

# ХОЛОДИЛЬНЕ УСТАТКУВАННЯ

## Фізичні принципи отримання низьких температур

### 1 Поняття теплоти і холоду

Всі тіла в природі складаються з молекул. Молекули перебувають у безперервному хаотичному русі та об'єднані силами взаємного притягання. Подібно до інших рухомих тіл, молекули володіють *кінетичною енергією* ( $E_k$ ), а сила притягання між ними означає присутність запасу *потенціальної енергії* ( $E_p$ ). Сума кінетичної і потенціальної енергії молекул утворює *внутрішню енергію тіла*:

$$E_v = E_k + E_p$$

Під час самопливного *термодинамічного процесу* внутрішня енергія може частково передаватися від одного тіла (групи тіл) до іншого тіла (групи тіл) у формі *теплоти*. Таким чином, *передача теплоти є одним із способів переходу частини внутрішньої енергії від одного тіла до іншого*. Особливістю цієї форми передачі енергії є те, що вона здійснюється за допомогою енергетичної взаємодії молекул, які беруть участь у процесі, без видимого руху тіл.

З точки зору *молекулярно-кінетичної теорії перехід теплоти* – це передача молекулами одного тіла частини своєї кінетичної енергії іншому тілу.

Оскільки *теплота – це частина внутрішньої енергії, яка передається в термодинамічному процесі*, то прийнято говорити, що теплота підводиться або відводиться від тіла. Енергія, відведена у формі теплоти (відведена теплота), вважається *від'ємною*, а підведена у формі теплоти (підведена теплота) – *додатною*.

Згідно всього сказаного, сформулюємо таке визначення: *кількість теплоти – це ступінь зміни внутрішньої енергії, яка перейшла від одного тіла до іншого внаслідок енергетичної взаємодії молекул без видимого руху самих тіл*.

*Передача частини внутрішньої енергії тіла, яка супроводжується видимим направленим рухом тіла, називається роботою*. Наприклад, внутрішня енергія газоподібних речовин може змінюватися під час їхнього розширення з подоланням опору зовнішніх сил, а також внаслідок стискання під дією зовнішніх сил. При цьому змінюється взаємне розміщення молекул газу та характер їх руху.

Отже, **передача теплоти і робота** є різними формами передачі внутрішньої енергії під час термодинамічного процесу. Теплота і робота для певної кількості речовини вимірюється в джоулях (Дж, кДж).

Таким чином, **поняття теплоти можна кількісно оцінити** (Дж), а **поняття холоду є умовним** і застосовують в тому випадку, коли теплота відводиться від одного тіла до іншого або в навколишнє середовище.

## 2 Поняття "робоче тіло" та параметри, які характеризують його стан

Для роботи холодильної машини необхідно мати **робоче тіло – речовину, яка здатна приймати та віддавати теплоту, змінюючи при цьому свій стан**. Як робочі тіла використовують переважно рідини з низькою температурою кипіння і порівняно невисоким значенням тиску пари.

Стан речовини характеризується певними значеннями різних фізичних величин, які називаються **параметрами стану**. Основні параметри стану такі:

- **температура**  $T$ , К
- **тиск**  $p$ , Па
- **питомий об'єм**  $v$ , м<sup>3</sup>/кг

**Температура** – це параметр теплового стану, значення якого визначається середньою кінетичною енергією молекул даного тіла. **Поняття температури** є статистичним і стосується лише тих тіл, які складаються з великої кількості молекул.

Оскільки фізичного еталону температури не існує, температурна шкала представлена набором декількох **фіксованих температур** – так званих **реперних точок**. Реперними точками прийнято температури фазових переходів: "замерзання"- "плавлення" і "кипіння"- "конденсація".

Для оцінки величини температури широко використовується стоградусна температурна шкала Цельсія (1742 р.). Один градус даної шкали дорівнює 1/100 температурного інтервалу між температурою плавлення водяного льоду (0 °С) і температурою кипіння води (100 °С).

В зарубіжній технічній літературі зустрічаються також температурні шкали Фаренгейта (°F) та Ренкіна (°Ra), які пов'язані між собою та шкалою Цельсія так:

$$n \text{ } ^\circ\text{C} = \frac{5}{9} (n \text{ } ^\circ\text{F} - 32) = \frac{5}{9} n \text{ } ^\circ\text{Ra} - 273,15$$

В середині XIX ст. У. Томсон (Кельвін) обґрунтував існування абсолютної термодинамічної шкали температури. За одиницю було прийнято К (Кельвін). Згідно даної шкали, 1 К = 1 °С, проте точки відліку шкал відрізняються:

$$n \text{ } ^\circ\text{C} = n \text{ } ^\circ\text{K} - 273,15 = n \text{ } ^\circ\text{C} + 273,15$$

**Тиск** рідини або газу – це сила  $F$ , яка діє на одиницю поверхні тіла  $S$  у напрямку, перпендикулярному цій поверхні:

$$p = \frac{F}{S}$$

де  $p$  – тиск, Па;  $F$  – сила, Н;  $S$  – площа поверхні, м<sup>2</sup>.

В системі СІ тиск вимірюється в паскалях ( $1\text{Па} = 1\text{Н}/\text{м}^2$ ). На практиці використовується мегапаскаль ( $1\text{МПа} = 10^6\text{Па}$ ) та позасистемні одиниці – технічна атмосфера (ат), бар,  $\text{кг}/\text{см}^2$ .

Залежно від початкового тиску розрізняють декілька систем відліку.

Тиск, який вимірюють від абсолютного вакууму, називають **абсолютним**  $p_a$ .

Тиск, представлений як різниця між абсолютним ( $p_a$ ) і барометричним ( $p_b$ ), називається **надлишковим**  $p_n$

$$p_n = p_a - p_b$$

Тиск, нижчий барометричного називається **вакууметричним**  $p_v$ .

**Питомий об'єм** – це об'єм речовини, віднесений до її маси. Питомий об'єм вимірюється в  $\text{м}^3/\text{кг}$ .

**Параметри стану пов'язані між собою залежністю:**

$$f(p, v, T) = 0$$

З даного рівняння випливає:

- можливо визначити фізичний стан тіла, якщо відомі величини, які характеризують його стан;
- якщо для даного тіла відомі два параметри стану, то можна розрахувати і третій.

Якщо робоче тіло змінює свій стан і його параметри набувають інших значень, то змінюється і величина внутрішньої енергії. Таким чином, **внутрішня енергія також є параметром стану**.

Процес зміни стану робочого тіла називається **термодинамічним процесом**.

Процеси бувають **рівноважні** та **нерівноважні**. Після протікання рівноважного процесу в одному напрямку, його можна провести в протилежний і повернути тіло в початковий стан, тому **рівноважні процеси є оборотними**. Після протікання нерівноважних процесів тіло не повертається в початковий стан, оскільки в реальних умовах існує значна різниця тиску і температур між зовнішнім середовищем і тілом, тому **реальні нерівноважні процеси є необоротними**.

### **3 Загальний принцип роботи холодильних машин**

Згідно другого закону термодинаміки, для того, щоб передати теплоту від холоднішого тіла до більш нагрітого, потрібно затратити енергію. Для здійснення цього процесу застосовують холодильні машини. **Холодильна машина – це комплекс елементів, які забезпечують відведення теплоти від об'єкта охолодження**.

Всі холодильні машини працюють за схемою, наведеною на рис. 1.1.

