

Тема 6. Кръгови процеси. Цикъл на Карно. Топлинни и хладилни машини

1. Равновесно състояние

Една термодинамична система се намира в термодинамично равновесие, ако макроскопичните величини, определящи състоянието ѝ, остават постоянни. Това се отнася в най-голяма степен за налягането и температурата. В състояние на равновесие не могат да протичат такива явления като топлопроводност, дифузия, химически реакции, фазови преходи.

Термодинамичното равновесие съществено се отличава от механичното по това, че дори когато макроскопичните величини остават постоянни, градивните частици на системата не преустановяват движенията си. А обстоятелството, че хаотичното движение не пречи системата да остане в равновесие, се дължи на огромния брой частици.

Така например, ако две тела, имащи една и съща температура, се доведат в контакт, те няма да обменят топлина и ще се намират в равновесие. При това не е изключено в някои от точките на контакт градивните частици на едното тяло да притежават по-голяма кинетична енергия и да се придава топлина от едното тяло към другото. Но този преход обезателно ще бъде компенсиран в друга точка.

Добре известен е фактът, че в състояние на равновесие газът се разпределя равномерно в целия обем на съда и плътността му във всички части е еднаква. Това явление се обуславя от големия брой молекули. Ако, например, в съда има само сто молекули, то при напълни хаотично движение на молекулите не можем да очакваме, че в двете половини на съда в произволен момент от време ще се съдържат точно по 50 молекули. Но дори при голям брой частици са възможни отклонения от равномерното им разпределение в обема на съда. Еднаква и постоянна остава само средната плътност на газа.

Аналогична е ситуацията при установяване на равновесие между течност и парите ѝ в затворен съд. Парите над течността се образуват в резултат на изпарение – процес при който молекулите от течността, притежаващи по-голяма енергия, се отделят от повърхността. Но при хаотичното си движение молекули от парите е възможно отново да се върнат в течността (т.е. парите да кондензират) и кондензацията е толкова по-голяма, колкото повече пара се е образувала. Равновесие между течността и парите настъпва когато броят на молекулите, напускащи течността за единица време, стане равен на броя на молекулите, които се връщат в нея. Парите стават *наситени*, след което не се наблюдават никакви макроскопични изменения в системата – налягането и температурата остават постоянни. Но изпарението и кондензацията продължават и след установяването на равновесието. Не е изключено в отделни части плътността на парата да се различава от средната, т.е. от плътността на наситените пари.

Тези примери показват две особености на равновесните състояния. Първо, понятието „термодинамично равновесие” е идеализация, тъй като строго погледнато параметрите на състоянието при равновесие не остават постоянни, а претърпяват неголеми колебания около равновесните (средните) си стойности. Такива колебания се наричат „*флуктуации*”. Второ, за термодинамично равновесие може да се говори само в случаите когато броят на частиците на системата е много голям.

2. Обратими и необратими процеси

Ако една термодинамична система се изведе от равновесното си състояние, тя спонтанно (без външни въздействия) се стреми към равновесие. Може да се каже, че равновесието е такова състояние, в което преминава всяка термодинамична система при отсъствие на външни въздействия. Процесът на преход към равновесно състояние, се нарича *процес на релаксация*, а времето, необходимо за този процес – *време на релаксация*. След като равновесното състояние е вече установено, системата не може от само себе си да се върне в първоначалното неравновесно състояние, т.е. преходът в обратна посока не може да

се осъществи без външно въздействие. Поради това процесите на релаксация са **необратими термодинамични процеси**. Примери за необратими процеси:

- Всички процеси, съпроводени с триене;
- Всички процеси, при които се предава топлина от по-топло към по-студено тяло (топлопроводност);
- Разширение на газ във вакуум;
- Процесите на дифузия.

