

Laminarea

În instalațiile frigorifice, **laminarea** este procesul care se realizează când agentul frigorific lichid trece printr-o secțiune îngustată, datorită căreia se modifică presiunea fluidului, de la valoarea presiunii de condensare p_k a lichidului obținut în condensator, până la valoarea presiunii de vaporizare p_0 a agentului care urmează să ajungă în vaporizator. Acest proces se realizează în ventilul de laminare, care din punct de vedere constructiv se aseamănă cu un robinet, sau o diafragmă având orificiul de curgere calibrat. **Laminarea este considerată adiabatică**, deoarece se desfășoară fără interacțiuni termice cu mediul ambiant. Având în vedere că în timpul realizării acestui proces termodinamic, nu se manifestă nici interacțiuni sub formă de lucru mecanic, se poate considera că **entalpia rămâne constantă**.

În instalațiile de putere frigorifică redusă, cum sunt de exemplu echipamentele frigorifice casnice, sau unele aparate de condiționare a aerului, laminarea adiabatică se poate realiza și în tuburi capilare.

Indiferent de dispozitivul fizic în care este realizată, **laminarea adiabatică este un proces ireversibil**. Pierderile care se manifestă în cadrul acestui proces, sunt datorate curgerii cu frecări, turbulențe și omogenizări. **Ireversibilitățile interne ale procesului de laminare adiabatică, duc la creșterea entropiei agentului frigorific**.

Construcția și funcționarea ventilului de laminare termostatic

Ventilul de laminare furnizează agentul de lucru cu care urmează să fie alimentat vaporizatorul. Simplitatea constructivă și funcțională a acestui dispozitiv, permite modificarea ușoară a condițiilor de realizare a curgerii, cu toate implicațiile care decurg asupra modificării condițiilor de lucru din instalație. Din aceste motive, în practica instalațiilor frigorifice **ventilul de laminare are rolul unui dispozitiv de automatizare, care controlează procesul de alimentare cu lichid a vaporizatorului**. Este evident, că în mod indirect, **prin cantitatea de lichid din vaporizator, poate fi controlată puterea frigorifică realizată de instalație**.

În figura 1 este prezentat un răcitor de aer alimentat prin ventil de laminare, iar în figura 2 este redată schema de alimentare prin ventil de laminare a unui vaporizator, răcitor de aer. Deoarece imediat după laminare, agentul frigorific ajunge în răcitorul de aer, aceste tipuri de aparate sunt denumite și **vaporizatoare cu detentă directă**.

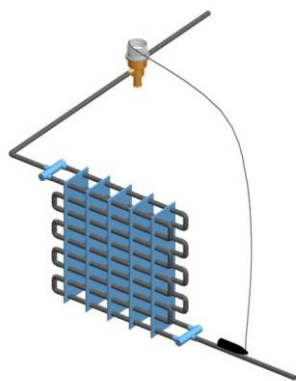


Fig. 1. Racitor de aer alimentat prin ventil de laminare termostatic

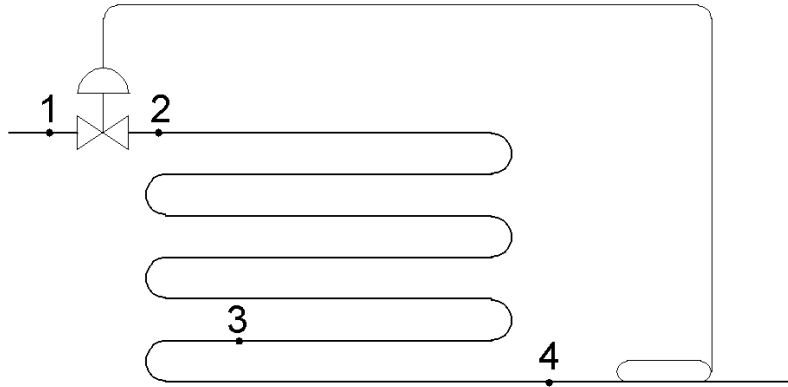


Fig. 2. Schema de alimentare prin ventil de laminare a unui răcitor de aer

La intrarea în ventilul de laminare, agentul frigorigen 1, este lichidul subrăcit care rezultă din condensator. În urma laminării, se obține un amestec de lichid și vapori saturați uscați 2, care intră în vaporizator. Lichidul vaporizează complet în interiorul serpentinei, poziția sfârșitului vaporizării fiind notată cu 3. La ieșirea din vaporizator se obțin vapori supraîncălziți 4, iar **gradul de supraîncălzire în vaporizator, prezintă o influență determinantă asupra funcționării ventilului de laminare.**

Ventilul de laminare prezentat anterior, a cărui schemă constructivă și funcțională este redată în figura 3, este denumit **termostatic**, deoarece funcționarea acestuia este controlată de o temperatură și anume cea a vaporilor la ieșirea din vaporizator.