До об'єкта, що охолоджується з навколишнього середовища постійно підводиться теплота  $Q_T$ . Щоб температура об'єкта не підвищувалася холодильна машина повинна постійно відводити від нього теплоту  $Q_0$ . Якщо  $Q_0 > Q_T$ , то температура об'єкта буде знижуватися.

Температура ділянки холодильної машини, яка контактує з об'єктом (**низький температурний рівень**) повинна бути нижчою за температуру об'єкта на  $5 \dots 10\text{С}$ . Тоді теплота від об'єкта буде самопливом переходити машині без затрати роботи. **Високий температурний рівень** машини на  $5 \dots 10\text{С}$  вищий за температуру навколишнього середовища, тому теплота самопливом від машини передається у довкілля.

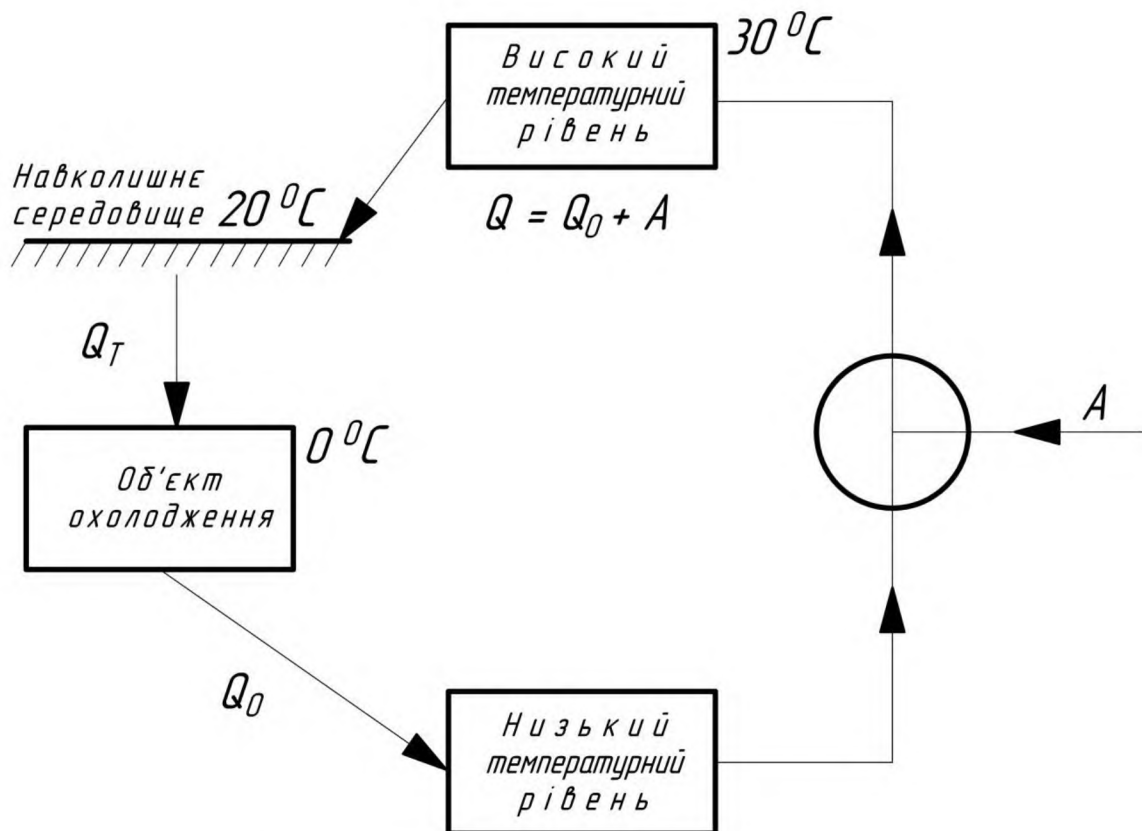


Рис. 1.1 Загальний принцип роботи холодильних машин

Для створення різниці температурних рівнів витрачається робота  $A$ . Еквівалентна їй енергія разом з відведеною теплотою  $Q_0$  передається у навколишнє середовище.

Посередником в даному процесі охолодження виступає холодильний агент, який сприймає теплоту від об'єктів охолодження і передає її у навколишнє середовище – воді чи повітрю. При цьому робоче тіло, яке циркулює у холодильній машині, здійснює круговий процес і повертається у початковий стан, що дає змогу підтримувати безперервне охолодження за допомогою одного і того ж об'єму робочого тіла.

Машини, в яких здійснюється круговий процес можна використовувати не лише для охолодження, а й для теплопостачання. Такі машини називаються **тепловими насосами**.

*Машина працює по холодильному циклу, якщо тепло переноситься від джерела низької температури в навколишнє середовище.*

*При перенесенні тепла від НС до джерела з більшою температурою холодильна машини працює як тепловий насос і використовується для теплопостачання. В цьому випадку робоче тіло сприймає теплоту  $Q_0$  навколишнього середовища і здійснює круговий процес, передаючи теплоту об'єкту нагрівання.*

*Якщо тепло переноситься від джерела низької температури до джерела з температурою вищою, ніж у навколишньому середовищі, то машина працює за комбінованим циклом і може використовуватися як для охолодження, так і для нагрівання.*

## 4 Характеристика способів штучного охолодження

Розрізняють *природне* та *штучне охолодження*. Охолодити нагріте тіло природним шляхом можна лише до температури навколишнього середовища, в якому перебуває тіло. Досягти менших температур можливо штучним способом за допомогою холодильних машин. *Холодильна машина знижує температуру тіла відносно навколишнього середовища та підтримує її впродовж тривалого часу в умовах незначного запасу робочої речовини.*

Низькі температури умовно поділяються так:

- область помірного холоду (до  $-103\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- область глибокого охолодження (від  $-103\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-203\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- криогенні температури (від  $-203\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-272,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- наднизькі температури (від  $-272,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-272,9992\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Для отримання низьких температур застосовують процеси, які супроводжуються поглинанням теплоти:

- фазовий перехід речовини (плавлення, кипіння, сублімація);
- адіабатичне дроселювання газу (ефект Джоуля-Томсона);
- вихровий ефект Ранка-Хільша;
- термоелектричний ефект Пельтьє.

### 4.1 Охолодження за допомогою процесів фазового переходу

Існує три агрегатних стани речовини: тверде тіло, рідина і газ.

*Тверде тіло* має жорстку молекулярну структуру, положення кожної молекули зафіксовано, а самі молекули здійснюють коливальні рухи відносно цього положення. Тверда речовина зберігає свої розміри, форму та майже не стискається.

*Рідке тіло* не має жорсткої молекулярної структури, молекули мають більше свободи для переміщення. Речовина в рідкому стані набуває форми ємності, в якій розміщена і практично не стискається.

Молекули *газоподібного тіла* не пов'язані між собою силами взаємного притягання, постійно переміщуються, безперервно зіштовхуються між собою та стінками ємності. Газоподібна речовина легко стискається.

Речовина може переходити з одного агрегатного стану в інший. *Особливістю усіх процесів фазового переходу є постійна температура.* Для здійснення процесів фазового переходу витрачається певна кількість теплоти.

Кількість теплоти, яка необхідна для фазового переходу 1 кг речовини з одного агрегатного стану в інший, називається *питомою теплотою фазового переходу*, кДж/кг.

*Охолодження відбувається під час зміни агрегатного стану речовини, яке супроводжується поглинанням теплоти з навколишнього середовища: кипіння, плавлення, сублімація.*

*Кипіння* – випаровування рідини, яке відбувається по всьому її об'єму. Температура кипіння залежить від тиску. Змінюючи тиск можна суттєво впливати на температуру кипіння. Зворотній до кипіння процес називається *конденсацією*, яка, на відміну від кипіння, супроводжується виділенням теплоти. Сукупність

процесів кипіння та конденсації є основою для роботи компресійної холодильної машини.

