

Condensarea

Condensarea este procesul termodinamic prin care agentul frigorific își schimbă starea de agregare din vapori în lichid, cedând căldură sursei calde, reprezentate de aerul sau apa de răcire a condensatorului. Condensarea realizează efectul util în pompele de căldură. Uneori răcirea condensatorului este realizată mixt, de aer și apă împreună. Procesul de condensare va fi analizat în continuare, separat pentru cazul răcirii cu aer și separat pentru cazul răcirii cu apă, deși din punct de vedere calitativ, pentru comportarea agentului frigorific nu există diferențe fundamentale.

De regulă, în cazul răcirii cu aer condensarea se realizează în interiorul țevilor, în aparate construite din serpentine, iar în cazul răcirii cu apă condensarea se realizează în spațiul dintre un fascicul de țevi și manta, în aparate de construcție multitubulară, cel mai adesea orizontale.

O altă diferență, între cele două tipuri de procese de condensare, este reprezentată de regimul termic al agenților de lucru (agentul frigorific și agentul de răcire), între cele două tipuri de aparate, existând unele diferențe care vor fi analizate în continuare.

Condensatoare răcite cu aer

Procesul de condensare este reprezentat în figura 1, unde se observă că în interiorul țevilor are loc întâi răcirea vaporilor până la saturație, urmată apoi de transformarea vaporilor în lichid, cantitatea de lichid crescând treptat spre ieșirea agentului frigorific din aparat. Ultima porțiune a serpentinei este integral umplută de lichid.

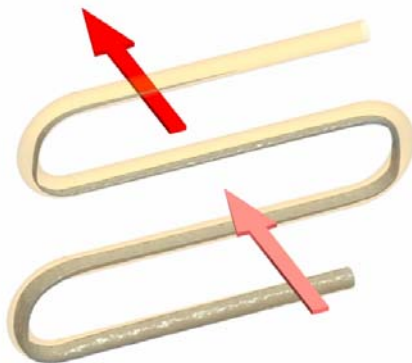


Fig. 1. Procesul de condensare

Schema de principiu a unui condensator răcit cu aer, este prezentată în figurile 1 și 2. Agentul frigorific intră în aparat sub formă de vapori supraîncălziți (refuțați de compresor) (v.si.), și iese din acesta sub formă de lichid subrăcit (l.s.). Aerul la intrarea în condensator (a.i.) este rece, iar la ieșirea din acesta (a.e.) devine cald, deoarece în aparat preia căldura cedată de agentul frigorific. Presiunea agentului frigorific în condensator, este considerată constantă și are valoarea presiunii de condensare p_k . Această ipoteză este corectă în condițiile în care se neglijează pierderile de presiune din condensator, datorate curgerii agentului frigorific, în condiții reale.

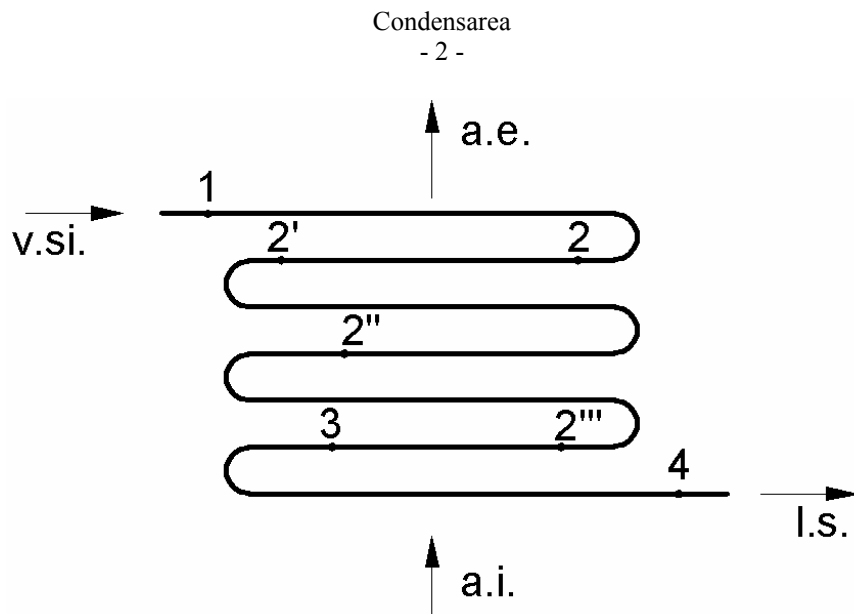


Fig. 2. Schema condensatorului răcit cu aer

Evoluția procesului de condensare, în interiorul țevii din care este construită serpentina condensatorului, este prezentată în figura 3.

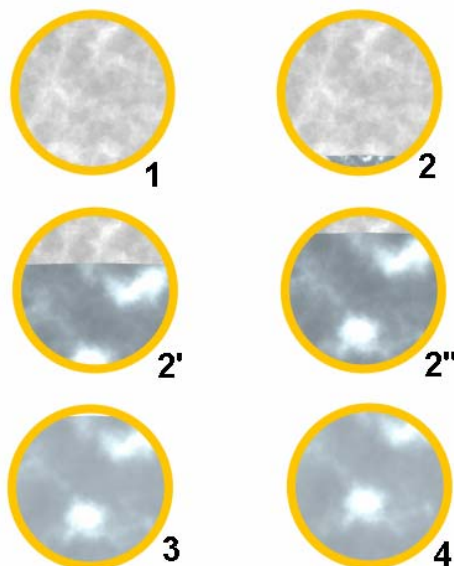


Fig. 3. Evoluția procesului de condensare în țevi
1-vapori supraîncălziți; 2-primele picături de lichid; 2', 2''-amestec de lichid și vapori saturați;
3-ultimele bule de vapori; 4-lichid subrăcit

La intrarea în condensator (1), vaporii sunt supraîncălziți. Această stare, poate fi considerată cea de refulare a vaporilor din compresor. În contact termic cu aerul rece, temperatura vaporilor se reduce, așa cum se poate observa pe diagrama din figura 4, care prezintă variația temperaturii celor doi agenți de lucru, în lungul suprafeței de transfer termic. Procesul de răcire a vaporilor supraîncălziți, până la atingerea stării de saturație 1-2, este numit desupraîncălzire și pentru realizarea acestuia este necesară o suprafață de schimb de căldură care reprezintă cca. 10-20% din suprafața totală a condensatorului.

