

Instalații frigorifice în două trepte de comprimare

Necesitatea utilizării a două trepte de comprimare

Odată cu scăderea temperaturii de vaporizare t_0 , necesară obținerii unor temperaturi foarte scăzute, scade și presiunea de vaporizare p_0 , deci crește raportul de comprimare H al compresorului.

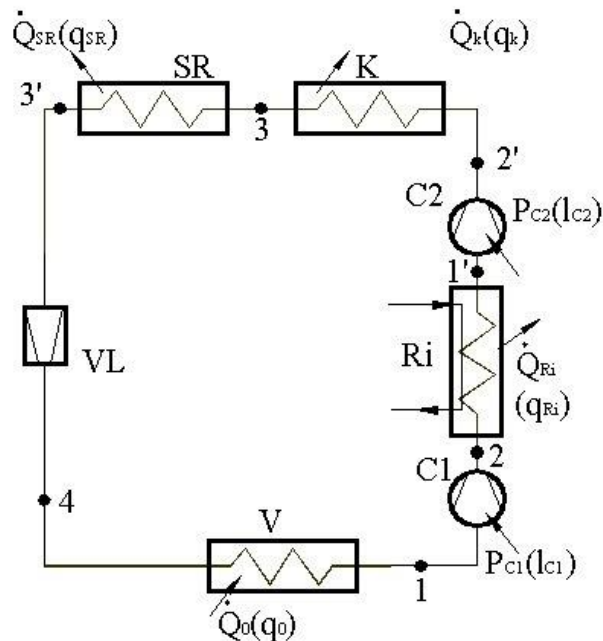
Ca o consecință, apar unele *dezavantaje* legate de funcționarea compresorului în aceste condiții, între care cele mai importante sunt *creșterea consumului de energie și reducerea coeficientului de debit* al compresorului. În situații extreme, la creșterea prea accentuată a raportului dintre presiunea de refulare și cea de aspirație, comprimarea devine nu numai neeconomică ci chiar imposibilă. O altă consecință nedorită a funcționării compresorului la rapoarte mari de comprimare, este *creșterea temperaturii vaporilor refulați*. Aceasta nu poate depăși anumite limite, reprezentate de temperatura de cocsificare, sau chiar de aprindere a uleiului de ungere. De exemplu, la utilizarea amoniacului (NH_3), nu se va depăși sub nici o formă temperatura vaporilor refulați de 120...140°C.

Orientativ, într-o singură treaptă de comprimare se pot realiza în condiții economice, temperaturi scăzute de până la cca. -10°C , cărora le corespund temperaturi de vaporizare de până la cca -25°C . În principiu, raportul de comprimare nu trebuie să depășească valoarea 8 la utilizarea compresoarelor cu piston verticale, respectiv valoarea 6 la utilizarea compresoarelor cu piston orizontale.

La proiectarea instalațiilor frigorifice pentru realizarea temperaturilor scăzute, aflate în domeniul pentru care se pot utiliza atât instalații într-o treaptă cât și în două trepte de comprimare, se va efectua o analiză comparativă tehnico-economică, în vederea alegerii variantei optime. Pentru realizarea temperaturilor și mai scăzute, se va utiliza comprimarea în două trepte.