**Плавлення** – перехід твердих тіл в рідкий стан. Для охолодження за допомогою плавлення використовують водяний лід.

Для використання льоду як охолоджувача температура його плавлення повинна бути нижчою за температуру середовища, яке охолоджують.

Фізичні властивості льоду при  $0^{\circ}\text{C}$  і атмосферному тиску такі:

- температура плавлення  $0^{\circ}\text{C}$ ;
- теплота плавлення  $335 \text{ кДж/кг}$
- теплоємність  $2,1 \text{ кДж/(кг}\times\text{K)}$

Кількість теплоти, яку можна відвести за допомогою льоду і льодяної води розраховується так:

$$Q_{\text{л}} = Q_{\text{н}} + Q_{\text{пл}} + Q_{\text{нв}} = c_{\text{л}} \times G \times t_{\text{л}} + q_{\text{пл}} + c_{\text{в}} \times G \times t_{\text{в}}, \text{ де}$$

$Q_{\text{л}}$  – теплота, витрачена на нагрівання льоду від температури  $t_{\text{л}}$  до  $0^{\circ}\text{C}$ , кДж

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

$Q_{\text{нв}}$  – теплота, необхідна для нагрівання льодяної води до температури  $t_{\text{в}}$ , кДж

$c_{\text{л}}$ ,  $c_{\text{в}}$  – питомі теплоємності льоду і води, кДж/кг $\times$ К

$G$  – маса льоду або води, кг

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

Льодяне охолодження може здійснюватися безпосереднім охолодженням і з використанням проміжного теплоносія (вода, повітря).

При безпосередньому охолодженні лід знаходиться у контакті з об'єктом. Для збільшення поверхні контакту з продуктом лід подрібнюють.

При використанні примусової циркуляції, повітря за допомогою вентиляторів пропускається через шар подрібненого льоду. При цьому значно інтенсифікується теплообмін, але зростають витрати електроенергії.

Лід можуть використовувати природний і штучний.

**Природний лід** заготовлюють шляхом вирізання крупних блоків із льоду, який утворюється у водоймах, пошарового наморожування води на горизонтальних поверхнях. Найкращим для харчових цілей вважається гренландський або антарктичний лід, як найбільш чистий. Лід вкривають насипною ізоляцією і зберігають на спеціальних майданчиках або у льодосховищах з постійною і тимчасовою теплоізоляцією.

**Штучний лід** отримують заморожуванням чистої прісної або морської води в льодогенераторах. Якість льоду, форма, розмір та спосіб отримання залежать від цільового призначення.

Для виготовлення матового льоду використовують питну воду без будь-якого її оброблення в процесі заморожування. На відміну від природного, штучний лід має молочний колір, зумовлений наявністю великої кількості пухирців повітря, які утворюються під час перетворення води в лід. Пухирці зменшують проникність льоду для світлових променів, і він стає непрозорим.

Прозорий штучний лід на вигляд нагадує скло. Під час його отримання в форму наливають воду і за допомогою форсунок продувають крізь неї стиснене повітря, яке захоплює та витягує з води пухирці повітря.

Лід з бактерицидними добавками призначений для охолодження риби, м'яса, птиці та деяких видів овочів при безпосередньому контакті. Бактерицидні добавки знижують кількість мікроорганізмів в продуктах.

При змішуванні подрібненого водяного льоду з різними солями крім теплоти танення льоду поглинається теплота розчинення солі у воді, що дає змогу значно знизити температуру суміші. Розчин може бути охолоджений до криогідратної точки.

**Недолік льодового охолодження:** за допомогою льоду не можна отримати температуру в об'ємах, які охолоджуються, нижчу з  $8^{\circ}\text{C}$ , що не дає змоги використовувати його для тривалого зберігання продуктів.

**Льодосольове охолодження.** Для того, щоб отримати нижчі температури, ніж при охолодженні чистим льодом, застосовують лід у суміші з сіллю. У такій суміші одночасно здійснюються процеси розчинення солі і плавлення льоду з утворенням води і подальшим розчиненням солі. На плавлення льоду і розчинення солі витрачається теплота суміші, тому її температура знижується. При збільшенні концентрації солі температура плавлення і замерзання льодосолюватої суміші зменшуються. Найменша температура фазового переходу суміші називається **криогідратною точкою**, а концентрація солі, яка відповідає цій температурі – евтектичною (рис. 1.2).

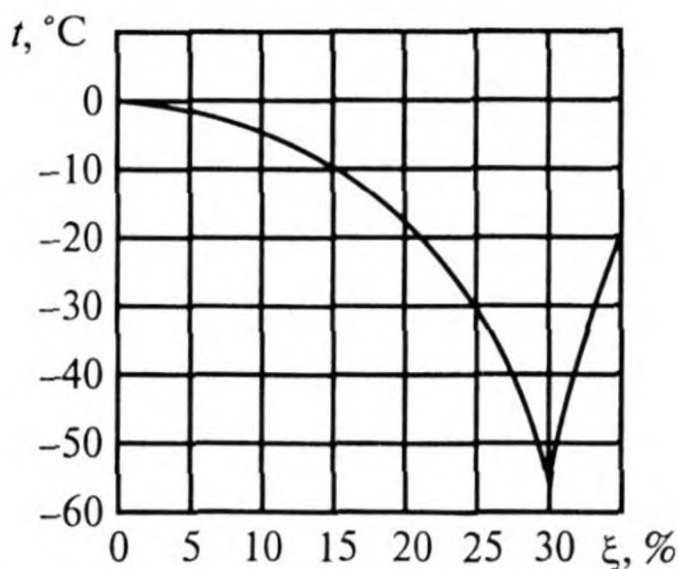


Рис. 1.2 Діаграма стану системи хлорид кальцію-лід

В криогідратній точці всі три фази льодосолюватої суміші (розчин, сіль, лід) знаходяться у термодинамічній рівновазі. При подальшому підвищенні концентрації солі в суміші температура плавлення не зменшується, а збільшується.

Таким чином, суть льодосолюватої охолодження полягає у додаванні неорганічних солей до льоду для зниження температури його плавлення. Чим менша температура плавлення, тим більше поглинається теплоти з навколишнього середовища.

Евтектичним розчином заповнюють металеві місткості (до 90-94 % їх об'єму), заморожують при температурах, нижчих за температуру плавлення евтектика, після чого розміщують їх в об'ємах, які охолоджуються. Там при поглинанні тепла евтектик тоне при сталій температурі, забираючи теплоту з оточуючого середовища.

**Таблиця 1.1 – Характеристика льодосоляної суміші (NaCl)**

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

Змінюючи місткість ємностей та їх кількість можна забезпечити охолодження достатньо великих об'ємів камер. Крім того, вони можуть бути використані як додаткові джерела холоду в години пікових навантажень у стаціонарних холодильниках.

**Сублімація** – перетворення твердих тіл в газоподібний стан, обминаючи рідку фазу. Для охолодження таким способом використовують твердий діоксид вуглецю.

Як охолоджуюче середовище сухий лід має значні переваги перед водяним льодом: холодопродуктивність на одиницю маси в 1,9 , на одиницю об'єму в 7,9 разів більша; при атмосферному тиску сухий лід переходить в газоподібний стан, обминаючи рідку фазу, що виключає зволоження поверхні продукту. Внаслідок низької температури сублімації сухого льоду (-78,9 °С) та виділенню газоподібного діоксиду вуглецю знижується концентрація кисню над поверхнею продукту, створюються несприятливі умови для розвитку мікроорганізмів.

