

energiju, što se očituje sniženjem njegove temperature (v. *Termodinamika*). Odvođenje energije za vrijeme prijelaza iz jednog u drugo agregatno stanje naziva se hlađenjem u širem smislu, iako tada temperatura ostaje postojana, a smanjenje se unutrašnje energije pri tom očituje u strukturnim promjenama tvari, npr. ukapljivanje pare ili zamrzavanje kapljevine.

Nastojanja da se nešto hladi sežu u daleku prošlost. Sakupljanje snijega i leda za vrijeme zime i njihovo čuvanje u pećinama poznato je od davnine. U starom Egiptu, gdje ni zimi nema leda ni snijega, voda se hladila u poroznim glinenim čupovima koje su robovi hladili lepezama (freske oko 2500. god.) ili su se stavljali noću na krovove, polijevali izvana vodom i hladili lepezama (Pitagora, 4. stoljeće). U Indiji se od davnina voda hladila u plitkim glinenim posudama koje su se ostavljale na slobodnom prostoru za vrijeme vedrih ljetnih noći (istodobno se iskoristavalo djelovanje ishlapljivanja i odvođenja topline).

Nije poznato kad su ljudi shvatili da se voda može ohladiti ako se u njoj otopi neka sol. Prvi tragovi o tome nalaze se u indijskoj zbirci basna i priča Pančatantra (II. do VI. st.). Potvrde o upotrebi salitre za hlađenje vode nalaze se u djelima iz XVI. i XVII. stoljeća (Blasius Villafranca, Baptista Porta, Francis Bacon i dr.).

Prva znanstvena razmišljanja o hlađenju nalaze se u djelu R. Boylea *Historia experimentalis de frigore* (1665). Početkom XVIII. st. pokuse za snižavanje temperature provodili su St. Geoffroy (1700), G. D. Fahrenheit (1724) i R. A. F. de Réaumur (1734). Miješanjem snijega i razrijeđene sumporne kiseline postignuta je temperatura od -40°C (Ch. Blagden, 1783), a miješanjem snijega i kalcij-klorida temperatura -50°C (T. Lowitz, 1793). U XIX. st. otkrivaju se zakonitosti pri stvaranju rashladnih smjesa koje su prikazane u Lightfootovu djelu o rashladnim smjesama soli, kiseline i vode.

Istodobno se istražuju i druge pojave hlađenja. Tako W. Cullen (1750–1755) smrzava vodu ispod staklenog zvona iz kojeg isisava zrak, J. Black (1761–1764) otkriva pojavu latentne topline taljenja i isparivanja, a L. Clouet i G. Monge (1780) po prvi put ukapljuju plin (sumpor-dioksid).

J. Perkins (1835) dobiva britanski patent za uređaj s isparivanjem etera u kružnom procesu, koji je osnova suvremenih rashladnih uređaja. Prvi, iako nesavršen, rashladni stroj s ekspanzijom zraka sagradio je američki liječnik J. Gorrie (1844). J. Harrison (1856) gradi rashladne strojeve s eterom, a W. Thomson i J. P. Joule (1862) otkrivaju hlađenje zraka prigušivanjem (prigušni efekt). Škotski inženjer A. Carnegie Kirk (1862) gradi prvi industrijski upotrebljiv rashladni uređaj sa zrakom, a T. Lowe (1866) rashladni uređaj s ugljik-dioksidom koji je ugrađen u brod za prijevoz mesa iz Texasa u New York. C. Linde objavljuje djelo *O odvođenju topline pri nižim temperaturama mehaničkim sredstvima* (1870), a 1876. god. gradi prvi rashladni stroj s amonijakom i prvi kompresor za komprimiranje amonijaka.

Nešto poslije uspjelo je ukapljiti zrak (1895. C. Linde primjenom prigušnog efekta; 1902. G. Claude ekspanzijom na niskim temperaturama), vodik (1898. J. Dewar) i helij (1908. K. Onnes).

Escher Wyss upotrijebio je 1913. godine po prvi put monoklormetan kao radnu tvar u rashladnom uređaju. Dvadesetih godina našeg stoljeća počela je serijska proizvodnja kućanskih hladnjaka s rashladnim uređajem pomoću sumpor-dioksida ili monoklormetana. U tridesetim godinama započinje proizvodnja kloriranih i fluoriranih derivata metana i etana, pa i njihova upotreba u rashladnoj tehnici. Tek 1945. godine zadobivaju freoni veliko značenje kao radne tvari u rashladnoj tehnici, pa su takvo značenje, uz amonijak, zadržali do danas.

Prvi glavni zakon termodinamike o održanju energije kazuje da je

$$Q + A = U_2 - U_1, \quad (1)$$

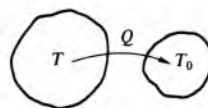
gdje je Q topline koja se izmjenjuje s nekim tijelom, A pri tome utrošeni ili iskorišteni mehanički rad, a U_1 iznos unutrašnje energije tijela prije, odnosno U_2 nakon takve izmjene topline i mehaničkog rada.

Prema izrazu (1) unutrašnja energija tijela pri hlađenju može se smanjiti na tri načina: odvođenjem topline Q bez mehaničkog rada ($A = 0$), pretvorbom unutrašnje energije u mehanički rad A , ali bez izmjene topline ($Q = 0$), te odvođenjem topline Q uz istodobnu upotrebu mehaničkog rada A .

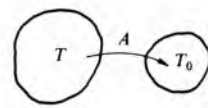
Energija je vezana uz tvar i ne može samostalno postojati. Zbog toga, ako se hladnom tijelu odvodi energija uz snižavanje temperature T , mora se istodobno i u istom iznosu dovoditi nekom drugom, hladnijem tijelu niže temperature T_0 . Tako se sadržaj njegove unutrašnje energije povećava, a temperatura T_0 raste (sl. 1).

Takav je prijenos energije moguć sve dok ne postane $T = T_0$, kad svaka dalja izmjena energije između dvaju tijela prestaje prema drugome glavnom zakonu termodinamike (v. *Termodinamika*). Tijela tada postižu svoju toplinsku ravnotežu. Izmijenjena energija između takvih dvaju tijela uzrokovana njihovim različitim temperaturama, $T > T_0$, naziva se *toplinskom energijom* ili *toplinom*, a označuje se sa Q .

Ako se unutrašnja energija tijela smanjuje uz pad njegove temperature T samo pretvorbom unutrašnje energije u mehanički rad prema izrazu (1), drugo tijelo, koje prima taj rad A i iskorištava ga za povećanje vlastite unutrašnje energije, ne mora biti hladnije od hlađenog tijela temperature T (sl. 2). To pokazuje bitnu razliku između topline i mehaničkog rada u pretvorbi energije.



Sl. 1. Prijenos topline Q s toplijeg na hladnije tijelo



Sl. 2. Izmjena rada

Slijedi, dakle, da su hlađenje i grijanje istodobne pojave, uz izmjenu topline, mehaničkog rada ili obaju oblika energije istodobno. Ipak, u običnom životu pažnja je najčešće usmjerena samo na jednu od njih, i to na onu koja je u promatranom trenutku zanimljivija, ili koja se želi postići. Prema tome, ako se želi neko tijelo temperature $T > T_{ok}$ hladiti, treba u njegovu okolišu naći hladnije tijelo temperature $T_0 = T_{ok}$ (gdje je T_{ok} temperatura zraka, zemlje, hladne vode, prirodnog leda itd.), sposobno da prihvati toplinsku energiju, i dovesti ga u dodir s hladnim tijelom da bi se ostvarila izmjena topline.

Ako neko tijelo treba ohladiti na temperaturu nižu od najhladnijeg tijela u neposrednom okolišu, tako da bude $T < T_{ok}$, očito je da se hladnije tijelo temperature T_0 ne može naći u okolišu, već hlađenje treba ostvariti tehničkim procesnim postupcima kojima se upravo i bavi rashladna tehnika.

Drugi glavni zakon termodinamike. Značenje drugoga glavnog zakona termodinamike sadržano je u izrazu

$$Q = T \Delta S, \quad (2)$$

gdje je Q topline koja se izmjenjuje s nekim tijelom, T njegova apsolutna temperatura za vrijeme te izmjene topline, a ΔS prirast entropije tijela koji je nastao zbog te izmjene.

Entropija ima izuzetno svojstvo da se pri događajima u prirodi uvijek povećava. Ako se npr. nekom tijelu pri odvođenju topline ($-Q$) entropija i smanji prema izrazu (2), istodobno se drugom tijelu, koje tu toplinu ($+Q$) prima, entropija povećava za veći iznos. Tek suma pojedinačnih prirasta entropije daje ukupni prirast entropije sustava koji je u prirodnim pojavama uvijek pozitivan ($\Sigma \Delta S > 0$).

Nadalje, prirodno je da toplo tijelo grije hladno tijelo, ali je sasvim neprirodno da hladno tijelo grije toplo tijelo. Toplina uvijek prelazi samo s tijela više temperature na tijelo niže temperature, ali se sama od sebe nikada ne može vratiti natrag na tijelo više temperature. Takva je pojava prirodna, ona je nepovrativa, a suma će entropija obaju tijela porasti za $\Sigma \Delta S > 0$.

Naprotiv, događaji uz negativni prirast entropije ($\Sigma \Delta S < 0$) neprirodni su i ne mogu se dogoditi sami od sebe. Drugi glavni zakon termodinamike doduše dopušta pretvorbu i takvih graničnih procesa kad nema prirasta entropije ($\Sigma \Delta S = 0$), što ima ipak samo teorijsko značenje. Takvi bi se procesi, naime, mogli odvijati sami od sebe i u jednom i u drugom smislu, bili bi dakle povrativi, ali su praktički neizvedivi. Toplina bi se tada izmjenjivala između tijela jednakih temperatura.