Condensarea propriu-zisă începe în momentul în care vaporii ajung la temperatura de condensare t_k , iar în țevă apare prima picătură de lichid saturat (2). Din acest moment, cantitatea de lichid din interiorul țevii crește continuu (2', 2''), până când la sfârșitul condensării, ultima bulă de vapori își schimbă și aceasta starea de agregare (3).

Pe toată durata procesului de condensare 2-3, temperatura rămâne constantă, iar vaporii de agent frigorific sunt saturați și se găsesc în echilibru cu lichidul, care de asemenea este saturat.

Pentru condensarea propriu-zisă, este utilizată aproximativ 60-80% din suprafața totală a condensatorului.

În ultima parte a condensatorului, lichidul obținut continuă să rămână în contact termic cu aerul rece și astfel condensul va continua să cedeze căldură, ajungând ca la ieșirea din aparat să fie ușor subrăcit. Pentru realizarea subrăcirii, procesul 3-4, este utilizată cca. 10-20% din suprafața totală a condensatorului.

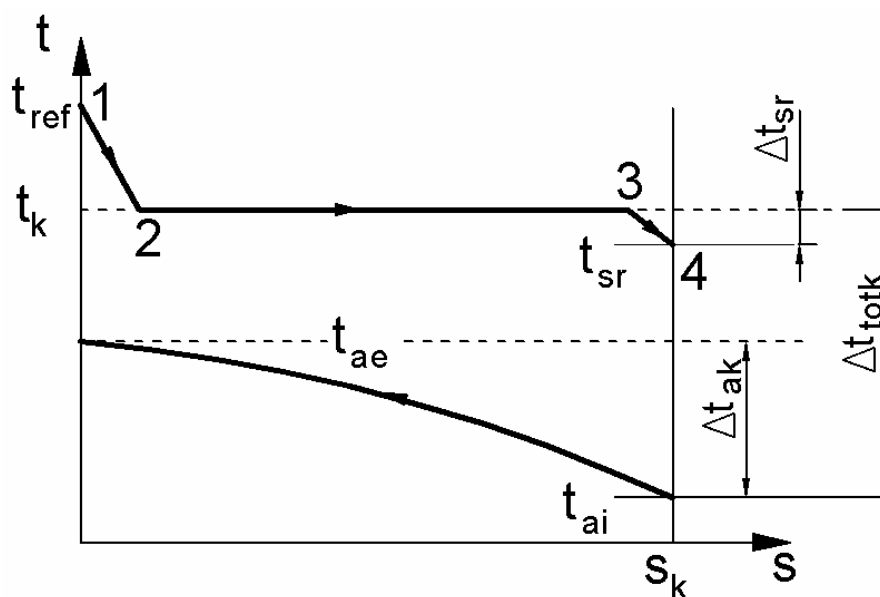


Fig. 4. Regimul termic al condensatorului răcit cu aer

La intrarea în condensator, vaporii supraîncălziți (1) au temperatura de refulare t_{ref} , iar la ieșire, condensul are o temperatură ceva mai redusă decât temperatura de condensare, denumită temperatură de subrăcire t_{sr} .

Regimul termic al condensatorului răcit cu aer este determinat de caracteristicile constructive ale aparatului (materiale, dimensiuni geometrice, starea suprafețelor, etc.), de regimul de curgere (debite, respectiv viteze de curgere), de amplasarea ventilatoarelor care asigură circulația aerului, etc.

Calculul regimului termic al condensatorului răcit cu aer constă în determinarea tuturor temperaturilor caracteristice. La proiectarea condensatoarelor, un obiectiv important al calculului regimului termic, este determinarea temperaturii de condensare t_k , care reprezintă unul din parametrii interni de lucru ai instalației.

Temperatura aerului la intrarea în condensator t_{ai} , este cunoscută, reprezentând cea mai ridicată temperatură a aerului, pe timp de vară, în zona geografică în care va funcționa condensatorul.

Temperatura aerului la ieșirea din condensator a fost notată, cu t_{ae} , iar variația temperaturii aerului în condensator, sau gradul de încălzire a aerului, a fost notată cu Δt_{ak} .

$$\Delta t_{ak} = t_{ae} - t_{ai} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (1)$$

Variația temperaturii aerului în condensator, are în cazul unor construcții uzuale și condiții de lucru normale, valori în intervalul:

$$\Delta t_{ak} = 5 \dots 10^\circ\text{C} \quad (2)$$

Temperatura aerului, la ieșirea din condensator se poate determina cu relația:

$$t_{ae} = t_{ai} + \Delta t_{ak} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3)$$

$$t_{ae} = t_{ai} + 5 \dots 10 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4)$$

