

# Ireversibilități

## Ireversibilități care se manifestă în cicluri frigorifice reale

În capitolul referitor la ciclurile frigorifice, s-a arătat că eficiența frigorifică, deși oferă informații globale privind gradul de performanță al ciclurilor, este un parametru care nu ține seama de calitatea frigului produs. Astfel cu cât temperatura mediului răcit, este mai apropiată de temperatura mediului ambiant, cu atât eficiența frigorifică este mai mare. Un alt dezavantaj al utilizării eficienței frigorifice în analiza calitativă a ciclurilor frigorifice, este acela că nu ține seama de ireversibilitățile care se manifestă în procesele din instalațiile frigorifice. Datorită motivelor prezentate, în continuare, vor fi analizate aceste ireversibilități și vor fi evaluate pierderile datorate acestora, iar în finalul capitolului, se va introduce noțiunea de randament exergetic, indicator de performanță a ciclurilor frigorifice, care ține seama atât de nivelul de temperatură al mediului răcit, respectiv al mediului ambiant, cât și de pierderile datorate ireversibilităților manifestate în procesele termice care compun ciclurile frigorifice.

În condiții reale, procesele de lucru din ciclurile frigorifice, prezentate în capitolele studiate, sunt însoțite de ireversibilități interne și externe, care au ca efect necesitatea unui consum de lucru mecanic, mai mare decât în cazul ciclului frigorific ideal, caracterizat prin lipsa acestor ireversibilități. Ciclul ideal analizat anterior, este ciclul Carnot inversat, iar ireversibilitățile cele mai reprezentative, care se manifestă în ciclurile frigorifice sunt:

- **Ireversibilități externe**, datorate transferului termic la diferențe finite de temperatură;
- **Ireversibilități interne**, datorate frecărilor, turbulențelor, omogenizărilor, etc.

În figura 1 este reprezentat în diagrama T-s, un ciclu frigorific real, cu subrăcire în condensator și supraîncălzire în vaporizator, care permite studierea celor mai importante ireversibilități care se manifestă în ciclurile frigorifice.