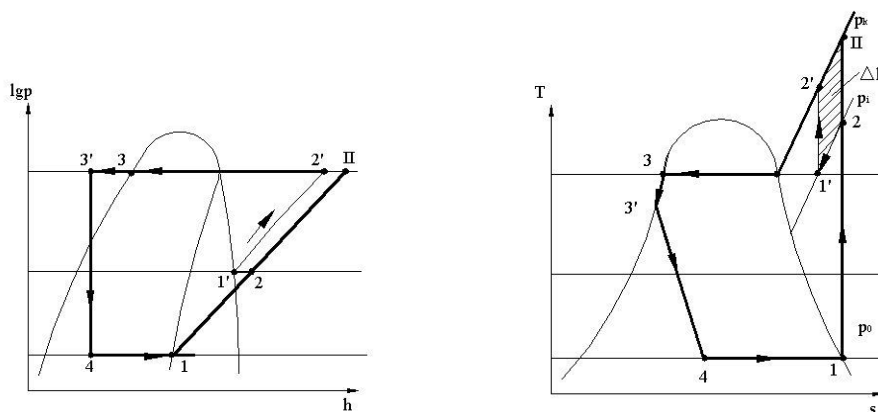
Răcirea intermediară cu apă

Această soluție poate fi utilizată atunci când temperatura de refulare din prima treaptă de comprimare este mai mare decât temperatura de condensare. În figura alăturată este prezentată schema de principiu a unei instalații frigorifice în două trepte de comprimare și răcire intermediară cu apă.



Instalație frigorifică în două trepte de comprimare și răcire intermediară cu apă

Figurile alăturate reprezintă procesele de lucru corespunzătoare, în diagrame termodinamice lgp-h și T-s.



Reprezentarea răcirii intermediare cu apă în diagrama lgp-h

Reprezentarea răcirii intermediare cu apă în diagrama T-s

Prin utilizarea apei ca agent de răcire, vaporii supraîncălziți refulați din prima treaptă se pot răci până la o temperatură ușor superioară celei a apei, diferența de temperatură fiind de minim 10°C . În aceste condiții este evident că la sfârșitul răcirii intermediare, vaporii de agent frigorific vor avea o temperatură apropiată de temperatura de condensare, așa cum se observă și pe cele două diagrame. Răcirea intermediară cu apă se realizează într-un schimbător de căldură, denumit *răcitor intermediar (Ri)*.

Procesul 1-II reprezintă comprimarea într-o singură treaptă de comprimare. Lucrul mecanic specific necesar realizării procesului în acest caz este:

$$lc_{1tr} = h_{II} - h_1 \quad (1)$$

Procesele 1-2 și 1'-2' reprezintă procesele din cele două trepte de comprimare, pentru realizarea cărora se consumă lucrul mecanic specific:

$$lc_{2tr} = (h_2 - h_1) + (h_{2'} - h_{1'}) \quad (2)$$

Între cele două trepte de comprimare se realizează răcirea intermediară cu apă, proces izobar în care agentul frigorific cedează apei de răcire căldura specifică:

$$q_{Ri} = h_2 - h_{1'} \quad (3)$$

Se observă că izobara de răcire intermediară, reprezintă presiunea de refulare din prima treaptă, aceeași cu presiunea de aspirație în treapta a doua. În instalațiile frigorifice, această valoare a presiunii, este denumită *presiune intermediară* și se notează cu p_i .

Analizând diagrama T-s, se observă fără a fi nevoie să se efectueze nici un calcul, că la comprimarea în două trepte, lucrul mecanic specific, necesar celor două procese de comprimare, este mai redus decât cel necesar comprimării într-o singură treaptă. Economia de lucru mecanic specific se poate calcula prin:

$$\Delta l = lc_{1tr} - lc_{2tr} = \text{aria } 1', 2, II, 2', 1' \quad (4)$$

În consecință, corespunzător reducerii lucrului mecanic specific necesar comprimării în două trepte, față de comprimarea într-o singură treaptă, în aceeași măsură și energia consumată pentru funcționarea instalației în două trepte de comprimare este mai mică decât cea consumată pentru funcționarea într-o singură treaptă de comprimare.

Dacă se citesc din diagramă valorile parametrilor termodinamici în stările caracteristice ale ciclului de lucru, se observă că deși are loc răcirea intermediară, temperatura de refulare din treapta a doua se apropie de valorile limită admise și chiar pentru temperaturi de vaporizare nu foarte scăzute, este posibil să fie depășită această limită. Prin urmare se impune găsirea unor soluții mai eficiente pentru realizarea răcirii intermediare.