Diferența dintre temperatura de condensare și temperatura aerului la ieșirea din aparat, este pentru construcții uzuale și condiții normale:

$$t_k - t_{ae} = 5 \dots 10^\circ\text{C} \quad (5)$$

Diferența totală de temperatură din condensator, este diferența dintre temperatura de condensare și cea a aerului la intrare în acesta, iar în condițiile prezentate, se poate constata că valorile normale pentru aceasta sunt:

$$\Delta t_{totk} = t_k - t_{ai} = 10 \dots 20^\circ\text{C} \quad (6)$$

Temperatura de condensare, se poate determina direct în funcție de temperatura aerului la intrarea în condensator și diferența totală de temperatură în condensator:

$$t_k = t_{ai} + \Delta t_{totk} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (7)$$

$$t_k = t_{ai} + 10 \dots 20 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (8)$$

Presiunea de condensare p_k , poate fi determinată ușor, dacă se cunoaște temperatura de condensare, cu ajutorul diagramelor sau tabelor termodinamice, corespunzătoare agentului de lucru din instalație:

$$t_k \rightarrow p_k \quad (9)$$

Gradul de subrăcire a condensului Δt_{sr} , reprezintă diferența dintre temperatura de condensare și temperatura lichidului la ieșirea din condensator:

$$\Delta t_{sr} = t_k - t_{sr} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10)$$

Valorile normale ale gradului de subrăcire, se încadrează în intervalul:

$$\Delta t_{sr} = 4 \dots 7^\circ\text{C} \quad (11)$$

Temperatura de subrăcire, cea la care iese agentul frigorific lichid din condensator, se poate calcula cu relația:

$$t_{sr} = t_k - \Delta t_{sr} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (12)$$

$$t_{sr} = t_k - 4 \dots 7 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (13)$$

În figura 5 este prezentat un exemplu de regim termic normal, pentru un condensator răcit cu aer, având o construcție uzuală și condiții de lucru medii.

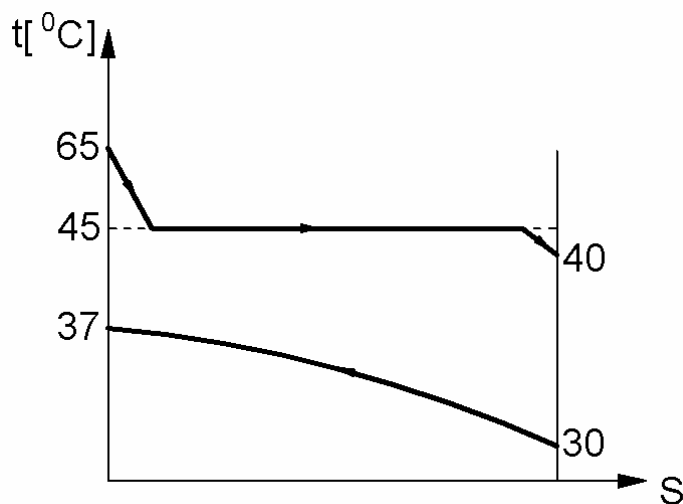


Fig. 5. Exemplu de regim termic al unui condensator răcit cu aer

Condensarea

- 5 -

Temperatura aerului la intrarea în condensator: $t_{ai} = 30^{\circ}\text{C}$

Temperatura de condensare: $t_k = 45^{\circ}\text{C}$

Diferența totală de temperatură în condensator: $\Delta t_{\text{totk}} = 45 - 30 = 15^{\circ}\text{C}$

Temperatura aerului la ieșirea din condensator: $t_{ae} = 37^{\circ}\text{C}$

Gradul de încălzire a aerului: $\Delta t_{ak} = 37 - 30 = 7^{\circ}\text{C}$

Diferența dintre t_k și t_{ae} : $45 - 37 = 8^{\circ}\text{C}$

Temperatura de subrăcire: $t_{sr} = 40^{\circ}\text{C}$

Gradul de subrăcire: $\Delta t_{sr} = 45 - 40 = 5^{\circ}\text{C}$

Condensatoare răcite cu apă

Construcția unui condensator răcit cu apă este prezentată în figura 6, iar *schema de principiu a unui condensator răcit cu apă* este prezentată în figura 7. Agentul frigorific intră în aparat sub formă de vapori supraîncălziți (v.si.), și iese din acesta sub formă de lichid subrăcit (l.s.). Apa la intrarea în condensator (w.i.) este rece, iar la ieșirea din acesta (w.e.) devine caldă, deoarece în aparat preia căldura cedată de agentul frigorific. Presiunea agentului frigorific în condensator, este constantă și are valoarea presiunii de condensare p_k .

