



## § 39. ПРИНЦИП ДІЇ ТЕПЛОВИХ ДВИГУНІВ. ХОЛОДИЛЬНА МАШИНА



Протягом тисячоліть використовувалися механізми, які суттєво полегшували фізичні навантаження на людину. Однак до кінця XVIII ст. величезний запас енергії, що міститься всередині різних видів палива, був практично не затребуваний. І тільки завдяки відкриттям, зробленим у термодинаміці, з'явилися *теплові машини* — пристрої, які *перетворюють внутрішню енергію на механічну роботу*. Про теплові машини, їх будову, фізичні закони, на яких ґрунтується їх дія, ви дізнаєтесь із цього параграфу.

### 1 Необоротність процесів у природі

Уявіть: ви внесли в будинок грудочку снігу, поклали її на стіл і, природно, через деякий час замість снігу виявили калюжку води. І раптом на ваших очах у воді з'являється крижинка, яка поступово збільшується, — і невдовзі замість калюжки ви бачите гірку пухнастого снігу. «Це неможливо!», — скажете ви і матимете рацію, адже знаєте, що в теплій кімнаті сніг завжди перетворюється на воду, але вода ніколи *самочинно* не перетворюється на сніг.

Інший приклад. Піднімаючись на гору, ви наступаєте на камінь, він зривається, котиться схилом і, прокотившись певну відстань, зупиняється. При цьому механічна енергія каменя перетворюється на внутрішню енергію самого каменя, схилу та оточуючого повітря. Із точки зору закону збереження енергії можливий і зворотний процес, коли камінь котитиметься вгору за рахунок накопиченої в ньому та довкіллі внутрішньої енергії. Однак на практиці такий процес не спостерігається.

Ці два приклади та безліч інших подібних переконують: *у природі всі макроскопічні процеси мають певний напрямок і в зворотному напрямку вони самочинно відбуватися не можуть*.

■ Процеси, які можуть самочинно відбуватися тільки в одному напрямку, називають **необоротними процесами**.

Необоротність процесів у природі відображає **другий закон (початок) термодинаміки**, який має кілька еквівалентних формулювань. Наприклад, у формулюванні німецького фізика та математика **Рудольфа Клаузіуса** він звучить так:

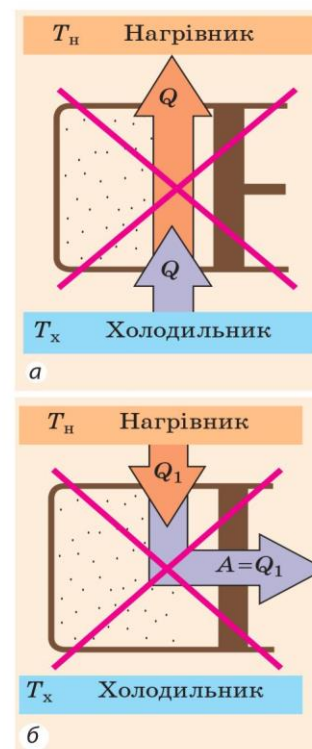
■ Неможливим є процес, єдиний результат якого — передача енергії у формі теплоти від менш нагрітого тіла до більш нагрітого (рис. 39.1, а).

Зверніть увагу на слова «*єдиний результат*». Тепло довільно передається тільки від більш нагрітого тіла до менш нагрітого, при цьому з іншими тілами жодних змін не відбувається. Зворотний процес теж можливий, але результат *не буде єдиним*. Наприклад, у холодильному пристрої тепло передається від менш нагрітої холодильної камери до теплішого навколишнього повітря, але при цьому витрачається електрична енергія.

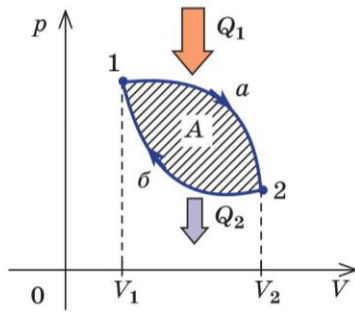
Англійський фізик **Вільям Томсон (лорд Кельвін)** дав у 1851 р. таке формулювання **другого закону (початку) термодинаміки**:

■ Неможливим є періодичний процес, єдиний результат якого — виконання тілом механічної роботи за рахунок зменшення його внутрішньої енергії (рис. 39.1, б).