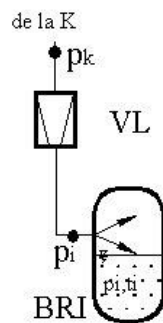
Răcirea intermediară cu agent frigorific

Singura soluție pentru răcirea mai pronunțată a vaporilor refuțați din prima treaptă, este utilizarea agentului frigorific din acele părți ale instalației unde temperatura agentului este mai scăzută decât cea a apei de răcire. Pentru răcirea intermediară se poate utiliza agent frigorific lichid, sau sub formă de vapori saturați. În ambele situații răcirea intermediară este mai eficientă decât în cazul utilizării apei, deoarece utilizând agent frigorific pentru răcire, la aspirația în treapta a doua, vaporii pot atinge temperaturi mult mai coborâte decât temperatura de condensare, ceea ce era imposibil la răcirea cu apă. O consecință evidentă, este aceea că și la refularea din treapta a doua, temperatura va fi mult mai redusă decât în cazul răcirii intermediare cu apă.

În instalațiile funcționând cu amoniac, răcirea intermediară se realizează cu lichid sau vapori proveniți dintr-un aparat care se utilizează numai la instalațiile în două trepte de comprimare cu amoniac, denumit *butelie de răcire intermediară (BRI)*. În principiu, acest aparat este un recipient în care se găsesc în echilibru lichid și vapori de amoniac, aflați la presiunea intermediară p_i , respectiv la temperatura de saturație corespunzătoare, denumită și *temperatură intermediară* notată cu t_i .

Alimentarea cu lichid a buteliei se realizează prin intermediul unui ventil de laminare (VL). Acest ventil preia lichid aflat la p_k și îl aduce la p_i prin laminare adiabatică. În urma procesului rezultă vapori umezi, care în butelia de răcire intermediară se separă în lichid (aflat în partea inferioară a buteliei) și vapori (aflați în partea superioară a buteliei).

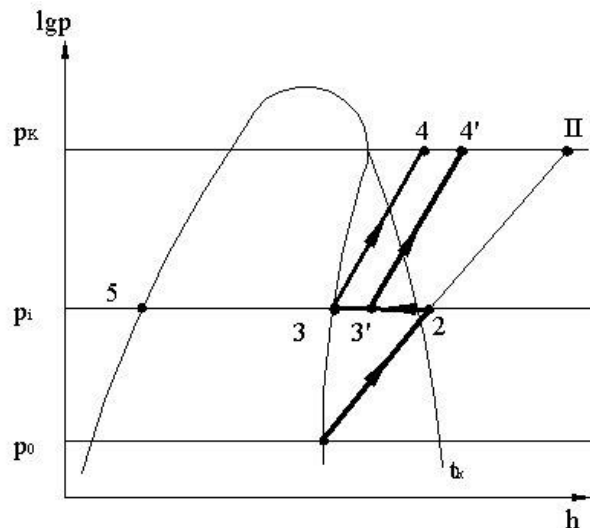
Între lichidul și vaporii din BRI există evident o suprafață de separație. O schemă a buteliei de răcire intermediară este prezentată în figura alăturată.



Schema de principiu a buteliei de răcire intermediară

Deoarece agentul din BRI se găsește la temperatura intermediară t_i mult mai mică decât cea ambientă, *acest aparat trebuie să fie prevăzut cu izolație termică*.

În funcție de starea termodinamică a vaporilor răciți, la sfârșitul procesului de răcire intermediară, se diferențiază două tipuri de asemenea procese: *răcire intermediară completă* și *răcire intermediară incompletă*. În figura alăturată sunt reprezentate procesele de răcire intermediară completă și incompletă



Procesele de răcire intermediară completă și incompletă

În cazul în care vaporii refuțați se răcesc până la saturație (procesul 2-3), răcirea intermediară este denumită *completă*, iar dacă la sfârșitul procesului vaporii rămân supraîncălziți (procesul 2-3'), răcirea intermediară este denumită *incompletă*.

