довжина апарата збільшується приблизно в 2 рази порівняно з заморожуванням продуктом тільки в рідкому азоті.

Апарати, в яких продукт зрошується рідким азотом, мають 3–4 ділянки,

що забезпечує ефективне тепловідведення і зниження витрати рідкого азоту (до 0,5 –1,5кг/кг) на заморожування. Наприклад, у апараті з чотирма ділянками (рис. 15.13) заморожування продукту здійснюється наступним чином.

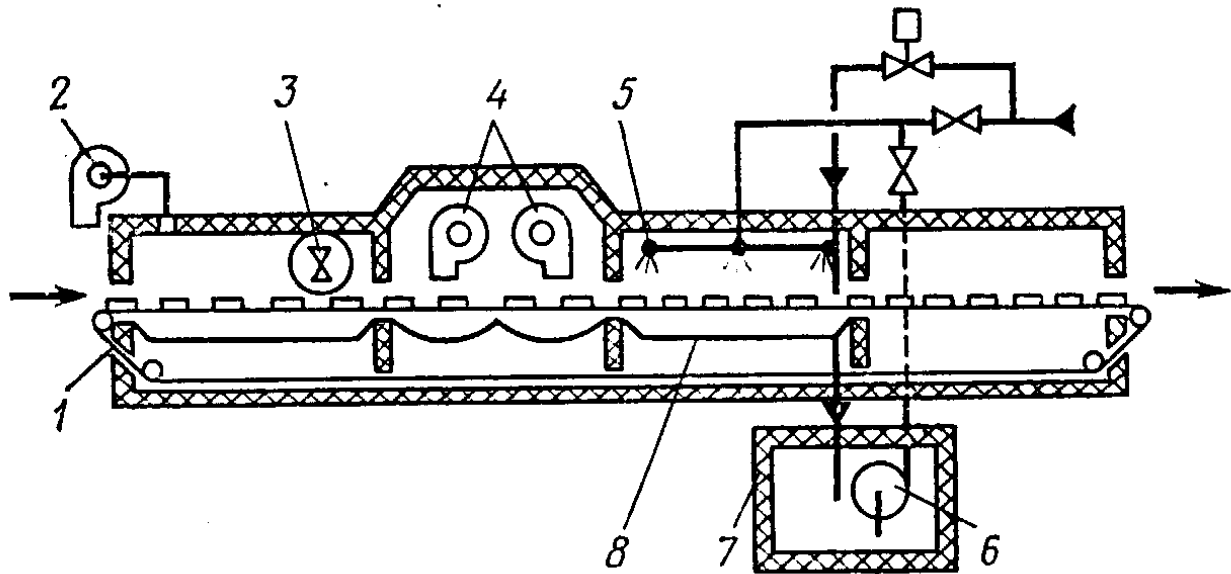


Рис. 15.13. Азотний апарат з чотирма ділянками для заморожування продукту в азоті: 1 – конвеєр; 2 – витяжний відцентровий вентилятор; 3 – осьовий вентилятор; 4 – відцентрові вентилятори; 5 – форсунки; 6 – насос; 7 – ємність з рідким азотом; 8 – піддон

На першій ділянці продукт охолоджується газоподібним азотом, що рухається зі швидкістю 2–3м/с і нагрівається від  $-120 \div -70$  до  $-70 \div -25^{\circ}\text{C}$ , від початкової температури в центрі  $25^{\circ}\text{C}$  до  $5^{\circ}\text{C}$ . На другій ділянці температура продукту знижується до  $0^{\circ}\text{C}$  газоподібним азотом, що рухається зі швидкістю 15 м /с і нагрівається від  $-195,8 \div -150$  до  $-120 \div -70^{\circ}\text{C}$ . На третій ділянці продукт зрошується рідким азотом і заморожується до температури в центрі  $-5^{\circ}\text{C}$ . На останній ділянці температура продукту вирівнюється за об'ємом в середовищі газу, що нагрівається від  $-150$  до  $-120^{\circ}\text{C}$ . Продукт виводиться з апарату з температурою  $-20^{\circ}\text{C}$ . 95% утвореного газоподібного азоту направляється на першу і другу ділянки. Основний потік, пройшовши через