Сухий лід укладають на поверхню упаковок продуктів та між ними і використовують як охолоджувальне середовище для зберігання морозива, фруктів та ягід.

Здійснити охолодження за допомогою плавлення льоду або сублімації вуглекислого газу можна лише маючи значні запаси робочої речовини. Тому під час машинного охолодження частіше за все використовують здатність деяких робочих тіл кипіти за низьких температур. Забезпечити безперервне охолодження можна при використанні однієї і тієї ж кількості холодильного агента, якщо після отримання холодильного ефекту повернути робоче тіло в початковий стан. Зниження тиску робочого тіла дає змогу знизити температуру його кипіння до потрібної величини. **Зниження температури кипіння холодильного агента збільшує кількість поглинутої ним теплоти.**

Основні вимоги до газів, які обрано робочими тілами холодильних машин:

- зріджений газ під час кипіння повинен поглинати якомога більше теплоти, тобто мати високу теплоту пароутворення;
- під час переходу з рідкого стану в газоподібний не повинна утворитися велика кількість парів;



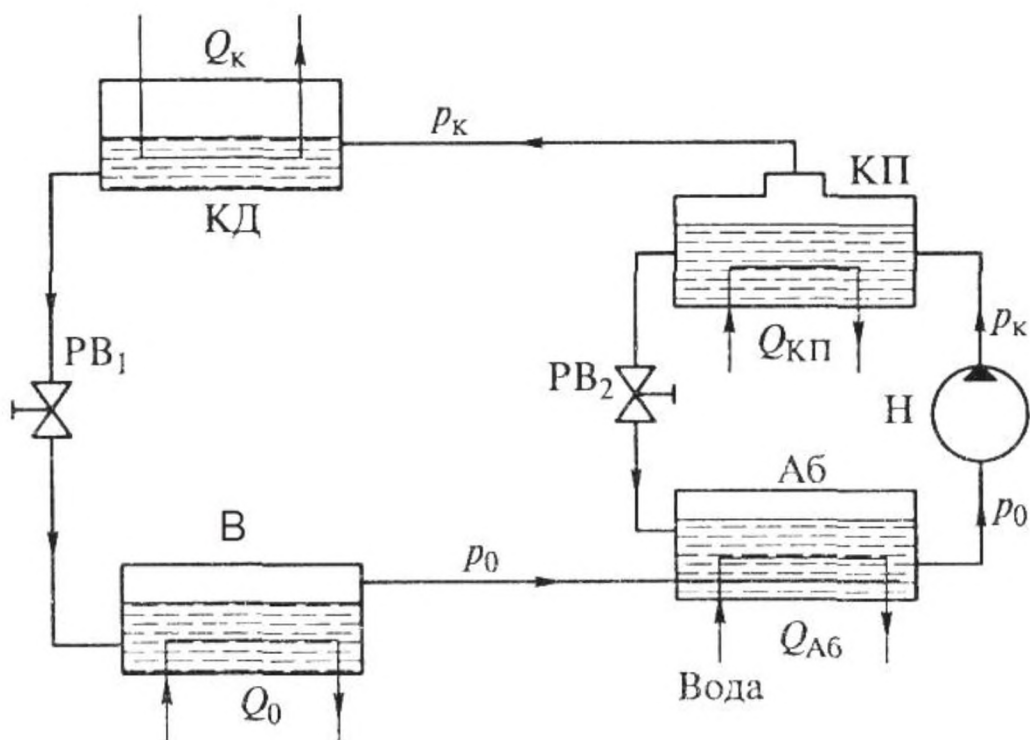
- кипіння зрідженого газу та перетворення його назад в рідкий стан повинне відбуватися за низького тиску і температури.

Фазовий перехід робочого тіла для отримання низьких температур використовується в парокompресійних, абсорбційних, сорбційних та пароежекторних холодильних машинах.

**Компресійні парові машини.** Більшість діючих сьогодні холодильних машин – парокompресійні, основними елементами яких є випарник, компресор, конденсатор, регулювальний вентиль та прилади автоматики. За типом компресора такі машини поділяються на поршневі, відцентрові, гвинтові та ротаційні. Докладніше про будову та принцип роботи компресійних холодильних машин описано в наступній лекції.

**Абсорбційні холодильні машини.** Абсорбційні холодильні машини відрізняються від компресійних тим, що їх робота здійснюється із затратами теплової енергії. Іншими словами, відведення теплоти від об'єкта в навколишнє середовище відбувається за рахунок підведення зовнішньої енергії у вигляді теплоти, а не роботи.

Схема абсорбційної холодильної машини наведено на рис. 1.3.



**Рис. 1.3** Схема абсорбційної холодильної машини

*В* – випарник; *Аб* – абсорбер; *Н* – насос; *КП* – генератор (кип'ятильник);  
*КД* – конденсатор; *PB*<sub>1</sub> і *PB*<sub>2</sub> – регулювальні (дросельні) вентилі

Робочим тілом абсорбційної холодильної машини є бінарний розчин (аміак-вода або вода-бромід літію). За однакового тиску компоненти бінарного розчину мають різну температуру кипіння. **Речовину з меншою температурою кипіння називають холодильним агентом, а з більшою – абсорбентом.** При викорис-

танні розчину аміак-вода холодильним агентом виступає аміак, а у випадку застосування суміші вода-бромід літію холодильним агентом є вода.

Водоаміачні машини використовують для отримання відносно низьких температур (до  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), а бромистолітієві – для більш високих.

Холодильний агент кипить у випарнику  $B$  за рахунок теплоти  $Q_0$ , яка відводиться від об'єму, який охолоджується. Пароподібний холодильний агент інтенсивно поглинається в абсорбері  $Ab$  слабким водоаміачним розчином. Поглинання супроводжується виділенням теплоти  $Q_{Ab}$ , яка відводиться в навколишнє середовище або охолоджувальну воду. Насичений аміаком розчин із абсорбера  $Ab$  перекачується насосом  $H$  в генератор (кип'ятильник)  $KП$ . Генератор нагрівається від зовнішнього джерела теплоти ( $Q_{KП}$ ) і з розчину випаровується чистий холодильний агент – аміак. Збіднений розчин через вентиль  $PВ_2$  відводиться в абсорбер з одночасним зниженням тиску від  $p_k$  до  $p_0$ . Пароподібний холодильний агент з тиском  $p_k$  подається в конденсатор  $КД$  і при відведенні теплоти конденсується (переходить із пароподібного стану в рідкий). Рідкий холодильний агент через вентиль  $PВ_1$  подається у випарник  $B$  зі зниженням тиску від  $p_k$  до  $p_0$ .

За наведеною схемою працюють холодильні машини великих підприємств харчової та хімічної промисловості.

На підприємствах торгівлі, в готелях та побуті використовують абсорбційні холодильні машини, які працюють за безнасосною схемою (рис. 1.4).