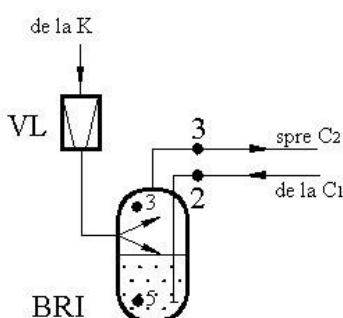
Se observă că față de comprimarea într-o treaptă 1-II, comprimarea în două trepte cu răcire intermediară incompletă reduce mult temperatura finală de refulare ($t_4 < t_{II}$), iar dacă se utilizează răcirea intermediară completă, temperatura finală de refulare scade și mai mult ($t_4 < t_{II}$).

În instalațiile funcționând cu freoni, răcirea intermediară se realizează prin injecție de vapori reci saturați, sau chiar de lichid, respectiv vapori umezi, în vaporii supraîncălziți refuțați din prima treaptă de comprimare. Această metodă de răcire intermediară este tot mai des utilizată în instalațiile moderne cu freoni.

Ameliorarea, respectiv creșterea eficienței energetice a ciclurilor în două trepte cu freoni, se realizează prin utilizarea unor *schimbătoare interne de căldură*, denumite și *regeneratoare*, specifice acestor agenți, așa cum s-a arătat și la analiza instalațiilor într-o treaptă de comprimare. Aceste schimbătoare de căldură pot fi amplasate pe oricare dintre ramurile de joasă presiune sau de înaltă presiune, ale acestor cicluri. Creșterea eficienței energetice este datorată subrăcirii condensului pe seama vaporizării (complet sau parțiale) a lichidului aflat la presiune intermediară (pe ramura de înaltă presiune), respectiv pe seama supraîncălzirii vaporilor reci proveniți din vaporizator (pe ramura de înaltă presiune).

Răcirea intermediară completă, este posibilă numai prin amestecul vaporilor refulați din prima treaptă de comprimare, cu lichid saturat aflat la aceeași presiune intermediară.

În instalațiile cu amoniac, vaporii calzi (2) sunt introduși în zona de la baza buteliei de răcire intermediară, unde se găsește lichidul (5). Vaporii se ridică spre suprafața de separație barbotând prin lichid. Contactul direct, permite un transfer termic intens între vaporii calzi și lichid. Astfel vaporii cedează căldură lichidului și se răcesc până la saturație (3), iar lichidul absoarbe această căldură și aflându-se la saturație, vaporizează parțial. Pentru a menține constant nivelul lichidului, este necesară alimentarea permanentă cu lichid a buteliei, prin intermediul ventilului de laminare VL, așa cum se observă în figura alăturată. Este evident că butelia reprezintă practic, un schimbător de căldură prin amestec.



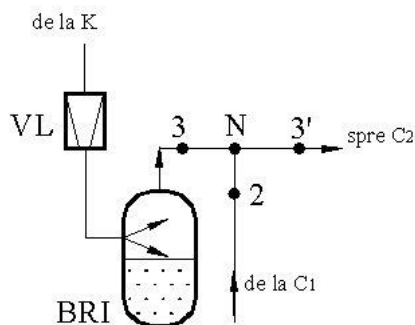
BRI pentru răcire intermediară completă

În butelie, vaporilor refulați din prima treaptă de comprimare li se adaugă cei proveniți din vaporizarea parțială a lichidului și cei introduși odată cu lichidul laminat în VL (la ieșirea din VL, lichidul conține și o cantitate de vapori, chiar dacă redusă). Astfel se explică de ce în treapta a doua de comprimare, debitul masic de agent frigorific este mai mare decât în prima treaptă. Din acest motiv, la instalațiile de acest tip, lucrurile mecanice consumate la funcționarea în două trepte, respectiv la funcționarea într-o treaptă, nu mai pot fi comparate atât de ușor ca la instalația unde răcire intermediară se realizează cu apă. Pentru compararea lucrurilor mecanice și mai ales a puterilor necesare proceselor de comprimare, este necesară efectuarea calculului termic.