них, вилучається з апарата за допомогою витяжного вентилятора, а частина — через вікно завантаження. На ділянку вирівнювання надходить 5% утвореного газу, який забирається через вікно розвантаження. Рідкий азот подається на форсунки за допомогою насоса під тиском 0,15МПа і розбризкується, зрошуючи рухомий продукт. Частина рідкого азоту, що не випарився, збирається в піддоні і по трубопроводі через фільтр надходить в ємність, звідки насосом подається на форсунки. Рівень рідкого азоту в ємності підтримується сталим за допомогою регулятора рівня (реле рівня з соленоїдним вентиляем).

Застосування вентиляторів в апараті дозволяє інтенсифікувати процес заморожування продукту, але вони є джерелом теплотоку, величина якого складає значну частину від суми теплотоку. Тому в деяких апаратах замість вентиляторів використовують інжектуючу здатність газових струменів.

Вуглекислотні апарати. Вуглекислий газ є інертний, має бактерицидну дію. Вуглекислотні апарати по конструкції в основному подібні до азотних. Але в роботі системи охолодження є деякі особливості. Вуглекислоту доцільно транспортувати і зберігати в рідкому стані в теплоізованих ємностях при тиску 0,8–2,5МПа і температурі  $-45\div-12$  °С. Це зменшує втрати вуглекислоти і спрощує її подачу, так як використовується природна різниця тиску. З ємності-накопичувача рідка вуглекислота подається через форсунки в охолоджуваний об'єм. Під час дроселювання в форсунках утворюється тверда вуглекислота у вигляді сніжинок, які можуть осідати на продукт і елементи конструкції апарата, утворюючи щільний шар. Такий шар є небажаним навіть на поверхні продукту, так як газовий прошарок на ділянці дотику різко знижує величину коефіцієнта тепловіддачі. В зв'язку з цим необхідно забезпечити сублімацію основної маси твердої вуглекислоти в газовому потоці до дотику з продуктом та елементами апарата, чому в чималій мірі сприяє температура потоку газу, яка не повинна бути нижчою  $-78$ °С (звичайно  $-60\div-70$ °С).

Під час роботи апарата в оптимальному режимі корисно використовується до 90 % вуглекислоти, що подається в апарат. В середньому питомих розхід вуглекислоти під час заморожування продуктів становить

1кг/кг, а тривалість процесу – 20–40хв.

**Хладонові апарати.** Хладони використовують для заморожування продуктів порівняно недавно. В основному це R12 і R22, очищені від шкідливих домішок. Їхня температура кипіння за атмосферного тиску становить відповідно  $-29,8$  і  $-40,8^{\circ}\text{C}$ , прихована теплота пароутворення – 166 і 233кДж/кг. Вони є інертними до конструкційних матеріалів, але в процесі тривалого контакту з вологим продуктом за температури від 7 до  $0^{\circ}\text{C}$  утворюються гідрати, що псують товарний вигляд продукту. Вартість R12 і R22 приблизно на порядок вища, ніж азоту і вуглекислоти. Відносно висока температура кипіння дає змогу конденсувати пару холодильного агента і зменшити його втрату в атмосферу до 1–1,5% маси газового потоку.

Хладонові апарати мають низку конструкційних особливостей, пов'язаних із необхідністю зменшення втрат хладона і виключення утворення гідратів. У теплоізольований корпус вводиться теплообмінник, що є випарником холодильної машини і конденсатором апарата, в якому підтримується температура кипіння  $-40\div-45^{\circ}\text{C}$ . Вікна завантаження та розвантаження розташовують у верхній частині апарата – вище конденсатора і ділянки 100%-вого вмісту газоподібного хладону. Утворенню гідратів запобігають швидким заморожуванням продукту. Тому продукт подається в ємність з рідким хладоном, де заморожується до кінцевої температури або близької до кінцевої, а доморожується в наступній ділянці.

