

Принцип дії теплових двигунів. Холодильна машина

Необоротність процесів у природі

Оборотний процес – це процес, при якому можливе повернення системи в початковий стан без будь-яких змін у навколишньому середовищі.

Наприклад, абсолютно пружна кулька, падаючи у вакуумі на абсолютно пружну плиту, повернеться після відбиття у вихідне положення, пройшовши у зворотному напрямку всі ті проміжні стани, які вона проходила при падінні.

Необоротний процес – це процес, при якому неможливе повернення системи в початковий стан без перетворень у навколишньому середовищі.

Теплообмін, як показує досвід, є односторонньо спрямованим процесом. В результаті теплообміну енергія передається сама по собі завжди від тіла з високою температурою до тіла з більш низькою температурою. Зворотний процес передачі теплоти від холодного тіла до гарячого сам по собі ніколи не відбувається.

При *дифузії* вирівнювання концентрацій відбувається мимовільно. Зворотний же процес сам по собі ніколи не відбудеться: ніколи мимовільно суміш газів, наприклад, не розділиться на її складові компоненти.

Другий закон (начало) термодинаміки (Рудольфа Клаузіуса):

Неможливим є процес, єдиний результат якого – передача енергії у формі теплоти від менш нагрітого тіла до більш нагрітого.

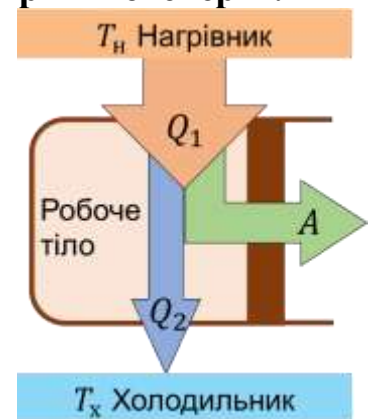
Другий закон (начало) термодинаміки (Вільяма Томсона (лорд Кельвін)):

Неможливим є періодичний процес, єдиний результат якого – виконання тілом механічної роботи за рахунок зменшення його внутрішньої енергії.

Тепловий двигун

Тепловий двигун – теплова машина циклічної дії, яка енергію, що виділяється під час згоряння палива, перетворює на механічну роботу.

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*.



Коефіцієнт корисної дії (ККД)

Коефіцієнт корисної дії η двигуна – фізична величина, яка характеризує економічність теплового двигуна і дорівнює відношенню роботи, виконуваної двигуном за цикл, до кількості теплоти, одержуваної від нагрівника.

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

Q_1 – кількість теплоти, одержана від нагрівника

Q_2 – кількість теплоти, віддана холодильнику

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*.

Ідеальний тепловий двигун – це двигун, який працює за циклом, що складається з двох ізотермічних і двох адіабатних процесів.

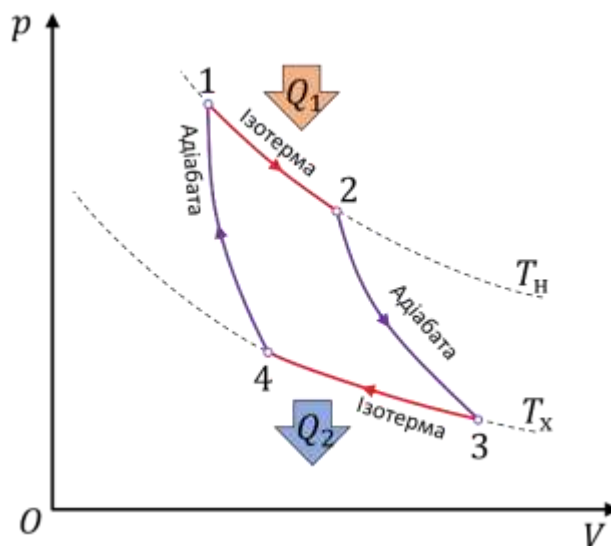
Цикл Карно:

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 .



Карно довів, що ККД такого двигуна дорівнює:

$$\eta_{\max} = \frac{T_H - T_x}{T_H}$$

T_H – температура нагрівника; T_x – температура холодильника.

Другий закон (начало) термодинаміки (Саді Карно):

Будь-яка реальна тепла 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.

Теплові двигуни

Види теплових двигунів:

- Парові турбіни (використовують у теплових та атомних електростанціях);
- Двигуни внутрішнього згоряння (автомобілі, водні судна);
- Реактивні та турбореактивні двигуни (літаки та ракети).