Разгледаните примери показват, че естествените процеси, които протичат в термодинамичните системи, са необратими. По това те се отличават от чисто механичните процеси, които (при пренебрегване на силите на триене и на съпротивление и на нееластични взаимодействия) са обратими. Причина за необратимостта е огромния брой микрочастици и пълната хаотичност на движенията им.

Обратим се нарича процес, за който е възможен обратния преход от крайното в началното състояние на системата през същите междинни състояния (но в обратен ред), като при това не настъпват никакви изменения в телата извън разглежданата система.

3. Квазистатични процеси

Да си представим процес (например свиване на газ в цилиндър под бутало), който протича много по-бавно от процесите на релаксация за разглежданата система. При това условие във всеки момент стойностите на параметрите се изравняват и процесът може да се разглежда като поредица от безкрайно близки равновесни състояния. Такива процеси се наричат **равновесни**, или **квазистатични**. Равновесните състояния и равновесните процеси могат да се изобразяват графично (например в pV – диаграма).

Един неравновесен процес по принцип не може да бъде обратим, т.е. **неравновесните процеси са необратими**. От друга страна, **равновесните процеси са обратими**.

Има процеси, които при едни условия са равновесни (т.е. протичат обратимо), а при други могат да се окажат необратими. В случая на свиване или разширение на газ времето на релаксация се определя от времето за разпространение на звукови вълни в газа. Процесът е квазистатичен, ако скоростта на преместване на буталото е много по-малка от скоростта на звука в газа.

4. Топлинна машина и формулировка на втория принцип на термодинамиката по Келвин-Планк

Според първия принцип на термодинамиката

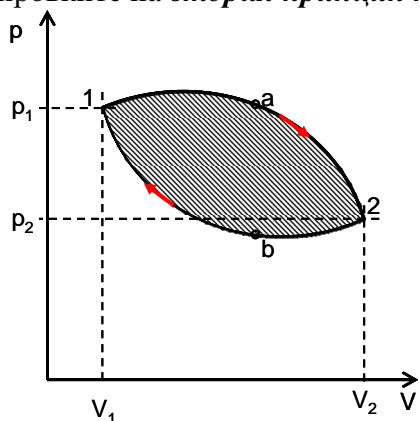
$$(6.1) \quad \delta A = \delta Q - dU$$

Най-голяма работа се извършва при изотермичен процес, когато вътрешната енергия на системата не се изменя, т.е. $\delta A = \delta Q$.

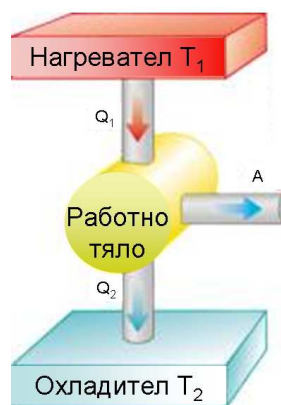
За техниката представлява интерес не единично преобразуване на топлината в механична работа. Реално съществуващите устройства за превръщане на топлината в работа (парна машина, двигатели с вътрешно горене и т.н.) действат както е известно циклично, т.е. в тях процесите на предаване на количество топлина и превръщането му в работа периодично се повтарят. За това е необходимо тялото, извършващо работа, след получаване на топлина от източника да се върне в изходно състояние, за да може отново да започне същия процес. С други думи работното тяло трябва да извършва кръгов процес (фиг. 6.1).

Възниква важният въпрос: може ли при цикличен процес да се получи работа, равна на топлината, получена от източника? На пръв поглед изглежда, че няма никакви пречки – в резултат на цикъла тялото, извършващо работа, се връща в изходно състояние, вътрешната му енергия остава непроменена и работата трябва да бъде равна на погълнатата топлина. В действителност обаче, натрупаните експериментални данни ни задължават да отоговим отрицателно на поставения въпрос. Отговорът е формулиран през 1854 г. от Томсън (Келвин) във вид на общ принцип: **не е възможен термодинамичен процес, единственият**

результат от който да бъде превръщането на погълнатото от работното вещество количество топлина изцяло в полезна работа. Този принцип представлява една от формулировките на **втория принцип на термодинамиката**.