Prirodno hlađenje, kao i sve ostale prirodne pojave, odvija se samo od sebe, jer hladno tijelo temperature T nepovrativo teži toplinskoj ravnoteži s okolišem temperature T_{ok} , uz uvjet da je $T > T_{ok}$ (sl. 3). Zbog toga je prirodno hlađenje praćeno pozitivnim prirastom entropije, što se dokazuje sljedećim primjerom. Jednostavnosti radi pretpostavlja se da su temperature T i T_{ok} za vrijeme izmjene topline Q konstantne. Za temperaturu okoliša to se uvijek može prihvatiti, jer je sposobnost okoliša da preuzima toplinu bez zamjetljiva porasta temperature praktički neograničena, dok za hladno tijelo to vrijedi kad tvar mijenja agregatno stanje, npr. kad

se vođena para kondenzira u vodu. Ako se takvu hladenom tijelu odvodi toplina ($-Q$) pri postojanoj temperaturi T , prema izrazu (2) će se entropija tokom odvođenja topline umanjiti za iznos

$$\Delta S_T = \frac{-Q}{T}. \quad (3)$$

U toplinskom T, S -dijagramu (sl. 3) odvedena toplina ($-Q$) prikazana je površinom $1-2-a-b$, a negativni prirast entropije dužinom $b-a$. Tu toplinu istodobno preuzima okoliš pri temperaturi T_{ok} , što je prikazano u T, S -dijagramu površinom $3-4-c-a$, koja očito mora biti jednaka površini $1-2-a-b$, a pozitivni prirast entropije okoliša prikazuje dužina $a-c$, pa je

$$\Delta S_{ok} = \frac{Q}{T_{ok}}. \quad (4)$$

Prirast entropije pri tome prijenosu topline dobiva se algebarskim zbrajanjem izraza (3) i (4):

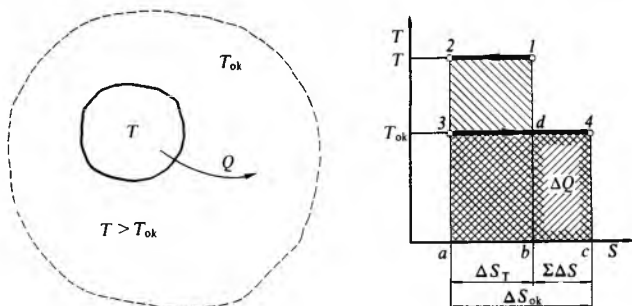
$$\Sigma \Delta S = \Delta S_{ok} + \Delta S_T, \quad (5)$$

odnosno

$$\Sigma \Delta S = Q \left(\frac{1}{T_{ok}} - \frac{1}{T} \right) > 0, \quad (6)$$

jer je $T > T_{ok}$.

Dakle, s takvim hlađenjem zaista raste entropija ($\Sigma \Delta S > 0$) pa je proces nepovrativ i događa se sam od sebe kao prirodni proces.



Sl. 3. Prirodno hlađenje s prikazom u T, S -dijagramu

Procesno hlađenje potrebno je kad se hladeno tijelo mora ohladiti na temperaturu T koja je niža od temperature okoliša ($T < T_{ok}$). Tada se hladenom tijelu odvodi toplina ($-Q$), pa će se prema izrazu (2) njegova entropija smanjiti, odnosno porast entropije bit će negativan, pa je

$$\Delta S_{T_0} = \frac{-Q_0}{T_0}. \quad (7)$$

U T, S -dijagramu (sl. 4) odvedena toplina ($-Q_0$) prikazana je površinom $1-2-a-c$, a negativni porast entropije ΔS_{T_0} dužinom $c-a$. Površina $1-2-a-c$ jednaka je površini $3-4-b-a$, koja predočuje istodobno predanu toplinu ($+Q$) okolišu pri temperaturi T_{ok} . Pri tome je pozitivni prirast entropije okoliša

$$\Delta S_{ok} = \frac{Q_0}{T_{ok}} \quad (8)$$

prikazan na sl. 4 dužinom $a-b$. Očito je da bi ukupni prirast entropije pri tako zamišljenom postupku bio negativan

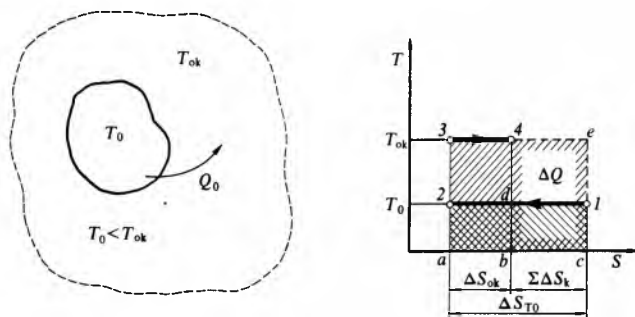
$$\Sigma \Delta S = \Delta S_{ok} + \Delta S_{T_0}, \quad (9)$$

odnosno

$$\Sigma \Delta S = Q_0 \left(\frac{1}{T_{ok}} - \frac{1}{T_0} \right) < 0, \quad (10)$$

jer je $T_0 < T_{ok}$.

Dakle, tako zamišljeni neprirodni postupak prijenosa topline Q_0 s niže temperature T_0 na višu T_{ok} protivi se drugome glavnom zakonu termodinamike, i ne može se dogoditi sam od sebe. Međutim, upravo hlađenjem na temperaturu T_0 nižu od temperature okoliša T_{ok} bavi se rashladna tehnika.



Sl. 4. Procesno hlađenje s prikazom u T, S -dijagramu uz dovođenje okolišu dodatne topline ΔQ (kompenzacijska energija)

Da bi se omogućio prijenos topline Q_0 s niže T_0 na višu temperaturu T_{ok} , mora se nekako zadovoljiti drugi glavni zakon termodinamike, koji traži da bude barem $\Sigma \Delta S = 0$. Taj se uvjet može ostvariti ako se pri prijenosu topline Q_0 s temperature T_0 na okoliš temperature T_{ok} nekim postupkom iz nekoga drugog neovisnog izvora privede okolišu dodatna toplina ΔQ (sl. 4), koja je prikazana površinom $4-e-c-b$, i tako dobije dodatni pozitivni prirast entropije okoliša ΔS_k prikazan dužinom $b-c$. Tada je ukupni prirast entropije

$$\Sigma \Delta S' = \Delta S_{ok} + \Delta S_k + \Delta S_{T_0} = 0, \quad (11)$$

odnosno

$$\Sigma \Delta S' = \frac{Q_0}{T_{ok}} + \frac{\Delta Q}{T_{ok}} - \frac{Q_0}{T_0} = \Sigma \Delta S + \frac{\Delta Q}{T_{ok}} = 0. \quad (12)$$

Iz izraza (11) slijedi

$$\Delta S_{ok} + \Delta S_k = \Delta S_{T_0}, \quad (13)$$

pa je

$$\frac{Q_0 + \Delta Q}{T_{ok}} = \frac{Q_0}{T_0}. \quad (14)$$

Minimalni potrebni iznos energije za kompenzaciju negativnog prirasta sumarne entropije iznosi

$$\Delta Q = Q_0 \frac{T_{ok} - T_0}{T_0}. \quad (15)$$

Time se zadovoljava drugi glavni zakon termodinamike, pa je postupak postao teorijski moguć. No, da bi takav proces postao i praktički provedljiv, morat će se procesu koji omogućuje *dizanje* topline s temperature T_0 na temperaturu T_{ok} dovesti veći iznos energije od minimalno potrebne kompenzacijske energije ΔQ . Tada će, naime, biti ukupni prirast entropije takva procesa $\Sigma \Delta S' > 0$, a postupak i stvarno provedljiv.

U većini je rashladnih procesa mehanički rad tražena kompenzacijska energija, dakle $\Delta Q = A$ (kompresijski rashladni procesi), u nekima je to toplina ΔQ (apsorpcijski rashladni uređaji), ili kemijska energija pri miješanju različitih tvari (pripremanje rashladnih smjesa).

U kompresijskim rashladnim procesima najčešće izraz (15) dobiva oblik

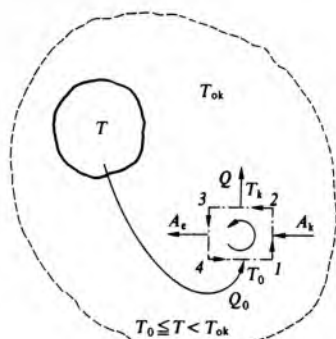
$$A = Q_0 \frac{T_{ok} - T_0}{T_0}, \quad (16)$$

a odatle slijedi *faktor hlađenja* ϵ_c , vrlo korisna veličina za ocjenjivanje dobrote rashladnog procesa (Carnotov proces, v. *Termodinamika*), koji je omjer topline Q_0 i utrošenoga mehaničkog rada

$$\epsilon_c = \frac{Q_0}{A} = \frac{T_0}{T_{ok} - T_0}. \quad (17)$$

Taj faktor daje podatak o toplini Q_0 koja se može podići od temperature T_0 na temperaturu T_{ok} utroškom jedinice mehaničkog rada A . Za razliku od drugih termodinamičkih stupnjeva djelovanja, ϵ_c poprima vrijednosti veće od jedan, tako da ga neki autori nazivaju i *množiteljem topline*.

