

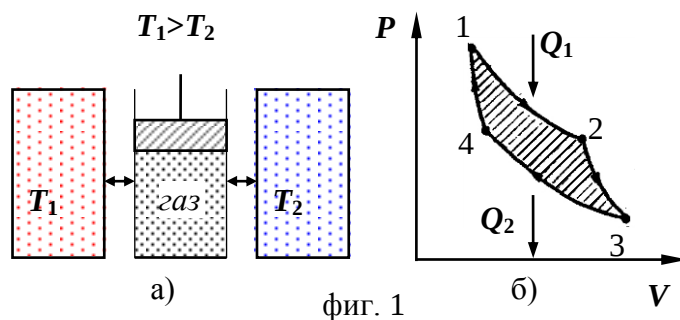
Цикъл на Карно. Коефициент на полезно действие на топлинна машина

Цикъл на Карно

Ще разгледаме принципното устройство на топлинна машина (фиг. 1а) на базата на идеализираният кръгов процес на френския инженер Карно. Изучавайки теоретично кръговите процеси, той достига до извода, че най-изгоден за практическо приложение е обратимият кръгов процес, който се състои от два изотермни и два адиабатни процеса, тъй като такъв цикличен процес има най-голям коефициент на полезно действие т.е. най-голяма част от предадената топлина се превръща в полезна работа. Графиката на такъв цикъл в P - V диаграма е представена на фиг. 1б (1–2 и 3–4 са изотермни процеси при температури съответно T_1 и $T_2 < T_1$, а 2–3 и 4–1 са двата адиабатни процеса).

Нека определено количество газ се намира в идеално изолиран съд с подвижно бутало (фиг. 1а) при температура T_1 , с налягане P_1 и обем V_1 (това отговаря на състояние 1 на графиката на фиг. 1б). Когато поставим съда в топлинен контакт с много голям резервоар със същата температура T_1 , газът ще получи количество топлина Q_1 от резервоара и ще извърши процес на изотермно разширение 1–2, при което обемът му ще се повиши до стойност V_2 , а налягането му ще се понижи до P_2 . Ако в този момент отделим съда от резервоара, той ще продължи да се разширява, но адиабатно (без топлообмен с околната среда) до състояние 3. При адиабатното разширение намаляват и температурата и налягането на газа и параметрите му в 3 ще бъдат P_3 , V_3 , T_2 . От състояние 3 в състояние 4 газът извършва още един изотермен процес – свиване, като се поставя в топлинен контакт с друг много голям резервоар, с температура $T_2 < T_1$, на когото при охлаждането предава количество топлина Q_2 .

Параметрите му в 4 ще бъдат P_4 , V_4 , T_2 . Тогава съдът се отделя от втория резервоар и извършва още един адиабатен процес 4–1 (свиване), при което се връща в началното си състояние 1. Така цикълът е завършен, а полезната работа A , извършена от газа, можем да пресметнем като площта, заштрихована на фиг. 1б.



Коефициент на полезно действие на топлинна машина

Коефициент на полезното действие η на една топлинна машина се нарича отношението на полезната работа A , извършена от машината при един цикъл, към количеството топлина Q_1 , постъпило в съда с газ от нагревателя. Така, за коефициента на полезно действие на идеална топлинна машина, работеща по идеалния цикъл на Карно, получаваме:

$$(1) \eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41}}{Q_1}.$$

Работата на газа при всеки един от процесите в цикъла ще пресметнем по формулите, получени за изотермен и адиабатен процес:

$$(2) \begin{aligned} A_{12} &= \frac{m}{\mu} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = Q_1 \\ A_{23} &= -\frac{m}{\mu} R(T_2 - T_1) \\ A_{34} &= \frac{m}{\mu} RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} = Q_2 \\ A_{41} &= -\frac{m}{\mu} R(T_1 - T_2) = -A_{23} \end{aligned}$$

Като заместим (2) в (1) получаваме:

$$(3) \eta = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = \frac{\frac{m}{\mu} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} + \frac{m}{\mu} RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3}}{\frac{m}{\mu} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}} = \frac{T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}}.$$

Трябва да имаме предвид, че $Q_1 > 0$, а $Q_2 < 0$, следователно $\eta < 1$. Като приложим уравнението на

Поасон за адиабатните процеси **2–3** и **4–1** можем да покажем, че $\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$:

$$(2-3) \quad T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}$$

$$(4-1) \quad T_2 V_4^{\gamma-1} = T_1 V_1^{\gamma-1}$$

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

и (3) ще придобие вида:

$$(4) \quad \eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} < 1.$$

От формула (4) се вижда, че коефициентът на полезно действие на идеалния цикъл на Карно не зависи от вида на работното вещество, а само от температурите T_1 и T_2 . За да се увеличи неговата стойност, е необходимо да се увеличава T_1 или да се намалява T_2 . Очевидно при $T_2=0 \text{ К}$ или при $T_1 \rightarrow \infty$ $\eta=1$, но това на практика е неосъществимо. Следователно коефициентът на полезно действие (КПД) дори на идеална топлинна машина, работеща по идеалния цикъл на Карно, винаги ще бъде по-малък от единица. За реална топлинна машина, с работно вещество реален, а не идеален газ:

$$\eta_p < 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

За съвременните топлинни машини, които работят по различни необратими цикли, коефициентът на полезното действие е около два пъти по-малък от този на цикъла на Карно.