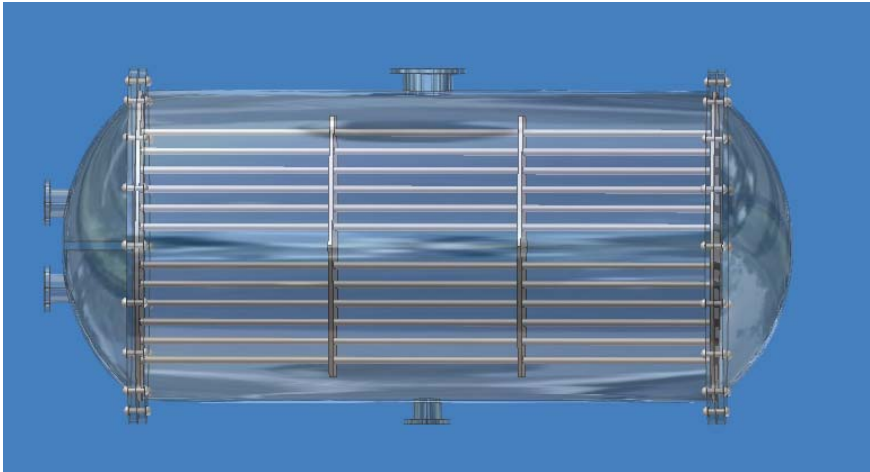


Fig. 6. Construcția condensatorului răcit cu apă

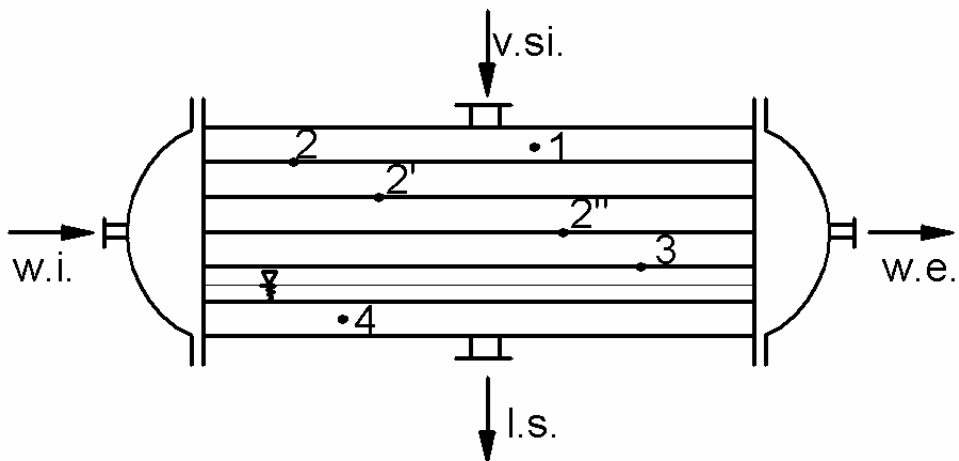


Fig. 7. Schema condensatorului răcit cu apă

Evoluția procesului de condensare este prezentată în figura 8, de la intrarea vaporilor supraîncălziți în condensator (1), până la ieșirea condensului ușor subrăcit (4) din acesta.

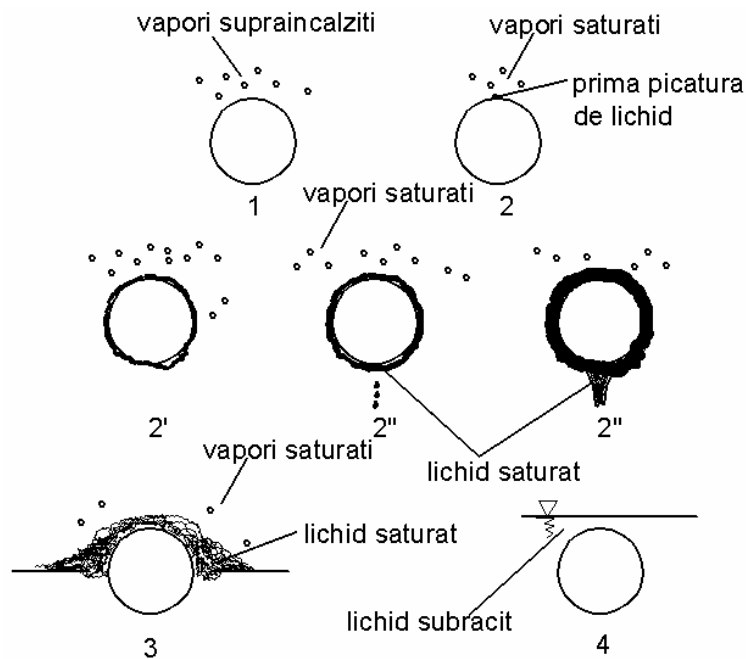


Fig. 8. Evoluția procesului de condensare pe țevi

Spre deosebire de condensatoarele răcite cu aer, în cele răcite cu apă, condensarea se realizează pelicular, pe suprafețele exterioare, reci, ale țevilor schimbătoare de căldură. Pelicula de condens se formează pe primele rânduri de țevi și condensul curge de pe țevile superioare pe cele inferioare, grosimea peliculei crescând treptat de sus în jos.

În figura 9 este redată o imagine 3D a modului în care se formează condensul, pe suprafața exterioară a țevilor condensatoarelor răcite cu apă.

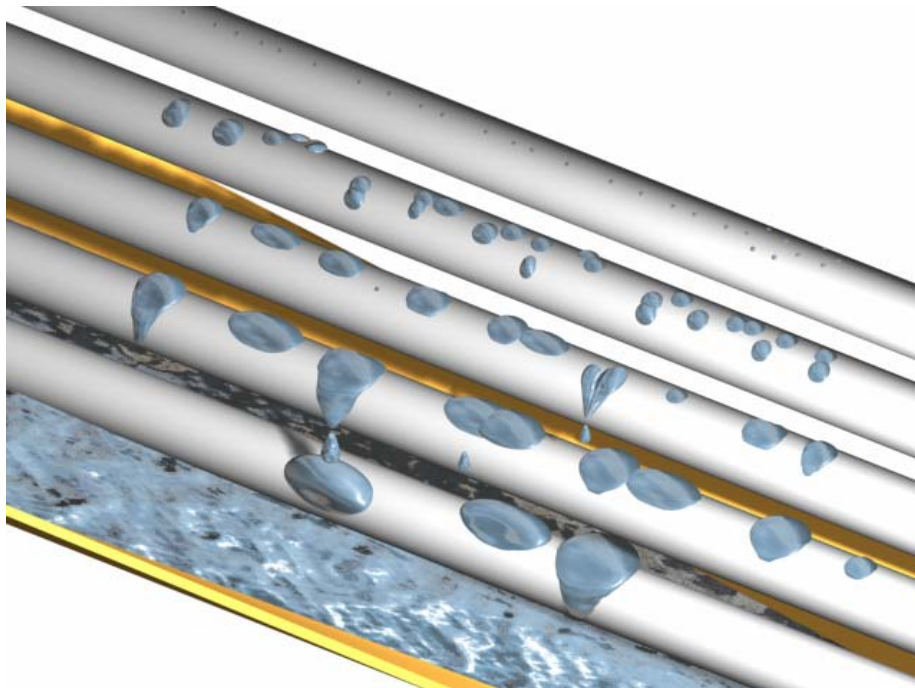


Fig. 9. Formarea condensului la exteriorul țevilor răcite cu apă

După intrarea în aparat, în contact termic cu apa rece, temperatura vaporilor supraîncălziți se reduce, așa cum se poate observa pe diagrama din figura 10, care prezintă variația temperaturii celor doi agenți de lucru, în lungul suprafeței de transfer termic. Desupraîncălzirea 1-2 se realizează pe primele țevi, din partea superioară a condensatorului, pe o suprafață de schimb de căldură de cca. 10% din suprafața totală a condensatorului.