Фиг. 6.1



Фиг. 6.2

И така, за да се преобразува топлината в работа е необходимо тялото, което извършва работа (работното тяло) да отнеме количество топлина от източника (нагревателя), да се разшири, при което извършва работа, и връщайки се в изходно състояние (свивайки се), да предаде част от топлината на трето тяло (охладител). Ролята на охладител много често се изпълнява от външната среда. Принципната схема на топлинен двигател е представена на фиг. 6.2.

За да изясним нуждата от допълнително тяло, което получава част от топлината, да разгледаме цикличния процес, представен на фиг. 6.1, който се извършва по посока на часовниковата стрелка. Работното тяло получава от нагревателя количество топлина Q_1 , разширява се и извършва работа $A_{1 \rightarrow 2}$, съответстваща на площта $V_1 1a2V_2$. След това за да се върне в първоначално състояние, е необходимо да се свие, т.е. над тялото трябва се извършва работа $A' = |A_{2 \rightarrow 1}|$. Очевидно

$$(6.2) \quad A' < A_{1 \rightarrow 2},$$

тъй като в противен случай топлинната машина няма да трансформира топлина в механична работа. Условието (6.2) е изпълнено, ако процесът на свиване се представя в pV -диаграмата с крива, лежаща по-ниско от $1a2$ (например процес $2b1$). На този процес съответства по-ниска температура. Следователно преди свиването работното тяло трябва да бъде охладено. От него е необходимо да се отнеме количество топлина Q_2 , което се предава на охладителя.

Да означим с U_1 и U_2 вътрешната енергия на системата съответно в състояния 1 и 2. Тогава от първия принцип на термодинамиката

$$Q_1 = \int_1^2 dU + \int_1^2 p dV = U_2 - U_1 + A_{1 \rightarrow 2}$$

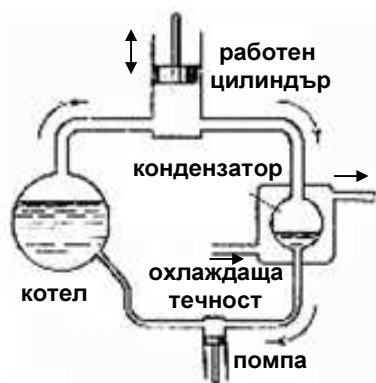
$$Q_2 = \int_2^1 dU + \int_2^1 p dV = U_1 - U_2 + A_{2 \rightarrow 1}$$

В последното равенство Q_2 и $A_{2 \rightarrow 1}$ са отрицателни величини.

Събирайки двете равенства, за работата, извършена от работното тяло при кръговия процес, намираме

$$(6.3) \quad A = Q_1 + Q_2 = Q_1 - |Q_2|$$

Като пример за топлинна машина ще разгледаме парната машина (фиг. 6.3)



Фиг. 6.3

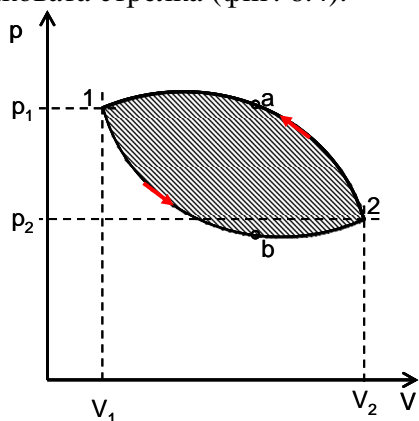
Водата и парата, явяващи се работното вещество, извършват кръгов процес. Водата в котела се превръща в пара при висока температура T_1 . При това парата поглъща количество топлина Q_1 . Парата постъпва в работния цилиндър, там адиабатно се разширява и, изтласквайки буталото, извършва работа. Преминвайки в кондензора, парата се охлажда от вода с температура T_2 и частично кондензира. При това кондензорът получава количество топлина $Q_2 < Q_1$. Накрая с помощта на помпа кондензираната пара под формата на вода отново се подава в котела.

