

Кръгов, обратим и необратим процес. Топлинни машини. Цикъл на Карно.

Коефициент на полезно действие на топлинна машина. Обратен цикъл на Карно.

Хладилен коефициент на хладилна машина

Кръгов процес. Топлинни машини. Обратим и необратим процес

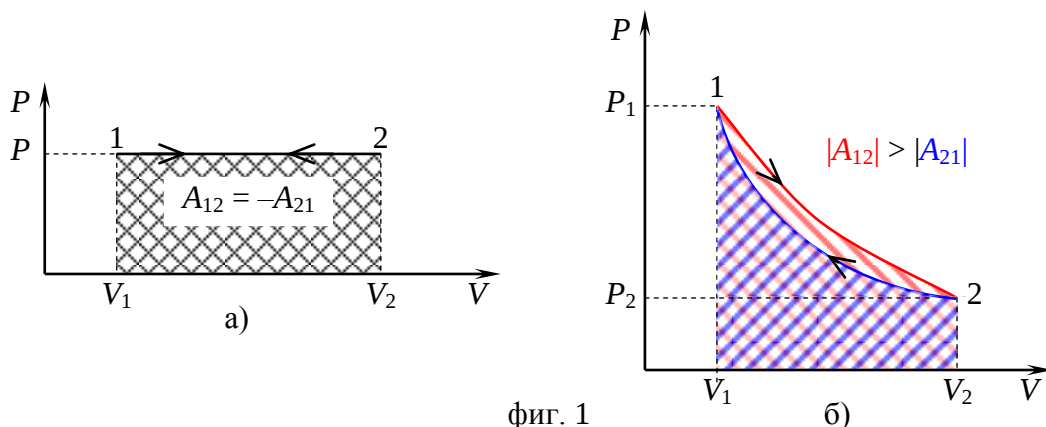
Законът за запазване на енергията, на който се основава първият принцип на термодинамиката (18 въпрос), не разрешава да получим повече енергия от тази, която сме внесли в системата, ако самата система не намалява енергията си. Той обаче не забранява преобразуването на енергия от един вид в друг. Тъй като повечето опити за използването на различните видове енергия са свързани с преобразуването в механична работа, именно първият принцип на термодинамиката ни подсказва начин, по който можем да използваме един от най-разпространените видове енергия – топлината. Чрез такива разсъждения се е стигнало до откриване на принципа на топлинната машина в средата на 18 век – ако предадем определено количество топлина Q на дадена термодинамична система (идеален газ), той може да извърши определена работа A при разширяването си т.е. това е устройство, което преобразува топлинната енергия в механична работа. Газът обаче не може да се разширява безкрайно – ако искаме машината да върши някаква полезна работа, трябва да намерим начин да върнем работното тяло (в случая газът) в началното му състояние. Такъв термодинамичен процес се нарича кръгов (или цикличен) – работното тяло, което разглеждаме, преминава през различни термодинамични състояния и се връща отново в изходното (начално) състояние. Това обаче е свързано с намаляване на обема на газа – той върши отрицателна работа (т.е. ние вършим работа за свиването му). Напр. ако загреем дадено количество газ (предадем му количество топлина)

изобарно (фиг. 1а), той ще се разшири и ще извърши работа $A_{12} = P(V_2 - V_1)$. Ако използваме същия изобарен процес при свиването му, ще извършим точно същата по големина работа върху газа (следователно газът ще извърши същата по големина работа, но с

обратен знак $A_{21} = P(V_1 - V_2)$), т.е. при този кръгов процес ние не печелим нищо, тъй като общата работа, извършена от газа е нула – $A_{12} = -A_{21}$, $A_{121} = A_{12} + A_{21} = 0$. Ако обаче газът извършва различни процеси при преходите от състояние 1 до състояние 2 и обратно в 1 (фиг. 1б), е възможно пълната работа на газа за този цикъл да е положителна ($A_{121} = A_{12} + A_{21} > 0$). На подобен принцип – извършване на кръгов (цикличен) процес чрез различни термодинамични процеси (най-често изопроцеси) – се основава действието на топлинните машини. С други думи, топлинната машина е устройство, което преобразува топлинната енергия в механична работа, чрез кръгов термодинамичен процес.