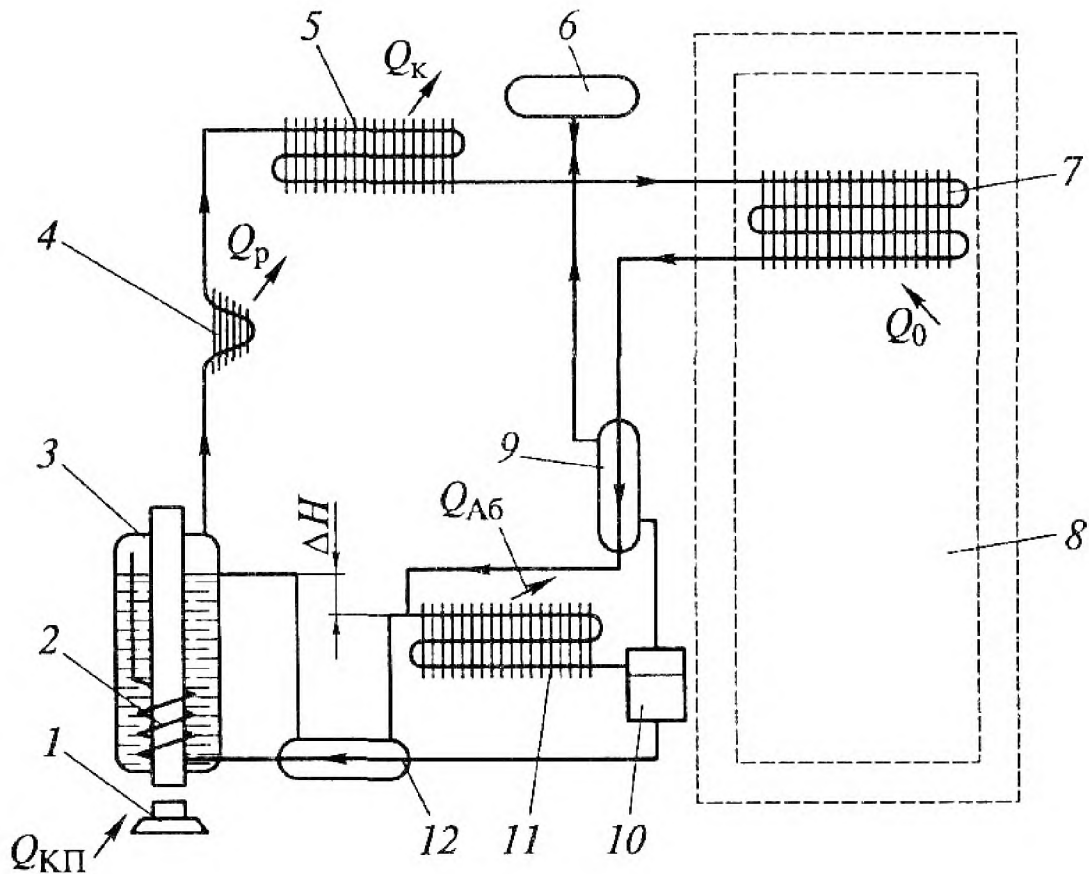
Функцію насоса для створення різниці тисків конденсації  $p_k$  і кипіння  $p_0$  виконує інертний до холодильного агента та абсорбента газ – водень.

Абсорбційні холодильні машини перспективні з точки зору економії паливно-енергетичних ресурсів, оскільки дають змогу використовувати вторинні ресурси (відпрацьована пара, гаряча вода), теплоту ТЕЦ в неопалювальний період. В абсорбційних машинах не використовуються хлорфторвуглеводні, які негативно впливають на озоновий шар. Використання таких холодильних машин дозволяє уникнути викидів машинного мастила в навколишнє середовище.

Абсорбційні холодильні машини працюють при температурі зовнішнього джерела теплоти  $70 - 180\text{ }^{\circ}\text{C}$  (частіше  $155 - 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Діапазон температур до  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  при цьому не реалізується, відповідно теплота частіше за все викидається в атмосферу. Проте в такому діапазоні температур можуть працювати сорбційні холодильні машини.

**Сорбційні холодильні машини.** В даному типі машин використовують робочі суміші з повною взаємною розчинністю компонентів (ацетон і пропанбутанова суміш, водні розчини роданіду амонію тощо). За допомогою сорбційних машин можливо отримувати холод на рівні  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Область застосування сорбційних холодильних машин – побутові холодильники, кондиціонери та автомобільний транспорт. В побутових холодильниках і кондиціонерах можливе використання енергії сонячного випромінювання за допомогою сонячних колекторів. Сорбційні холодильні машини, встановлені на холодильниках агропромислового комплексу і торгівлі, дають змогу додатково виробляти холод використанням теплоти перегріву парів холодильного агента і теплоти охолоджуючого мастила гвинтових компресорів.



**Рис. 1.4** Схема безнасосної абсорбційної холодильної машини

1 – нагрівач; 2 – термосифон; 3 – кип'ятильник (генератор); 4 – ректифікатор;  
 5 – конденсатор; 6 – збірник водню; 7 – випарник; 8 – холодильна шафа;  
 9 – теплообмінник; 10 – збірник; 11 – абсорбер; 12 – теплообмінник

#### 4.2 Адіабатичне дроселювання газу (ефект Джоуля-Томсона)

*Дроселювання виникає, коли на шляху потоку газу чи рідини встановлюється перешкода у вигляді пористої перегородки, вентиля чи просто звуження самого перерізу потоку діафрагмою, а далі потік знову рухається у ширшому перерізі.*

*Адіабатним називається процес, що проходить лише за рахунок внутрішньої енергії тіла, без підводу теплоти ззовні і без передачі її навколишньому середовищу.*

*Адіабатичне дроселювання – це процес необоротного розширення газу або рідини після проходження його через перегородку з малим прохідним перетином (дросель, пориста перегородка) без здійснення корисної зовнішньої роботи і теплообміну з навколишнім середовищем. Іншими словами, газ або рідина швидко переходять від зони високого тиску до низького (рис. 1.5).*

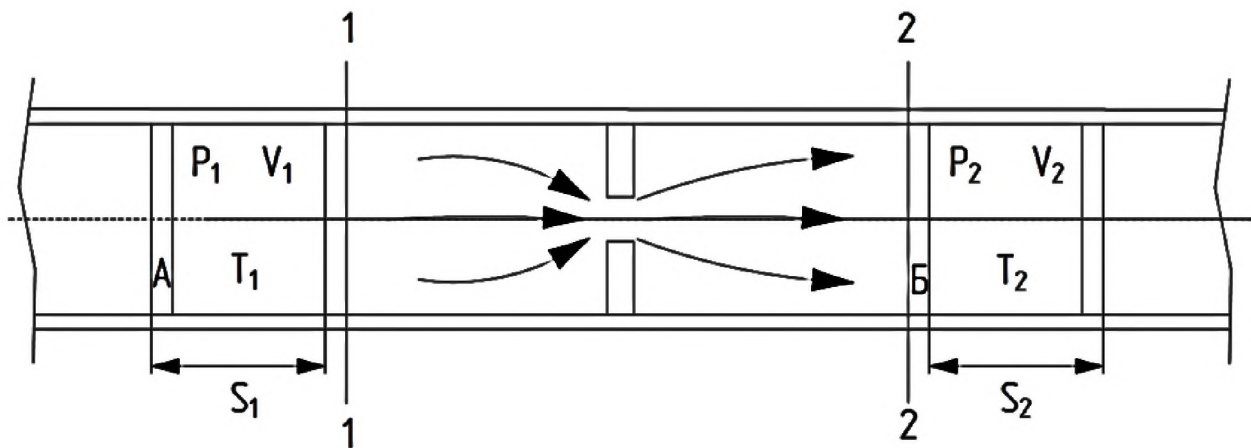


Рис. 1.5 Схема адиабатичного дроселювання газу

Залежно від властивостей і стану речовини, яка дроселюється, її внутрішня енергія ( $E_v$ ) за дросельною ділянкою може стати більшою або меншою. Параметри стану речовини при цьому змінюються. Відповідно кінцева температура речовини може збільшитися, знизитися або залишитися без змін, порівняно з початковою. Точка, яка відповідає початковому стану речовини, в якій температура при адиабатичному дроселюванні не змінюється, називається **точкою інверсії**, а температура, що відповідає цій точці – **температурою інверсії**.

