

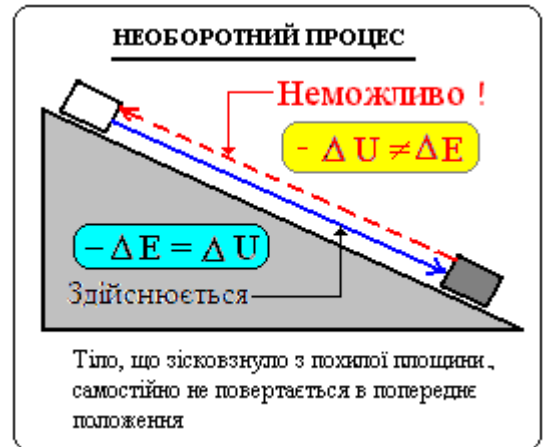
**ДРУГИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ. ТЕПЛОВІ МАШИНИ. ТЕОРЕМА КАРНО****1. Напрямок ходу природних процесів. Вічний двигун першого роду**

Перший закон термодинаміки заперечує можливість існування процесів, в яких зникає, або виникає енергія, тобто порушується закон зміни та збереження енергії.

Якщо тіло, зісковзуючи з похилої площини, втрачає механічну енергію, то на величину цієї втрати зростає внутрішня енергія системи тіло + площина, у відповідності до першого закону термодинаміки.

Проте перший закон термодинаміки, як форма закону зміни та збереження енергії, не дає повної інформації про можливість процесів, які не протирічать цьому закону, але в природі не спостерігаються.

Не пояснюється, чому тіло, яке зісковзнуло з похилої площини, не може повернутись на попередню висоту за рахунок внутрішньої енергії, хоча першим законом термодинаміки це не забороняється .



За першим законом термодинаміки рівноможливими будуть процеси охолодження склянки з кип'ятком і самодовільного закипання води в склянці за рахунок теплової енергії оточуючого повітря, чого не буває в дійсності.

Досвід вказує на те, що процеси з енергетичним балансом ідуть лише в певній послідовності (в одному напрямку). Можна помітити, що *механічна енергія може повністю перетворюватися у внутрішню енергію, а зворотне повне перетворення є неможливим*. Така особливість природних явищ спонукає до пошуків відповідного закону природи.

Розглянуті проблеми також тісно пов'язані з пошуками максимально ефективних теплових двигунів. Загальне обмеження можливостей таких двигунів дає *перший закон термодинаміки, який можна виразити у вигляді твердження про неможливість існування двигуна, який виконує роботу без відповідних витрат енергії (вічного двигуна першого роду)*.

Дійсно, за першим законом термодинаміки

$$A + Q = \Delta W,$$

і, якщо  $Q = 0$ ,  $\Delta W = 0$ , то  $A = 0$  (робота не виконується).

При подальшому вивченні можливостей двигунів, крім зазначеного, досить явного, обмеження, виявилось інше, не таке очевидне, обмеження, пов'язане саме з необоротною послідовністю, однонаправленістю природних процесів, котре у підсумку було узагальнене другим законом термодинаміки. Саме цей закон висуває додаткове обмеження, що суттєво визначає ефективність теплових машин.

## 2. Циклічні процеси та теплові машини

Можливість виконання роботи за рахунок теплоти давно турбувала розум винахідників. Використавши здатність певного тіла збільшувати та зменшувати свій об'єм при нагріванні та охолодженні, можна перевертати внутрішню енергію, яка передається тілу при теплопередачі, в механічну. Зрозуміло, що в якості такого *робочого тіла* зручно використовувати газоподібне тіло.

В зв'язку з цим загальні висновки стосовно роботи теплових машин можна зробити на основі аналізу багаторазово повторюваних, з поверненням в початковий стан (циклічних, кругових), процесів над газами. Газ, розширюючись при нагріванні, може виконувати роботу, і, якщо знайти спосіб повернення газу в початковий стан меншою роботою, то на такій основі можна побудувати двигун.