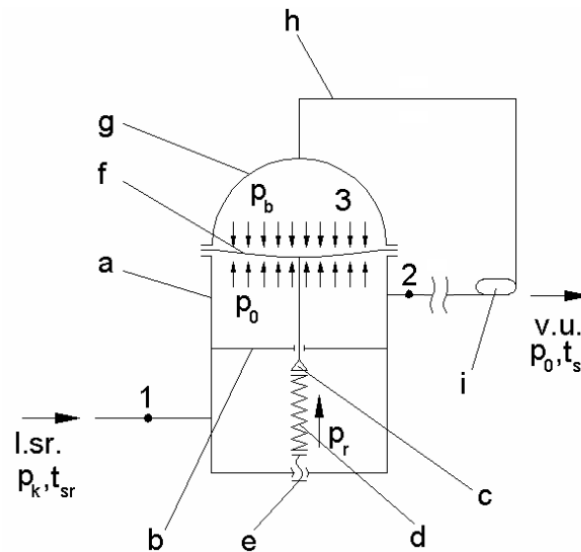


Fig. 3. Schema constructivă și funcțională a ventilului de laminare termostatic
a – corp; b – diafragmă cu orificiul de curgere calibrat; c – organul de închidere al ventilului,
d – resort; e – dispozitiv de reglare a tensiunii resortului; f – membrană elastică; g – capac;
h – tub capilar; i - bulb

Pe corpul (a) al ventilului de laminare termostatic, este fixată diafragma având orificiul de curgere calibrat (b). Unele construcții au diafragma interschimbabilă, ceea ce lărgeste domeniul de utilizare a ventilelor respective. Organul de închidere al ventilului (c), obturează sau eliberează traseul de curgere a agentului frigorigen, prin orificiul calibrat al diafragmei. Poziția organului de închidere este influențată de resortul (d) și de membrana elastică (f). Membrana, împreună cu capacul (g), tubul capilar (h) și bulbul (i), alcătuiesc împreună **elementul termostatic**, denumit astfel deoarece prin intermediul acestor

componente, temperatura vaporilor furnizați de vaporizator, acționează asupra organului de închidere al ventilului de laminare. Asupra aceluiași element acționează și resortul, care poate fi tensionat sau detensionat, cu ajutorul elementului de reglaj (e).

Organul de închidere al ventilului de laminare, este fixat prin intermediul unei tije, de membrana elastică, iar cele două elemente se deplasează solidar. Mișcarea membranei este determinată pe de-o parte de presiunea de vaporizare p_0 , care se manifestă în spațiul dintre corp, diafragmă și membrană și pe de altă parte de presiunea din elementul termostatic, denumit uneori și *tren termostatic*. Această presiune a fost notată cu p_b , deoarece are aceeași valoare ca și în bulb. Presiunea p_b , reprezintă tocmai valoarea presiunii de saturație a agentului frigorific din elementul termostatic, determinată de valoarea temperaturii vaporilor ușor supraîncălziți, furnizați de vaporizator. Temperatura vaporilor este denumită adesea și temperatura bulbului. **De obicei, în elementul termostatic, se regăsește agentul frigorific din instalație.** În afara celor două presiuni, care determină deplasarea membranei, asupra organului de închidere al ventilului, acționează și tensiunea resortului, care este echivalentă tot cu o presiune, notată cu p_r . Prin intermediul organului de închidere și al tijei, p_r acționează tot asupra membranei elastice. Analizând schema constructivă a ventilului de laminare termostatic, se poate constata că valoarea presiunii de condensare p_k , a agentului frigorific la intrarea în ventil, nu influențează poziția membranei și a organului de închidere al ventilului. Această presiune acționează asupra suprafeței organului de închidere, cu aceeași intensitate de jos în sus, ca și de sus în jos, deci nu influențează poziția acestuia. Ulterior se va arăta că și presiunea de condensare influențează funcționarea ventilului de laminare termostatic.