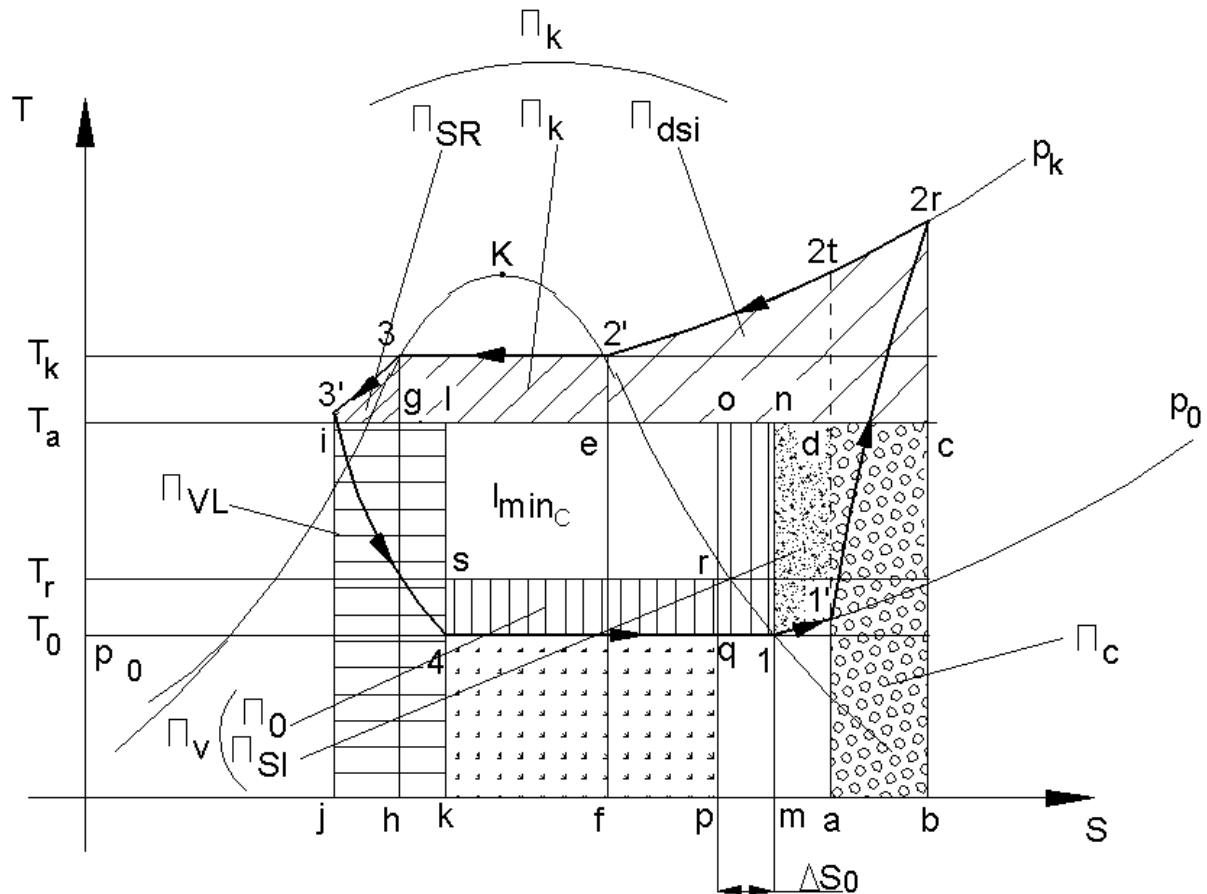


Fig. 1. Ireversibilitățile care se manifestă în ciclul frigorific

**Pentru calculul tuturor pierderilor datorate ireversibilităților** și notate în general cu  $\pi$ , se utilizează **teorema Guy-Stodola**, care din punct de vedere matematic poate fi scrisă sub forma:

$$\pi = T_a \cdot \Delta_{s \text{ sist}} \quad (1)$$

unde  $T_a$  reprezintă temperatura mediului ambiant, iar  $\Delta_{s \text{ sist}}$  reprezintă variația entropiei sistemului termic în care se manifestă ireversibilitatea respectivă și include atât variația entropiei mediului înconjurător, respectiv a surselor de căldură  $\Delta_{s \text{ SC}}$ , cât și variația entropiei agentului frigorific  $\Delta_{s \text{ ag}}$ :

$$\Delta_{s \text{ sist}} = \Delta_{s \text{ SC}} + \Delta_{s \text{ ag}} \quad (2)$$

*Procesul ideal de comprimare*, sau teoretic, este reprezentat pe diagrama din figura 1 prin adiabata  $1'-2_t$  caracterizată prin valoarea constantă a entropiei, iar *procesul real* este reprezentat prin politropa  $1'-2_r$  caracterizată prin creșterea entropiei, datorată ireversibilităților interne. Ireversibilitățile acestui proces sunt de natură internă, iar în lipsa interacțiunilor termice cu mediul înconjurător.

*Pierderile datorate ireversibilităților din compresor*  $\pi_c$ , pot fi calculate cu relația:

$$\pi_c = T_a \Delta_{s \text{ ag}} = T_a (s_{2r} - s_{1'}) = \text{aria } a, b, c, d \quad (3)$$

*Procesul real de condensare*, reprezentat pe diagramă prin izobara  $2r-2'-3-3'$ , este caracterizat prin ireversibilități externe, datorate transferului termic la diferențe finite de temperatură. Procesul de condensare menționat anterior, poate fi descompus în trei subprocese: supraîncălzirea  $2r-2'$ , condensarea propriu-zisă  $2'-3$  și subrăcirea  $3-3'$ . Pentru fiecare fază a procesului de transfer termic din condensator, se poate scrie ecuația Guy-Stodola, pentru determinarea pierderilor datorate ireversibilităților.

*Pierderile datorate ireversibilităților din procesul de desupraîncălzire*  $\pi_{dsi}$  se calculează prin:

$$\begin{aligned}\pi_{dsi} &= T_a (\Delta s_{SCdsi} + \Delta s_{ag}) = q_{dsi} + T_a (s_{2'} - s_{2r}) = q_{dsi} - T_a (s_{2r} - s_{2'}) = \\ &= \text{aria } 2r, 2', f, b - \text{aria } c, e, f, b = \text{aria } 2r, 2', e, c\end{aligned}\quad (4)$$

unde  $\Delta s_{SCdsi}$  reprezintă variația entropiei sursei calde în urma realizării supraîncălzirii, datorată faptului că aceasta (mediul ambiant) absoarbe pentru fiecare kilogram de agent, căldura specifică de desupraîncălzire  $q_{dsi}$ .