Більшість газів, окрім водню і гелію, мають достатньо високу температуру інверсії (600 °C і вище), тому **практично для всіх газоподібних речовин адиабатичне дроселювання призводить до зниження температури**.

Зміна  $E_v$  відбувається в результаті механічної взаємодії речовини з середовищем. Дану взаємодію можна умовно розглядати як рух двох поршнів А і Б разом з потоком речовини (рис. 1.5).

Ліворуч від поршня А на нього діє середовище. В результаті між поршнями А і Б виконується робота над потоком речовини і вона має від'ємний знак:

$$p_1 \cdot F_1 \cdot s_1 = - p_1 \cdot V_1$$

$F_1$  – площа поршня;

$s_1$  – хід поршня;

$p_1$  – тиск до зони дроселювання;

$V_1$  – об'єм, який витіснено поршнем.

Ця робота збільшує внутрішню енергію середовища між поршнями і називається внутрішньою роботою проштовхування.

За рахунок внутрішньої енергії речовини між поршнями А і Б поршень Б виконує роботу і витісняє середовище праворуч від себе. В цьому випадку робота зменшує внутрішню енергію речовини між поршнями:

$$p_2 \cdot F_2 \cdot s_2 = p_2 \cdot V_2$$

Сумарна об'ємна робота, яку виконує речовина становить:

$$p_2 \cdot V_2 - p_1 \cdot V_1 <> 0$$

Даний вираз відповідає роботі проштовхування газу крізь дросель.

Слід зазначити, що кінетична енергія теплового руху молекул має додатній знак, а потенціальна енергія взаємного тяжіння – від'ємний. Зі збільшенням об'єму

потенціальна енергія збільшується. Під час дроселювання відбувається збільшення об'єму речовини  $V_2 > V_1$ , тому збільшується і від'ємна складова внутрішньої енергії.

Якщо  $p_2 \cdot V_2 - p_1 \cdot V_1 > 0$ , то середовище між поршнями витрачає внутрішню енергію на виконання об'ємної роботи над зовнішнім середовищем. В цьому випадку зниження температури (зменшення кінетичної енергії молекул) буде проходити як наслідок росту від'ємної складової внутрішньої енергії середовища завдяки збільшенню об'єму, так і в результаті витрат внутрішньої енергії середовища між поршнями на виконання об'ємної роботи.

Якщо  $p_2 \cdot V_2 - p_1 \cdot V_1 < 0$ , то зовнішнє середовище за рахунок об'ємної роботи збільшує внутрішню енергію середовища між поршнями. Тут можливі декілька варіантів:

- якщо збільшення внутрішньої енергії в результаті об'ємної роботи менше, ніж зростання від'ємної складової внутрішньої енергії, пов'язаної з ростом об'єму, то відбудеться зниження температури;
- якщо об'ємна робота компенсує зростання від'ємної складової внутрішньої енергії, пов'язаної з ростом об'єму, то температура при дроселюванні не зміниться;
- якщо буде надлишок об'ємної роботи, температура при дроселюванні збільшиться.

При  $p_2 \cdot V_2 - p_1 \cdot V_1 = 0$  зниження температури буде відбуватися лише в наслідок збільшення від'ємної складової внутрішньої енергії, пов'язаної зі збільшенням об'єму.

Адіабатичне дроселювання газу в детандері (розширювачі) використовують для отримання криогенних температур в повітряних холодильних машинах. Холодопродуктивність повітряних холодильних машин становить 30–60 кВт. Вони не є широко розповсюдженими, проте іноді використовуються для швидкого охолодження плодів, овочів, ягід та кулінарних виробів.

### **4.3 Вихровий ефект Ранка-Хільша**

Під час подачі стиснутого повітря, яке має температуру навколишнього середовища, в циліндричну трубу по дотичній до її поверхні, центральна частина потоку буде мати більшу швидкість, ніж периферійна. Через це температура повітря біля стінки труби буде вища, а в центрі – нижча за температуру повітря, що подається в трубу.

З термодинамічної точки зору процеси у вихровій трубі полягають в тому, що шари повітря, які обертаються поряд з віссю, віддають кінетичну енергію периферійній частині повітря і при цьому охолоджуються. Інша частина повітря сприймає цю енергію і нагрівається в результаті тертя, на подолання якого затрачається значна частина кінетичної енергії.

Схематично роботу вихрової труби зображено на рис. 1.6.

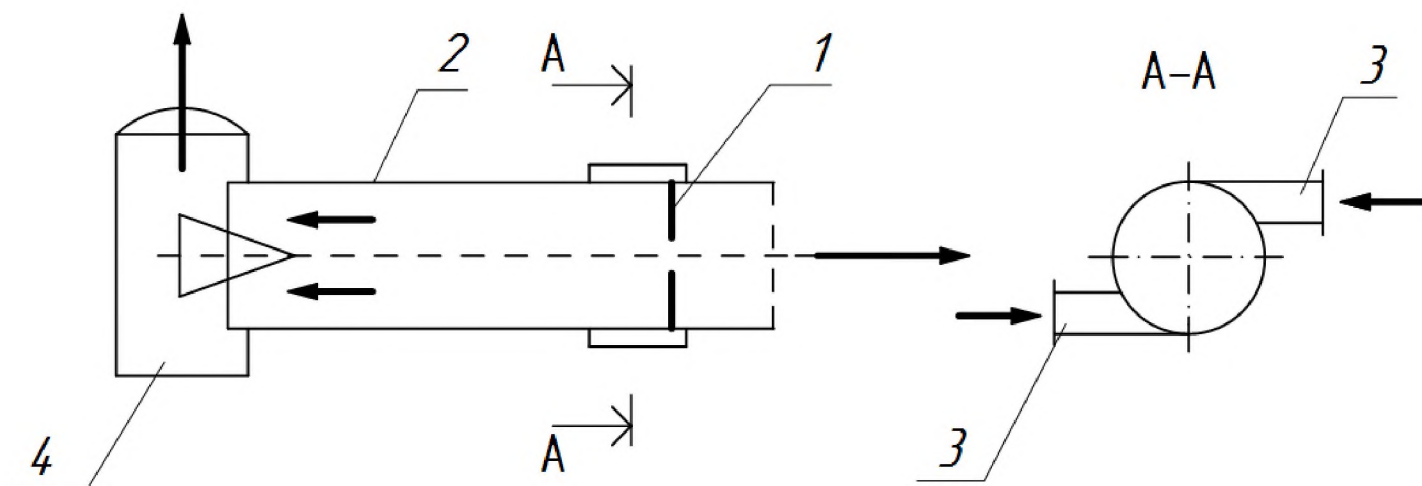


Рис. 1.6 Схема вихрової труби

Газ, що надійшов через сопла 3 у трубу 2 переміщується до вентилля 4. Частина периферійного газу виходить з труби з вищою температурою, а інша частина протитоком надходить до центральної частини труби і виходить через діафрагму 1 зі зниженою температурою. Потік з низькою температурою використовується для охолодження, а з високою – для нагрівання.