În figura 4 este prezentată schema forțelor, respectiv presiunilor care acționează asupra membranei elastice a ventilului de laminare termostatic și determină închiderea sau deschiderea acestuia.

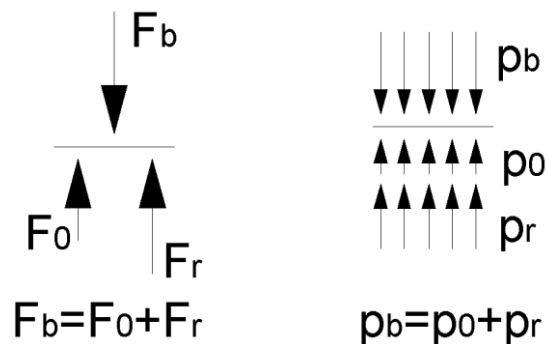


Fig. 4. Schema forțelor și presiunilor care acționează asupra membranei

Deoarece presiunile de vaporizare p_0 , a resortului p_r și din bulb, respectiv trenul termostatic p_b , acționează asupra aceleiași suprafețe a membranei, fiecare din cele trei presiuni, înmulțită cu suprafața membranei, generează câte o forță de închidere sau de deschidere a ventilului, notate cu F_0 , F_r , respectiv F_b .

Membrana elastică și resortul, respectiv organul de închidere al ventilului de laminare termostatic, sunt în echilibru, când cele trei forțe, respectiv presiuni, respectă relațiile:

$$p_b = p_0 + p_r$$

$$F_b = F_0 + F_r$$

Presiunea de vaporizare p_0 și presiunea din bulb p_b , sunt determinate de condițiile de lucru ale instalației, iar presiunea exercitată de resort p_r , este reglabilă cu ajutorul unui element de reglare.

Ventilul de laminare termostatic este deschis și permite curgerea agentului frigorific, deci alimentarea cu lichid a vaporizatorului, dacă:

$$p_b \geq p_0 + p_r$$

$$F_b \geq F_0 + F_r$$

Ventilul de laminare termostatic este închis și nu permite curgerea agentului frigorific, deci alimentarea cu lichid a vaporizatorului, dacă:

$$p_b < p_0 + p_r$$

$$F_b < F_0 + F_r$$

Poziția de echilibru a membranei, diferă în funcție de valorile presiunilor, respectiv forțelor care determină deplasarea acesteia. Astfel, când crește presiunea de deschidere, membrana coboară, ceea ce determină comprimarea, deci tensionarea resortului, având ca efect creșterea presiunii de închidere datorată resortului, iar când scade presiunea de deschidere, membrana urcă, ceea ce determină destinderea resortului, având ca efect scăderea presiunii de închidere datorată resortului. De asemenea, presiunea de vaporizare, contribuie mai mult sau mai puțin la închiderea resortului, în funcție de valoarea acestei presiuni, corelată la rândul ei, cu temperatura de vaporizare.

Trebuie observat că **ventilul de laminare termostatic reglează gradul de supraîncălzire a vaporilor la ieșirea acestora din vaporizator**. Când crește temperatura vaporilor, crește și presiunea din bulb, ceea ce determină deschiderea mai puternică a orificiului de curgere a agentului frigorific, deci alimentarea cu mai mult lichid a vaporizatorului, ceea ce va reduce gradul de supraîncălzire. Când scade temperatura vaporilor, scade și presiunea din bulb, ceea ce determină închiderea orificiului de curgere și alimentarea cu mai puțin lichid a vaporizatorului. În acest mod, se observă că gradul de supraîncălzire este menținut între anumite limite, care au fost prezentate în capitolul referitor la vaporizare.

Reglarea gradului de supraîncălzire a vaporilor la ieșirea din vaporizator, prin **utilizarea ventilelor de laminare termostactice, este obligatorie în instalațiile în care compresorul aspiră direct din vaporizatoare**, fără a fi prezente separatoare de lichid, sau alte aparate similare. Obligativitatea reglării gradului de supraîncălzire, provine din necesitatea de a evita pătrunderii lichidului în cilindrii compresorului. În asemenea instalații, ventilele de laminare termostactice sunt singura soluție pentru rezolvarea acestei probleme. Astfel, dacă gradul de supraîncălzire ar scădea teoretic la valoarea 0°C, atunci din vaporizator, ar putea rezulta la limită, un amestec de vapori saturați și lichid. Chiar dacă lichidul s-ar găsi în cantități mici, acesta ar putea ajunge în cilindrii compresorului, unde ar putea produce lovituri hidraulice, dacă volumul lichidului la sfârșitul comprimării ar depăși volumul spațiului mort. În asemenea situații s-ar deteriora în primul rând supapele compresorului, dar este posibil să se distrugă și alte componente, cum sunt segmentii, pistonul, sau chiar chiulasa.