Отношението на работата $\oint \delta A$, извършена от работното тяло по време на цикъла, към количеството топлина Q_1 , погълнато от нагревателя, се нарича термодинамичен коефициент на полезно действие (КПД) на топлинната машина:

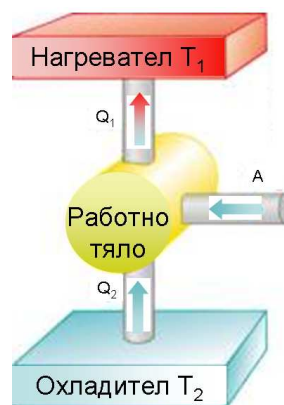
$$(6.4) \quad \eta = \frac{\oint \delta A}{Q_1} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} < 0$$

5. Хладилна машина и формулировка на втория принцип на термодинамиката по Клаузиус

Да разгледаме сега кръгов процес, който се извършва в посока, обратна на посоката на часовниковата стрелка (фиг. 6.4).



Фиг. 6.4

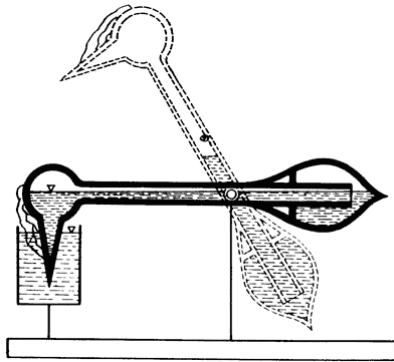


Фиг. 6.5

В този случай при разширението на газа състоянието на системата се изменя по процеса 1b2. При това се извършва положителна работа $A_{1 \rightarrow 2}$, съответстваща на площта $V_1 1b2V_2$. При свиването газът се връща в изходно състояние по процеса 2a1, извършвайки отрицателна работа $A_{2 \rightarrow 1}$, която съответства на площта $V_2 2a1V_1$. Сумарната работа на системата за един цикъл е $A_{1 \rightarrow 2} - A_{2 \rightarrow 1} = A < 0$ и графично се изразява с площта, ограничена от затворената крива. Тъй като разширението се осъществява при по-ниска температура, отколкото свиването, количеството топлина Q_2 се взема от по-студеното тяло, а Q_1 се предава на по-топлото (фиг. 6.5). Машина, извършваща такъв цикъл, се нарича *хладилна*. Тя работи за сметка на външна сила, която извършва работа $A' = |A|$.

От разгледания принцип на хладилна машина следва изводът: не може без да се извърши работа да се прехвърли количество топлина от по-студено на по-топло тяло. Той изразява съдържанието на вторич принцип на термодинамиката, формулиран от Клаузиус: *не е възможен термодинамичен процес, единственият резултат от който да бъде предаване на топлина от тяло с по-ниска към тяло с по-висока температура.*

Нагледна демонстрация на втория принцип на термодинамиката представлява детската играчка «патето, пиещо вода» (фиг. 6.6).



Фиг. 6.6.

„Патето” представлява стъклено кълбо, в което е запоена стъклена тръбичка. Тръбичката завършва в покрит с папук глава с клон, също частично покрит с памук. Въздухът от прибора е изведен. Кълбото е частично запълнено с лесно изпаряваща се течност. „Патето” е закрепено на ос в леко наклонено положение. Когато главата се навлажни от водата, при изпарението на водата протича охлаждане. В резултат налягането на парите в главата намалява. Течността навлиза в тръбичката в по-голямо количество, при което центъра на масите на системата се издига над оста и патето се навежда, докосвайки с клонка си повърхността на водата в поставената пред него паничка. По такъв начин клонка и главата отново се овлажняват. Когато патето се наклони, долният край на тръбичката в кълбото излиза от течността, в резултат на което между парите в главата и в кълбото се осъществява връзка. Затова налягането на парите се уравновесява, течността в тръбичката слиза надолу и патето си повдига главата. След това процесът отново се повтаря. Движението на патето е за сметка на топлината, която се отнема от околната среда.