Sada se može opisati proces za prijenos topline Q_0 s niže T_0 na višu temperaturnu razinu T_{ok} uz trošak mehaničkog rada (sl. 5). Između hlađenog tijela temperature T i okoliša temperature T_{ok} ($T < T_{ok}$) potrebno je uključiti ljevokretni kružni proces (npr. Carnotov), koji će omogućiti da masa radne tvari kojom je uređaj za provedbu procesa punjen poprimi nisku temperaturu T_0 u kružnom toku između točaka procesa 4 i 1. Masa radne tvari postaje tako umjetno stvoreno hladnije tijelo temperature T_0 , koje je u stanju da primi toplinu Q_0 odvedenu hlađenom tijelu ($T \geq T_0$). Pri tome se sadržaj unutrašnje energije radne tvari poviši za iznos Q_0 i tako ona postaje nosilac preuzete toplinske energije. Naknadnom kompresijom radne tvari od stanja 1 do 2 povećava se njezina unutrašnja energija još za iznos utrošenoga mehaničkog rada kompresije A_k , uz porast temperature sve do temperature $T_k \geq T_{ok}$. U tom stanju radna je tvar toplije tijelo u hladnijem okolišu. Toplina dopremljena radnom tvari na razinu temperature $T_k \geq T_{ok}$ u iznosu $Q = Q_0 + A_k$ predaje se sada sama od sebe hladnijem okolišu između točaka procesa 2 i 3. Nakon toga radna tvar expandira od stanja 3 do 4, dio njezine unutrašnje energije pretvara se u mehanički rad ekspanzije A_e , pa joj se temperatura opet snizi na T_0 . Tako se opisani proces ponavlja uz održavanje niske temperature T_0 na jednoj strani, a visoke T_k na drugoj strani uređaja. Stvarno utrošeni rad A razlika je utrošenog rada za kompresiju radne tvari A_k i onog dobivenog ekspanzijom A_e , pa je $A = A_k - A_e$.



Sl. 5. Procesno hlađenje uz trošak mehaničkog rada. Q_0 odvedena toplina hlađenom tijelu, Q toplina predana okolišu, A_k utrošeni mehanički rad kompresije, A_e dobiveni mehanički rad ekspanzijom, T_0 temperatura ohlađene radne tvari, T_k temperatura zagrijane radne tvari

Treba naglasiti da je okoliš temperature T_{ok} u procesu hlađenja onaj toplinski spremnik koji konačno preuzima toplinu Q_0 odvedenu hlađenom tijelu pri niskoj temperaturi T_0 , no uz to prima i energiju utrošenoga mehaničkog rada A kao neku naplatu za prijenos topline s niže T_0 na višu temperaturnu razinu T_{ok} , što bi inače, prema drugome glavnom zakonu termodinamike, bez mehaničkog rada bilo nemoguće.

Ostvareni je faktor hlađenja prema (17)

$$\varepsilon_c = \frac{T_0}{T_{ok} - T_0} \quad (18)$$

Upravo zbog sposobnosti ljevokretnih rashladnih procesa i uređaja da utroškom mehaničkog rada podižu toplinu s niže na višu temperaturnu razinu nazivaju se i *dizalicama topline*.

Temperatura okoliša očito je presudna za procese hlađenja. Temperatura okoliša T_{ok} prirodna je granica iznad koje i do koje se odvija samo od sebe prirodno hlađenje tijela u hladnijem okolišu, dakle dok je $T > T_{ok}$. Hlađenje nekog tijela ispod te prirodne granice, kad mora biti $T < T_{ok}$, više nije moguće samo od sebe, već samo uz trošak dodatne energije u primjeni nekoga rashladnog procesa.

Temperaturom okoliša treba smatrati temperaturu onog pogodnog toka mase tvari u okolišu koji može protjecati kroz izmjenjivač topline rashladnog postrojenja i tamo preuzimati

toplina, pa je odvoditi u širi okoliš. Temperatura okoliša najčešće je temperatura okolišnog zraka ili temperatura vode za hlađenje.

Tako definirana temperatura tehničkog okoliša ovisna je o godišnjem dobu i o geografskom položaju na Zemlji. Hlađenje zimi ili na Arktiku, zbog niske temperature okoliša, smatra se prirodnim hlađenjem, dok je ljeti ili u tropskim krajevima za isti rashladni zadatak potrebno procesno hlađenje zbog visoke temperature okoliša.

Kružni procesi u rashladnoj tehnici ljevokretni su procesi uz trošak kompenzacijske energije koja se dovodi procesu najčešće kao mehanički rad. U rashladnim procesima mora utrošeni mehanički rad biti veći ili barem jednak potrebnoj kompenzacijskoj toplini, dakle mora biti

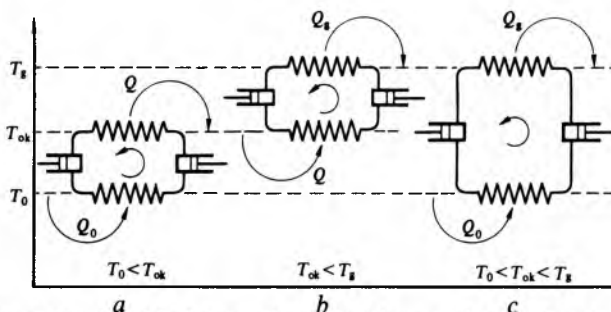
$$A \geq \Delta Q = T_{ok} \Delta S_k \quad (19)$$

Za povrativ kružni proces dovoljno je da bude $A = \Delta Q$, pa bi tada kompenzacijski mehanički rad bio minimalan.

Iako se svakim ljevokretnim kružnim procesom uz trošak mehaničkog rada može ostvariti prijenos topline od neke niže na višu temperaturu, ipak se razlikuju tri vrste takvih procesa.

Kad se takvim kružnim procesom prenosi toplina od niske temperature na višu okolišnu temperaturu, proces se naziva *rashladnim procesom* (sl. 6a).

Ako se takvim kružnim procesom prenosi toplina s okolišne temperature na neku višu temperaturu, npr. radi grijanja, takav se proces obično naziva *ogrjevnim procesom* ili *dizalicom topline* (sl. 6b).



Sl. 6. Ljevokretni kružni procesi. a rashladni proces, b ogrjevni proces, c ogrjevno-rashladni proces

U treću vrstu ljevokretnih kružnih procesa idu takvi procesi u kojima se utroškom mehaničkog rada prenosi toplina od niske na visoku temperaturu grijanja. Takav se proces naziva *ogrjevno-rashladnim procesom* (sl. 6c).

Iako se opisani procesi nazivaju različitim imenima, oni su u biti ipak svi dizalice topline.

Faktor hlađenja. Utrošak mehaničkog rada A omogućuje hlađenje na temperaturu nižu od temperature okoliša, pa je važno znati koliko se rada mora utrošiti rashladnim procesom da bi se ostvario rashladni učinak Q_0 , tj. da bi se toplina Q_0 prenijela s niže na višu temperaturu.

Takvu ocjenu omogućuje izraz (17) koji pokazuje koliki se rashladni učinak Q_0 može procesom ostvariti uz trošak određenog mehaničkog rada A , te ovisnost faktora hlađenja o temperaturama T_0 i T_{ok} .

Prema izrazima (17) i (18) zaključuje se da će faktor hlađenja ε_c biti to manji, a utrošeni rad A to veći, što je razlika temperatura $T_{ok} - T_0$ veća. Budući da je temperatura okoliša u promatranom trenutku stalna, temperaturna razlika $T_{ok} - T_0$ bit će to veća što je niža temperatura T_0 u postupku hlađenja. Zato u rashladnoj tehnici općenito vrijedi preporuka: Nikada ne hladiti na nižu temperaturu T_0 negoli je to bezuvjetno potrebno.

RASHLADNI PROCESI

Rashladni procesi jesu ljevokretni kružni procesi pomoću kojih se ostvaruje rashladni učinak Q_0 pri temperaturi $T_0 < T_{ok}$ (sl. 6a). Teorijski se može zamisliti više različitih

rashladnih kružnih procesa, ali koji će se od njih izabrati kao osnova za rashladni uređaj ovisi o izboru radne tvari (nosioca toplinske energije) koja kruži rashladnim postrojenjem, o željenoj temperaturi T_0 pri kojoj se mora ostvariti rashladni učinak Q_0 , o načinu dovođenja topline Q_0 procesu, o vrsti trošene kompenzacijske energije ΔQ , o načinu odvođenja topline $Q = Q_0 + A$ u okoliš itd.

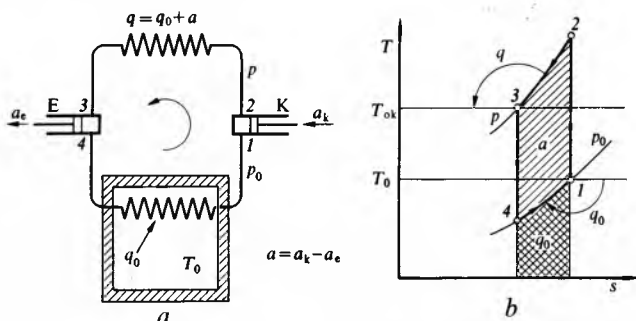
Budući da radna tvar trajno kruži kroz cijevi i ostale dijelove rashladnog uređaja, ona može biti samo plin, para, kapljevina ili njihova mješavina, a ne može biti tvar u krutom agregatnom stanju. Prema tome rashladni kružni procesi mogu biti plinski i parni, već prema radnoj tvari u rashladnom postrojenju.

Svaka se tvar u načelu može pojaviti u svakom agregatnom stanju, što ovisi samo o temperaturi tvari. Tako je npr. atmosferski zrak plin pri temperaturi i tlaku okoliša. Ako se zrak hladi na vrlo niske temperature uz postojani tlak, npr. $p_0 = 0,1$ MPa, on najprije prelazi u paru zraka, da bi na temperaturi otprilike -192°C došao u područje zasićenja i počeo kondenzirati u *kapljeviti zrak*. Daljim hlađenjem kapljeviti zrak prelazi u kruto agregatno stanje, tzv. *led zraka*.