Funcționarea ventilului de laminare termostatic, cu menținerea valorii gradului de supraîncălzire între limite bine determinate, este potrivită și din punct de vedere al puterii frigorifice asigurate de vaporizator.

Când din diverse motive crește necesarul de frig (de exemplu un depozit frigorific este alimentat cu o cantitate mare de produse alimentare proaspete și calde), excesul de căldură determină supraîncălzirea excesivă a vaporilor, ceea ce va avea ca efect deschiderea puternică a ventilului și alimentarea vaporizatorului cu un debit mare de agent frigorific lichid, iar acesta va putea prelua excesul de putere frigorifică. Atunci când, din diverse motive, scade necesarul de frig (de exemplu toate produsele dintr-un depozit frigorific au fost răcite până la temperatura de păstrare), scade și gradul de supraîncălzire a vaporilor la ieșirea din vaporizator, ceea ce determină închiderea cel puțin parțială a ventilului și alimentarea vaporizatorului cu un debit mult mai mic de agent frigorific, suficient însă pentru a prelua puterea frigorifică redusă a instalației în aceste situații.

Din cele prezentate anterior, se observă că ventilul de laminare termostatic alimentează vaporizatorul cu mult lichid, când este nevoie de o putere frigorifică mare și cu puțin lichid, când este nevoie de o putere frigorifică mică.

Se poate observa și că **unui necesar de frig redus îi corespunde o presiune de vaporizare redusă și o temperatură de vaporizare de asemenea redusă.** În acest caz, deschiderea redusă a orificiului de curgere, determină atât o laminare mai pronunțată a agentului de lucru, cât și alimentarea vaporizatorului cu un debit redus de agent frigorific. **Unui necesar de frig accentuat îi corespunde o presiune de vaporizare ridicată și o temperatură de vaporizare ridicată.** În acest caz, deschiderea largă a orificiului de curgere, determină atât o laminare mai redusă a agentului de lucru, cât și alimentarea vaporizatorului cu un debit mărit de agent frigorific.

Reduceri necesarului de frig, i se poate asocia și o reducere a temperaturii din spațiul răcit, deci la intrarea aerului în vaporizator, iar scăderea corespunzătoare a temperaturii de vaporizare, menționată anterior, este în concordanță și cu faptul că **în timpul funcționării vaporizatorului, diferența totală de temperatură se menține relativ constantă.** Modul de funcționare a ventilului de laminare termostatic, este perfect adaptat și acestei caracteristici a instalației frigorifice.

Funcționarea ventilului de laminare termostatic, depinde și de presiunea de condensare p_k , însă aceasta este menținută relativ constantă în timpul funcționării instalației, indiferent de condițiile externe de lucru ale condensatorului, aceasta fiind una din funcțiile sistemului de automatizare a instalațiilor frigorifice.

În figurile 5 și 6 sunt prezentate două tipuri de ventile de laminare termostatică produse de firma Danfoss. Principala diferență constructivă, constă în faptul că presiunea cu care acționează agentul frigorific din instalație asupra membranei elastice, este egalizată cu presiunea de vaporizare, fie printr-o construcție internă, în cazul primului ventil, fie printr-un racord suplimentar, denumit *racord de egalizare externă a presiunii de vaporizare*, în cazul celui de-al doilea ventil. Prima construcție prezentată, are avantajul simplității constructive. A doua construcție are avantajul că ține seama de căderile de presiune din vaporizator și permite racordarea spațiului din ventilul de laminare, de sub membrana elastică a elementului termostatic, la presiunea de la sfârșitul procesului de vaporizare, prin intermediul unui tub capilar, conectat la racordul de egalizare a presiunii. A doua construcție este recomandată mai ales în cazul vaporizatoarelor cu trasee de curgere lungi, precum și cazul vaporizatoarelor cu mai multe serpentine alimentate independent (în paralel), caz în care sistemul de alimentare prevede și existența unor tuburi capilare, unde se produce o cădere de presiune semnificativă.