#### **15.4. Сублімаційні установки**

Сублімаційне сушіння – це метод консервування харчових продуктів, що полягає в заморожуванні продукту та наступному його зневодненні внаслідок сублімації кристалів льоду, що утворюються в продукті.

Такий метод консервування має переваги в порівнянні з іншими. Продукт можна зберігати тривалий час (рік і більше в герметичній упаковці) в

звичайних умовах (без охолодження). Маса продукту є меншою в 4–10 раз, ніж в звичайному стані. При наводненні продукт легко вбирає воду і практично повністю відновлюються його харчові властивості, зовнішній вигляд і об'єм. Проте, в зв'язку із значною енергоємністю виробництва застосування сублімаційного сушіння для консервування продуктів є обмеженим.

Процес сублімаційного сушіння може здійснюватись за таких умов: основна частина води в продукті знаходиться в твердому стані, є різниця парціальних тисків водяної пари на ділянці фазового переходу і в оточуючому продукт середовищі. Для одержання високоякісного продукту необхідно вилучити 70–90% вологи за температури в центрі продукту  $-10\div-30^{\circ}\text{C}$ . Частину вологи, що залишилась і яка більш міцно зв'язана з продуктом, вилучають за  $-30\div-60^{\circ}\text{C}$  (залежно від властивостей продукту).

Як відомо, сублімація льоду може відбуватися за атмосферного тиску. Проте з метою інтенсифікації масоперенесення сублімаційне сушіння продуктів проводять в умовах, за яких створюється значний потенціал переносу вологи (різниця між парціальним тиском водяної пари, що відповідає температурі продукту, і парціальним тиском в середовищі, що оточує продукт). Для підтримки вказаних умов температура продукту повинна мати певне значення, яке регулюється підведенням теплоти до продукту в кількості, достатній для компенсації забраної від продукту теплоти сублімації. Парціальний тиск водяної пари в середовищі регулюється відведенням пари. За від'ємної температури волога осідає на поверхні у вигляді криги, тому цей процес часто називають десублімацією, а теплообмінник – десубліматором. Для зменшення опору перенесенню вологи від продукту до десубліматора загальний тиск (із врахуванням парціальних тисків незконденсованих газів) середовища підтримується нижче атмосферного (від 300 до 1Па). На інтенсивність процесу сублімаційного сушіння суттєво впливає товщина шару продукту, яка зазвичай не перевищує 20мм.

Промислове виробництво продуктів сублімаційного сушіння організовується відповідно до технологічного процесу. Продукт готують до



сушіння: сортують, миють, підсушують, обробляють теплом, холодом, подрібнюють і викладають на противні. Процес сублімаційного сушіння поділяється на три періоди: встановлення заданих режимних параметрів (загального тиску середовища і температури продукту), сталої швидкості сушіння і зменшення швидкості сушіння. Період встановлення режимних параметрів, за умови попереднього заморожування, починається з пониження тиску середовища в субліматорі до потрібного значення і закінчується встановленням заданої температури продукту підведенням теплоти. Тривалість цього періоду 5–15 хв. Період сталої швидкості сублімаційного сушіння характеризується найінтенсивнішим відведенням вологи з продукту і підведенням до нього теплоти. В період повільної швидкості сушіння зменшується інтенсивність вологовиділення і підведення теплоти.

Тепловому обробленню (варінню, жаренню, бланшуванню) піддають значну частину продуктів тваринного і рослинного походження. Досягають часткової або повної кулінарної готовності продукту, знищуються мікроорганізми. Багато продуктів подрібнюють, що збільшує поверхню випаровування, скорочує тривалість процесу, забезпечує однорідність шару.