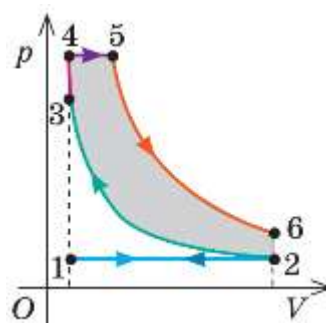
Принцип роботи чотиритактного дизельного двигуна

I такт Всмоктування

Ділянка 1 → 2 графіка. Поршень рухається вниз. Через відкритий впускний клапан повітря втягується в циліндр.

II такт Стиснення

Ділянка 2 → 3 графіка. Обидва клапани закриті, поршень рухається вгору, стискаючи повітря. Завдяки величезному стисненню повітря розігрівається до температури понад 700 °С.

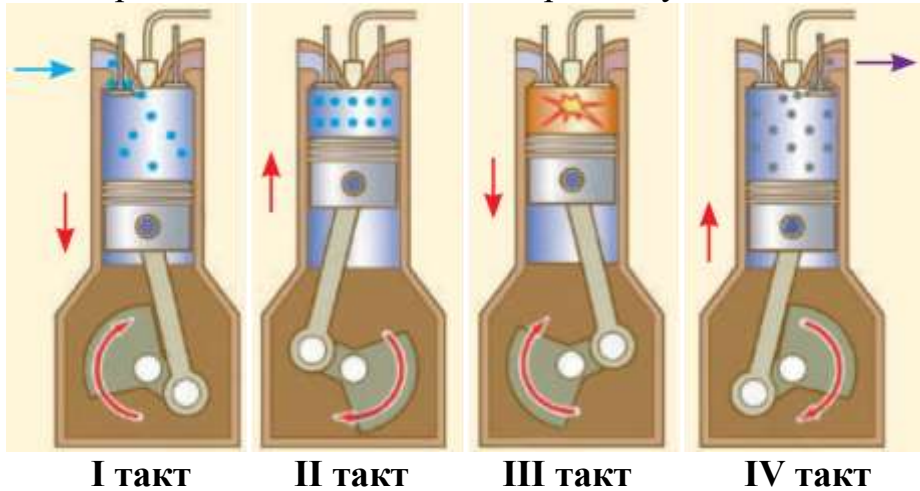


III такт Робочий хід

Ділянка $4 \rightarrow 5 \rightarrow 6$ графіка. Через форсунку в циліндр вприскується розпилене дизельне паливо ($3 \rightarrow 4$), яке змішується з розігрітим повітрям. Паливно-повітряна суміш спалахує і, розширюючись, штовхає поршень униз.

IV такт Випускання

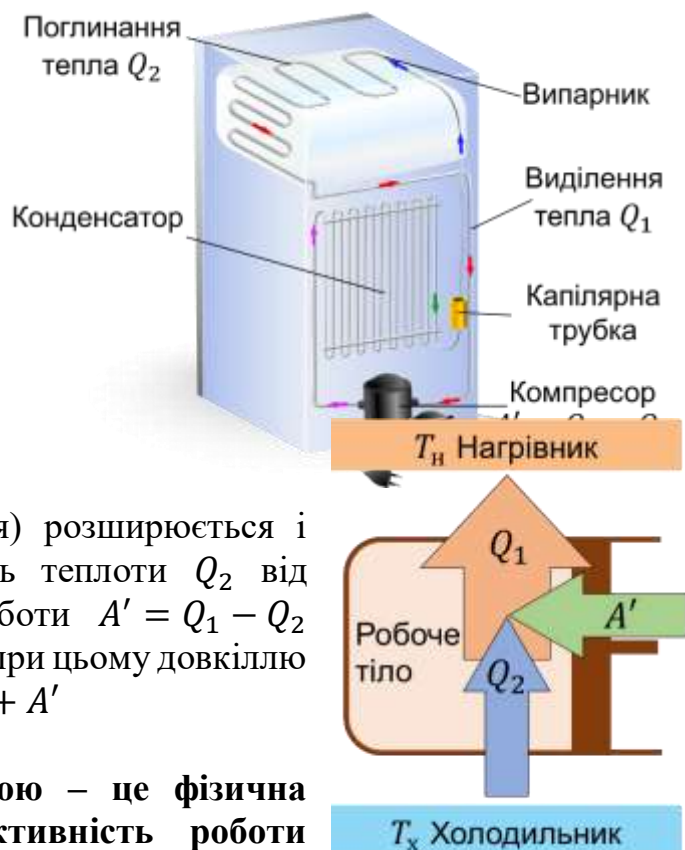
Ділянка $2 \rightarrow 1$ графіка. Відкривається випускний клапан ($6 \rightarrow 2$). Поршень піднімається, і відпрацьовані гази виходять через випускний клапан.