6. Цикъл на Карно

В резултат на изследване на причините за много ниския КПД на топлинните двигатели през 1824 г., далеч преди формулирането на втория принцип на термодинамиката, Карно достига до следното заключение:

Максималният КПД за даден цикличен процес може да се достигне, ако са изпълнени две условия:

- Получаването и отдаването на топлина от работното вещество трябва да става при постоянна температура;
- Температурата на работното вещество трябва да се изменя само в резултат на извършване на работа (адиабатно, без топлообмен).

При тези условия процесът е напълно обратим, тъй като при изотермните процеси се осъществява идеален равновесен топлообмен, а при адиабатните няма топлообмен. С други думи липсват необратими процеси на топлопроводност.

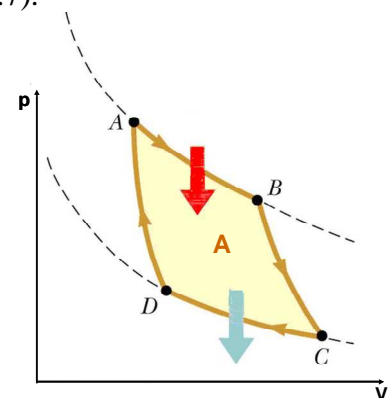
Обратим цикличен процес, който се състои от две равновесни изотерми и две равновесни адиабати, се нарича идеален цикъл на Карно (фиг. 6.7).

Предполагаме, че нагревателят и охладителят на идеалната топлинна машина на Карно имат огромни топлинни капацитети, така че температурите им (T_1 и T_2 съответно) не се променят при контакта им с работното вещество. Предполагаме освен това, че всички процеси протичат достатъчно бавно, т.е. те са квазистатични.

A→B – изотермен процес ($T_1 = \text{const}$):

Работното тяло е в контакт с нагревателя, като температурата му е диференциално малко по-ниска от температурата T_1 на нагревателя. Работното тяло се разширява изотермно, извършва се работа за сметка на топлината, получена от нагревателя (например премества се бутало).

B→C – адиабатен процес ($Q_{BC} = 0$):



Фиг. 6.7

Работното тяло се изолира от нагревателя и му се дава възможност да се разшири адиабатно, при което температурата му се понижава, като става диференциално малко по-висока от температурата T_2 на охладителя. Извършва се допълнително работа.

C→D – изотермен процес ($T_2 = \text{const}$):

Работното тяло е в контакт с охладителя. То се свива изотермно за сметка на външна работа и отдава топлина на охладителя.

D→A – адиабатен процес ($Q_{DA} = 0$):

Работното тяло се изолира от охладителя и допълнително се свива адиабатно за сметка на външна работа, за да повиши температурата си и се върне в началното си състояние.

Ще пресметнем КПД на идеалната машина на Карно, когато работното тяло е 1 mol идеален газ. Количеството топлина, придадено на газа от нагревателя при изотермния процес е:

$$Q_{AB} = RT_1 \ln \frac{V_B}{V_A} > 0$$

Количеството топлина, отдадено от идеалния газ на охладителя при изотермичното свиване е:

$$Q_{CD} = RT_1 \ln \frac{V_D}{V_C} < 0$$

Другите два процеса протичат без топлообмен. Тогава

$$\eta = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = \frac{RT_1 \ln \frac{V_B}{V_A} - RT_2 \ln \frac{V_C}{V_D}}{RT_1 \ln \frac{V_B}{V_A}}$$