Перед сушінням продукти заморожують. Швидкість заморожування впливає на тривалість сушіння, якість продукту. За повільного заморожування, наприклад у камері за температури  $-20^{\circ}\text{C}$  і вільної конвекції повітря, утворюються великі кристали льоду, що порушують структуру продукту і знижують його якість. За швидкого заморожування продукту вуглекислотою або рідким азотом утворюються малі кристали. Структура не порушується, але сублімація малих кристалів криги з продукту мало можлива, тому збільшується тривалість сушіння і знижується якість продукту під час його відновлення. За таких умов важливо забезпечити оптимальну швидкість заморожування. Оптимальна кристалічна структура криги утворюється під час заморожування продукту в повітряному морозильному апараті за температури повітря  $-30^{\circ}\text{C}$ – $35^{\circ}\text{C}$ .

Продукт можна заморожувати безпосередньо в субліматорі шляхом

відведення теплоти конвекцією за атмосферного тиску або випаровуванням вологи у вакуумі. Перший спосіб припускає, що сублиматор спочатку працює як морозильна машина, а потім як сушильний апарат. Таке рішення ускладнює конструкцію сублиматора і знижує його корисну місткість. Другий спосіб позбавлений вказаних недоліків першого, є вигідний в енергетичному і технологічному відношеннях, але для заморожування більшості продуктів неприйнятний, так як призводить до значних змін фізико-хімічних і структурних властивостей.

Продукти рідкої консистенції (молочні, фруктово-ягідні) розливають у суцільні противні, а шматкові розташовують в сітчасті чи поребрені противні, що можуть встановлюватись на підлозі або бути підвісними. Візки з продуктом завантажують в сублиматор, який може бути циліндричної або прямокутної форми. Об'єм по центрі камери виділяється для розміщення візків з продуктом. У безпосередній близькості від продукту або навіть в контакті з ним знаходяться нагрівальні елементи системи теплопідведення.