Холодильний пристрій

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

Принцип роботи холодильного пристрою: робоче тіло (холодоагент – пара рідини, яка легко випаровується) розширюється і виконує роботу, одержуючи кількість теплоти Q_2 від холодильної камери. За рахунок роботи $A' = Q_1 - Q_2$ зовнішніх сил робоче тіло стискається, при цьому довкіллю передається кількість теплоти $Q_1 = Q_2 + A'$



Холодильний коефіцієнт пристрою – це фізична величина, яка характеризує ефективність роботи холодильного пристрою і дорівнює відношенню кількості теплоти, забраної за цикл від холодильної камери, до роботи зовнішніх сил.

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

Q_2 – кількість теплоти одержана від холодильної камери

A' – робота зовнішніх сил

Q_1 – кількість теплоти передана довкіллю

Максимальний холодильний коефіцієнт пристрою:

$$k_{\max} = \frac{T_x}{T_H - T_x}$$

Холодильний коефіцієнт пристрою може бути більшим за одиницю (на відміну від ККД теплового двигуна).

Проблемні питання

- Що таке кондиціонер та як він працює?

Кондиціонер – електричний пристрій, призначений для охолодження повітря в приміщенні.

Якщо трубки теплообмінника винести за межі приміщення, а холодильну камеру залишити відчиненою, то холодильний пристрій забиратиме тепло з приміщення та віддаватиме його довкіллю.

ЗАКРІПЛЕННЯ НОВИХ ЗНАНЬ І ВМІНЬ

1. Кількість теплоти, віддана за цикл тепловим двигуном холодильнику, 1,5 кДж, ККД двигуна 20 %. Визначте кількість теплоти, отриману за цикл від нагрівала.

Дано:

$$Q_2 = 1,5 \text{ кДж}$$

$$= 1500 \text{ Дж}$$

$$\eta = 0,2$$

$$Q_1 = ?$$

Розв'язання

ККД теплової машини визначається за формулою:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \Rightarrow Q_1 = \frac{Q_2}{1 - \eta}$$

$$[Q_1] = \text{Дж}$$

$$Q_1 = \frac{1500}{1 - 0,2} = 1875 \text{ (Дж)}$$

Відповідь: $Q_1 = 1,875 \text{ кДж}$.

2. Ідеальний тепловий двигун за 0,5 год отримує від нагрівателя кількість теплоти 150 кДж, а холодильнику віддає 100 кДж. Визначте корисну потужність цього двигуна.

Дано:

$$t = 0,5 \text{ год}$$

$$= 1800 \text{ с}$$

$$Q_1 = 150 \text{ кДж}$$

$$= 1,5 \cdot 10^5 \text{ Дж}$$

$$Q_2 = 100 \text{ кДж}$$

$$= 1 \cdot 10^5 \text{ Дж}$$

$$P = ?$$

Розв'язання

Згідно з першим законом термодинаміки робота, яку виконує газ (за цикл) дорівнює:

$$A = Q_1 - Q_2$$

Потужність за означенням:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{Q_1 - Q_2}{t} \quad [P] = \frac{\text{Дж} - \text{Дж}}{\text{с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт}$$

$$P = \frac{1,5 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^5}{1800} \approx 27,8 \text{ (Вт)}$$

Відповідь: $P \approx 27,8 \text{ Вт}$.

3. Температура холодильника теплової машини, що працює за циклом Карно, 0 °С. За якої мінімальної температури нагрівана ККД теплової машини перевищуватиме 70 %?

Дано:

$$T_x = (0 + 273)K = 273 K$$

$$\eta_{\max} = 0,7$$

$$T_H - ?$$

Розв'язання

За формулою Карно максимально можливий ККД ідеального теплового двигуна дорівнює:

$$\eta_{\max} = \frac{T_H - T_x}{T_H} \Rightarrow T_H = \frac{T_x}{1 - \eta_{\max}}$$

$$[T_H] = K \quad T_H = \frac{273}{1 - 0,7} = 910 (K)$$

Відповідь: $T_H = 910 K$.

4. ККД теплової машини, що працює за циклом Карно, становить 0,25. У скільки разів необхідно збільшити температуру нагрівника за незмінної температури холодильника, щоб збільшити ККД в 2 рази?