Međutim, ima i takvih tvari kao što je npr. amonijak, NH_3 , koji pri tlaku od $p_0 = 0,1$ MPa hlađenjem kondenzira već na temperaturi od -33°C , a pri tlaku od $\sim 1,2$ MPa čak i na temperaturi od $+30^\circ\text{C}$. Dakle, amonijak treba smatrati parom koja na temperaturama odvijanja velike većine rashladnih procesa može kondenzirati odvođenjem topline, a dovođenjem topline isparivati.

Plinski procesi

Plinski procesi osnivaju se na teorijskim rashladnim procesima u kojima je plin radna tvar koja u toku strujanja cijevima i dijelovima rashladnog uređaja mijenja svoje toplinsko stanje, tlak i temperaturu, ali ne mijenja svoje agregatno stanje.



Sl. 7. Plinski rashladni uređaj (a) i rashladni proces u T,s -dijagramu (b). K kompresor, E ekspanzor, q_0 specifični rashladni učinak, a_k specifični utrošeni mehanički rad kompresora, a_e specifični dobiveni mehanički rad ekspanzijom

Na sl. 7 prikazana je shema rashladnog uređaja punjenog zrakom kao radnom tvari i pripadni teorijski rashladni proces u T,s -dijagramu. Budući da je radna tvar plin (zrak), toplina odvođena iz hladionice q_0 prelazi posredovanjem izmjenjivača topline u hladionici u unutrašnju energiju radne tvari pri konstantnom niskom tlaku p_0 . To se prikazuje promjenom stanja zraka u pripadnom T,s -dijagramu na putu između točaka procesa 4 do 1, zrak se pri tome zagrije od temperature T_4 u točki 4 do T_1 u točki 1. Važno je uočiti da se zrak u procesu od stanja 4 do 1 može najviše zagrijati do temperature $T_1 = T_0$, tj. do tražene temperature u hladionici T_0 . Zrak toplinskog stanja p_0 i T_0 u točki 1 siše kompresor i komprimira ga adijabatski na tlak p utroškom rada kompresije a_k , uz porast temperature zraka na $T_2 > T_{ok}$. S tim stanjem zrak struji u izmjenjivač topline s okolišem, te pri konstantnom visokom tlaku $p = \text{const.}$ odaje okolišu toplinu $q = q_0 + a$. Naravno da se pri tome može ohladiti najviše do temperature $T_3 = T_{ok}$, stanje 3 u T,s -dijagramu. S tim stanjem zrak se usisava u ekspanzijski stroj (ekspanzor), gdje se adijabatskom ekspanzijom od tlaka p do tlaka p_0 pretvara dio unutrašnje

energije zraka u rad ekspanzije a_e , a temperatura se snizi na vrijednost $T_4 < T_0$ u točki 4 procesa. Tada je radna tvar opet u stanju da primi na sebe toplinu q_0 , grijući se od T_4 do T_1 .

Specifični rashladni učinak q_0 ona je količina topline koju određena masa radne tvari može preuzeti uz tlak $p_0 = \text{const.}$, zagrijevajući se od temperature T_4 do T_1 , pa je

$$q_0 = h_1 - h_4 = c_p(T_1 - T_4). \quad (20)$$

Specifični rad iznosi

$$a = a_k - a_e = (h_2 - h_1) - (h_3 - h_4) = c_p(T_2 - T_1) - c_p(T_3 - T_4), \quad (21)$$

a toplina predana okolišu

$$q = h_2 - h_3 = q_0 + a = c_p(T_2 - T_3), \quad (22)$$

gdje su h specifične entalpije, a c_p je specifični toplinski kapacitet uz konstantni tlak.

Budući da se temperature i tlakovi pri adijabatskoj promjeni stanja mijenjaju prema izrazu

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}, \quad (23)$$

gdje je $\kappa = 1,4$ vrijednost politropnog eksponenta za dvoatomne plinove, pa tako i za zrak, sledi iz izraza (21) da je

$$\begin{aligned} a &= a_k - a_e = c_p T_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right) - c_p T_4 \left(\frac{T_3}{T_4} - 1\right) = \\ &= c_p (T_1 - T_4) \left[\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1\right]. \end{aligned} \quad (24)$$

Faktor je hlađenja ε teorijskoga plinskog procesa prema (20) i (24)

$$\varepsilon = \frac{q_0}{a_k - a_e} = \frac{q_0}{a} = \frac{T_1 - T_4}{(T_1 - T_4) \left[\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1\right]} = \frac{1}{\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}. \quad (25)$$

Izraz (25) pokazuje da faktor hlađenja ovisi samo o omjeru tlakova p i p_0 između kojih se odvija proces. Što je omjer p/p_0 veći, faktor je hlađenja manji, a utrošak rada a za isti rashladni učinak veći. Ovisnost faktora hlađenja o omjeru tlakova prikazuje sljedeća tablica:

$\frac{p}{p_0}$	2	3	4	5	6
ε	4,56	2,71	2,05	1,72	1,50

Prema tome poželjno bi bilo da se omjer tlakova p/p_0 odabere što manjim, no tu postoji ograničenje jer mora biti

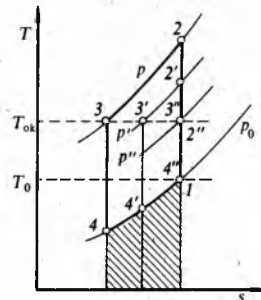
$$\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} > \frac{T_{ok}}{T_0}, \quad (26a)$$

pa kad je

$$\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \frac{T_{ok}}{T_0}, \quad (26b)$$

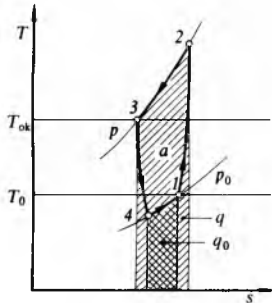
svaki rashladni učinak iščezava, površina koja predstavlja q_0 postaje jednaka nuli (sl. 8).

Sl. 8. Utjecaj omjera tlakova p/p_0 na rashladni učinak



Faktor hlađenja ε plinskoga rashladnog procesa, s obzirom na druge rashladne procese, ima vrlo malu vrijednost, dakle rashladni se učinak ostvaruje uz relativno velik utrošak mehaničkog rada. Utrošeni višak rada, naime, prikazan površinama iznad temperature T_{ok} i ispod temperature T_0 na slici 7, termodinamički gledano, nije potreban, no proces s plinom ne može se drugačije ostvariti, jer nije moguće plinu dovoditi toplinu ili je odvoditi bez promjene njegove temperature.

Faktor je hlađenja još mnogo lošiji ako se uzmu u obzir stupnjevi korisnog djelovanja kompresora ($\eta_k = 0,7 \dots 0,85$) i ekspandera ($\eta_e = 0,7 \dots 0,8$), kad kompresija i ekspanzija nisu adijabatske već politropske (sl. 9).



Sl. 9. Prikaz realne kompresije i ekspanzije plina u rashladnom uređaju

Uzevši to u obzir faktor hlađenja iznosi

$$\varepsilon_r = \frac{q_0}{a} = \frac{q_0}{a_k - a_e \eta_e} \quad (27)$$

Tada se pri kompresiji troši više rada ($\frac{a_k}{\eta_k} > a_c$), a ekspanzijom se dobiva manje rada ($a_e \eta_e < a_c$) nego u kompresoru i ekspanderu bez gubitaka. Uzimajući u obzir izraze (20) i (24) izraz za faktor hlađenja glasi

$$\varepsilon_r = \frac{T_1 - T_4}{\frac{T_1}{\eta_k} \left[\left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] - T_4 \eta_e \left[\left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]} = \frac{T_1 - T_4}{\left[\left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] \left(\frac{T_1}{\eta_k} - T_4 \eta_e \right)} \quad (28)$$

Budući da je

$$\left(\frac{T_1}{\eta_k} - T_4 \eta_e \right) > (T_1 - T_4), \quad (29)$$

mora, prema izrazima (24) i (28), biti

$$\varepsilon_r < \varepsilon_i. \quad (30)$$

Protok mase zraka G koji mora cirkulirati rashladnim uređajem da bi se postigao rashladni učinak Q_0 iznosi

$$G = \frac{Q_0}{q_0}. \quad (31)$$

Zbog maloga specifičnoga toplinskog kapaciteta zraka ($c_p \approx 1 \text{ kJ/kg K}$) i male temperature razlike ($T_1 - T_4$) radi što boljeg ε_i , specifični je rashladni učinak q_0 , prema (20), također malen, a protok G relativno vrlo velik.

Ako se npr. traži rashladni učinak od $Q_0 = 100 \text{ kW}$, uz temperature $T_0 = 273,15 \text{ K}$ i $T_{ok} = 293,15 \text{ K}$, te kompresijski omjer $p/p_0 = 3,5$, rashladni bi proces sa zrakom (sl. 7) ostvarivao specifični rashladni učinak $q_0 = 68,5 \text{ kJ/kg}$ uz utrošak mehaničkog rada $a = 29,5 \text{ kJ/kg}$. Odatle slijedi da je postignuti faktor hlađenja $\varepsilon_i = q_0/a = 2,32$, a potrebnii optok mase zraka u procesu $G = 100/68,5 = 1,46 \text{ kg/s}$, odnosno uz specifični volumen zraka u točki 1 procesa $v_1 = 0,8 \text{ m}^3/\text{kg}$, slijedi protočni volumen zraka koji mora usisavati kompresor $V_1 = G v_1 = 1,167 \text{ m}^3/\text{s}$ ili $4202 \text{ m}^3/\text{h}$. Tako velik protočni

volumen potrebnog zraka traži velike dimenzije plinskih rashladnih uređaja, njihovih cijevi, izmjenjivača topline, a osobito velike cilindre kompresora i ekspandera, pa je to razlog što se takvi uređaji nisu mogli graditi za iole veće rashladne učinke i bili su istisnuti razvojem boljih, parnih rashladnih uređaja.