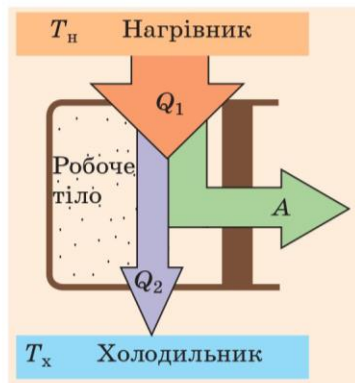
Якби такий процес був можливим, то ми одержали б *вічний двигун другого роду*. Така машина, наприклад, могла б відбирати теплову енергію у Світового океану та повністю перетворювати її на роботу.



**Рис. 39.1.** Циклічні процеси, «дозволені» першим законом термодинаміки, але «заборонені» другим законом: а — ідеальна холодильна машина; б — вічний двигун другого роду



**Рис. 39.2.** У ході циклічного процесу газ повертається у вихідний стан. Якщо розширення газу (ділянка 1a2) відбувається за більшого тиску, ніж стиснення (ділянка 2b1), то сумарна робота за цикл є додатною (ця робота відповідає площі фігури 1a2b1)



**Рис. 39.3.** Принцип роботи теплових двигунів: робоче тіло, одержуючи певну кількість теплоти  $Q_1$  від нагрівника, виконує механічну роботу  $A$  і передає деяку кількість теплоти  $Q_2$  холодильнику

У тепловому двигуні відбувається циклічний періодичний процес, у результаті якого за рахунок зменшення внутрішньої енергії нагрівника виконується механічна робота. Однак цей результат не єдиний, тому що частина енергії передається холодильнику.

### 3 Чи може ККД теплової машини дорівнювати 100 %

Внутрішня енергія робочого тіла за цикл не змінюється (внутрішня енергія — функція стану, а після закінчення циклу газ повертається у вихідний стан), тому згідно з першим законом термодинаміки робота  $A$ , яку виконує газ за цикл, дорівнює:  $A = Q_1 - Q_2$ , де  $Q_1$  — кількість теплоти, одер-

## 2 Із яких основних частин складається тепловий двигун

Процеси, які не суперечать ні першому, ні другому законам термодинаміки, відбуваються в теплових машинах. Як приклад розглянемо роботу *теплого двигуна*.

**Тепловий двигун** — тепла машина циклічної дії, яка енергію, що виділяється під час згоряння палива, перетворює на механічну роботу.

Механічну роботу у двигуні виконує газ, який, розширюючись, тисне на поршень. Газ, який виконує механічну роботу в процесі свого розширення, називають *робочим тілом*.

Щоб газ міг штовхати поршень, необхідно, щоб тиск під поршнем був більшим за зовнішній тиск. Таке підвищення тиску досягається за рахунок збільшення температури робочого тіла. Пристрій, у контакті з яким робоче тіло одержує певну кількість теплоти, називають *нагрівником*.

Робоче тіло не може нескінченно розширюватися. Для безперервної роботи двигуна необхідно, щоб поршень повертався у початкове положення. Газ при цьому буде стискатися, виконуючи від'ємну роботу. Щоб у цілому за цикл робота газу була додатною, тиск, а отже, і температура газу під час стиснення мають бути меншими, ніж тиск і температура під час розширення (рис. 39.2), тобто газ потрібно охолоджувати. Об'єкт, у контакті з яким від робочого тіла береться деяка кількість теплоти, називають *холодильником*.

Будь-який тепловий двигун складається з трьох основних частин: *нагрівника, робочого тіла, холодильника* (рис. 39.3).

жана від нагрівника;  $Q_2$  — кількість теплоти, віддана холодильнику. Чим менше тепла віддається холодильнику (втрачається), тим більшим є ККД теплового двигуна.

**Коефіцієнт корисної дії  $\eta$  двигуна** — фізична величина, яка характеризує економічність теплового двигуна і дорівнює відношенню роботи, виконуваної двигуном за цикл, до кількості теплоти, одержуваної від нагрівника:

$$\eta = \frac{A}{Q_1}; \quad \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

*Зверніть увагу!* 1. Якщо в тепловому двигуні згоряє паливо, то  $Q_1 = qm$ , де  $q$  — питома теплота згорання палива,  $m$  — маса палива. 2. ККД теплового двигуна завжди менший від одиниці.