Дано:

$$\eta_{\max 1} = 0,25$$

$$\eta_{\max 2} = 2\eta_{\max 1}$$

$$\frac{T_{H2}}{T_{H1}} - ?$$

Розв'язання

За формулою Карно максимально можливий ККД ідеального теплового двигуна дорівнює:

$$\eta_{\max} = \frac{T_H - T_x}{T_H} \Rightarrow T_H = \frac{T_x}{1 - \eta_{\max}}$$

$$\frac{T_{H2}}{T_{H1}} = \frac{\frac{T_x}{1 - \eta_{\max 2}}}{\frac{T_x}{1 - \eta_{\max 1}}} = \frac{1 - \eta_{\max 1}}{1 - 2\eta_{\max 1}} \quad \left[\frac{T_{H2}}{T_{H1}} \right] = \frac{1}{1} = 1$$

$$\frac{T_{H2}}{T_{H1}} = \frac{1 - 0,25}{1 - 2 \cdot 0,25} = 1,5$$

Відповідь: $\frac{T_{H2}}{T_{H1}} = 1,5$.

5. Холодильник, що працює за зворотним циклом Карно, відвів від охолоджуваного тіла 140 Дж теплоти й передав її нагрівнику, який має температуру 27 °С. Температура охолоджуваного тіла 7 °С. Визначте коефіцієнт ефективності холодильної машини. Яку роботу виконав холодильник для реалізації цього процесу?

Дано:

$$Q_2 = 140 \text{ Дж}$$

$$T_H = (27 + 273)K = 300 K$$

$$T_x = (7 + 273)K = 280 K$$

$$k_{\max} - ?$$

$$A' - ?$$

Розв'язання

Максимальний холодильний коефіцієнт пристрою:

$$k_{\max} = \frac{T_x}{T_H - T_x} \quad [k_{\max}] = \frac{K}{K - K} = 1$$

$$k_{\max} = \frac{280}{300 - 280} = 14$$

$$k_{\max} = \frac{Q_2}{A'} \Rightarrow A' = \frac{Q_2}{k_{\max}}$$

$$[A'] = \frac{\text{Дж}}{1} = \text{Дж} \quad A' = \frac{140}{14} = 10 \text{ (Дж)}$$

Відповідь: $k_{\max} = 14$; $A' = 10 \text{ Дж}$.

6. На швидкості 90 км/год автомобіль розвиває потужність 30 кВт, при цьому витрата палива становить 8 л бензину на 100 км шляху. Температура газу в циліндрі двигуна дорівнює 1250 К, а температура відпрацьованого газу – 450 К. Визначте, на скільки реальний ККД двигуна автомобіля менший за ККД ідеальної теплової машини.

Дано:

$$v = 90 \frac{\text{км}}{\text{год}} = 25 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$P = 30 \text{ кВт} = 3 \cdot 10^4 \text{ Вт}$$

$$V = 8 \text{ л} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$l = 100 \text{ км} = 10^5 \text{ м}$$

$$T_{\text{н}} = 1250 \text{ К}$$

$$T_{\text{х}} = 450 \text{ К}$$

$$\rho = 710 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$q = 46 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$$\Delta\eta - ?$$

Розв'язання

ККД реальної машини:

$$\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{Q_{\text{повна}}}$$

$$A_{\text{кор}} = Pt = P \frac{l}{v} \quad Q_{\text{повна}} = qm = q\rho V$$

$$\eta = \frac{Pl}{q\rho V} = \frac{Pl}{q\rho Vv}$$

$$[\eta] = \frac{\text{Вт} \cdot \text{м}}{\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \text{м}^3 \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}} = \frac{\frac{\text{Дж}}{\text{с}} \cdot \text{м}}{\text{Дж} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}} = 1$$

$$\eta = \frac{3 \cdot 10^4 \cdot 10^5}{46 \cdot 10^6 \cdot 710 \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot 25} \approx 0,46$$

За формулою Карно максимально можливий ККД ідеального теплового двигуна дорівнює:

$$\eta_{\max} = \frac{T_{\text{н}} - T_{\text{х}}}{T_{\text{н}}} \quad [\eta_{\max}] = \frac{\text{К} - \text{К}}{\text{К}} = 1$$

$$\eta_{\max} = \frac{1250 - 450}{1250} = 0,64$$

$$\Delta\eta = \eta_{\max} - \eta \quad \Delta\eta = 0,64 - 0,46 = 0,18$$

Відповідь: $\Delta\eta = 18\%$.

Запитання для самоперевірки

1. Наведіть приклади природних процесів і доведіть, що вони є не оборотними.
2. Сформулюйте другий закон термодинаміки.
3. Наведіть приклади умовних процесів, які не суперечать першому началу термодинаміки, але суперечать другому.
4. Дайте означення теплового двигуна. Які його основні елементи?
5. Як визначити ККД теплового двигуна? Які існують можливості збільшення ККД?
6. Як визначити ККД циклу Карно?
7. Як працює холодильний пристрій? Наведіть приклади різних холодильних пристроїв. У чому їх відмінність?
8. Що показує холодильний коефіцієнт?