Между обемите на газа в четирите състояния има връзка, която се получава от уравненията на процесите. За адиабатния процес BC

$$T_1 V_B^{\gamma-1} = T_2 V_C^{\gamma-1}$$

Аналогично за адиабатния процес DA

$$T_1 V_A^{\gamma-1} = T_2 V_D^{\gamma-1}$$

Почленно разделяне на последните две уравнения води до пропорцията $\frac{V_B}{V_A} = \frac{V_C}{V_D}$

$$(6.5) \quad \eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Първа теорема на Карно: Получихме, че КПД на обратимата машина на Карно с работно вещество идеален газ зависи само от температурите на нагревателя и охладителя. Доказва се, че този резултат не зависи от вида на работното вещество. Това е съдържанието на първата теорема на Карно:

Всички обратими машини, работещи по идеалния цикъл на Карно с даден нагревател ($T_1 = \text{const}$) и охладител ($T_2 = \text{const}$) имат еднакъв КПД, т.е. КПД на обратимия цикъл на Карно не зависи от вида на работното вещество и се определя от

$$\text{израза: } \eta_k = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

При напълно обратимата топлинна машина, работеща по идеалния цикъл на Карно, са осигурени възможно най-изгодните условия за превръщане на топлинната енергия в работа. Във всичките си етапи той се провежда така, че да се избегне контакт между тела с различни температури и да се изключи възможността за необратим процес на топлообмен. Изменението на обема също се провежда обратимо, при което се обезпечава максимум на извършената работа. Цикълът на Карно е идеализиран. Някоя реална топлинна машина не

работи по този цикъл. Въпреки това той има принципно значение в термодинамиката, защото определя теоретичната горна граница на КПД на топлинните машини.

Втора теорема на Карно: *Топлинна машина, работеща при дадени температури на нагревателя и хладилника, не може да има КПД по-голям от топлинна машина, работеща по обратимия цикъл на Карно при същите температури на нагревателя и хладилника:*

$$(6.6) \quad \frac{A}{Q_1} \leq \eta_k = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Нека в (8.6) заместим работата A от израза (8.3):

$$\frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} \leq 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad \text{или} \quad 1 + \frac{Q_2}{Q_1} \leq 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Така достигаме до равенството:

$$(6.7) \quad \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0$$

Знакът „=” в тази зависимост се отнася за обратими процеси, а знакът „<” – за необратими.

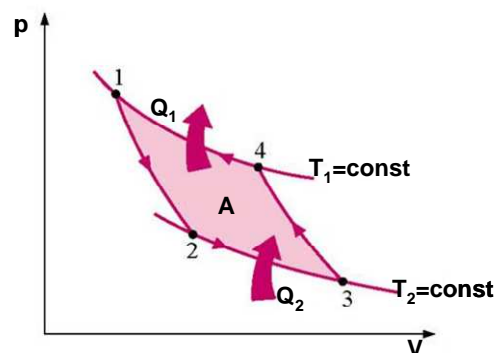
Обратен цикъл на Карно: Обратимият процес се характеризира с това, че ако се проведе в обратна посока, тялото, участващо в процеса, преминава през същите състояния, но в обратен ред. В случая на цикъла на Карно това означава, че топлина ще се придава не от нагревателя към охладителя, а обратно – от охладителя към нагревателя. Следователно машина, работеща по обратния цикъл на Карно представлява *хладилна машина*.

Обратният цикъл на Карно (фиг. 6.8.) започва с това, че работното тяло, намиращо се например в състояние, съответстващо на точка 1, адиабатно се разширява до състояние, съответстващо на точка 2, а след това изотермично се разширява до точка 3. През тези първи два етапа работното тяло се разширява и извършва работа. През втората половина на цикъла – по адиабатата 3→4 и изотермата 4→1 – работното тяло се свива за сметка на работа, извършена над него от външен източник на енергия. Тази работа е по-голяма от работата, извършвана от работното тяло при разширението. Следователно резултатът от обратния цикъл на Карно не е извършване на работа, а пренос на топлина от охладителя към нагревателя, т.е. от по-студеното към по-топлото тяло. В този случай се въвежда величината *коэффициент на ефективност*:

$$(6.8) \quad \eta' = \frac{Q_2}{A} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} > 1$$