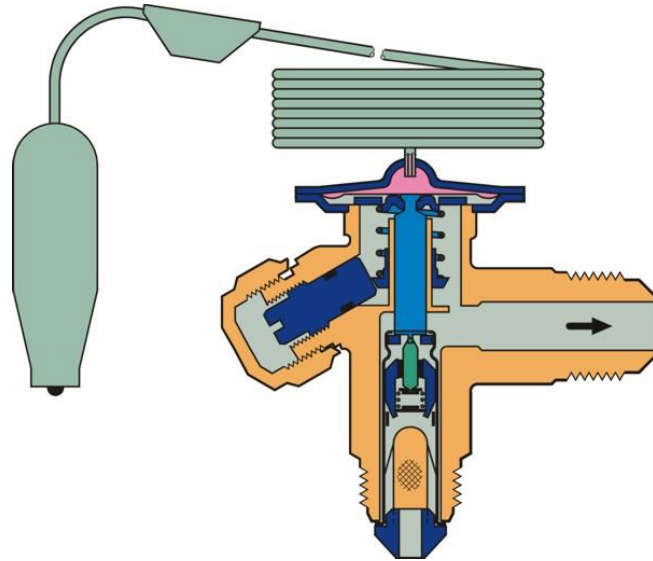


Fig. 5. Ventil de laminare termostatic cu egalizare internă a presiunii de vaporizare

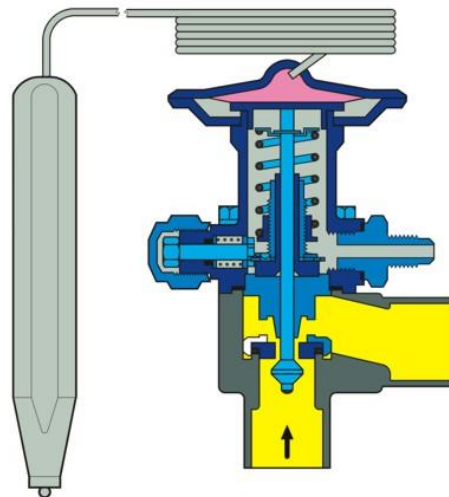


Fig. 6. Ventil de laminare termostatic cu egalizare externă a presiunii de vaporizare

Capacitatea ventilului de laminare termostatic

Funcționarea ventilului de laminare termostatic este determinată nu doar de cele trei presiuni care determină poziția organului de închidere ci și de presiunile agentului frigorific la intrarea în ventil p_k , respectiv la ieșirea din ventil p_0 .

Pentru o mai bună înțelegere a modului în care cele două presiuni influențează funcționarea ventilului de laminare, în figura 7 este prezentat un furtun prin care curge apă și care debitează liber în atmosferă. Este prezentată comportarea apei, nu numai pentru a se face o comparație cu un fenomen extrem de comun și cunoscut de toți cei care au stropit o grădină, sau au văzut măcar cum se procedează, respectiv au spălat sau măcar au văzut cum se spală un automobil, dar și pentru că agentul de lucru care curge prin ventilul de laminare este tot un lichid. Având în vedere că presiunea atmosferică p_a , de la capătul liber al furtunului, este constantă, singura presiune care influențează curgerea apei, este presiunea din furtun. Cu cât aceasta este mai mare, cu atât debitul masic de apă debitat prin furtun, este și acesta mai mare.

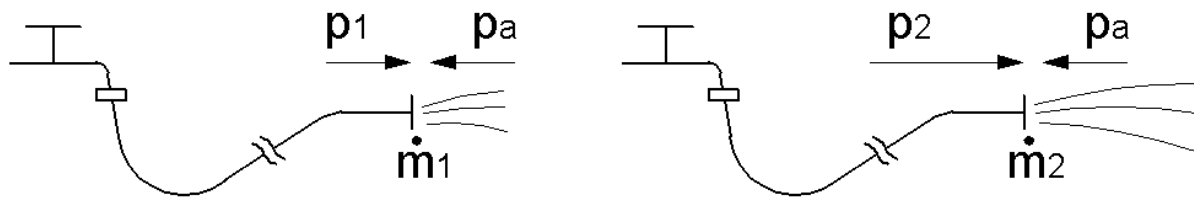


Fig. 7. Influența presiunii din interiorul furtunului, asupra debitului masic

$$p_1 < p_2 \Rightarrow \dot{m}_1 < \dot{m}_2$$

Debitul masic de apă care curge prin furtun, este de fapt proporțional cu diferența dintre presiunile de la cele două capete ale furtunului. Debitul masic de agent frigorific lichid, care curge prin ventilul de laminare și alimentează vaporizatorul, este de asemenea proporțional cu diferența dintre presiunile agentului frigorific înainte și după ventilul de laminare.