Аналізуючи роботу теплових двигунів, французький інженер *Саді Карно* (1796–1832) у 1824 р. дійшов висновку, що найбільш ефективним (із максимально можливим ККД  $\eta_{\max}$ ) є так званий *ідеальний тепловий двигун*, який працює за циклом, що складається з двох ізотермічних і двох адіабатних процесів (рис. 39.4). Карно довів, що ККД такого двигуна дорівнює:

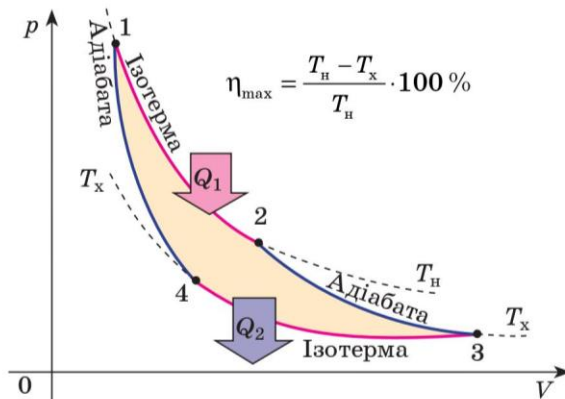
$$\eta_{\max} = \frac{T_H - T_X}{T_H},$$

де  $T_H$  — температура нагрівника;  $T_X$  — температура холодильника.

**Другий закон (начало) термодинаміки у формулюванні С. Карно:**

Будь-яка реальна теплова машина, що працює з нагрівником, який має температуру  $T_H$ , і холодильником із температурою  $T_X$ , не може мати ККД, який перевищує ККД ідеальної теплової машини.

Формулювання Карно показує, що для збільшення ККД теплового двигуна потрібно зменшити температуру холодильника і (або) збільшити температуру нагрівника. Однак температуру холодильника не можна зменшити до нижчої, ніж температура довкілля, а температура нагрівника обмежена жаростійкістю матеріалів, з яких виготовлені поршень і циліндр двигуна. Тому максимальний ККД не може перевищувати 60–70 %. Зараз основні зусилля інженерів спрямовані на збільшення реального ККД за рахунок зменшення втрат енергії під час тертя і втрат палива внаслідок неповного його згорання.

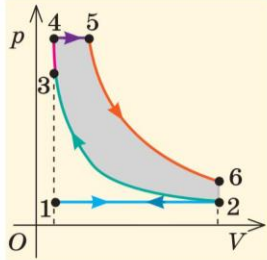


**Рис. 39.4.** Цикл Карно: 1–2 — ізотермічне розширення за температури  $T_H$ , робоче тіло одержує теплоту  $Q_1$ ; 2–3 — адіабатне розширення, зменшення температури до  $T_X$ , теплообміну немає; 3–4 — ізотермічне стиснення за температури  $T_X$ , робоче тіло віддає теплоту  $Q_2$ ; 4–1 — адіабатне стиснення, збільшення температури до  $T_H$