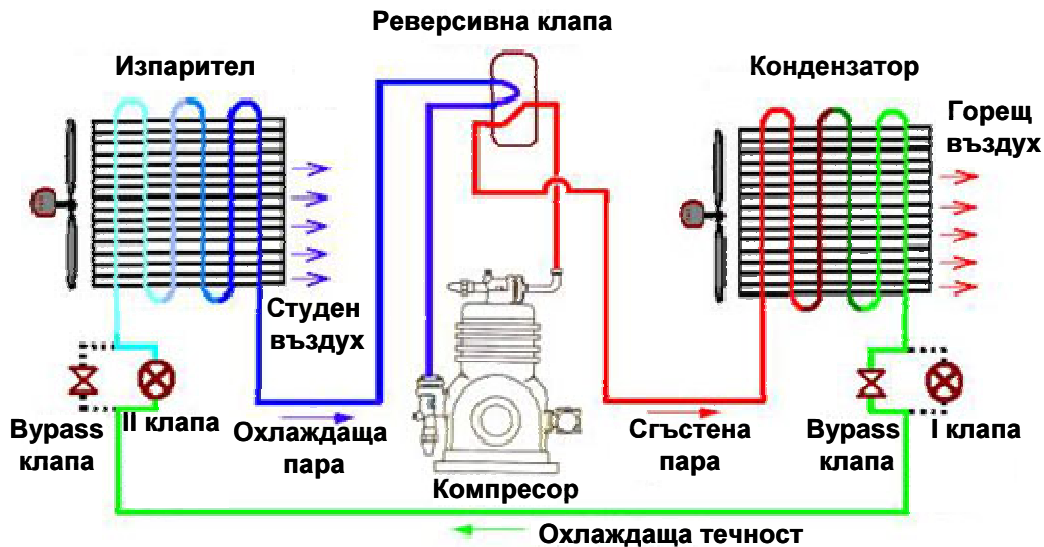
7. Топлинна помпа

Топлинната помпа е механизъм, който използва работа на външна сила за да пренесе количество топлина от по-студено към по-топло тяло. Тя е подложена на същите ограничения от втория принцип на термодинамиката както всички топлинни машини и нейната максимална ефективност може да се определи от цикъла на Карно. Топлинната помпа лежи в основата на климатиците и може да работи в два режима – на охлаждане и на загряване. Работата и се основава на компресионно-кондензаторен цикъл. При него топлината се “извлече” от обема, който я доставя (вътрешен или външен въздух) под формата на топлина за изпаряване на някакъв течен хладилен агент. След сгъстяване на парите в компресор до значително по-високо налягане и по-висока температура, те кондензират, като отдават своята топлина на кондензация на околното пространство, което може да бъде въздух или вода.



Фиг. 6.8

Режим на охлаждане:



Фиг. 6.9

Кондиционерът по същество представлява топлинна помпа, към която са добавени една реверсивна клапа, две разширителни клапи и две bypass клапи. Реверсивната клапа дава възможност циркулацията на охладителя да се промени и един и същ агрегат да работи едновременно и при охлаждане и при загряване. Принципът на действие е следния (фиг. 6.9):