Більш точно **циклічним процесом (циклом)** називають *рівноважний процес, в результаті якого система повертається в початковий стан*. Оскільки внутрішня енергія ідеального газу є функцією стану системи, то в результаті циклічного процесу ця енергія не змінюється ( $\Delta U = 0$ ), і перший закон термодинаміки для цього процесу запишеться у вигляді

$$A = Q.$$

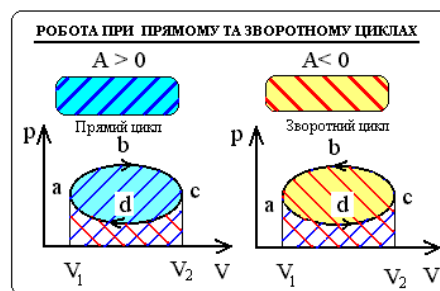
Розглянемо цикл на  $(p;V)$  діаграмі. На такій діаграмі робота в результаті проходження певної послідовності станів зобразиться площею під кривою графіка залежності тиску від об'єму (див. мал.).

При *прямому циклі* на  $(p;V)$  діаграмі послідовність станів проходиться за годинниковою стрілкою.

Робота циклу

$$A_{abcdca} = A_{abc} + A_{cda}.$$

Тут робота  $A_{abc}$  рівна площі під кривою  $abc$  зі знаком



(+). Зворотна робота  $A_{cba} = -A_{abc}$  рівна тій же площі але зі знаком (-). Робота  $A_{cda}$  рівна площі під кривою  $cda$  зі знаком (-). Зворотна робота  $A_{adc} = -A_{cda}$  рівна тій же площі зі знаком (+).

В підсумку виходить, що циклічна робота рівна площі обмеженій замкненою кривою – графіком циклу зі знаком (+) при прямому і знаком (-) при зворотному циклі.

Отже, при прямому циклі

$$A_{abcda} > 0,$$

при зворотному циклі

$$A_{adcba} < 0.$$

*Якщо циклічний процес може проходити в прямому і зворотному напрямку без змін в оточуючій системі, то він є оборотним.*

Особливості циклічного процесу дозволяють покласти його в основу роботи теплової машини.

**Тепловою машиною** називають систему, яка здійснює циклічний процес, в результаті якого відбувається взаємоперетворення внутрішньої і механічної енергій (теплоти в роботу). Розрізняють два види теплових машин: теплові двигуни та холодильники (а також теплові насоси).

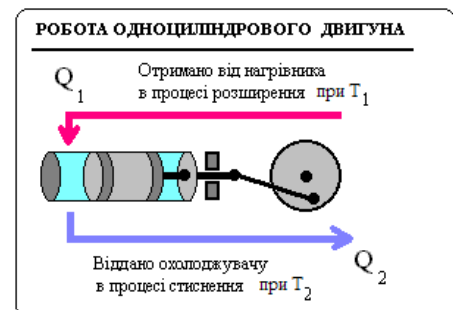
**Тепловий двигун** – це система, в якій над робочим тілом здійснюється прямий циклічний процес, в результаті якого внутрішня енергія робочого тіла перетворюється в механічну (теплота в роботу).

Циклічний процес в тепловому двигуні здійснюється **робочим тілом** – ідеальним газом, який виконує позитивну роботу в процесі розширення. Для постійної дії двигуна необхідно

мати два тіла різної температури. Від одного з них періодично віднімається тепло, іншому неминуче віддається.

Наприклад. газ під поршнем у циліндрі в результаті нагрівання (контакту з тілом при температурі  $T_1$ ) розширеться, виконуючи механічну роботу. Таку ж роботу слід виконати для повернення газу в початковий стан при тій же температурі. Ця робота буде меншою, якщо газ попередньо охолодити до температури меншої  $T_2$ .