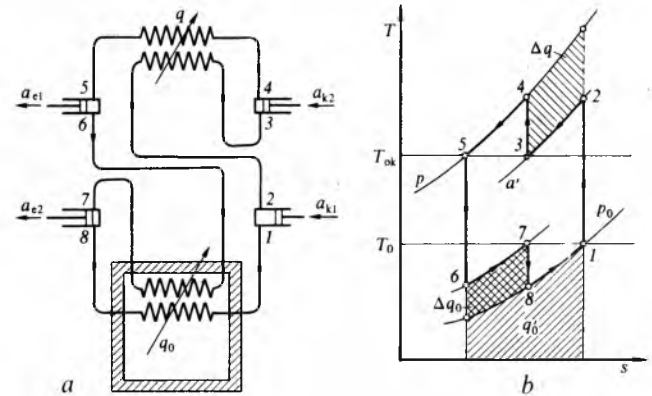
Prema izrazu (22) i (31) određuje se i količina toplinske energije Q koja se tokom odvijanja procesa predaje okolišu

$$Q = G q, \quad (32)$$

a prema izrazu (24) i snaga potrebna za odvijanje procesa

$$P = G a. \quad (33)$$

Proces dvokratne kompresije i ekspanzije. Loša svojstva plinskoga rashladnog procesa, izražena malom vrijednošću faktora hlađenja ε_i , mogu se ublažiti primjenom dvokratne (dvostepene) kompresije i ekspanzije (v. *Kompresor*, TE 7, str. 228).



Sl. 10. Plinski rashladni uređaj s dvokratnom kompresijom i ekspanzijom (a) i proces u T,s -dijagramu (b). a_{k1} i a_{k2} specifični utrošeni mehanički rad u dva kompresijska stupnja, a_{e1} i a_{e2} specifični dobiveni mehanički rad u dva ekspanzijska stupnja

U takvu se postupku (sl. 10) plin komprimira od stanja 1 do 4 uzastopno u dva kompresijska cilindra s međuhlađenjem, uz konstantan tlak od stanja 2 do 3, kojim se okolišu odvodi toplina $q_1 = h_2 - h_3 = c_p (T_2 - T_3)$. Nakon postignutog stanja 4 okolišu se odvodi još toplina $q_2 = h_4 - h_5 = c_p (T_4 - T_5)$. Nakon stanja 5 plin ekspankira također uzastopno u dva ekspanzijska cilindra uz dvokratno preuzimanje topline (rashladnog učinka), najprije od stanja 6 do 7 toplinu $q_{01} = h_7 - h_6 = c_p (T_7 - T_6)$ i zatim od stanja 1 do 8 toplinu $q_{02} = h_1 - h_8 = c_p (T_1 - T_8)$. Usporedbom T,s -dijagrama (sl. 10 i 7) vidi se da se rashladni učinak povećao i iznosi

$$q'_0 = q_0 + \Delta q_0 = q_{01} + q_{02}, \quad (34)$$

a da se utrošeni rad smanjio i iznosi

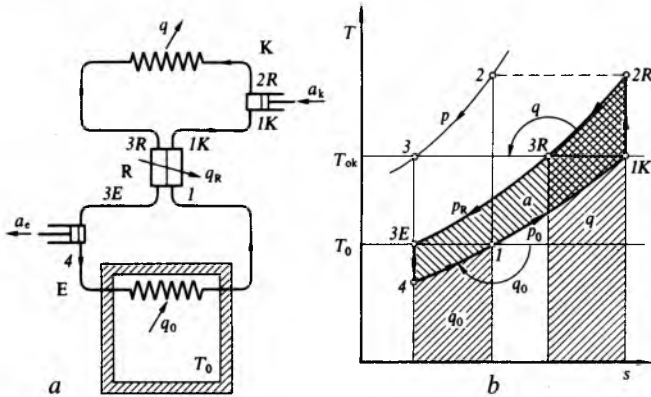
$$a' = a - \Delta q_0 - \Delta q. \quad (35)$$

Pri tome se faktor hlađenja plinskoga rashladnog procesa dvokratne kompresije i ekspanzije u usporedbi s procesom jednokratne kompresije i ekspanzije povećao, pa je

$$\varepsilon'_i = \frac{q_0 + \Delta q_0}{a - (\Delta q_0 + \Delta q)} > \frac{q_0}{a} = \varepsilon_i. \quad (36)$$

Proces s regeneratom. Plinski se rashladni proces može poboljšati ako se nadopuni izmjenjivačem topline (regeneratorom). Shema takva uređaja i pripadni teorijski T,s -dijagram prikazani su na sl. 11. Kompresor siše zrak okolišne temperature T_{ok} i tlaka p_0 (stanje 1_K), i komprimira ga adijabatski na viši tlak p_R i temperaturu T_{2R} (stanje 2_R). Od stanja 2_R do stanja 3_R zrak se pri konstantnom tlaku p_{2R} hladi u izmjenjivaču topline s okolišem predajući mu toplinu q procesa te se tako ponovno ohladi na temperaturu $T_{3R} = T_{ok}$. Nakon toga se zrak uvodi u regenerator (izmjenjivač) topline R i hladi se od T_{3R} do $T_{3E} = T_0$ i u protustruji, pri $p_R = \text{const.}$, prenosi toplinu q_R na zrak koji ulazi u regenerator sa stanjem p_0 i T_0 , i time ga zagrijava od temperature $T_1 = T_0$ do temperature

$T_{1K} = T_{ok}$ uz $p_0 = \text{const.}$ Ohlađeni zrak stanja $3E$ ekspandira u ekspanderu od tlaka p_R do tlaka p_0 i postiže nisku temperaturu $T_4 < T_0$. Daljim primanjem topline rashladnog učinka q_0 zrak se zagrijava od T_4 do $T_1 = T_{ok}$ pri tlaku $p_0 = \text{const.}$, točka 1 . Tako je proces plinskoga rashladnog procesa s regeneratom zatvoren.



Sl. 11. Plinski rashladni uređaj s regeneratom (a) i rashladni proces u T,s -dijagramu (b). K kompresor, E ekspander, R regeneratom

Rashladni učinak q_0 tog procesa identičan je rashladnom učinku procesa bez regeneratora ($1-2-3-4$), što je očito prema T,s -dijagramu (sl. 11) i računa se uz $T_1 = T_0$, pa je

$$q_0 = h_1 - h_4 = c_p T_4 \left(\frac{T_0}{T_4} - 1 \right) = c_p T_4 \left[\left(\frac{p_R}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]. \quad (37)$$

Budući da su u T,s -dijagramu linije konstantnih tlakova međusobno paralelno pomaknute, slijedi da je uz $T_{3R} = T_{ok}$

$$q = h_{2R} - h_{3R} = h_2 - h_3 = c_p T_{ok} \left(\frac{T_{2R}}{T_{ok}} - 1 \right) = c_p T_{ok} \left[\left(\frac{p_R}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right], \quad (38)$$

pa je utrošeni rad

$$a = q - q_0 = c_p \left\{ T_{ok} \left[\left(\frac{p_R}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] - T_4 \left[\left(\frac{p_R}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] \right\}, \quad (39)$$

što odgovara površini $1K-2R-3E-4$ koja je jednaka površini $1-2-3-4$. Slijedi da je faktor hlađenja takva plinskoga rashladnog procesa

$$\varepsilon_t = \frac{q_0}{a} = \frac{T_4 \left[\left(\frac{p_R}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]}{(T_{ok} - T_4) \left[\left(\frac{p_R}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]} = \frac{1}{\frac{T_{ok}}{T_4} - 1} = \frac{1}{\left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1} \quad (40)$$

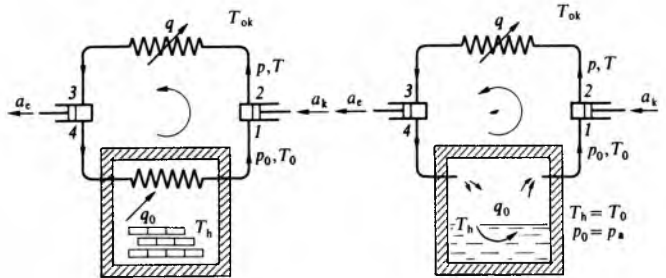
Usporedbom izraza (40) i izraza (25) pokazuje se da je teorijski plinski proces s regeneratom termodinamički jednako dobar kao i proces bez regeneratora.

Ipak, pokazuju se pozitivne razlike u praktičnoj izvedbi rashladnog uređaja. Očito je prema slici 11 da se izmjena topline s okolišem $q = h_2 - h_3$ u području visokog tlaka upotrebom regeneratora premješta na niži tlak $p_R = \text{const.}$, jer je također $q = h_{2R} - h_{3R}$, što znači da je potrebna manja čvrstoća uređaja i da se troši manje materijala. Zatim, dio adijabatske kompresije od stanja 1 do $3R$ i dio adijabatske ekspanzije od 3 do $3E$ teorijskog procesa nadomješta se povratljivom izmjenom topline na putu od 1 do $1K$, odnosno od $3R$ do $3E$, uz $\Delta T = 0$. No, prelaskom na realni rashladni uređaj kompresija i ekspanzija postaju politrope uz nepovratljivu izmjenu topline s okolišem. Izmjena topline q_R u regeneratu koji ima dovoljno veliku površinu, tako da bi razlika temperatura pri prijenosu topline bila malena, može

biti manje nepovratljiva pojava nego realna kompresija ili ekspanzija.