От друга страна всички термодинамични процеси могат да се разделят на два основни типа – обратими и необратими. Обратим е този процес, при който е възможно връщането на работното тяло от крайното в началното състояние точно по същия път и без настъпващи изменения в околната среда. При този процес, когато тялото се върне в изходното състояние, всички тела, с които то е взаимодействало, също трябва да се върнат в началните си състояния. Като пример за такъв процес може да разгледаме газ, поставен в цилиндър с подвижно бутало. Ако увеличим температурата на газа с ΔT , той ще се разшири и ще измести буталото, ако след това го охладим и намалим температурата му с ΔT , той ще се върне в изходното си състояние. Това се изпълнява обаче само ако пренебрегнем силите на триене и съпротивление, при които загубите на топлина са необратими. Строго обратими процеси в природата не съществуват. Това са идеализирани процеси, при които силите на триене и съпротивление не се вземат под внимание. Процесите, които не отговарят на условието за обратимост, се наричат необратими. При тях работното тяло не се връща в изходното състояние, т.е. в околната среда нещо се променя. Примери за необратими процеси са отдаването на количество топлина от по-топлите към по-студените тела, смесването на два газа с различни концентрации и др.

Основната разлика между обратимите и необратимите процеси е посоката, в която те могат да протичат. Обратимият процес се осъществява еднакво лесно в две противоположни посоки, наречени



права и обратна. При необратимите процеси двете посоки не са равностойни. Всеки необратим процес протича спонтанно в една определена посока, която се нарича естествена. Обратната посока на необратимия процес, в която той никога не протича от само себе си, се нарича неестествена. В зависимост от посоката, в която протичат, необратимите процеси биват естествени и неестествени. Естествени процеси са дифузията, топлопроводността, намаляването на скоростта на дадено тяло под действието на силата на триене и др. Неестествени процеси са преминаването на топлина от по-студено към по-топло тяло, свиването на газовете, разделянето на газова смес на съставните ѝ компоненти и др.

Разгледаните примери показват, че естествените процеси протичат спонтанно, докато неестествените могат да се осъществят само чрез външна намеса. Всички процеси в природата са необратими и естествени.

Цикъл на Карно. Коефициент на полезно действие на топлинна машина

Ще разгледаме принципното устройство на топлинна машина (фиг. 2а) на базата на идеализираният кръгов процес, предложен от 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. 2б (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. 2а) при температура T_1 , с налягане P_1 и обем V_1 (това отговаря на състояние 1 на графиката на фиг. 2б). 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 съдът с газа 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. 2б.

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:

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

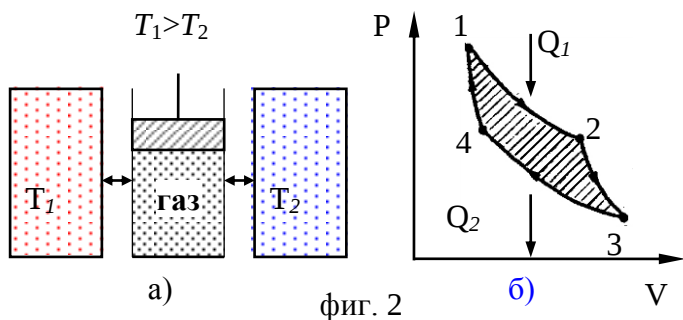
Работата на газа при всеки един от процесите в цикъла ще пресметнем по формулите, получени за изотермен и адиабатен процес (20 въпрос):

$$A_{12} = \frac{m}{\mu} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = Q_1$$

$$A_{23} = -\frac{m}{\mu} R(T_2 - T_1)$$

$$(2) \quad A_{34} = \frac{m}{\mu} RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} = Q_2$$

$$A_{41} = -\frac{m}{\mu} R(T_1 - T_2) = -A_{23}$$



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, получено в 20 въпрос 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:

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

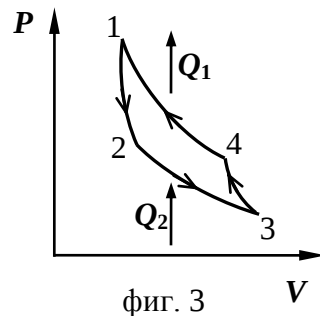
От формула (4) се вижда, че коефициентът на полезно действие на идеалния цикъл на Карно не зависи от вида на работното вещество, а само от температурите T_1 и T_2 . За да се увеличи неговата стойност, е необходимо да се увеличава T_1 или да се намалява T_2 . Очевидно при $T_2 = 0 \text{ K}$ или при $T_1 \rightarrow \infty$ $\eta = 1$, 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.

Обратен цикъл на Карно. Хладилен коефициент на хладилна машина

Нека да разгледаме цикъл на Карно, който протича в обратна посока (фиг. 3). Това е възможно, тъй като всички процеси в идеализирания цикъл са обратими. В адиабатния процес 1–2 газът се разширява без топлообмен с околната среда, при което температурата му се понижава от T_1 до T_2 тъй като той върши работа за сметка на вътрешната си енергия. Процесът 2–3 е изотермен, като работното тяло получава от резервоар II с температура T_2 количество топлина Q_2 . Процесът 3–4 е адиабатно свиване, което обаче газът не може да извърши самопроизволно, поради което трябва да се извърши някаква работа A върху него и температурата му се повишава до T_1 . Последният процес 4–1 е изотермно свиване, за което е необходимо да се отдаде количество топлина Q_1 на друг резервоар I с температура T_1 за да може в състояние 1 да има същата вътрешна енергия, която е имал в началото на цикъла. В дадения случай сумарната работа, която върши газът е отрицателна (ние извършваме работа за свиването му) и следователно $Q_2 < Q_1$ т.е. извършваме работа за да отнемаме топлина от тялото с по-ниска температура и да я предадем на тялото с по-висока температура (работата и в този случай е равна по големина на площта заградена от цикъла 1–2–3–4–1). Това е принципът на действие на хладилника. Реално цикълът започва в 3, където се извършва компресиране на работното вещество, при което именно се върши работата A . Обикновено резервоарът II е обемът, който искаме да охладим, а за резервоар I се използва околната среда.



Основната характеристика на една хладилна машина е нейният **хладилен коефициент**, който е свързан с ефективността ѝ. Ясно е, че една хладилна машина е толкова по-ефективна, колкото по-малко работа A влагаме за охлаждането и колкото по-голямо количество топлина Q_2 успяваме да отведем за един цикъл. Така хладилният коефициент ε на една хладилна инсталация се дава с:

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2}.$$

За идеална хладилна машина работеща по обратния цикъл на Карно можем да приложим разсъжденията за правия цикъл по-горе и ще достигнем до израз, който не зависи от работното тяло, а само от температурите на двата резервоара:

$$(5) \quad \varepsilon = \frac{T_2}{T_1 - T_2}.$$

Ако сравним (5) с КПД η на топлинна машина, работеща в правия цикъл на Карно, можем да получим връзка между термичния КПД на топлинната машина и хладилния коефициент на същата машина, работеща по обратния цикъл на Карно като хладилник:

$$\varepsilon = \frac{1 - \eta}{\eta}.$$

Можем да забележим, че колкото е по-голям термичният КПД на устройството, толкова е по-малък хладилният му коефициент. Това не е учудващо, тъй като с топлинната и хладилната машини ние си поставяме две противоположни цели: с топлинната машина трябва да получаваме повече полезна работа A при по-малко количество топлина Q_2 отдавано на охладителя; при обратния процес на охлаждане се стремим да вложим по-малко работа и да отнемем по-голямо количество топлина от охлаждадения обем. С други думи ако едно устройство работи много ефективно като топлинна машина, то не може да се използва като добър хладилник и обратно. От друга страна можем да използваме ефективно един хладилник като нагревател (напр. климатик), но в този случай ние не получаваме полезна работа, а само пренасяме определено количество топлина от едно тяло към друго.