Condensarea propriu-zisă începe în momentul în care vaporii ajung la temperatura de condensare t_k , moment în care apare pe țevă prima picătură de lichid saturat (2). Din acest moment, cantitatea de lichid formată la exteriorul țevii crește continuu (2', 2'', 2'''), până când la sfârșitul condensării, pe țevile din partea inferioară a condensatorului, vaporii își schimbă integral starea de agregare (3).

Pe toată durata procesului de condensare 2-3, temperatura rămâne constantă la valoarea t_k , iar vaporii de agent frigorific sunt saturați și se găsesc în echilibru cu lichidul, care de asemenea este saturat.

Pentru condensarea propriu-zisă este utilizată aproximativ 80% din suprafața totală a condensatorului.

Pe ultimele țevi din partea inferioară a condensatorului, lichidul continuă să se găsească în contact termic cu apa rece din interiorul țevilor și astfel lichidul va continua să cedeze căldură, ajungând ca la ieșirea din aparat să fie ușor subrăcit. Subrăcirea este realizată pe cca. 10% din suprafața totală a condensatorului.

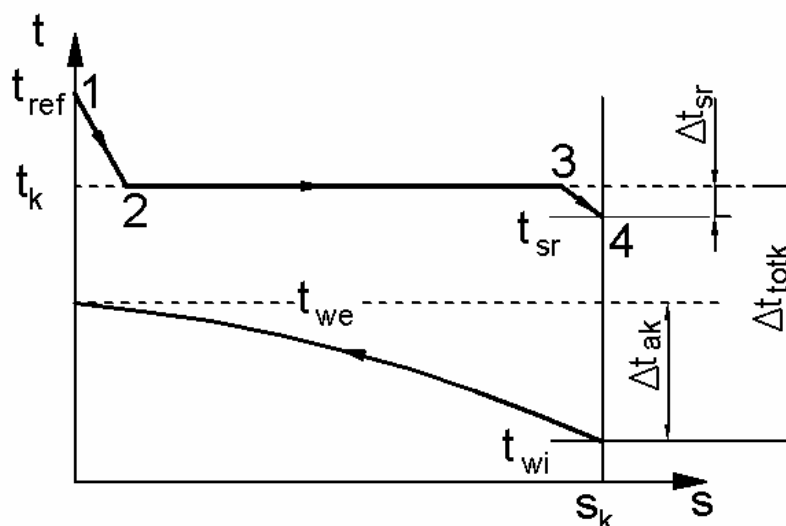


Fig. 10. Regimul termic al condensatorului răcit cu apă

Regimul termic al condensatorului răcit cu apă este determinat de caracteristicile constructive ale aparatului (materiale, dimensiuni geometrice, starea suprafețelor, etc.), de regimul de curgere (debite, respectiv viteze de curgere), etc.

Temperatura apei la intrarea în condensator t_{wi} , este determinantă pentru condițiile în care se realizează condensarea.

Temperatura apei la ieșirea din condensator a fost notată, cu t_{we} , iar variația temperaturii aerului în condensator, sau gradul de încălzire a aerului, a fost notată cu Δt_{wk} .

$$\Delta t_{wk} = t_{we} - t_{wi} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (14)$$

Variația temperaturii aerului în condensator, pentru construcții uzuale și condiții de lucru normale, are valori în intervalul:

$$\Delta t_{wk} = 3 \dots 5^{\circ}\text{C} \quad (15)$$

Temperatura apei, la ieșirea din condensator se poate determina cu relația:

$$t_{we} = t_{wi} + \Delta t_{wk} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (16)$$

$$t_{we} = t_{wi} + 3 \dots 5 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (17)$$

Diferența dintre temperatura de condensare și temperatura apei la ieșirea din aparat, este pentru construcții uzuale și condiții normale:

$$t_k - t_{we} = 3 \dots 5^{\circ}\text{C} \quad (18)$$

Diferența totală de temperatură din condensator, are în condițiile prezentate valori normale situate în intervalul:

$$\Delta t_{\text{totk}} = t_k - t_{wi} = 6 \dots 10^{\circ}\text{C} \quad (19)$$

Temperatura de condensare se poate determina direct în funcție de temperatura apei și diferența totală de temperatură din condensator:

$$t_k = t_{wi} + \Delta t_{\text{totk}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (20)$$

$$t_k = t_{wi} + 6 \dots 10 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (21)$$

Presiunea de condensare p_k , poate fi determinată în funcție de temperatura de condensare, cu ajutorul diagramelor sau tabelelor termodinamice, corespunzătoare agentului de lucru din instalație:

$$t_k \rightarrow p_k \quad (22)$$

Gradul de subrăcire a condensului Δt_{sr} , reprezintă diferența dintre temperatura de condensare și temperatura lichidului la ieșirea din condensator:

$$\Delta t_{sr} = t_k - t_{sr} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (23)$$

Valorile normale ale gradului de subrăcire, se încadrează în intervalul:

$$\Delta t_{sr} = 4 \dots 7^{\circ}\text{C} \quad (24)$$

Temperatura de subrăcire, cea la care iese agentul frigorific lichid din condensator, se poate calcula cu relația:

$$t_{sr} = t_k - \Delta t_{sr} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (25)$$

$$t_{sr} = t_k - 4 \dots 7 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (26)$$

În figura 11 este prezentat un exemplu de regim termic normal, pentru un condensator răcit cu apă, având o construcție uzuală și condiții de lucru medii.