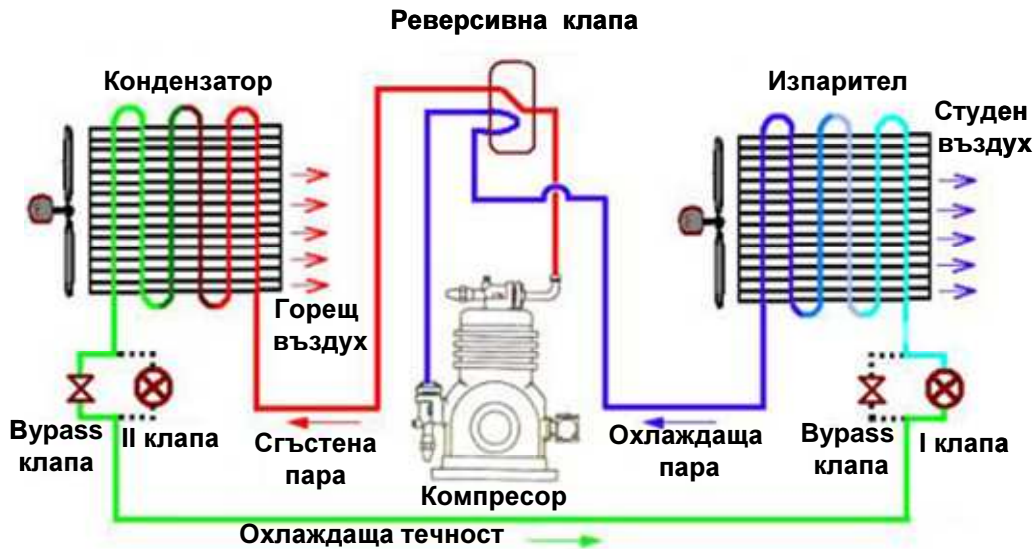
- Компресорът сгъстява парата на хладилния агент и я изпомпва към обратимата клапа;
- Обратимата клапа насочва сгъстената пара към кондензатора (външния топлообменник), където хладилният агент се охлажда и кондензира до течност; При това температурата на кондензация (а оттам и налягането на парите на хладилния агент след компресора) трябва да бъде доста по-висока от температурите, които трябва да се достигнат в стаята.
- Въздухът, движещ се в серпантината на кондензатора, отнема топлината от хладилния агент;
- Втечненият хладилен агент преминава през първата разширителна клапа и се придвижва през втората разширителна клапа в изпарителя (вътрешния топлообменник), разширява се в изпарителя и се трансформира в пара; Температурата на изпарение трябва да се достатъчно ниска, за да се „извлече” топлина от стаята.
- Хладилният агент отнема количество топлина от въздуха, циркулиращ през серпантината на изпарителя и охладеният въздух излиза от другата страна на серпантината;
- Хладилният агент под формата на пара се връща отново до реверсивната клапа за да бъде насочен към компресора, след което охлаждащият цикъл се повтаря.

Отношението на полученото от по-студеното тяло количество топлина Q_2 към вложената под формата на работа механична енергия за сгъстяване на парите на хладилния агент се нарича *коэффициент на използване на енергията*. Неговата максимална стойност може да се оцени като се използва теоремата на Карно:

$$(6.9) \quad \eta' = \frac{Q_2}{A} \leq \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

Следователно коэффициентът на използване на енергията е толкова по-голям, колкото по-малка е разликата в температурите T_1 и T_2 , т.е. при повишаване на температурата на изпаряване и понижаване на температурата на кондензация на хладилния агент.

Режим на загряване:



Фиг. 6.10

Топлинната помпа, работеща в режим на загряване е представена на фиг. 6.10. Разликата между двата режима е, че реверсивната клапа насочва сгъстените пари на хладилния агент към вътрешния топлообменник. Я случая той работи като кондензатор и отделя топлинна енергия. Топлината се предава на въздуха, който циркулира през серпантината и топлият въздух се насочва към помещението. Външният топлообменник изпълнява ролята на изпарител. Течният хладилен агент преминава през втората разширителна клапа, предвижва се към първата разширителна клапа, където се разширява в изпарителя. Трансформира се в пара и поглъща количество топлина от околния въздух.

Отношението на предаденото на по-топлото тяло количество топлина Q_1 към вложената енергия се нарича **коэффициент на трансформация**:

(6.10)
$$\eta'' = \frac{Q_1}{A} \leq \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$