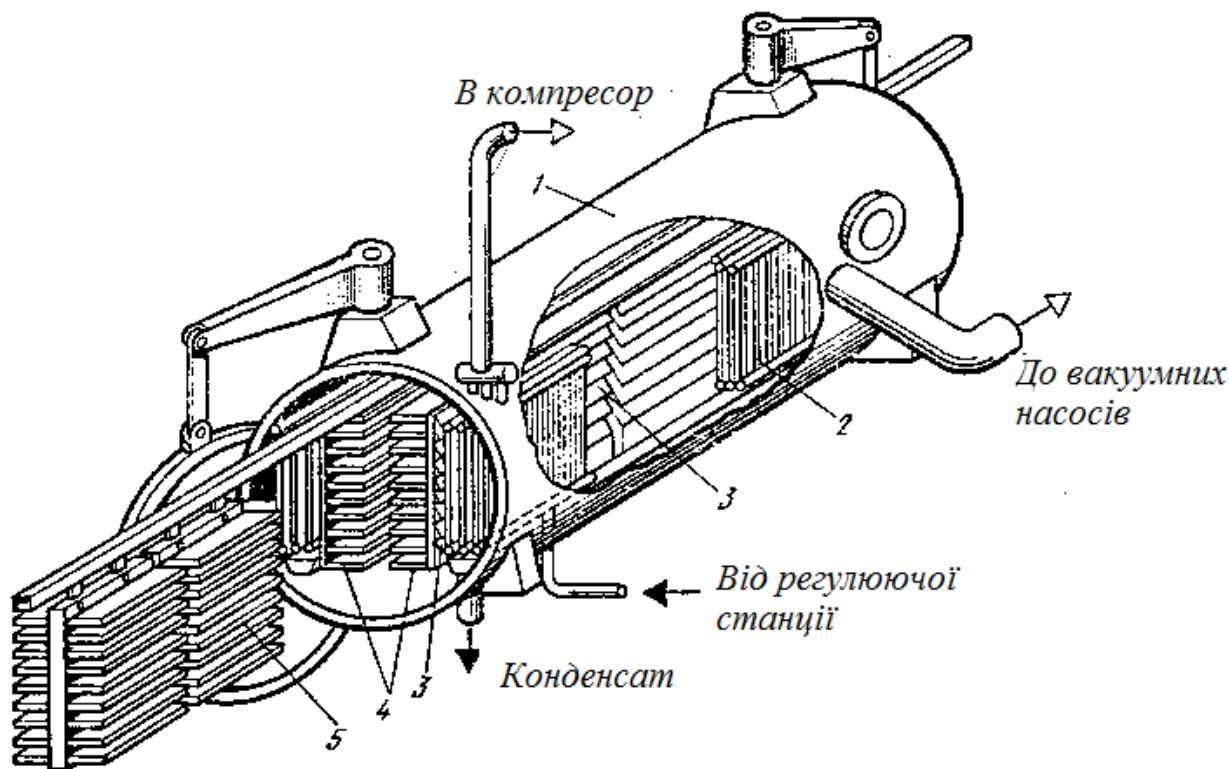


Рис. 15.14. Сублимаційна установка СУ-3: 1 – апарат; 2 – секція десублиматора;

3 – жалюзі; 4 – нагрівальні панелі; 5 – візки

Нагрівальний елемент може бути у вигляді плити, в середині якої циркулює рідкий теплоносієм температурою 120–170 °С. Панель складається з трубчастих електронагрівачів (ТЕНів) або нагрівальних електроламп. У середині камери можуть розміщуватись секції десубліматора, які є випарником холодильної машини, призначені тільки для відведення вологи або для заморожування продукту і наступного відведення водяної пари. Розміщення десубліматора в камері збільшує масоперенесення за інших рівних умов, але знижує корисну вантажомісткість камери. Розміщення секцій десубліматора в окремому апараті підвищує гнучкість роботи установки, так як за відносно простого конструктивного рішення секції можуть по черговому звільнятися від криги, не порушуючи режиму роботи установки. При цьому знижується швидкість сушіння внаслідок зростаючого опору масоперенесенню.

Секції десубліматора-випарника виготовляють з труб або плоских елементів з каналами. Застосовують безпосереднє охолодження, що потребує менших затрат, ніж при проміжному холодоносієві. Як і будь-який теплообмінник, десубліматор-випарник повинен бути компактним і працювати ефективно: внутрішня поверхня повинна повністю омиватися рідким холодильним агентом, а зовнішня – інтенсивно і в максимальній кількості акумулювати кригу. Добрі результати дає послідовне, по чергове включення в режим виморожування секцій поверхні, починаючи з останньої за ходом руху водяної пари. Крига з поверхні десубліматора повинен усуватися своєчасно і бажано без порушення режиму сублімаційного сушіння.

Температура кипіння холодильного агента –40:–60°С, що забезпечується парокомпресійними холодильними машинами. Вакуумна система вилучає з апаратів незконденсовані гази і частково водяну пару за допомогою механічних вакуумних насосів: пускових і робочих. Пускові насоси мають високу продуктивність і забезпечують швидке зниження тиску до заданої величини, а робочі – підтримування цього тиску в процесі сушіння.

Сублімаційні установки можуть бути періодичної і поточно-циклічної

дії. Останні є складними за конструкцією і в експлуатації. Їхнє використання економічно доцільне за масового виробництва вузького асортименту продуктів. У промисловості застосовують установки періодичної дії (рис.15.14). Така установка складається з апарату циліндричної форми, систем транспортування продукту, теплопідведення, вологовідведення, вакуумного і автоматичного керування. Апарат виконує функції сублиматора і десублиматора і має кришки для завантаження і вивантаження візків з продуктом, монорейковий підвісний шлях для розміщення візків, нагрівальні панелі, вертикально-трубні батареї десублиматора з піддонами для вилучення талої води і жалюзі. Система теплопідведення складається з тиристорних блоків живлення і електричних нагрівальних панелей. Система вологовідведення централізованого холодозабезпечення підтримує в секціях десублиматора температуру кипіння аміаку  $-35^{\circ}\text{C}$ . Ліва і права частини систем теплопідведення і вологовідведення мають автономне керування. Це дає змогу одночасно сушити продукт різного виду: з одного боку за однією програмою, з іншого – за другою, та використовувати в роботі одну підсистему, якщо друга не працює. Вакуумна система, що містить пускові і робочі механічні вакуумні насоси, забезпечує робочий тиск 160Па.