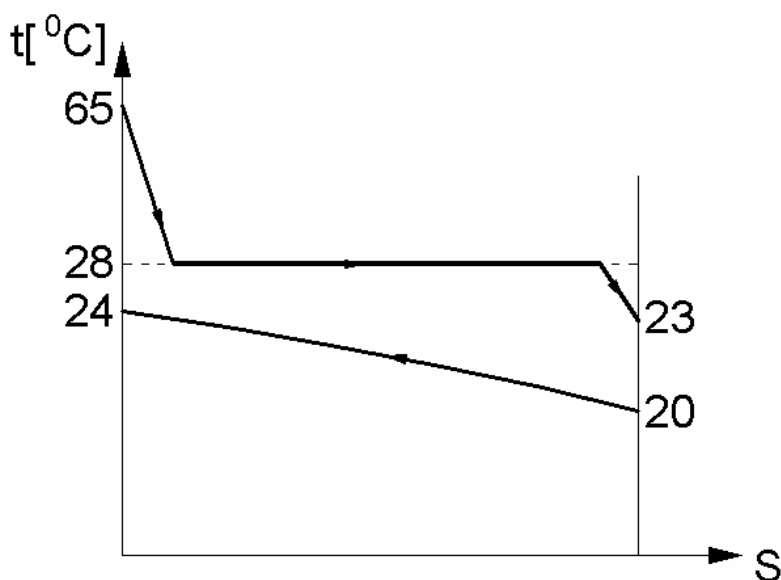


Fig. 11. Exemplu de regim termic al unui condensator răcit cu apă

Temperatura apei la intrarea în condensator: $t_{wi} = 20^{\circ}\text{C}$

Temperatura de condensare: $t_k = 28^{\circ}\text{C}$

Diferența totală de temperatură în condensator: $\Delta t_{\text{totk}} = 28 - 20 = 8^{\circ}\text{C}$

Temperatura aerului la ieșirea din condensator: $t_{we} = 24^{\circ}\text{C}$

Gradul de încălzire a aerului: $\Delta t_{\text{wk}} = 24 - 20 = 4^{\circ}\text{C}$

Diferența dintre t_k și t_{we} : $28 - 24 = 8^{\circ}\text{C}$

Temperatura de subrăcire: $t_{sr} = 23^{\circ}\text{C}$

Gradul de subrăcire: $\Delta t_{sr} = 28 - 23 = 5^{\circ}\text{C}$

În instalațiile frigorifice de puteri medii și mari, în schema instalațiilor, după condensator urmează o **butelie de lichid** (cazul instalațiilor având condensator răcit cu aer, de puteri frigorifice medii), sau un **rezervor de lichid** (cazul instalațiilor având condensator răcit cu aer sau apă, de puteri frigorifice mari).

În instalațiile de puteri frigorifice mari, răcite cu apă, subrăcirea condensului, se realizează uneori în schimbătoare de căldură independente, denumite **subrăcitoare**, în care agentul frigorific lichid saturat, este subrăcit utilizându-se tot apă de răcire. Din punct de vedere constructiv, aceste schimbătoare de căldură sunt de tip țevă în țevă.

Reprezentarea proceselor în diagrame termodinamice

Procesele termodinamice care au loc în condensator pe partea agentului frigorific, desupraîncălzirea, condensarea și subrăcirea, pot fi reprezentate în diagramele termodinamice T-s și lgp-h, ca în figurile 12, respectiv 13.