Dakle, primjena regeneratora u teorijskome plinskom rashladnom procesu ne pruža nikakvu dobit, ali u praktičnoj izvedbi plinskih rashladnih uređaja primjena regeneratora može biti odlučujuća za dobrotu realnog procesa. To dokazuju složenije analize svih realnih utjecaja.

Zatvoreni i otvoreni procesi. U prethodnim razmatranjima promatrani su *zatvoreni procesi*, u kojima radna tvar kruži u rashladnom uređaju. U takvim procesima radna tvar preuzima toplinu q_0 od hlađene tvari preko metalne stijenke izmjenjivača topline, npr. u hladionici (sl. 12), i ne dolazi u neposredni dodir sa hlađenom tvari. Atmosferski zrak u hladionici posrednik je u prijenosu topline od hlađenog tijela na radnu tvar. Zrak u hladionici naziva se sekundarnim nosiocem topline.



Sl. 12. Zatvoreni rashladni proces. a_k specifični utrošeni rad kompresije, a_e specifični dobiveni rad ekspanzije, q_0 rashladni učinak, q toplina odvedena u okoliš, T_h temperatura hladionice

Sl. 13. Otvoreni rashladni proces. a_k specifični utrošeni rad kompresije, a_e specifični dobiveni rad ekspanzije, q_0 rashladni učinak, q toplina odvedena u okoliš, T_h temperatura hladionice

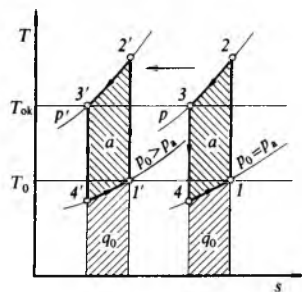
U *otvorenom procesu* (sl. 13) ne postoji izmjenjivač topline u hladionici, nego ekspanzijom zrak ohlađen na temperaturu T_4 ulazi u hladionicu i u neposrednom dodiru s hlađenom tvari ostvaruje rashladni učinak q_0 i pri tome se zagrije do izlazne temperature T_1 , odnosno najviše do $T_1 = T_0$. Očito je da se otvoreni rashladni procesi mogu primijeniti samo ako je radna tvar atmosferski zrak.

Termodinamička ocjena tih dviju vrsta plinskih procesa daje prednost otvorenom procesu. Toplina q_0 , naime, prenosi se od hlađene tvari na radnu tvar zatvorenog procesa preko dvaju posrednika, zraka u hladionici i izmjenjivača topline, pa je potrebna određena temperaturna razlika za prijenos topline. Ako se u oba procesa želi održavati u hladionici jednaka temperatura T_0 , mora se za zatvoreni proces odabrati niža temperatura T_4 zbog tih temperaturnih razlika, što traži veći omjer tlakova nego za otvoreni proces gdje radna tvar preuzima toplinu bez posrednika. Zato je faktor hlađenja zatvorenog procesa manji od onoga za otvoreni proces.

Postoji, međutim, više praktičnih razloga, osobito kad se hladi na relativno niske temperature, koji ipak daju prednost zatvorenim procesima. Izraz (31) pokazuje da je zbog male vrijednosti specifičnoga toplinskog kapaciteta plinova potrebno da u plinskom rashladnom uređaju cirkulira relativno velika masa plina, što traži velike i skupe uređaje i strojeve. Budući da rashladni učinak i utrošeni rad ne ovise o apsolutnim vrijednostima tlakova između kojih se proces odvija, već samo o njihovom omjeru p/p_0 , prema izrazima (37) i (39), može se u zatvorenom procesu postići jednaki omjer tlakova u području viših tlakova tako da se odabere tlak p_0 veći od tlaka okoliša p_a (sl. 14). Time se osjetno smanjuje specifični volumen plinova uz jednaku temperaturu, pa rashladni uređaji postaju mnogo manji i jeftiniji. Osim toga, za zatvoreni proces može se kao radna tvar odabrati plin koji ima veći specifični toplinski kapacitet od zraka ($c_p \approx 1 \text{ kJ/kgK}$), npr. helij ($c_p = 5,2 \text{ kJ/kgK}$) ili vodik ($c_p = 14,2 \text{ kJ/kgK}$). Takvim se izborom može prema (20) postići veći specifični rashladni učinak, a prema (31) manja potrebna masa radne tvari u optoku.

Sve to u otvorenom procesu nije moguće, jer tlak p_0 mora biti jednak tlaku u hladionici, a on pak onome u okolišnoj

atmosfera, te odabrana radna tvar mora biti atmosferski zrak. Nadalje, u otvorenome plinskom procesu zrak dolazi u neposredni dodir s hlađenom tvari, pa ako je ona vlažna, zrak se zasićuje vlagom i odnosi je u rashladni uređaj. Vлага u zraku uzrokuje velike teškoće u ekspanderu, gdje zrak ekspanzijom poprima niske temperature, pa se vlaga iz zraka izlučuje u obliku kapljevite vode ako postignuta temperatura nije niža od 0°C , odnosno u obliku inja (leda) ako je temperatura niža od leđišta vode. To uzrokuje hidrauličke ili čak krute udare u stapnom ekspanderu, odnosno začepljivanja strujnih kanala u turboekspanderu.



Sl. 14. Usporedba procesa s obzirom na tlakove p i p_0 , ali uz nepromijenjeni omjer tlakova p/p_0

U zatvorenom procesu uređaj se puni suhim plinom koji ne dolazi u dodir s vlagom, pa nema teškoća zbog izlučivanja vlage u ekspanderu. To je odlučujuća prednost zatvorenih procesa kad se hladi na temperature niže od 0°C .

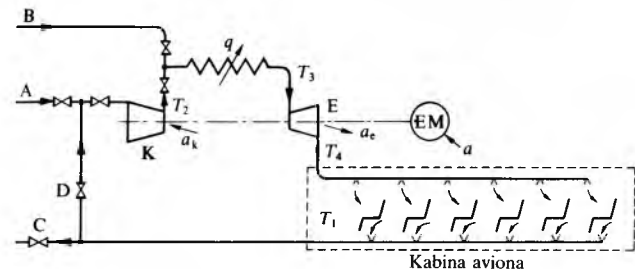
Procesi s turbostrojevima. Suvereni, termodinamički i konstrukcijski dotjerani turbostrojevi mogu komprimirati ili ekspanzirati velike protočne mase plina, a imaju male dimenzije jer rade s brzinama vrtnje $1000 \dots 1500 \text{ s}^{-1}$. Zbog relativno vrlo malih dimenzija tih strojeva izmjenjena je topline radnog zraka s okolišem za vrijeme kompresije i ekspanzije neznatna, pa su stvarne politropske promjene stanja radnog zraka u stroju blizu teorijskim adijabatskim promjenama. Nadalje, zbog malenih dimenzija vrlo su maleni i mehanički gubici u stroju, pa takvi strojevi imaju vrlo visoke stupnjeve djelovanja η_k i η_e .

Iz izraza (28) vidi se da će faktori hlađenja realnog i teorijskog procesa biti međusobno to bliži što su veće vrijednosti stupnjeva djelovanja kompresora i ekspandera η_k i η_e . Prema tome, realni plinski rashladni procesi s regeneratom, uz primjenu turbokompresora i turboekspandera, neće biti bitno lošiji od teorijskih procesa, pogotovo ako treba ostvarivati umjereno hlađenje uz male razlike temperatura $T_{ok} - T_0$, a pogotovo kad je temperatura T_4 viša od 0°C .

Zbog toga se danas plinskim rashladnim procesima opet posvećuje sve više pažnje. Rashladni procesi sa zrakom uvelike se primjenjuju za hlađenje okolišnog zraka za potrebe klimatizacije. To se redovito primjenjuje kad temperatura hlađenja ostaje viša od 0°C , a radi se u otvorenom procesima hlađenja. Tako se hlade podzemni hodnici u rudnicima, radne prostorije za proizvodnju osjetljivih proizvoda i eksploziva, unutrašnjost kabina vojnih i putničkih aviona.

Shema uređaja za hlađenje unutrašnjosti kabine putničkog aviona prikazana je na sl. 15. Takav rashladni uređaj ima dva režima rada: jedan za hlađenje kabine dok je avion na tlu, a drugi za vrijeme leta kad su u pogonu reaktivni motori.

Na tlu turbokompresor K siše okolišni zrak i komprimira ga na viši tlak i temperaturu utroškom mehaničkog rada. Zrak

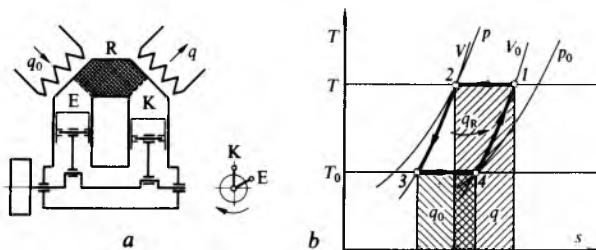


Sl. 15. Hlađenje avionske kabine. A, B dovodi i C odvod zraka, K kompresor E ekspander, EM elektromotor

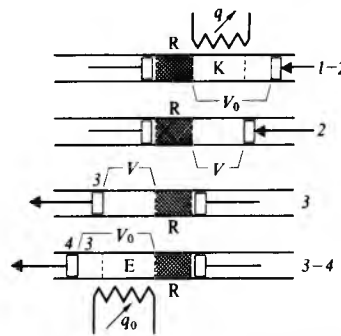
zagrijan kompresijom struji kroz izmjenjivač topline i predaje u okoliš toplinu pa se temperatura zraka snizi. Tako ohlađeni zrak siše turboekspander E, u kojemu se ekspanzijom dalje snize temperatura i tlak zraka koji se upušta u kabinu. Ostvarivanjem rashladnog učinka zrak se u kabini zagrije i zatim ispušta u okoliš kroz odvod C, odnosno djelomično recirkulira otvaranjem ventila D i miješa sa svježim zrakom iz okoliša koji siše turbokompresor na priključak A. Turbo-kompresor i turboekspander mogu imati zajedničku osovinu priključenu na zagonski elektromotor EM.