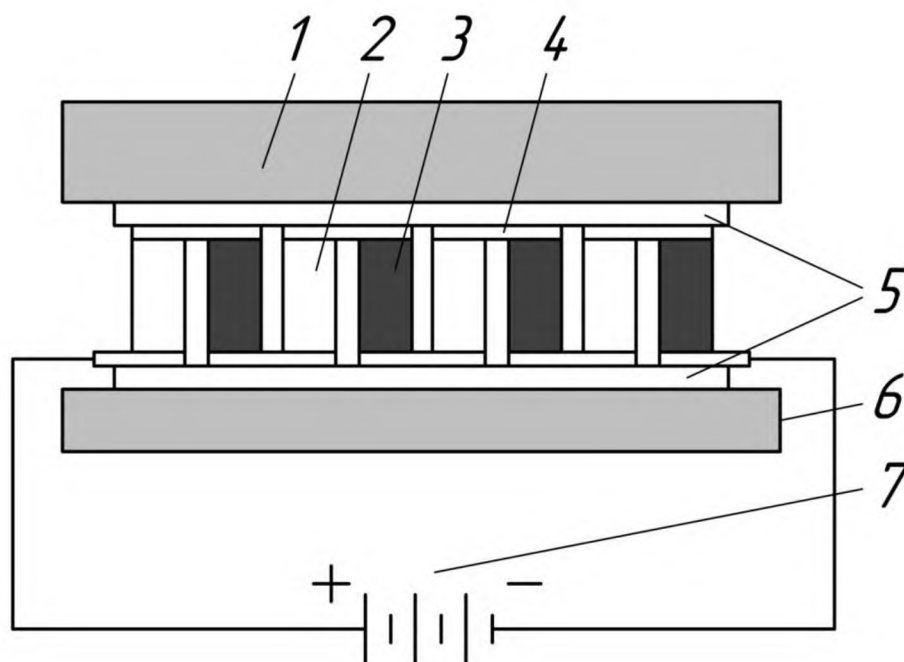
Термодинамічна досконалість вихрових машин не перевищує декількох відсотків і залежить від використання теплоти потоку повітря, яка виходить з гарячої частини вихрової труби. Якщо ця теплота утилізується, то загальна ефективність збільшується. Вихрові труби прості у виготовленні та експлуатації, компактні та високонадійні. Проте область їх застосування обмежується низькою економічністю термодинамічних процесів.

#### 4.4 Термоелектричний ефект Пельтьє

У 1834 році французький фізик Ж. Пельтьє встановив, що *під час пропускання електричного струму в ланцюгу, який складається з двох різних провідників, залежно від напрямку струму в місцях контакту виділяється або поглинається теплота, тобто один із спаїв нагрівається, а інший охолоджується*. Іншими словами, за допомогою ефекту Пельтьє можна охолодити або нагріти який-небудь об'єкт.

Тривалий час ефект термоелектричного охолодження не застосовувався на практиці через відсутність достатньо ефективних матеріалів термоелементів. Лише після ряду відкриттів в області напівпровідникової техніки з'явилася можливість ефективно використовувати це явище.

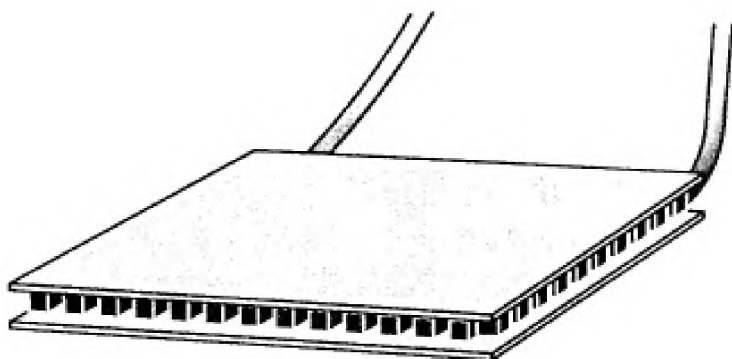
Холодильний ефект від двох спаїв невисокий, тому провідники і спаї об'єднують в модулі. Перепад температур між холодним і гарячим спаями може становити 60...70 °С, а у випадку каскадного підключення модулів досягати 150 °С.



**Рис. 1.7** Принципова схема термоелектричного холодильного блоку

1 – об'єкт охолодження; 2, 3 – напівпровідники різного типу; 4 – електропровідники;  
5 – електроізолятор; 6 – нагрітий елемент; 7 – джерело живлення

Ефект Пельєтьє виникає тому, що середня енергія електронів, які беруть участь в перенесенні струму з одного провідника в інший, різні. Наприклад, напрям струму відповідає напрямку переходу електронів із напівпровідника в метал. Оскільки енергетичний рівень вільних електронів напівпровідника значно вищий, ніж вільних електронів металу, під час переходу з напівпровідника в метал електрони зіштовхуються з атомами металу і віддають їм свою надлишкову енергію. Це призводить до виділення теплоти і підвищення температури спая. При зміні напрямку струму процес іде в зворотному напрямі і теплота Пельєтьє поглинається.



**Рис. 1.8** Зовнішній вигляд охолоджуючого модуля термоелектричної холодильної машини

Термоелектричний модуль складається з провідників, які вкриті керамічними пластинами (рис. 1.7, 1.8). Пластини мають високу теплопровідність і не проводять струм. Холодна частина модуля контактує з об'єктом охолодження, а нагріта з навколишнім середовищем.

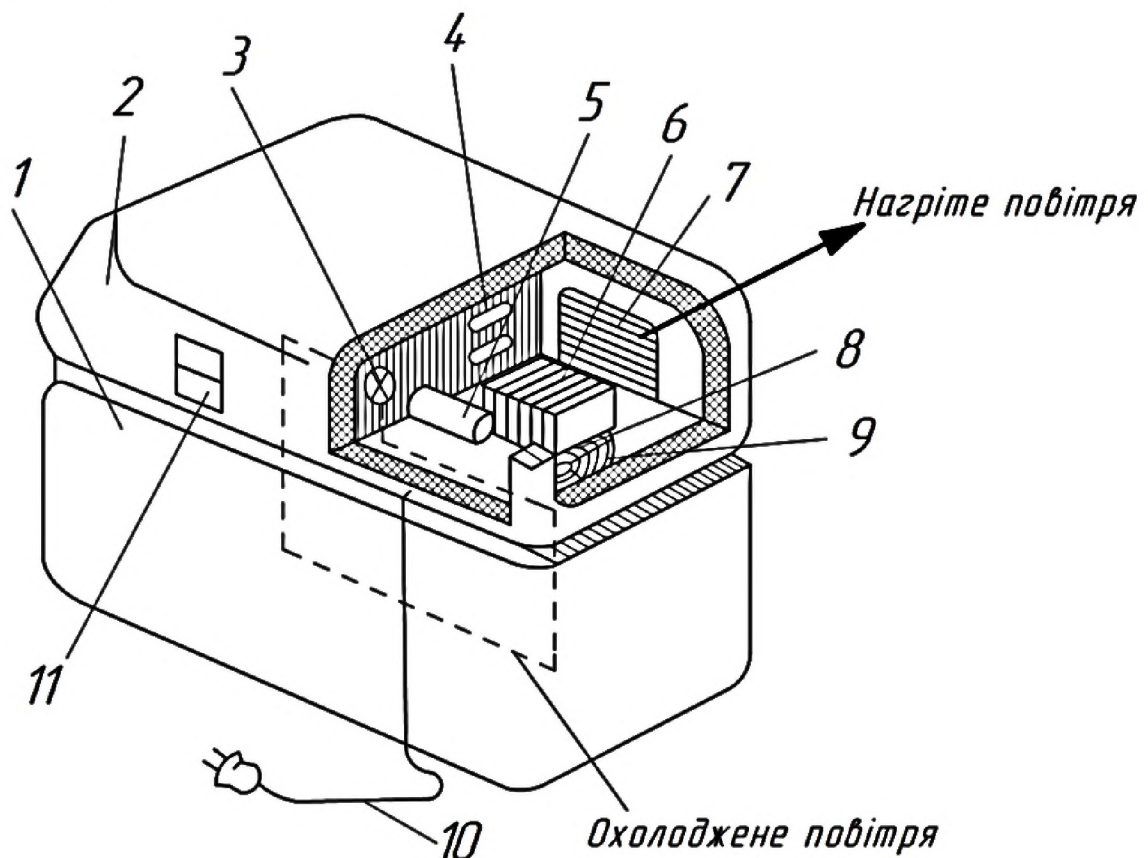
Енергетична ефективність термоелектричних холодильних машин менша, ніж парокompресійних.