\dot{m} proporțional cu $\Delta p = p_k - p_0$

În figura 8 sunt prezentate două duze de curgere a agentului frigorific, prin diafragmele interschimbabile ale unui ventilul de laminare, având diametre diferite ale orificiului calibrat.



Fig. 8. Duze ale unui ventil de laminare, prevăzute cu orificii de curgere calibrate, de diametre diferite

Este evident că pentru aceleași presiuni de lucru, prin ventilul de laminare va curge un debit mai mare de agent frigorific, dacă acesta este echipat cu duze având diametrul orificiului calibrat mai mare, decât dacă ventilul este echipat cu duze având diametre mai mici ale orificiului de curgere.

Cu cât debitul masic de agent frigorific lichid, care curge prin ventilul de laminare este mai mare, cu atât mai mult lichid frigorific ajunge în vaporizator, deci cu atât mai mare va fi puterea frigorifică pe care o va asigura acesta. Este evident că există o corelație între debitul

de lichid furnizat de ventilul de laminare și puterea frigorifică a instalației. În aceste condiții, poate fi definită o mărime care să caracterizeze capacitatea ventilului de laminare termostatic de a realiza putere frigorifică. Această mărime a fost denumită **capacitatea ventilului de laminare termostatic**. Deoarece în mod abuziv, firmele furnizoare de echipamente frigorifice utilizează denumirea de detentor pentru ventilele de laminare și mărimea care le caracterizează, poartă uneori denumirea de **capacitatea detentorului**. Acest abuz de limbaj, provine mai ales din limba franceză, în care, literatura de specialitate utilizează adesea denumirea de detentor (*détendeur*), pentru ventilul de laminare.

Capacitatea ventilului de laminare de a furniza putere frigorifică, depinde așa cum s-a arătat, atât de condițiile de lucru, prin diferența dintre presiunile de condensare p_k și de vaporizare p_0 , cât și de diametrul orificiului de curgere al duzei cu care este echipat ventilul de laminare termostatic respectiv. Bineînțeles, capacitatea ventilelor de laminare, depinde și de natura agentului frigorific. Capacitatea ventilelor de laminare se măsoară în kW, dar uneori sunt utilizate și alte unități de măsură cum este **Ton**-ul.

$$1 \text{ Ton} = 12000 \text{ btu/h} \approx 3,5 \text{ kW}$$

Observație: Ton-ul reprezintă puterea termică rezultată prin topirea unei “tone mici (*short ton*)” de gheață ($m=907 \text{ kg}$) aflată la 0°C , în 24 de ore. Căldura latentă a gheții aflate la 0°C este $l = 333.55 \text{ kJ/kg}$.

$$1 \text{ Ton} = \frac{m \cdot l}{\tau} = \frac{907 \cdot 333.55}{24 \cdot 3600} = 3.501 \text{ kW}$$

O “tonă mică” (*short ton*) este masa echivalentă cu 2000 livre (*pounds*), respectiv cu 907 kg, fiind denumită și simplu “ton” spre deosebire de “tonă” (*metric tonne*) reprezentând 1000 kg sau 2204.6 livre (*pounds*) sau spre deosebire de “tona mare” (*long ton*) denumită și “tona imperială (*imperial ton*)” reprezentând 2240 livre (*pounds*) $\approx 1016 \text{ kg}$.

În tabelul alăturat, este prezentată capacitatea unui asemenea ventil de laminare, echipat cu o anumită duză, pentru diferite condiții de lucru. Asemenea tabele sunt indicate de producătorii de ventile de laminare termostactice.