**Холодильник** – це система, в якій здійснюється зворотний циклічний процес, в результаті якого за рахунок роботи відбувається теплопередача від тіла з нижчою, до тіла



з вищою температурою. В побутових холодильниках позитивну роботу виконує електричний струм, тілом з нижчою температурою служить холодильна камера, тілом з вищою температурою – кімнатне повітря. Зрозуміло, що холодильник, охолоджуючи продукти в холодильній камері, неминуче має нагрівати оточуюче середовище.

Перші результати на шляху з'ясування принципів дії теплових машин, отримав Саді Карно (Франція, 1824 р.).

КАРНО Саді-Ніколя-Леонар (CARNOT Sadi-Nikolas-Leonard, 01.06.1796 – 24.08.1832) народився в Парижі, Там же закінчив Політехнічну школу. Служив військовим інженером (1814 – 1832).

Карно першим наголосив на обов'язковості використання тіл різної температури для роботи теплової машини.

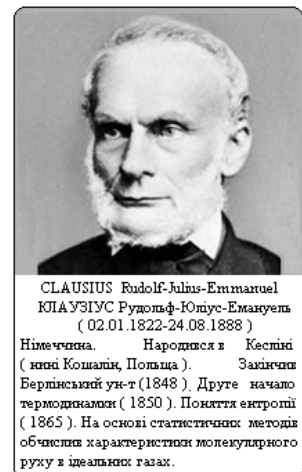
В своїх міркуваннях Карно виходив з аналогії між виконанням роботи за рахунок падіння води та передачі теплоти. В першому випадку необхідна різниця рівнів води, в другому – різниця температур. На основі такої аналогії, Карно сформулював два правила роботи теплових машин: (1) для перетворення теплоти в роботу необхідно створити різницю температур; (2) для створення різниці температур, необхідно виконати роботу. Свої думки Карно виклав у невеликій популярній книзі «Роздуми про рушійну силу вогню і про машини здатні розвивати цю силу», опубліковану в Парижі у 1824 р. Його ідеї були підхоплені і розвинені Емілем Клапейроном, який надав їм строгої математичної форми в роботі опублікованій у 1834 р.



### 3. Другий закон термодинаміки та вічний двигун другого роду

Принципи побудови теплових машин тісно пов'язані зі **другим законом термодинаміки**, який можна сформулювати різними способами. Проте *всі означення закону можна звести до принципу нерівноможливості перетворення механічної і внутрішньої енергії (роботи і теплоти) в природних процесах.* Якщо механічна енергія системи повністю перетворюється у внутрішню у відповідності до першого закону термодинаміки, то внутрішня енергія не може повністю перетворитися у механічну без одночасних змін в оточуючій системі.

Можна виходити з іншого означення закону, яке узагальнює спостереження за напрямком ходу природних процесів, і стверджує, що *неможлива передача теплоти від тіла з нижчою температурою до тіла з вищою температурою*



без одночасних змін в оточуючій системі (**Клаузіус**, Німеччина, 1850 р.). Іншими словами – *самодовільна теплопередача між двома тілами не є оборотним процесом.*

Це означення є еквівалентним попередньому, в якому стверджується, що *неможливе повне перетворення теплоти в роботу без одночасних змін в оточуючій системі (Томсон (Кельвін), Англія; Планк, Німеччина, 1851р.).*

Доведемо еквівалентність останнього означення попередньому міркуваннями від супротивного.

||> Нехай теплота, що взята від деякого тіла, повністю перетворюється в роботу ( $Q = A$ ). Тоді, виконуючи роботу проти тертя з участю тіл більш високої температури, можна повністю перетворити її в тепло, і тим самим передати початкову кількість теплоти тілу більш високої температури, що протирічить першому означенню

Еквівалентною попереднім твердженням є *теорема про неможливість існування теплової машини з одним нагрівником, або про неможливість виконання роботи в круговому процесі при теплообміні лише з одним тілом.* Фактично це є ще однією формою закону (**Карно**, Франція; **Планк**, Німеччина; **Пуанкаре**, Франція).