*Pierderile datorate ireversibilităților din procesul de condensare propriu-zisă*  $\pi_k$ , se calculează prin:

$$\begin{aligned}\pi_k &= T_a (\Delta s_{SCK} + \Delta s_{ag}) = q_k + T_a (s_3 - s_{2'}) = q_k - T_a (s_{2'} - s_3) = \\ &= \text{aria } 2', 3, h, f - \text{aria } e, g, h, f = \text{aria } 2', 3, g, e\end{aligned}\quad (5)$$

unde  $\Delta s_{SCK}$  reprezintă variația entropiei sursei calde în urma realizării condensării propriu-zise, datorată faptului că aceasta (mediul ambiant) absoarbe pentru fiecare kilogram de agent, căldura latentă de condensare specifică  $q_k$ .

*Pierderile datorate ireversibilităților din procesul de subrăcire*  $\pi_{SR}$ , se calculează prin:

$$\begin{aligned}\pi_{SR} &= T_a (\Delta s_{SCsr} + \Delta s_{ag}) = q_{SR} + T_a (s_{3'} - s_3) = q_{SR} - T_a (s_3 - s_{3'}) = \\ &= \text{aria } 3, 3', j, h - \text{aria } g, i, j, h = \text{aria } 3, 3', i, g\end{aligned}\quad (6)$$

unde  $\Delta s_{SCsr}$  reprezintă variația entropiei sursei calde în urma realizării subrăcirii, datorată faptului că aceasta (mediul ambiant) absoarbe pentru fiecare kilogram de agent, căldura specifică de subrăcire  $q_{SR}$ .

*Pierderile totale din condensator*  $\pi_K$ , datorate ireversibilităților, se calculează cu relația evidentă:

$$\pi_K = \pi_{dsi} + \pi_k + \pi_{SR} = \text{aria } 2r, 2', 3, 3', i, c \quad (7)$$

*Procesul de laminare adiabatică* 3'-4 se desfășoară la entalpie constantă și este caracterizat prin ireversibilități interne și prin lipsa interacțiunilor cu mediul înconjurător.

*Pierderile datorate ireversibilităților din procesul de laminare adiabatică*  $\pi_{VL}$ , se calculează prin relația:

$$\pi_{VL} = T_a \Delta s_{ag} = T_a (s_4 - s_{3'}) = \text{aria } l, i, j, k \quad (8)$$

*Procesul real de vaporizare* 4-1-1' este însoțit de ireversibilități datorate transferului termic la diferențe finite de temperatură. Procesul de vaporizare poate fi împărțit în două faze, vaporizarea propriu-zisă 4-1 și supraîncălzirea 1-1'. Datorită faptului că în acest proces agentul frigorific absoarbe căldură de la sursa rece (mediul răcit), entropia acestuia scade, deci variația entropiei sursei reci  $\Delta s_{SR0}$  are valoare negativă. În procesul de vaporizare propriu-zisă, izobar-izoterm, pentru fiecare kilogram de agent frigorific, se poate considera că valoarea căldurii latente de vaporizare specifice  $q_0$ , preluată de agentul frigorific la temperatura  $T_0$ , este egală cu valoarea căldurii specifice preluate de la sursa rece, având temperatura  $T_r$ . În consecință, se poate scrie relația:

$$q_0 = T_0 \Delta s_{ag} = \text{aria } l, 4, k, m = T_r \Delta s_{SR0} = \text{aria } r, s, k, p \quad (9)$$

unde  $\Delta s_{ag}$  reprezintă variația entropiei agentului frigorific, în procesul de vaporizare propriu-zisă.

Deoarece  $T_r > T_0$ , rezultă că  $\Delta s_{SR0} < \Delta s_{ag}$ .