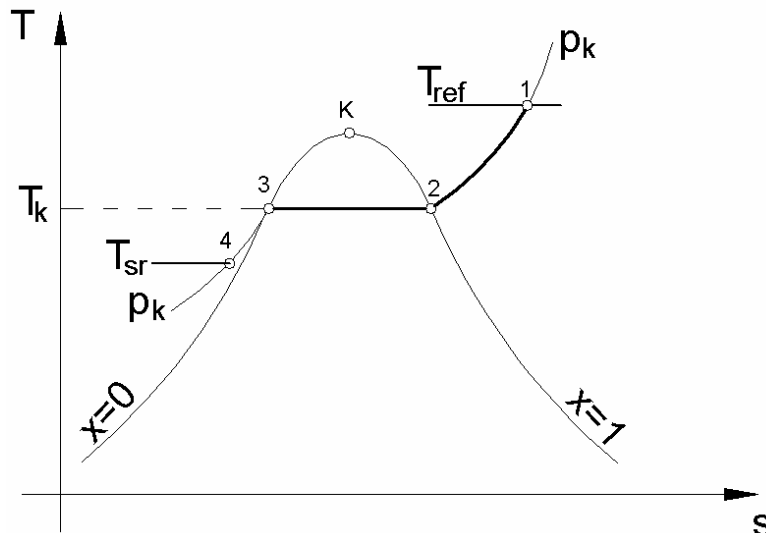


Fig. 12. Reprezentarea proceselor termodinamice din condensator, în diagrama T-s

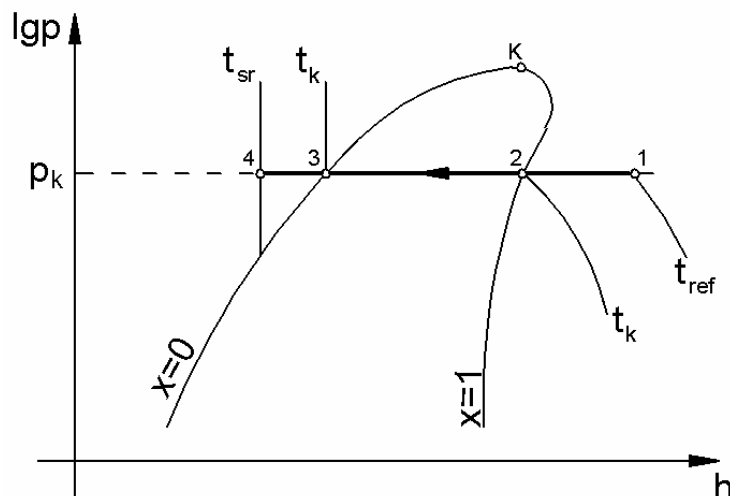


Fig. 13. Reprezentarea proceselor termodinamice din condensator, în diagrama lgp-h

Notațiile de pe cele două diagrame au aceeași semnificație, ca și în celelalte figuri:

- 1 – starea vaporilor la ieșirea din compresor;
- 2 – începutul procesului de condensare;
- 3 – sfârșitul procesului de condensare;
- 4 – ieșirea lichidului subrăcit din condensator.

Pentru condensatoarele răcite cu apă, reprezentarea regimului termic, în diagrama temperatură (t) – suprafață de transfer termic (S), oferă toate informațiile necesare pentru determinarea parametrilor termodinamici ai apei.

În cazul condensatoarelor răcite cu aer, datorită prezenței umidității în aerul care preia căldura degajată de agentul frigorific, în vederea studierii procesului termodinamic suferit de aer, este necesară reprezentarea acestuia în diagrama entalpie (h) – umiditate (x) a aerului umed.

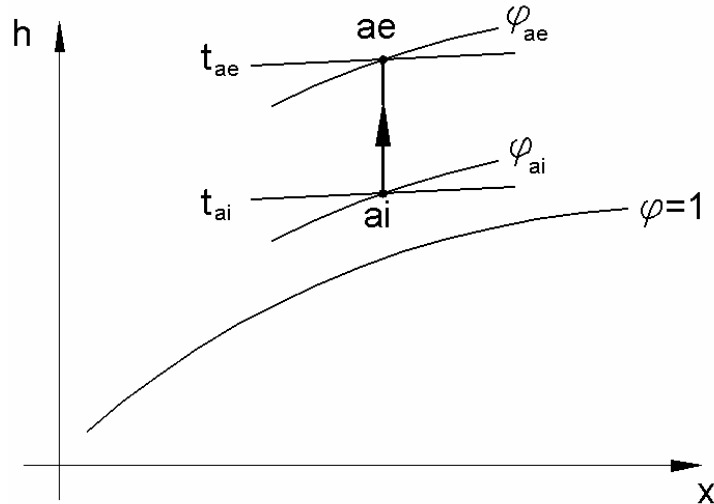


Fig. 14. Reprezentarea procesului de încălzire în condensator a aerului umed, în diagrama h - x

Notațiile au aceeași semnificație ca și cele utilizate anterior:

- ai – starea aerului la intrarea în condensator;
- ae – starea aerului la ieșirea din condensator.

Analizând procesul reprezentat în figura 14, se observă că temperatura aerului umed, crește, în condițiile în care umiditatea absolută rămâne constantă (cantitatea de vapori de apă din aerul umed, rămâne constantă). În aceste condiții, umiditatea relativă scade în timpul procesului de încălzire a aerului ($\varphi_{ai} > \varphi_{ae}$).

Subrăcirea

Analiza detaliată a procesului de subrăcire, este importantă pentru înțelegerea completă a proceselor termodinamice și pentru formarea unei imagini mai clare a manierei în care evoluează agentul frigorific în condensator.

Analiza valorii gradului de subrăcire, este importantă în procesul de diagnoză a stării de funcționare a condensatorului. În plus, așa cum se va arăta în continuare, valoarea gradului de subrăcire, sau mai simplu valoarea subrăcirii, permite evaluarea cantității de lichid din condensator.

Având în vedere că în condiții normale, valorile gradului de subrăcire, sau valorile subrăcirii, sunt foarte apropiate, pentru ambele tipuri de condensatoare (răcite cu aer, sau cu apă), în continuare va fi analizată doar subrăcirea din condensatoarele răcite cu aer, iar concluziile se vor putea extrapola integral și pentru condensatoarele răcite cu apă.

În figura 15 este prezentat un detaliu al condensatorului răcit cu aer, reprezentând zona în care se realizează subrăcirea 3-4.

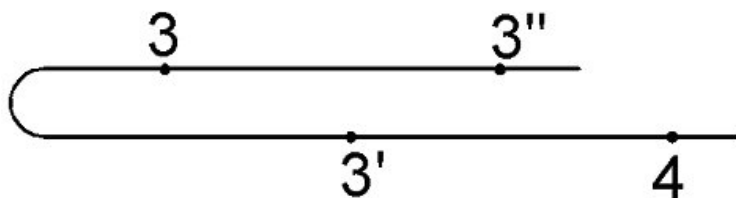


Fig. 15. Detaliu al condensatorului răcit cu aer. Subrăcirea.

Având în vedere că poziția stării 3, corespunde locului în care se produce condensarea ultimei bule de vapori din condensator, lungimea de țeavă a condensatorului 3-4, este cea care asigură suprafața de transfer termic, necesară realizării în condiții normale a subrăcirii. Această porțiune de conductă este în condiții normale, plină cu lichid.