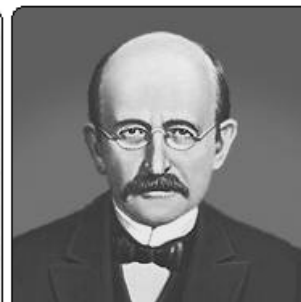
Доведемо це твердження від супротивного міркуваннями, які подібні до попередніх.

||> Нехай від тіла з температурою  $T_1$  взята кількість теплоти  $Q$  і перетворена в роботу  $A$ , причому система повернулась у вихідний стан, здійснивши круговий процес. Тоді, за допомогою роботи  $A$  проти тертя, ми можемо передати початкову кількість теплоти тілу з більш високою температурою, що неможливо. <||

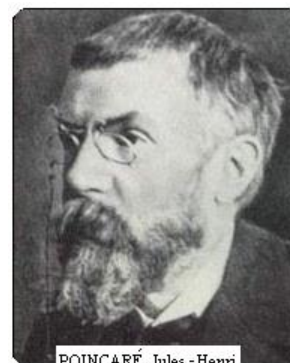
Останню форму другого закону термодинаміки можна подати у вигляді заперечення можливості існування *вічного двигуна другого роду* – такої теплової машини, яка



THOMSON William ( Lord Kelvin )  
ТОМСОН Вільям ( лорд Кельвін )  
( 26.06.1834-17.12.1907 )  
Народився в Белфасті. Закінчив Кембрідзький ун-т (1845 ). 1892 титул лорда. Друге начало термодинаміки ( 1851 ). Поняття абсолютної температури ( 1848 ). Автор видатних робіт з електромагнетизму.

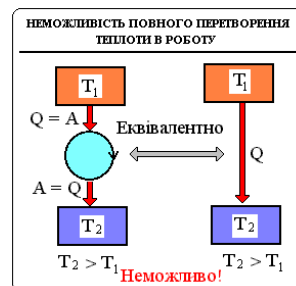


Planck ,Max Karl Ernst Ludwig  
Планк, Макс Карл Ернст Людвіг  
(23.04.1858 - 04.10. 1847)  
Німецький фізик-теоретик.  
Нобелівський лауреат 1918 р. за теорію кванта (1900 р.).  
Наукові роботи з термодинаміки, теорії випромінювання, теорії відносності.



POINCARÉ Jules -Henri  
ПУАНКАРЕ Жюль -Анрі  
( 29.04.1854 - 17.07. 1912 )

Французький вчений. Універсальний науковий геній. Народився в Нансі. Вчився в Політехнічній школі, закінчив Грінчу школу (1879). Засновник СТО, розробник її математичного апарату. Фундаментальні праці з багатьох галузей науки.



працює за рахунок теплообміну лише з одним тілом. Дійсно, така теплова машина могла би працювати, віднімаючи тепло від оточуючого середовища, при будь-якій власній температурі, і, навіть за рахунок земного оточення, тобто практично вічно.

#### 4. Принципи роботи теплових машин (теплових двигунів та холодильників)

На основі розглянутого можна сформулювати основні принципи роботи теплових машин та визначити їх основні структурні елементи.

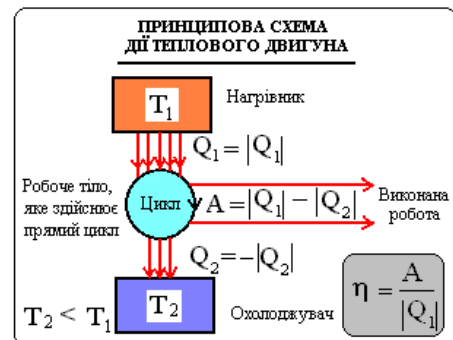
Перш за все потрібно відзначити, що в кожній тепловій машині має здійснюватись циклічний (круговий) процес з виконанням роботи за рахунок теплообміну з двома тілами різної температури, як цього вимагає другий закон термодинаміки. *Тіло вищої температури називають **нагрівником**, нижчої – **охолоджувачем*** (загальноживане слово «холодильник» збережемо для назви побутового агрегата). Використання циклічного процесу забезпечує періодичність робочого ходу теплової машини, повну його повторюваність.