*Pierderile datorate ireversibilităților din procesul de vaporizare*  $\pi_0$ , se calculează prin:

$$\pi_0 = T_a (\Delta s_{ag} - \Delta s_{SR0}) = T_a \Delta s_0 = \text{aria } m, n, o, p \quad (10)$$

unde  $\Delta s_0$  reprezintă practic variația totală a entropiei sistemului vaporizator - sursă rece.

Analizând mai atent aria  $m, n, o, p$  se constată că aceasta este compusă din două suprafețe:

aria m,n,o,p = aria n,o,q,1 + aria 1,q,p,m

Analizând cele două suprafețe care reprezintă puterea frigorifică specifică a instalației frigorifice  $q_0$ , conform relației (9), se constată că acestea au în comun aria q,4,k,p la care se adaugă aria 1,q,p,m respectiv aria r,s,4,q deci se poate spune că:

aria 1,q,p,m = aria r,s,4,q

În aceste condiții, suprafața reprezentând pierderile datorate ireversibilităților din procesul de vaporizare, pot fi reprezentate și prin aria obținută prin adăugarea la aria n,o,q,1 suprafața r,s,4,q echivalentă cu aria 1,q,p,m.

$$\pi_0 = \text{aria } n, o, q, 1 + \text{aria } r, s, 4, q = \text{aria } n, o, r, s, 4, 1 \quad (11)$$

Pierderile datorate ireversibilităților din procesul de supraîncălzire  $\pi_{SI}$ , se calculează prin:

$$\begin{aligned} \pi_{SI} &= T_a (\Delta s_{ag} - \Delta s_{SRsi}) = T_a \Delta s_{ag} - q_{SI} = T_a (s_{1'} - s_1) - q_{SI} = \\ &= \text{aria } d, n, m, a - \text{aria } 1', 1, m, a = \text{aria } n, d, 1, 1' \end{aligned} \quad (12)$$

Pierderile totale din vaporizator  $\pi_v$ , datorate ireversibilităților, se calculează cu relația evidentă:

$$\pi_v = \pi_0 + \pi_{SI} = \text{aria } d, o, r, s, 4, 1, 1' \quad (13)$$

Lucrul mecanic minim necesar pentru funcționarea unui ciclu frigorific care să asigure aceeași putere frigorifică specifică  $q_0$ , între aceleași valori ale temperaturilor surselor de căldură  $T_r$ , respectiv  $T_a$ , este reprezentat de lucrul mecanic al ciclului Carnot inversat 0,1,s,r și are valoarea  $l_{\min C}$ .

Eficiența frigorifică a ciclului Carnot inversat, se poate calcula cu relația prezentată în capitolul referitor la cicluri frigorifice:

$$\varepsilon_C = \frac{q_0}{l_{\min C}} = \frac{T_r}{T_a - T_r} = \frac{1}{\frac{T_a}{T_r} - 1} \quad (14)$$

Randamentul exergetic al ciclului real prezentat anterior, se calculează cu relația:

$$\eta_{ex} = \frac{l_{\min C}}{l_r} \quad (15)$$

unde  $l_r$ , reprezintă lucrul mecanic al ciclului real, care se poate determina prin:

$$l_r = l_{\min C} + \pi_C + \pi_K + \pi_{VL} + \pi_v \quad (16)$$

Înlocuind în relația (15), expresia pentru  $l_{\min C}$ , determinată din relația (14), pentru randamentul exergetic se poate obține:

$$\eta_{ex} = \frac{q_0}{l_r \varepsilon_C} = \frac{q_0}{l_r} \left( \frac{T_a}{T_r} - 1 \right) = \varepsilon \left( \frac{T_a}{T_r} - 1 \right) \quad (17)$$

unde  $\varepsilon$  reprezintă eficiența frigorifică a ciclului real.

Prin utilizarea randamentului exergetic, sunt înlăturate dezavantajele eficienței frigorifice, pentru că randamentul exergetic are valori subunitare și ține seama de calitatea frigului, respectiv de condițiile în care este produs acesta, prin valorile temperaturilor sursei reci, respectiv sursei calde. De asemenea randamentul exergetic ține seama de mărimea pierderilor datorate ireversibilităților, deoarece valoarea acestui randament scade pe măsură ce cresc pierderile exergetice.