

temperatura de inversie este $T_i = \frac{2a}{Rb}$, astfel încât $\lambda < 0$ pentru $T > T_i$ și

$\lambda > 0$ pentru $T < T_i$. Când coeficientul de dilatare al gazului real e mai mare decât al gazelor perfecte, are loc scăderea temperaturii gazului (O_2 , N_2 , aer); în caz contrar se produce o creștere a temperaturii gazului (He , H_2). Pentru gazele cu densitate mare există puncte de inversie inferior și superior [1].

Acest efect este utilizat în tehnică pentru obținerea temperaturilor foarte joase și pentru lichefierea gazelor prin *procedeele* Linde (1895).

1.10. Lucrul maxim. Ciclul Carnot. Randamentul motoarelor

Ciclul Carnot a fost propus în anul 1820 de inginerul francez Nicolas Léonard Sadi Carnot în scopul îmbunătățirii randamentului motoarelor termice. Este un ciclu teoretic reversibil, alcătuit din două

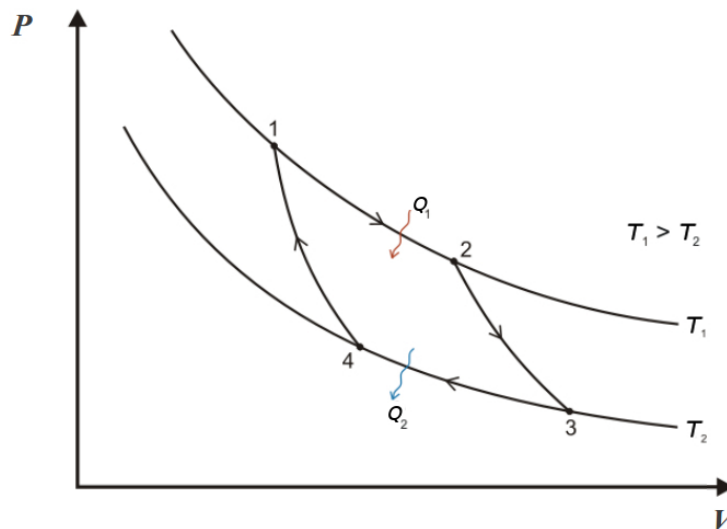


Fig.4. Reprezentarea în diagrama P - V a ciclului Carnot.

transformări adiabatice și două transformări izoterme. Motorul imaginat de Carnot folosea drept agent termic gazul ideal prin transformările căruia se obține lucrul mecanic. Este un ciclu efectuat de o „mașină Carnot” unită la două surse de căldură de temperaturi diferite („sursa caldă” și „sursa rece”). Ca orice ciclu termodinamic, și ciclul Carnot poate fi parcurs în sens orar, fiind în acest caz un ciclu motor, sau în sens antiorar (trigonometric), fiind în acest caz un ciclu generator. În cele ce urmează va fi descris ciclul Carnot motor reprezentat grafic în Figurile 4 și 5 în două diagrame diferite, $P-V$ și $T-S$.

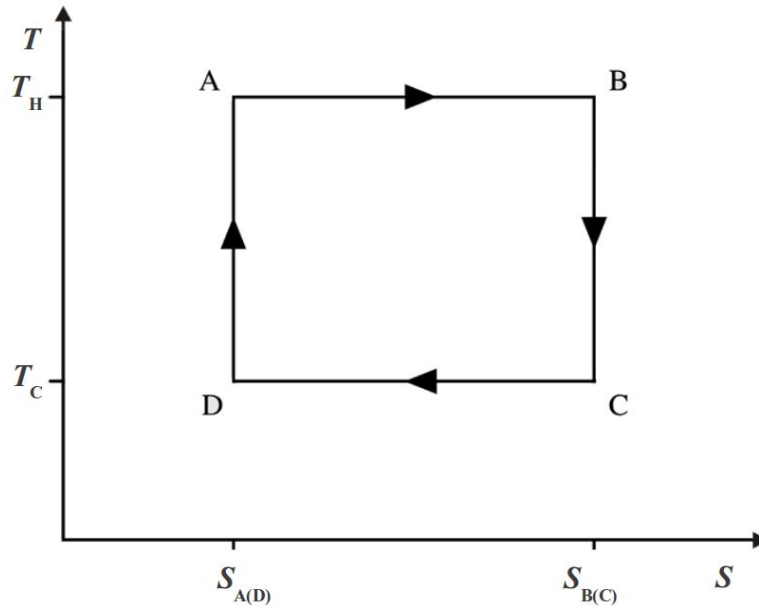


Fig.5. Reprezentarea în diagrama $T-S$ a ciclului Carnot.