U letu, kad su u pogonu reaktivni motori aviona, komprimirani se zrak visokog tlaka i temperature oduzima iz turboekspandera reaktivnog motora (kompresor K tada nije u pogonu) i dovodi se kroz ulaz B, zatim se hladi u izmjenjivaču topline s okolišem. Zrak konačno ekspanzira u turboekspanderu E iz kojeg se ohlađen dovodi u kabinu aviona. Hlađeni zrak se zagrijava, a zatim prigušuje ventilom C i ispušta u okoliš izvan aviona gdje vlada tlak manji od tlaka u avionu za vrijeme leta.

Philipsov plinski proces teorijski se odvija između dvije izoterme i dvije izohore uz upotrebu rekuperatora (sl. 16). Uređaj se sastoji od kompresijskoga toplog cilindra K, koji se izdašno hladi rashladnom vodom odvođeci toplinu q izotermne kompresije, i ekspanzijskoga hladnog cilindra E kojemu se dovodi toplina q_0 nekim sekundarnim hlađenim optokom tvari. Između tih dvaju cilindara smješten je rekuperator R kojemu vlastita masa izmjenjuje toplinu q_R s plinom koji struji kroz rekuperator.



Sl. 16. Philipsov plinski rashladni uređaj (a) i rashladni proces u T,s -dijagramu (b). K kompresor, E ekspander, R rekuperator, q odvedena toplina izotermne kompresije, q_0 dovedena toplina ekspanderu, q_R toplina koja se izmjenjuje u rekuperatoru



Sl. 17. Shematski prikaz odvijanja Philipsova rashladnog procesa. K kompresor, E ekspander, R rekuperator

Proces se može najbolje rastumačiti promatranjem međusobnoga relativnog gibanja stapova kompresijskog i ekspanzijskog cilindra i prestrujavanja plina iz jednog cilindra u drugi kroz rekuperator (sl. 17). Proces se sastoji od dvije izoterme i dvije izohore:

Izoterma 1-2: Glavnina plina volumena V_0 nalazi se u toplom kompresijskom cilindru gdje se komprimira izotermno uz intenzivno hlađenje rashladnom vodom i odvođenjem topline izotermne kompresije (sl. 16) koja iznosi

$$q = RT \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (41)$$

Volumen plina smanji se kompresijom od V_0 na V .

Izohora 2-3: Komprimirani plin tlaka p , stanje 2 na slici 16, provodi se relativnim gibanjem stapova toplog i hladnog cilindra kroz rekuperator R i tako se potiskuje iz kompresijskog K u ekspanzijski cilindar E uz $V = \text{const.}$ Prostrujavanjem kroz rekuperator ohlađen u prethodnom ciklusu plin se hladi predajući toplinu q_R hladnoj masi rekuperatora. Sam se plin tako ohladi od temperature T , stanje 2, na temperaturu T_0 , stanje 3, a masa rekuperatora, preuzimajući toplinu, zagrije se na temperaturu T .

Izoterma 3-4: Najveći dio ohlađenog plina volumena V i temperature T_0 nalazi se u hladnom ekspanzijskom cilindru, stanje 3, i ekspanzira izotermno do volumena V_0 preuzimajući toplinu

$$q_0 = R T_0 \ln \frac{p_4}{p_3} \quad (42)$$

od nekoga sekundarnog donosioca topline pri niskoj temperaturi T_0 .

Izohora 4-1: Ekspandirani plin niske temperature T_0 i volumena V_0 , stanje 4, provodi se relativnim gibanjem stapova iz hladnog cilindra kroz rekuperator R opet u topli cilindar, preuzimajući od rekuperatora ponovno toplinu q_R . Plin se pri tome, uz $V_0 = \text{const.}$, zagrije na temperaturu T , stanje 1, a masa se rekuperatora ohladi na temperaturu T_0 .

Toplina q_0 dovodi se procesu samo pri niskoj temperaturi T_0 , a toplina q odvodi samo pri visokoj temperaturi T (sl. 16). Budući da su izohorne promjene stanja u T, s -dijagramu paralelno pomaknute, pa je dužina 1-2 jednaka dužini 3-4, faktor je hlađenja teorijskoga Philipsova procesa jednak onom za Carnotov proces, pa je

$$\varepsilon_{t,ph} = \varepsilon_C = \frac{T_0}{T - T_0} \quad (43)$$

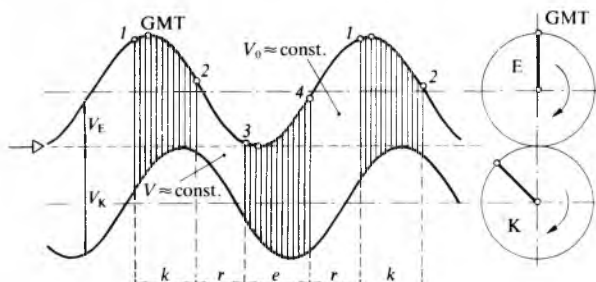
Nadalje, proračuni pokazuju da je i u tom procesu specifični rashladni učinak q_0 prema izrazu (42) malen kada je radni plin procesa atmosferski zrak. Zato se Philipsov stroj puni plinom koji ima veću plinsku konstantu R , npr. helijem (plinska konstanta $R_{He} \approx 7R_{zrak}$) ili vodikom (plinska konstanta $R_{H_2} \approx 14R_{zrak}$). Osim toga, stroj se puni plinom pod tlakom višim od atmosferskoga, što smanjuje njegove dimenzije.

Izraz (42) napisan za izotermne promjene stanja:

$$q_0 = R T_0 \ln \frac{p_4}{p_3} = R T_0 \ln \left(\frac{p_4}{p_2} \cdot \frac{p_2}{p_3} \right) = p_0 V_0 \ln \left(\frac{p_0}{p} \cdot \frac{T}{T_0} \right), \quad (44)$$

pokazuje da je rashladni učinak q_0 proporcionalan najvećem volumenu između stapova V_0 i odabranom najnižem tlaku p_0 . Rashladni učinak q_0 bit će to veći što je uz postojani omjer graničnih temperatura manji omjer najvišeg i najnižeg tlaka u procesu.

U praktičnoj primjeni treba cikluse Philipsova procesa što brže ponavljati, pa masa rekuperatora mora praktički trenutno primati i odavati toplinu plina koji struji kroz rekuperator. Zato je potrebna što veća dodirna površina za prijenos topline između plina i mase rekuperatora. Da bi se to postiglo, rekuperator se puni veoma tankim bakrenim ili, još bolje, volframovim žicama.



Sl. 18. Harmonijska promjena volumena između stapova Philipsova stroja. GMT gornja mrtva točka, V_k volumen u kompresijskom cilindru, V_E volumen u ekspanzijskom cilindru, V najmanji, V_0 najveći volumen plina, k područje kompresije, e područje ekspanzije, r područje prolaza plina kroz rekuperator

Velika je praktična prednost Philipsova uređaja u tome što radni cilindri ne trebaju nikakve razvodne ventile. Stapovi su obaju cilindara pokretani zajedničkim koljenčastim vratilom i gibaju se harmonijski približno po sinusoidi, ali tako da gibanje stapa ekspanzijskog cilindra prethodi gibanju stapa kompresijskog cilindra za određeni kut (sl. 18). Prateći harmonijsku promjenu volumena plina između stapova toplog i hladnog cilindra slijedi da se praktički ne može ostvariti prostrujavanje plina kroz rekuperator, uz uvjet da pri tome volumen ostane konstantan, već će se pojavljivati manja odstupanja od teorijskog procesa. Budući da je trenutni volumen plina između stapova u cilindrima zbroj volumena u toplom V_K i hladnom cilindru V_E , to je

$$V = V_K + V_E. \quad (45)$$

Okretanjem vratila stroja od trenutka 1 do 2 (sl. 17 i 18) plin se izotermno komprimira, od 2 do 3 plin prostrujava kroz rekuperator, no njegov volumen V ostaje pri tome samo približno konstantan. Od trenutka 3 do 4 plin ekspanzira i volumen raste, da bi tokom prestrujavanja kroz rekuperator postigao najveći volumen V_0 u procesu koji je od trenutka 4 do 1 opet samo približno konstantan. Praktički nije moguće ostvariti izotermnu kompresiju i ekspanziju plina, a toplina se u rekuperatoru izmjenjuje uz toplinske gubitke i temperaturne razlike.

Ipak, uz sva ta odstupanja praktičnog od teorijskog procesa, Philipsov je plinski stroj izvedbeno jednostavan, djelotvoran u postizanju niskih temperatura, malih je dimenzija i ekonomičan u pogonu. Najveća mu je odlika da se mogu postići vrlo niske temperature, čak do -200°C , pa se kao sekundarni hlađeni tok može upotrijebiti zrak, dušik, kisik, argon ili metan u kapljevitoj stanju.