Chiar dacă debitul masic din treapta a doua este mai mare decât în prima treaptă, la aspirația în compresorul C2 presiunea este mai mare decât la aspirația în compresorul C1 ($p_i > p_0$), ceea ce face ca în a doua treaptă de comprimare, debitul volumic aspirat să fie aproximativ egal cu jumătate din debitul volumic aspirat în prima treaptă. Acest lucru este important, pentru că în treapta a doua se poate utiliza un compresor având volumul cilindrilor de aproximativ 2 ori mai mic decât cel din prima treaptă, sau având un număr de cilindri de aproximativ 2 ori mai mic decât cel din prima treaptă. O soluție des utilizată în instalațiile industriale cu amoniac este utilizarea unor compresoare cu 3 cilindri, dintre care doi funcționează în prima treaptă, iar al treilea funcționează în a doua treaptă de comprimare.

În instalațiile cu freoni, răcirea intermediară completă este realizată prin injecția de lichid sau vaporii umezi în vaporii refulați din prima treaptă de comprimare. Răcirea până la saturație prin acest proces este dificil de controlat, ceea ce face ca procedeul să fie rar utilizat.

Răcirea intermediară incompletă în instalațiile pentru amoniac se realizează tot prin amestec, dar în afara buteliei de răcire intermediară, așa cum se arată în figura alăturată.



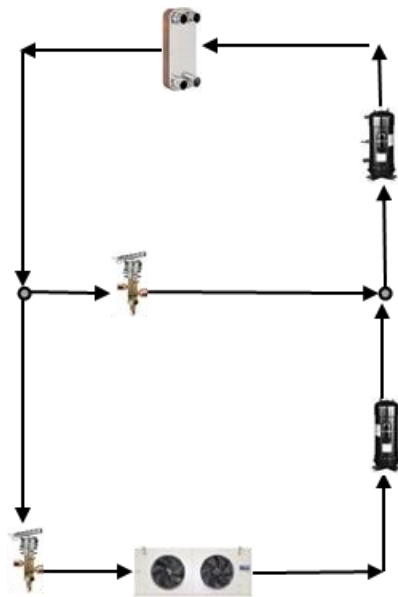
BRI pentru răcire intermediară incompletă

Vaporii calzi, refuțați din prima treaptă de comprimare (2) se amestecă în nodul (intersecția de conducte) N cu vaporii saturați (3) din butelie. În urma amestecului rezultă vaporii supraîncălziți (3'), dar având temperatura mai redusă decât cea a vaporilor refuțați de C1. De regulă, temperatura de subrăcire este sub cea de condensare. Dacă se efectuează bilanțul masic pentru nodul N, se observă că și în acest caz, debitul masic în treapta a doua de comprimare este mai mare decât în prima treaptă, ceea ce face dificilă compararea puterii consumate la comprimarea în două trepte cu acest tip de răcire intermediară, față de instalația într-o treaptă, în acest scop fiind necesară efectuarea calculului termic.

Față de răcirea intermediară completă, cea incompletă are avantajul că elimină complet riscul ca în compresorul de înaltă presiune C2 să ajungă lichid, dar are dezavantajul că temperatura la sfârșitul comprimării este mai ridicată. De asemenea cu cât comprimarea începe mai departe de curba de saturație, cu atât este mai mare lucrul mecanic specific necesar pentru comprimarea între aceleași presiuni de aspirație și refulare. De regulă, în practica instalațiilor frigorifice cu amoniac, se utilizează răcirea intermediară completă, deoarece asigură o temperatură de refulare din treapta a doua foarte scăzută, riscul ca lichidul din BRI să ajungă în compresor este foarte redus (deoarece aspirația vaporilor în treapta a doua de comprimare se realizează din partea superioară a BRI, unde se găsesc vaporii). În plus, efectuarea calculelor termice arată că la răcirea intermediară completă consumurile energetice pentru comprimare sunt ceva mai reduse decât la răcirea intermediară incompletă.