## 4

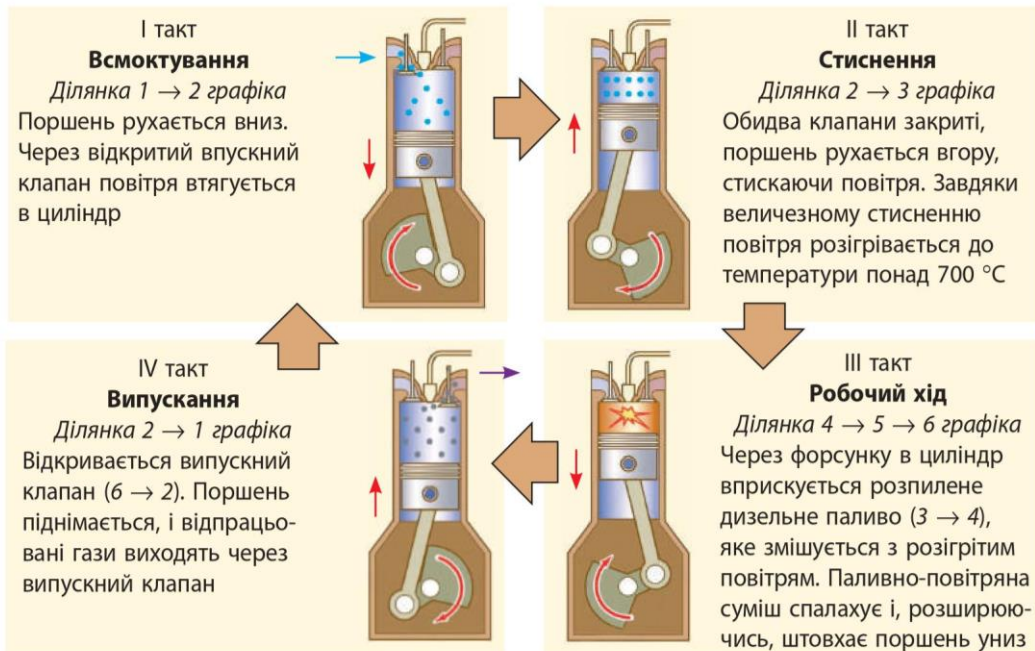
**Як працюють дизельні двигуни**

Сучасну цивілізацію неможливо уявити без теплових двигунів. Найбільш широко їх використовують у теплових та атомних електростанціях, де потужні парові турбіни (двигуни зовнішнього згоряння) обертають ротори генераторів електричного струму. Теплові двигуни використовують і в більшості сучасних видів транспорту. На потужних літаках і ракетах встановлюють турбореактивні та реактивні двигуни, на легких літаках — поршневі. Водні судна можуть бути оснащені як дизельними двигунами (двигунами внутрішнього згоряння), так і турбінами. Карбюраторні та дизельні двигуни приводять у рух більшість сучасних автомобілів.



У курсі фізики 8 класу ви ознайомилися з роботою карбюраторного двигуна внутрішнього згоряння. Розглянемо, як працює *дизельний двигун*.

На відміну від карбюраторного двигуна (в якому пальна суміш утворюється ззовні циліндра та запалюється від електричної іскри), в дизельних двигунах пальна суміш утворюється безпосередньо всередині циліндра, а запалюється внаслідок підвищення температури повітря під час стиснення (рис. 39.5).



**Рис. 39.5.** Графік циклу і принцип роботи чотиритактного дизельного двигуна

Незважаючи на зручність і користь, теплові двигуни забруднюють навколишнє середовище (насамперед це викиди шкідливих речовин, теплове забруднення). На жаль, зараз людство не може відмовитися від використання теплових двигунів, тому пов'язані з цим екологічні проблеми потрібно вирішувати.



Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся, які міжнародні програми щодо захисту навколишнього середовища реалізуються зараз.

## 5 Як працює холодильний пристрій

**Холодильний пристрій** — це пристрій циклічної дії, який підтримує в холодильній камері температуру нижчу, ніж температура довкілля.

Принцип роботи холодильного пристрою показано на рис. 39.6.

Робочим тілом у холодильному пристрої є *холодоагент* — пара рідини, яка легко випаровується. Унаслідок стиснення холодоагент конденсується, при цьому виділяється велика кількість теплоти  $Q_1$ , яка через теплообмінник передається довкіллю. Стиснення газу здійснюється *компресором*, який виконує механічну роботу  $A'$  за рахунок електроенергії.

У випарнику тиск над поверхнею рідини зменшується, холодоагент випаровується, при цьому поглинається кількість теплоти  $Q_2$ . Оскільки стиснення робочого тіла відбувається за більшого тиску, ніж його розширення, то робота газу за цикл є від'ємною і дорівнює:

$$A = Q_2 - Q_1.$$

Зовнішні сили за цикл виконують додатну роботу:  $A' = Q_1 - Q_2$ .

Фізична величина, яка характеризує ефективність роботи холодильного пристрою і дорівнює відношенню кількості теплоти, забраної за цикл від холодильної камери, до роботи зовнішніх сил, називається **холодильним коефіцієнтом пристрою**:

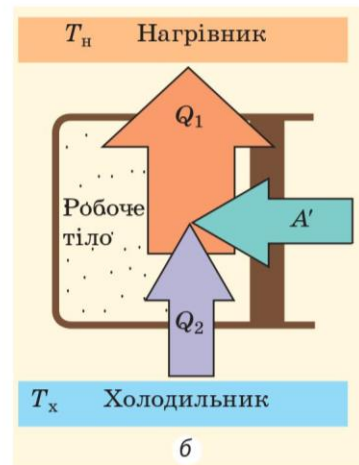
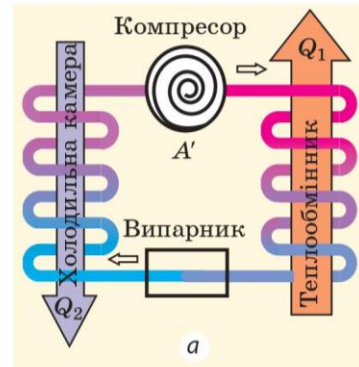
$$k = \frac{Q_2}{A'}; \quad k = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

Із другого закону термодинаміки випливає, що *максимальний холодильний коефіцієнт пристрою* дорівнює:  $k_{\max} = \frac{T_x}{T_n - T_x}$

*Зверніть увагу:* холодильний коефіцієнт пристрою може бути більшим за одиницю (на відміну від ККД теплового двигуна).