<i>Exemplu de capacitate pentru un ventil de laminare termostatic</i>			
1 Ton nominal – duza nr. 2 – agent R22			
t_k [$^\circ\text{C}$]	t_0 [$^\circ\text{C}$]		
	10 $^\circ\text{C}$ (5,8 bar)	5 $^\circ\text{C}$ (4,8 bar)	0 $^\circ\text{C}$ (4 bar)
50 $^\circ\text{C}$ (18,4 bar)	3,16 kW	3,26 kW	3,32 kW ①
40 $^\circ\text{C}$ (14,4 bar)	2,78 kW	2,94 kW	3,07 kW
35 $^\circ\text{C}$ (12,5 bar)	2,53 kW ③	2,72 kW	2,88 kW ②

1: Capacitatea este de 3,32 kW cu $t_k=50^\circ\text{C}$ și $t_0=0^\circ\text{C}$ (deci $\Delta p=18,4-4=14,4 \text{ bar}$);

2: Capacitatea este de 2,88 kW cu $t_k=35^\circ\text{C}$ și $t_0=0^\circ\text{C}$ (deci $\Delta p=12,5-4=8,5 \text{ bar}$);

3: Capacitatea este de 2,53 kW cu $t_k=35^\circ\text{C}$ și $t_0=10^\circ\text{C}$ (deci $\Delta p=12,5-5,8=6,7 \text{ bar}$).

Pentru o temperatură de vaporizare constantă de 0°C , capacitatea detentorului scade de la 3,32 kW la 2,88 kW, când Δp scade de la 14,4 bar (1), la 8,5 bar (2), ceea ce înseamnă o reducere de cca. 13% a capacității ventilului de laminare termostatic.

Analog, la temperatura de condensare constantă de 35°C , capacitatea detentorului scade de la 2,88 kW la 2,53 kW, când Δp scade de la 8,5 bar (2), la 6,7 bar (3), ceea ce înseamnă o reducere de cca. 12% a capacității ventilului de laminare termostatic.

Din analiza asupra capacității ventilelor de laminare termostactice, prezentată anterior, se constată că această mărime este orientativă, deoarece depinde mult de condițiile de lucru. Această concluzie este importantă și trebuie să se țină seama de ea la selecția din cataloage a ventilelor de laminare termostactice.

Reprezentarea procesului în diagrame termodinamice

Procesul de laminare adiabatică poate fi reprezentat în diagramele termodinamice, ca în figurile 9, respectiv 10.

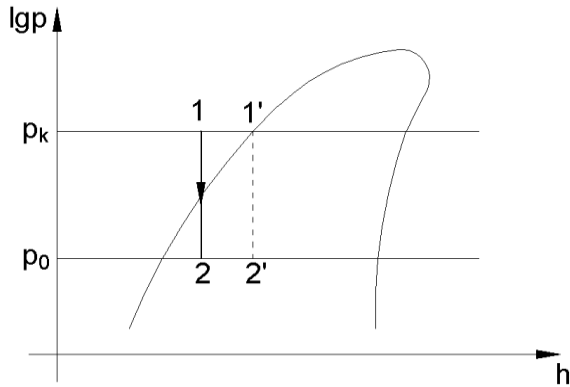


Fig. 9. Reprezentarea laminării adiabaticice în diagrama lgp-h

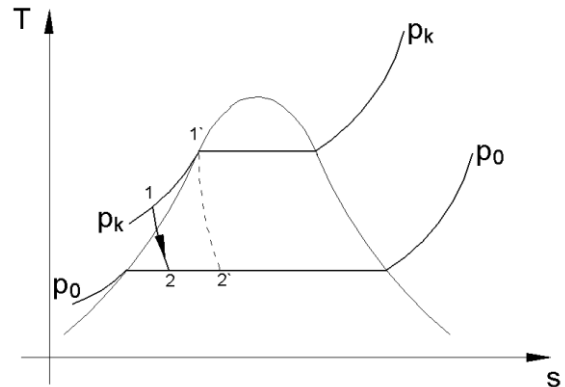


Fig. 10. Reprezentarea laminării adiabaticice în diagrama T-s

În cele două diagrame a fost reprezentat procesul termodinamic de laminare adiabatică în două situații, când lichidul este subrăcit înainte de ventilul de laminare (1-2), respectiv când lichidul laminat este saturat (1'-2'). Se observă că subrăcirea are ca efect reducerea titlului vaporilor umezi obținuți la sfârșitul laminării.

Influența subrăcirii lichidului înainte de laminare, asupra parametrilor de performanță ai ciclului frigorific, va fi analizată într-un capitol ulterior.