În instalațiile cu freoni, răcirea intermediară este de regulă incompletă și se realizează așa cum prin amestecul vaporilor supraîncălziți refuțați din prima treaptă de comprimare, cu vaporii saturați sau vaporii umezi aflați la aceeași presiune intermediară. În instalațiile moderne se utilizează tot mai mult injecția de lichid în vaporii refuțați la presiunea intermediară.

În figura alăturată este prezentată schemă unei instalații frigorifice în care răcirea intermediară este realizată prin injecția de vapori umezi în conducta de aspirație a compresorului din treapta a doua de comprimare.



Răcire intermediară prin injecție de vapori umezi în vaporii refulați din prima treaptă

În unele instalații moderne, injecția de lichid, sau vapori umezi, se realizează în timpul procesului de comprimare, astfel încât atât răcirea intermediară cât și a doua treaptă de comprimare se realizează într-un singur compresor.

Avantaje și dezavantaje ale comprimării în două trepte

Avantajele cele mai importante, față de comprimarea într-o singură treaptă sunt următoarele:

- Se reduce consumul energetic necesar comprimării;
- Crește coeficientul de debit datorat spațiului mort (λ_1), deoarece pe fiecare treaptă în parte, raportul de comprimare este mai mic decât cel total;
- Scade riscul de cocsificare sau aprindere a uleiului de ungere, deoarece scade temperatura finală de refulare;
- Scade temperatura medie a cilindrilor, deci crește coeficientul de debit (λ_3), datorat încălzirii agentului la aspirație;
- Se reduc pierderile prin neetanșeități, datorită reducerii diferenței de presiune pe fețele pistoanelor, deci crește coeficientul de debit (λ_4).

Dezavantajele mai semnificative ale comprimării în două trepte sunt:

- Crește complexitatea instalației prin mărirea numărului aparatelor și a numărului de circuite frigorifice;
- Exploatarea devine mai pretențioasă și impune uneori, utilizarea de personal cu calificare și specializare mai ridicată;
- Cresc pierderile hidraulice și deci apar consumuri energetice suplimentare pentru acoperirea lor.

Determinarea presiunii intermediare optime

Presiunea intermediară p_i care separă cele două trepte de comprimare, nu este determinată de condițiile exterioare de lucru, fiind necesară studierea influenței acestui parametru asupra performanțelor instalației. Acest lucru se poate realiza prin utilizarea calculatoarelor electronice, pentru efectuarea calculelor termice.

În literatura de specialitate sunt recomandate mai multe relații pentru determinarea valorii presiunii intermediare, cea mai uzuală fiind:

$$p_i = \sqrt{p_0 p_k}, \quad (5)$$

relație care asigură valoarea maximă a eficienței frigorifice și valori egale ale rapoartelor de comprimare pentru fiecare treaptă în parte:

$$H_1 = \frac{p_i}{p_0} = H_2 = \frac{p_k}{p_i} \quad (6)$$

Alte relații disponibile în literatura de specialitate, permit fie calculul p_i , fie calculul t_i :

$$\begin{aligned} p_i &= \sqrt{p_0 p_k} + 0,35 \text{ atm.} \\ T_i &= \sqrt{T_0 T_k} \\ T_i &= (T_0 + T_k)/2 \\ t_i &= 0,4t_k + 0,6t_0 + 3^\circ\text{C} \\ p_i &= 1,2p_0 \frac{\dot{V}_{cI}}{\dot{V}_{cII}}, \end{aligned} \quad (7)$$

unde \dot{V}_{cI} , respectiv \dot{V}_{cII} reprezintă debitele volumice teoretice de agent frigorific la aspirația în cele două trepte de comprimare.