### ***Переваги термоелектричних машин:***

- 1) безшумність, оскільки в машині відсутні рухомі частини;
- 2) висока надійність, зумовлена відсутністю герметичної системи з холодильним агентом;
- 3) висока ремонтпридатність – ремонт зводиться до заміни охолоджувального модуля;
- 4) екологічна чистота – відсутність холодильного агента;
- 5) можливість зміни напрямку струму і переходу від охолодження до нагрівання;
- 6) можливість швидкого охолодження об'єктів;
- 7) висока точність регулювання температури;

Сьогодні холодопродуктивність термоелектричних холодильних машин в основному не перевищує 500 Вт, проте вже існують термоелектричні установки до 10 кВт.

Спектр застосування термоелектричного охолодження включає: переносні домашні холодильники, автомобільні мініхолодильники, охолоджувачі для напоїв, мінібари тощо.



**Рис. 1.9** Будова термоелектричного холодильника ХАТЭ-12М

- 1 – корпус; 2 – кришка; 3, 8 – крильчатка; 4 – резистор; 5 – електродвигун;  
6 – холодильний агрегат; 7 – радіатор тепла; 9 – радіатор холоду; 10 – шнур;  
11 – перемикач



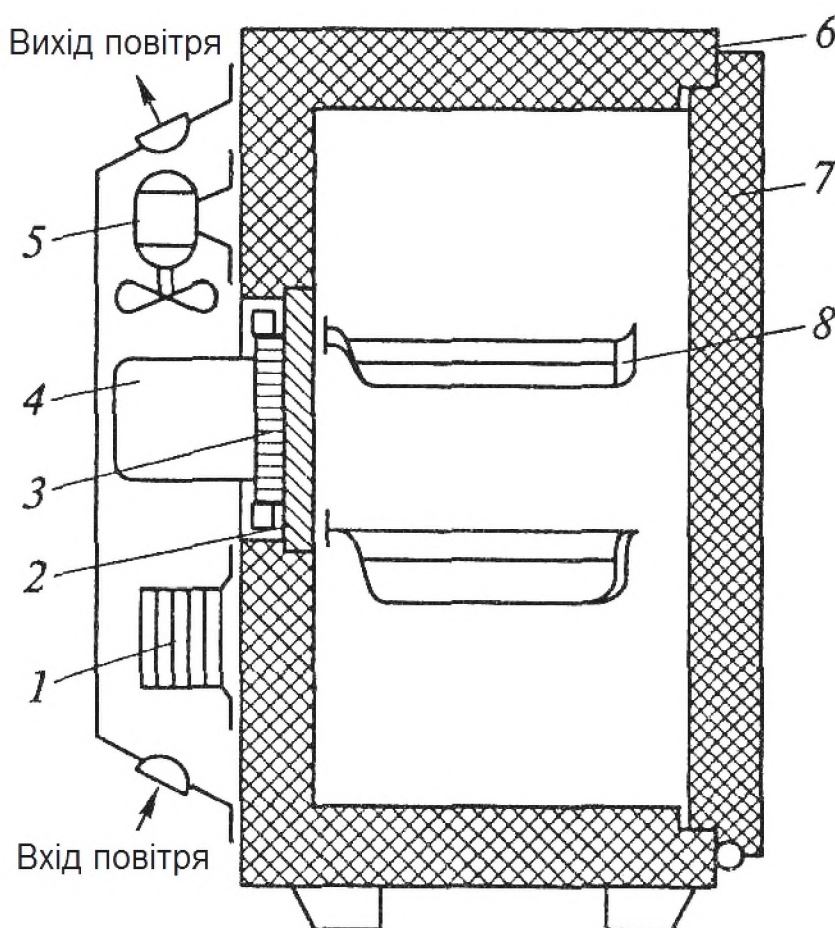
Будову термоелектричного холодильника, який використовується на транспорті розглянемо на прикладі *холодильника ХАТЭ-12М* (рис. 1.9).

Холодильник складається із корпусу 1, кришки 2 та з'єднувального шнура 10. В кришку вмонтовано вентилятор і холодильний агрегат 6, який складається з радіатора тепла 7 і радіатора холоду 9. Вентилятор складається з електродвигуна 5, на кінцях вала якого закріплено крильчатки 3 і 8.

Термоелектрична батарея вмикається в електромережу постійного струму напругою 12 В і створює перепад температур між робочими поверхнями. Крильчатка 3 охолоджує радіатор тепла, а крильчатка 8 перемішує повітря в холодильній камері.

Подібні холодильники мають об'єм холодильної камери 8 – 14 дм<sup>3</sup>, а маса становить від 6 до 15 кг.

*Будову побутового термоелектричного холодильника або мінібара* можна розглянути на прикладі схеми холодильника "Чайка" на рис. 1.10.



**Рис. 1.10** Схема термоелектричного холодильника "Чайка"

1 – електричний трансформатор; 2 – радіатор охолоджувача; 3 – термоелектрична батарея; 4 – радіатор нагрівача; 5 – вентилятор; 6 – теплова ізоляція шафи; 7 – дверцята шафи; 8 – полиці для продуктів

На задній стінці холодильника розміщений блок живлення, який складається з двох термоелектричних батарей 3. В кожній батареї послідовно з'єднані 60

термоелементів. Поруч з термоелектричними батареями знаходиться алюмінієвий радіатор охолодження 2, через який теплота з холодильної шафи передається в навколишнє середовище за допомогою ребристого радіатора нагрівача 4. Ребристі радіатори 4 розміщені на гарячій стороні кожної термоелектричної батареї. На кожному з них закріплено по 18 алюмінієвих пластин з кроком ребер 4 мм. Від радіаторів теплота відводиться за рахунок циркуляції повітря, яка створюється вентилятором 5.

Зовнішнє сталеве покриття корпусу холодильника має товщину 0,8 мм та вкрите синтетичною плівкою. Внутрішнє покриття зроблено з листів алюмінію товщиною 3 мм. Простір між покриттями заповнений теплоізоляцією 6.

Дверцята 7 відкриваються донизу та можуть використовуватись як столик. Вони обладнані автоматичним замком та ущільнені за допомогою профільної гуми.

Всередині холодильної камери об'ємом 40 дм<sup>3</sup> за рахунок зміни напруги, яка подається на термоелектричні батареї терморегулятором, підтримується температура 2...5 °С.

Температура 5 °С встановлюється в камері приблизно через 3 години після увімкнення холодильника.