Dacă dintr-un motiv oarecare, ultima bulă de vapori, condensează mai târziu decât în mod normal (în 3'), atunci **pentru subrăcire va fi disponibilă o porțiune mai scurtă de țeavă, care va asigura o suprafață de transfer termic mai redusă. Gradul de subrăcire realizat va fi mai redus și în condensator se va găsi mai puțin lichid decât în mod normal.**

Dacă dintr-un motiv oarecare, ultima bulă de vapori, condensează mai repede decât în mod normal (în 3''), atunci **pentru subrăcire va fi disponibilă o porțiune mai lungă de țeavă, care va asigura o suprafață de transfer termic mai mare. Gradul de subrăcire realizat va fi mai mare și în condensator se va găsi mai mult lichid decât în mod normal.**

Se constată că există o corelație între gradul de subrăcire și cantitatea de lichid existentă în condensator. **Cu cât crește gradul de subrăcire, cu atât crește și cantitatea de lichid din condensator. Cu cât scade gradul de subrăcire, cu atât scade și cantitatea de lichid din condensator.** La limită, dacă gradul de subrăcire este nul, se poate considera că procesul de condensare se termină exact la ieșirea din condensator, sau chiar că din condensator, ies vapori umezi, adică un amestec de lichid saturat și vapori saturați.

Aspecte practice

Un grad de subrăcire prea redus poate fi asociat cu o cantitate prea redusă de lichid în condensator.

Această concluzie poate fi exploatată eficient în activitatea de diagnoză a instalațiilor frigorifice, dar valoarea gradului de subrăcire, trebuie corelată și cu valorile altor parametri funcționali ai instalației.

Cantitatea de lichid din condensator, depinde și de temperatura aerului la intrarea în condensator. Cu cât temperatura aerului de răcire a condensatorului este mai redusă, cu atât mai redusă va fi lungimea de țevă, deci suprafața de transfer termic, necesară realizării unei subrăciri normale. Astfel, pentru un condensator dintr-o anumită instalație, pe timp de iarnă, gradul de subrăcire va fi mai mare decât pe timp de vară.

Temperatura de condensare poate fi citită pe manometrul montat pe conducta de refulare a compresorului, iar temperatura de subrăcire poate fi citită pe un termometru de contact, montat pe conducta de ieșire a lichidului din condensator.

Prima parte a afirmației anterioare poate fi considerată la prima vedere hazardată, de către un cititor neavizat, dar este perfect adevărată. Pentru a se înțelege mai ușor cum anume se poate determina temperatura de condensare cu ajutorul unui manometru, în figura 16, este prezentat un manometru frigorific de refulare.



Fig. 16. Manometru frigorific de refulare

Se observă că asemenea manometre frigorifice, prezintă cinci scale gradate, dintre care cele două plasate la interior indică presiunea, iar cele trei plasate spre exterior indică ***temperaturile de saturație***, pentru trei agenți frigorifici diferiți.

Fiind montat pe conducta de refulare, manometrul va indica presiunea de condensare, iar temperatura de saturație corespunzătoare acestei presiuni este temperatura de condensare, care trebuie citită pe scala corespunzătoare agentului de lucru din instalație.

În figura 17, este prezentată o schemă de montaj într-o instalație frigorifică a unui manometru, pe conducta de refulare a compresorului C și a unui termometru, pe conducta de ieșire a lichidului din condensatorul K. Gradul de subrăcire a lichidului în condensator, este reprezentat de diferența dintre temperatura de condensare, citită pe manometrul de refulare și temperatura lichidului la ieșirea din condensator, citită pe termometru.

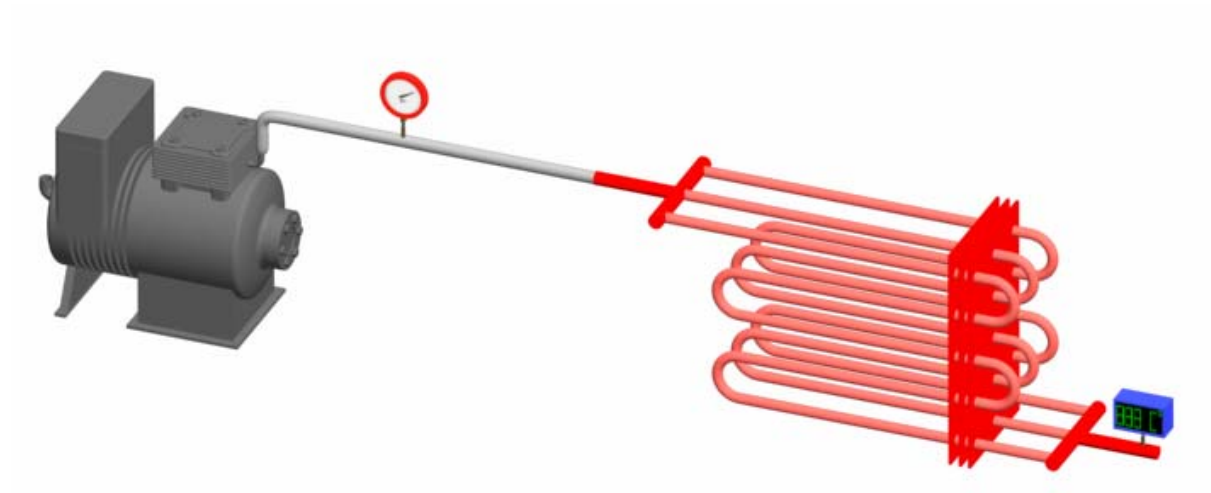


Fig. 17. Schema de montaj a manometrului și termometrului pentru determinarea gradului de subrăcire

Principiul pentru determinarea experimentală a gradului de subrăcire, prezentat anterior, este valabil atât pentru condensatoarele răcite cu aer cât și pentru condensatoarele răcite cu apă sau mixt.