Під час сушіння м'яса технологічний процес здійснюється наступним чином. М'ясо, заморожене в апараті, ріжуть на шматки товщиною 12мм і вкладають на противні, що встановлюються на консольні полицки візків, які завантажують у апарат. Кришку апарата закривають і вмикають пускові вакуумні насоси та систему вологовідведення. Приблизно за 10хв. тиск в апараті знижується до 200–160Па, а температура продукту до  $-25\div-30^{\circ}\text{C}$ . Вмикаються нагрівальні панелі, вимикаються пускові і вмикаються робочі вакуумні насоси. Після закінчення сушіння (через 8–9 год.) візки з продуктом виштовхують у відділення розвантаження, де підтримується низька відносна вологість (не більше 40 %), і продукт запаковують. Противні і візки піддають санітарному обробленню і завантажують продуктом.

## ЛІТЕРАТУРА

### Основна

1. Мещеряков Ф.Е. Основы холодильной техники и холодильной технологии. - М.: Пищевая промышленность, 1975.
2. Н.Я.Барулин. Применение холода в пищевой промышленности. -М.: Пищевая промышленность, 1979. -312с.
3. Н.Д.Кочетков. Холодильная техника. -М.: Пищевая промышленность, 1966. -280с.
4. Б.Г.Маринюк Аппараты холодильных машин. -М.: Пищевая промышленность, 1995. -315с.
5. В.Ф.Лебедев. Холодильная техника. -М.: Агропромиздат, 1986. -335с.
6. Б.К.Явнель. Курсовое и дипломное проектирование холодильных установок и систем кондиционирования воздуха. -М.: Агропромиздат, 1989с.
7. Е.С.Курилев. Холодильные установки. -М.: Агропромиздат, 1975. -622с.
8. З.С.Шлипченко. Насосы, компрессоры, вентиляторы. -К.: Техника, 1976. -622с.
9. И.С.Падылькес. Свойства холодильных агентов. -М.: Агропромиздат, 1974. -180с.
10. Э.Альмаши. Быстрое замораживание пищевых продуктов. -М.: Легкая и пищевая промышленности, 1981. -407с.
11. А.Т.Ионов. Автоматизированные, роторные, морозильные агрегаты для замораживания пищевых продуктов. -М.: Пищевая промышленность, 1981. -175с.
12. Рой Дж.Досаат. Основы холодильной техники. -М.: Агропроиздат, 1984, -412с.
13. Ю.И.Фримштейн. Промышленные холодильные установки. -М.: Пищевая промышленность, 1974. -430с,
14. Семиков Ф.П., Ужек Г.Л. Ремонт и монтаж тепломеханического оборудования. -К.: Пищевая промышленность, 1981. -325с.

### Додаткова

16. Мальгина Е.В., Мальгин Ю.В. Холодильные машины и установки. -М.: Пищевая промышленность, 1973.
17. Зеликовский И.Х., Каплан Д.Г. Малые холодильные машины и установки /справочник в двух частях: малые холодильные машины, малые холодильные установки/. - М.: Пищевая промышленность, 1978.
18. Кондрашова Н.Г. Холодильно-компрессорные машины и установки. – К.: Выща школа, 1966.
19. Чумак И.Г. Безопасность труда при эксплуатации холодильных установок. -К.: Пищевая промышленность, 1988. -290с.

20. Богданов С.М., Куприянова. Задачник по термодинамическим расчётам в пищевой и холодильной промышленности. -М.: Пищевая промышленность, 1983.-215с.
21. М.Бежанншвили. Холодильные компрессоры. Справочник. -М.: Легкая промышленность, 1981. -450с.

\*\*\*\*\*

Друк ФОП Паляниця В.А.

Свідоцтво про реєстрацію № 924385 від 18.08.2008 р.

М. Тернопіль, віл. Б. Хмельницького, 9а, оф.38.

Тел.. (0352)528-777.