Este un ciclu în patru transformări:

1. **Destindere izotermă** reversibilă a gazului la temperatura sursei calde, T (în Fig. 4 - T_1 , iar în Fig. 5 - T_H). În această transformare (A-B în diagrama $T-S$) destinderea gazului este determinată de absorbția de căldură la temperatură constantă

de la sursa caldă, iar gazul efectuează un lucru mecanic asupra mediului. Cantitatea de căldură absorbită de la sursa caldă este notată cu Q .

2. **Destindere adiabatică** reversibilă (izoentropică) a gazului. În această transformare (B-C în diagrama T - S) gazul continuă să se destindă efectuând un lucru mecanic asupra mediului. Deoarece transformarea e adiabatică (fără schimb de căldură), prin destindere gazul se răcește până la temperatura sursei reci, T_0 (în Fig.4 - T_2 , iar în Fig.5 - T_C).
3. **Comprimare izotermă** reversibilă a gazului la temperatura sursei reci, T_0 . În această transformare (C-D în diagrama T - S) mediul efectuează un lucru mecanic asupra gazului, determinând evacuarea căldurii din gaz la temperatura sursei reci. Cantitatea de căldură evacuată la sursa rece este Q_0 .
4. **Comprimare adiabatică** reversibilă (izoentropică) a gazului. În această transformare (D-A în diagrama T - S) mediul continuă să efectueze un lucru mecanic asupra gazului. Deoarece transformarea e adiabatică (fără schimb de căldură), prin comprimare gazul se încălzește până la temperatura sursei calde.

Există mai multe metode de stabilire a *randamentului termic* al ciclului Carnot. Pe vremea lui Sadi Carnot nu exista noțiunea de entropie. Actual cea mai simplă metodă pornește de la diagrama temperatură-entropie (T - S). După cum se observă din Fig.5, expresiile căldurilor schimbate cu sursele sunt:

$$Q = T(S_B - S_A), \quad |Q_0| = T_0(S_C - S_D).$$

Deoarece $S_B - S_A = S_C - S_D = \Delta S$, expresiile căldurilor schimbate devin $Q = T\Delta S$ și $|Q_0| = T_0\Delta S$. Fie L suma lucrurilor mecanice efectuate în cursul celor patru transformări ale ciclului, adică lucrul mecanic util al ciclului. Din primul principiu al termodinamicii rezultă $L = Q - |Q_0|$, iar randamentul termic al ciclului, prin definiție, este

$$\eta \equiv \frac{L}{Q} = \frac{Q - |Q_0|}{Q} = 1 - \frac{|Q_0|}{Q} = 1 - \frac{T_0 \Delta S}{T \Delta S} = 1 - \frac{T_0}{T}. \quad (1.61)$$

De remarcat că expresia randamentului termic (1.61) al ciclului Carnot nu limitează valoarea acestui randament. Mărirea randamentului termic al ciclului Carnot se poate face fie ridicând temperatura sursei calde, fie coborând temperatura sursei reci. Temperatura sursei calde poate fi ridicată mult (sute de milioane de grade în cazul reacțiilor de fuziune nucleară), însă limitarea practică este dată de temperaturile la care rezistă materialele din care este făcută o mașină termică. Temperatura sursei reci poate fi coborâtă până aproape de zero absolut, însă din punct de vedere energetic coborârea temperaturii sursei reci sub temperatura mediului ambiant

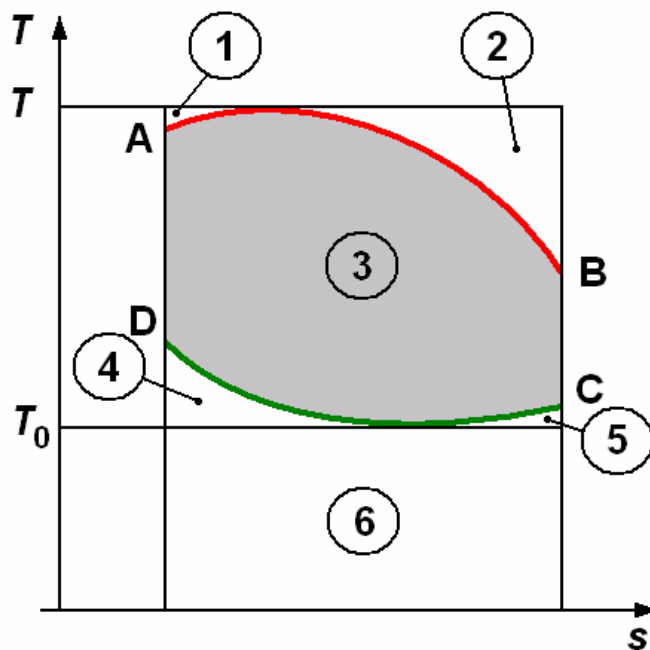


Fig.6. Comparație în diagrama T - S a unui ciclu oarecare cu un ciclu Carnot.

este inefficientă, deoarece pentru aceasta se consumă mai multă energie decât se obține prin ameliorarea randamentului termic al ciclului.