Якщо трубки теплообмінника винести за межі приміщення, а холодильну камеру залишити відчиненою, то холодильний пристрій забиратиме тепло з приміщення та віддаватиме його довкіллю. Так працює *кондиціонер* — *електричний пристрій, призначений для охолодження повітря в приміщенні*.

Якщо трубки теплообмінника залишити в приміщенні, а відчинену холодильну камеру винести за його межі, то холодильний пристрій



**Рис. 39.6.** Будова (а) і принцип роботи (б) холодильного пристрою: робоче тіло розширюється і виконує роботу, одержуючи кількість теплоти  $Q_2$  від холодильної камери. За рахунок роботи  $A'$  зовнішніх сил робоче тіло стискається, при цьому довкіллю передається кількість теплоти  $Q_1 = Q_2 + A'$

забиратиме тепло з докiлля i вiддаватиме його примiщенню. Так працює *тепловий насос — пристрiй для обiгрiву примiщення*. Цiкаво, що тепловий насос працює ефективнiше за звичайний електричний обiгрiвач, бо в ходi його роботи передана примiщенню кiлькiсть теплоти ( $Q_2 = A' + Q_1$ ) бiльша, нiж робота  $A'$  електричного струму. Сучаснi кондицiонери мають два режими роботи: влiтку вони працюють як кондицiонери, взимку — як тепловi насоси.



### Пiдбиваємо пiдсумки

- Усi макроскопiчнi процеси в природi мають певний напрямк, i в зворотному напрямку вони довiльно вiдбуватися не можуть. Процеси, якi можуть самочинно вiдбуватися тiльки в одному напрямку, називають необоротними. Необоротнiсть процесiв у природi вiдбиває другий закон (начало) термодинамiки, який можна сформулювати так: неможливим є перiодичний процес, єдиний результат якого — виконання тiлом механiчної роботи за рахунок зменшення його внутрiшньої енергiї.

- Тепловий двигун — тепла машина циклiчної дiї, яка енергiю, що видiляється при згоряннi палива, перетворює на механiчну роботу. Будь-який тепловий двигун має три частини: нагрiвник, робоче тiло, холодильник.

- ККД теплового двигуна визначають за формулою  $\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$ ; вiн

не може перевищувати ККД iдеальної теплової машини:  $\eta_{\max} = \frac{T_H - T_X}{T_H}$ .

- Холодильний пристрiй — пристрiй циклiчної дiї, який пiдтримує в холодильнiй камерi температуру нижчу, нiж температура докiлля.



### Контрольнi запитання

1. Наведiть приклади природних процесiв i доведiть, що вони є необоротними.
2. Сформулюйте другий закон термодинамiки.
3. Наведiть приклади умовних процесiв, якi не суперечать першому началу термодинамiки, але суперечать другому.
4. Дайте означення теплового двигуна. Якi його основнi елементи?
5. Як визначити ККД теплового двигуна? Якi iснують можливостi збiльшення ККД?
6. Як визначити ККД циклу Карно?
7. Як працює холодильний пристрiй? Наведiть приклади рiзних холодильних пристроїв. У чому їх вiдмiннiсть?
8. Що показує холодильний коефiцiєнт?



### Вправа № 39

1. Чи можна, вiдчинивши дверцята працюючого холодильника, охолодити повітря в кiмнатi?
2. Теплова машина працює за циклом Карно. Визначте ККД машини, якщо температура нагрiвника за шкалою Кельвина бiльша, нiж температура холодильника: а) у 2 рази, б) у 3 рази, г) у  $n$  разiв.
3. Кiлькiсть теплоти, яку робоче тiло одержує вiд нагрiвника, становить за цикл 240 Дж, а яку вiддає холодильнику — 150 Дж. Визначте ККД двигуна та виконувану ним роботу.
4. У тепловiй машинi потужнiстю 1,0 кВт, яка працює за циклом Карно, нагрiвником є вода, узята за температури кипiння, а холодильником — лiд, що тане. Яка маса льоду тане пiд час роботи машини протягом хвилини? Питома теплота плавлення льоду — 330 кДж/кг.