**Тепловий двигун** – це теплова машина, що працює за прямим циклом. В залежності від того, що вважається тепловим ефектом, машини, що працюють за зворотним циклом поділяють на **холодильники та теплові насоси**. Для **холодильника** тепловим ефектом є кількість теплоти, що віднімається від охолоджувача (холодильної камери), для **теплого насоса** тепловим ефектом є кількість теплоти віддана нагрівнику (тілу вищої температури). Так, в теплових насосах, що використовуються для нагрівання приміщень, тепло взяте від повітря назовні, передається кімнатному повітрю. Робота теплової машини дорівнює різниці кількостей теплот отриманих робочим тілом від нагрівника ( $Q_1 > 0$ ) та відданих охолоджувачу ( $Q_2 < 0$ )

$$A = |Q_1| - |Q_2|.$$

Отже **структурна схема теплового двигуна** (див. малюнок) включає нагрівник робоче тіло (наприклад газ), яке здійснює прямий цикл, та охолоджувач.

Коефіцієнтом корисної дії двигуна (к.к.д. –  $\eta$ ) називається відношення корисної кількості теплоти ( $|Q| = |Q_1 - |Q_2|$ ), яка перетворюється в роботу ( $A = |Q|$ ), до кількості теплоти отриманої від нагрівника ( $|Q_1|$ )



$$\eta = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|},$$

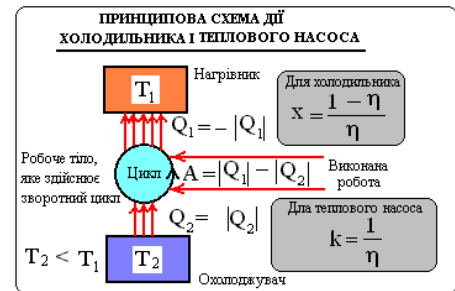
або

$$\eta = \frac{A}{|Q_1|}.$$

Зрозуміло, що  $\eta = 1$  лише в тому випадку, коли  $|Q_2| = 0$ , тобто двигун працює без охолоджувача, а такий двигун неможливий за другим законом термодинаміки.

**Холодильник** – це теплова машина, в якій робоче тіло здійснює зворотний цикл, в результаті якого за рахунок зовнішньої роботи здійснюється передача тепла від тіла вищої температури до тіла нижчої температури. *Корисним ефектом холодильника* є віднімання тепла ( $Q_2$ ) від тіла нижчої температури (охолоджувача, холодильної камери). *Затратним ефектом* є робота ( $A = |Q_1| - |Q_2|$ ) виконана робочим тілом холодильника (спожита енергія). Критерієм ефективності холодильника служить **холодильний коефіцієнт** ( $x$ )

$$x = \frac{|Q_2|}{|Q_1| - |Q_2|} = \frac{|Q_2|}{|Q_1|} = \frac{1 - \eta}{\eta}.$$



Тут  $\eta$  – к.к.д. прямого циклу (теплового двигуна).

*Корисним ефектом теплового насоса* є передавання тепла ( $Q_1$ ) тілу вищої температури (нагрівнику).

Тепловий насос – це, фактично, кондиціонер встановлений в зворотному напрямку, або холодильник з холодильною камерою у вигляді вулиці, решта якого знаходиться в приміщенні.

Затратним ефектом тут також є виконана робота (спожита енергія).

*Критерієм ефективності теплового насоса служить коефіцієнт теплопередачі* ( $k$ )

$$k = \frac{|Q_1|}{|Q_1| - |Q_2|} = \frac{1}{1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}} = \frac{1}{\eta}.$$

Очевидно  $k \gg 1$ . Структурні схеми холодильника і теплового насоса однакові.

Пошуки найбільш ефективної теплової машини та найбільш вигідного циклу для неї



привели до уявлення про *ідеальну теплову машину* – таку, яка працює без втрат на тертя за оборотним циклом (циклом Карно), який складається з двох ізотерм та двох адіабат. Те, що саме такий цикл забезпечує максимальний к. к. д. теплової машини, встановив у 1824 році Карно.