Ciclul Carnot are cel mai mare randament termic posibil la transformarea căldurii în lucru mecanic la ciclul motor, respectiv transferă o cantitate maximă de căldură pentru un lucru mecanic dat în cazul ciclului generator. Se poate demonstra matematic acest fapt, însă în cele ce urmează se va explica fenomenul intuitiv. Fie un ciclu oarecare în diagrama $T-S$ (Fig. 6) unde lucrul mecanic al ciclului este zona gri (zona 3), căldura primită de la sursa caldă este suprafața de sub curba A-B până la axa S (zonele 3, 4, 5 și 6), iar căldura cedată sursei reci este suprafața de sub curba C-D până la axa S (zonele 4, 5 și 6). Oricare ar fi forma ciclului, el poate fi circumscris de un dreptunghi. Acest dreptunghi reprezintă lucrul mecanic al ciclului Carnot care acționează între aceleași temperaturi ale sursei calde, respectiv sursei reci. Zonele 4 și 5 evident diminuează zona gri față de dreptunghi, fără a avea influență asupra zonei de sub curba A-B, deci micșorează lucrul mecanic fără a diminua căldura primită de la sursa caldă, ca urmare randamentul termic al ciclului scade. Zonele 1 și 2 diminuează cu aceeași suprafață zona gri și, deci, căldura primită de la sursa caldă într-un ciclu Carnot, însă zona gri fiind mai mică decât cea de sub curba A-B, rezultă ca lucrul mecanic se diminuează relativ mai mult decât căldura primită, deci și în acest caz randamentul termic scade. Randamentul termic este maxim când zonele 1, 2, 4 și 5 sunt nule, adică tocmai în cazul ciclului Carnot.

Deoarece ciclul Carnot are un randament termic maxim, o altă formulare este: *nu există mașină termică care să aibă un randament termic mai mare decât o mașină Carnot lucrând între aceleași limite de temperaturi*. În practică, randamentul unui mașini termice nu poate atinge nici măcar randamentul termic al ciclului Carnot, deoarece transformările din acest ciclu sunt considerate reversibile, un ideal imposibil de atins conform celui de al doilea principiu al termodinamicii. În plus, în stadiul actual al tehnicii este practic imposibilă realizarea transformărilor izoterme cu o viteză suficientă pentru aplicațiile practice, iar inerentele pierderi prin frecare, oricât ar fi ele de mici, împiedică realizarea transformărilor izoentropice.

Astfel, randamentul motorului ireversibil este $\eta < 1 - \frac{T_0}{T}$. Studiul ciclului Carnot mai permite, printre altele, definirea temperaturii termodinamice absolute. Dacă parcurgerea ciclului este reversibilă, din expresia randamentului ciclului Carnot (1.61) rezultă că raportul $|Q_0|/Q$ rămâne constant și independent de natura substanței de lucru, dacă mașina lucrează între aceleași temperaturi T și T_0 .

1.11. Termodinamica mediilor magnetice și a dielectricilor

Relațiile termodinamice pentru substanțele magnetice în câmp magnetic sunt identice în forma lor finală cu relațiile analogice pentru substanțele dielectrice în câmp electric. Modul de deducere a lor, însă, se deosebește esențial.

Lucrul elementar la magnetizarea unei unități de volum al substanței magnetice se determina din formula

$$dW = -\frac{1}{4\pi} (\vec{H}, d\vec{B}), \quad (1.62)$$

care este similară relației (1.20) scrisă pentru lucrul elementar efectuat la variația intensității câmpului electric \vec{E} într-un mediu dielectric. Aici \vec{H} este intensitatea câmpului magnetic, iar \vec{B} este inducția.

Prin analogie cu termodinamica sistemelor simple, se poate construi o termodinamică a dielectricilor și magneticilor (neferomagnetici). Pentru aceasta, se ține seama în (1.40) de lucrul mecanic care apare în prezența câmpului extern respectiv. Astfel, limitând ilustrarea la câmpul electric \vec{E} (formulele corespunzătoare referitoare la câmpul magnetic pot fi transcrise direct pe baza înlocuirilor $\vec{E} \rightarrow \vec{H}, \vec{D} \rightarrow \vec{B}, \vec{P} \rightarrow \vec{M}, \varepsilon \rightarrow \mu$), diferențiala energiei interne a unității de volum a unui dielectric, u , va avea expresia

$$du = Tds + \zeta d\rho + \vec{E} \cdot d\vec{D}, \quad (1.63)$$