#### 4.1. Цикл Карно. Максимальний к. к. д. теплових машин

Знайдемо к. к. д. циклу Карно. В цьому циклі газ спочатку ізотермічно розширюється (ізотерма 1–2), отримуючи кількість теплоти  $Q_1$  від нагрівника при температурі  $T_1$ . Далі йде адіабатне розширення (адіабата 2–3). Після розширення газ стискується, спочатку ізотермічно (ізотерма 3–4), віддаючи кількість теплоти  $Q_2$  охолоджувачу при температурі  $T_2$ . потім, на останньому етапі, стискується адіабатно (адіабата 4–1).

Теплопередача в циклі здійснюється лише в ізотермічних процесах, при цьому кількість переданої теплоти рівна виконаній роботі.

Дійсно, за першим законом термодинаміки

$$\Delta U = Q - A.$$

Так як в ізотермічному процесі  $\Delta T = 0$ , то  $\Delta U = 0$ .

Звідси

$$Q = A.$$

Замінивши в формулі к.к.д. відношення кількостей теплоти відношенням робіт, отримаємо

$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|A_2|}{|A_1|}.$$

Карно довів, що к. к. д. циклу Карно

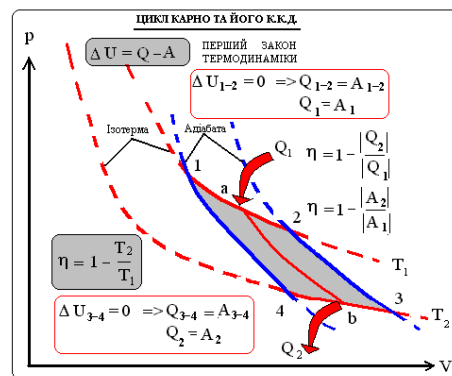
$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

або

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

#### Доповнення\*

Відношення робіт можна знайти, використавши формулу роботи ізотермічного процесу. Для процесів 1-





2 та 3-4, з врахуванням від'ємності останньої роботи, матимемо

$$A_{1-2} = \nu R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1},$$

$$A_{3-4} = \nu R T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}.$$

Для адіабатних процесів 2-3 та 4-1 матимемо за рівнянням Пуассона

$$\left(\frac{V_2}{V_3}\right)^{\gamma-1} = \frac{T_3}{T_2} \quad \text{та} \quad \left(\frac{V_4}{V_1}\right)^{\gamma-1} = \frac{T_1}{T_4},$$

звідки, при  $T_3 = T_4$  та  $T_1 = T_2$ ,

$$\left(\frac{V_2}{V_3}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_1}{V_4}\right)^{\gamma-1}$$

та

$$\frac{V_2}{V_3} = \frac{V_1}{V_4}.$$

Отже

$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|A_2|}{|A_1|} = 1 - \frac{\gamma R T_2 \ln \frac{V_1}{V_4}}{\gamma R T_1 \ln \frac{V_2}{V_3}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

**Зауваження.** Роботи при адіабатних процесах залежать лише від різниці температур ( $A_q = \Delta U_q = C_{M\nu} \Delta T$ ) і, маючи протилежні знаки, компенсуються.

Наведені співвідношення ілюструють **першу теорему Карно**, яка стверджує, що к.к.д. всіх машин, які працюють за циклом Карно між двома термостатами з даними температурами, рівні і не залежать від конкретної будови машин і роду робочого тіла.

**Друга теорема Карно** стверджує, що к.к.д. будь-якої машини  $\eta$ , що працює по необоротному циклу, не може перевищувати к.к.д. машини Карно  $\eta_m$ , що працює між тими ж тепловими резервуарами.

$$\eta \leq \eta_m, \quad \eta_m = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad \text{де } T_1 - \text{абсолютна температура нагрівника, } T_2 - \text{охолоджувача.}$$