Lindeov proces. Unutrašnja energija plina i njegova entalpija ovisne su jedino o temperaturi T samo tako dugo dok se plin može smatrati *idealnim plinom* koji se pokorava termičkoj jednadžbi stanja $pV = RT$. Tako se prigušivanjem, $h = \text{const.}$, temperatura idealnih plinova ne mijenja. Jednako se ponašaju i realni plinovi pri nižim tlakovima kad im je gustoća malena. No, prigušivanjem realnih plinova pojavljuje se uz više tlakove i veće gustoće neznatna promjena temperature koja pri prigušivanju realnih plinova za većinu tehničkih procesa nije važna, a Lindeov se rashladni uređaj osniva upravo na primjeni tog *Joule-Thomsonova prigušnog efekta*. Jouleovi i Thomsonovi rezultati mjerenja pri prigušivanju zraka do tlaka od 0,6 MPa i temperatura između 0 i 100°C prikazuju se izrazom

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h = \alpha \left(\frac{273}{T} \right)^2, \quad (46)$$

gdje je ∂T promjena temperature pri promjeni tlaka ∂p prigušivanjem uz konstantnu entalpiju h , a T temperatura zraka prije prigušivanja. Tako je za zrak temperature 273 K prigušivanjem tlaka za 0,1 MPa dobiveno sniženje temperature za $\alpha = 0,265^\circ\text{C}/0,1 \text{ MPa}$.

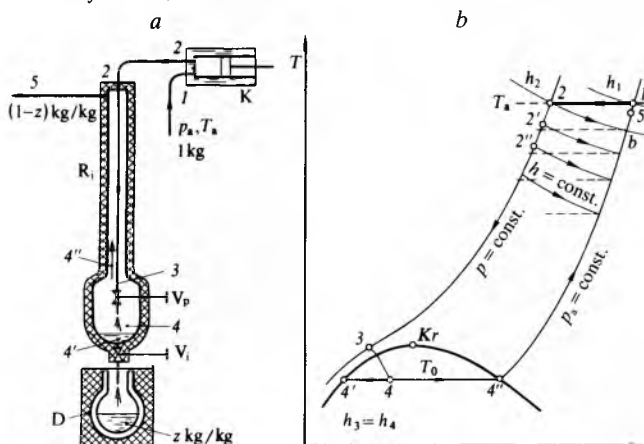
Plinovi se prigodom prigušivanja hlade samo ako imaju temperaturu manju od tzv. *inverzijske temperature* (T_{inv}) i ako tlak ostaje manji od *inverzijskog tlaka* (p_{inv}). Iznad inverzijske temperature i iznad inverzijskog tlaka realni se plinovi griju prigušivanjem. U tabl. 1 navedene su inverzijske temperature i tlakovi za neke plinove.

Tablica 1
INVERZIJSKE TEMPERATURE I TLAKOVI

	t_{inv} $^\circ\text{C}$	T_{inv} K	$(p_{inv})_{max}$ MPa
Zrak	+ 487	760	34,0
Vodik	- 73	200	11,8
Helij	- 233	40	2,0

Pri okolišnoj temperaturi i okolišnom tlaku zrak će se prigušivanjem hladiti jer je temperatura niža od inverzijske temperature ($T_{inv} = 760 \text{ K}$), a tlak je manji od inverzijskoga ($p_{inv} = 34 \text{ MPa}$). Naprotiv, vodik će se na jednakoj temperaturi

prigušivanjem grijati, jer je temperatura veća od inverzijske iako je tlak manji od inverzijskoga. Ako se vodik ipak želi ohladiti prigušivanjem, mora se najprije na neki drugi način ohladiti ispod inverzijske temperature ($T_{inv} = 200\text{ K}$). Helij bi najprije trebalo ohladiti, čak do $T = 40\text{ K}$, ali i smanjiti tlak na manje od $2,0\text{ MPa}$.

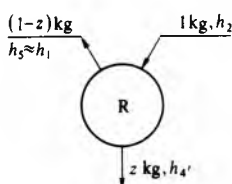


Sl. 19. Lindeov rashladni uređaj (a) i rashladni proces u T,s -dijagramu (b). K kompresor, R, regenerator, V_p prigušni ventil, V_i ispusni ventil, D Dewarova posuda, z iscrpak

Jednostavni Lindeov uređaj i pripadni T,s -dijagram toplinskog procesa prikazani su na sl. 19. Kompresor K, izdašno hlađen vodom, tlači okolišni zrak, stanje 1, teorijski izotermno na visoki tlak od $5,0 \dots 20,0\text{ MPa}$, stanje 2. S tim stanjem stlačeni zrak ulazi u regenerator R_i (protustrujni izmjenjivač topline), prolazi kroz prigušni ventil V_p gdje se priguši uz $h_2 = \text{const.}$ na tlak p_a , te se pri tome zbog prigušnog efekta ohladi na temperaturu T_b koja je samo za nekoliko stupnjeva niža od okolišne. U početku, dok je uređaj još topao, malo ohlađeni zrak temperature T_b vraća se vanjskim plaštem regeneratora ususret novom zraku temperature T_a koji struji kroz središnju cijev regeneratora. Pri tome se zrak u središnjoj cijevi ohladi najviše do temperature $T_2 = T_b$, a povratni se zrak u plaštu regeneratora zagrije na temperaturu $T_3 \approx T_a$ s kojom odlazi u okoliš. Nakon toga zrak se temperature T_2 ohladi prigušivanjem za daljih nekoliko stupnjeva na temperaturu T_4 i odlazi ususret novom zraku visokog tlaka, sada već temperature T_2 pa se zrak zbog toga u regeneratoru dalje ohladi, no najniže do temperature T_2 . Takve se izmjene topline između zraka visokog tlaka u središnjoj cijevi regeneratora i prigušivanog, a time i ohlađivanog zraka niskog tlaka koji mu struji nasuprot ponavljaju tako dugo dok se zrak pred prigušnim ventilom ne ohladi do vrlo niske temperature T_3 , stanje 3. Daljim prigušivanjem uz $h_3 = h_4$ zrak se već djelomično ukapljuje, stanje 4. U proširenom donjem dijelu regeneratora razdvaja se heterogena smjesa stanja 4 u kapljeviti zrak kod niskog tlaka p_a , stanje 4', i suhozasićenu paru zraka istog tlaka, stanje 4'', koja služi i nadalje za prethlađivanje regeneratora. Ukapljeni zrak stanja 4' ispušta se iz naprave, npr. u Dewarovu posudu D, kao proizvod Lindeova postupka.

Za svaki kilogram komprimiranog zraka u kompresoru K smije se otpustiti samo $z\text{ kg}$ ukapljenog zraka (iscrpak), jer za prethlađivanje regeneratora mora ostati količina zraka $(1-z)\text{ kg}$. Koliki je taj iscrpak z , dobiva se iz toplinske bilance regeneratora (sl. 20).

Budući da je razlika entalpije $h_1 - h_2$ između točaka 1 i 2 (sl. 19) vrlo malena s obzirom na razliku entalpije $h_1 - h_4$,



Sl. 20. Bilanca regeneratora Lindeova procesa. R regenerator, z iscrpak, h entalpija

moćna proizvodnja ukapljenog zraka iznosi samo nekoliko postotaka od komprimirane mase zraka u kompresoru. Tako uz $p/p_a = 100$ iscrpak iznosi $z = 0,053$ ili 5,3%, a utrošeni rad $1,95\text{ kWh po kg}$ ukapljenog zraka, a uz $p/p_a = 200$ iscrpak je $z = 0,095$ ili svega 9,5%, a utrošeni rad $1,25\text{ kWh po kg}$ ukapljenog zraka.

Teorijski proces izotermne kompresije u kompresoru troši mehanički rad predstavljen površinom ispod izotermne 1-2 u T,s -dijagramu (sl. 19).

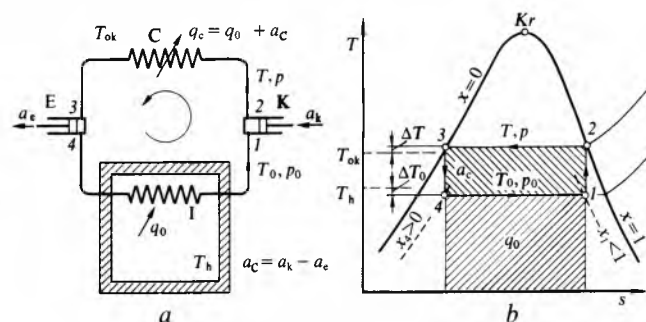
Opisani osnovni Lindeov postupak praktički je ostvarljiv, ali je termodinamički loš zbog nepovratljivog prigušivanja i prijenosa velikih količina topline u regeneratore uz konačnu temperaturnu razliku, te zbog odstupanja od izotermne kompresije. Količina proizvedenoga kapljevitoz zraka vrlo je malena, a utrošeni rad razmjerno velik.

Da bi se postupak termodinamički popravio i dobila veća količina ukapljenog zraka uz manji utrošak rada za kompresiju, predložio je C. Linde dotjerani postupak s dvokratnom kompresijom i dvokratnim prigušivanjem uz primjenu trostrujnog regeneratora. G. Claude, pak, predložio je postupak prema kojemu se nepovratljivo prigušivanje djelomično zamjenjuje povratljivom ekspanzijom plina visokog tlaka u stapnom ekspanzeru radi prethlađivanja regeneratora. P. Kapitza je pak stapni kompresor i stapni ekspanzer zamijenio turbostrojevima povećanog stupnja djelovanja i tako omogućio provedbu ukapljivanja zraka uz kompresijski omjer svega $p/p_a \approx 6$, te veći iscrpak uz manji utrošak mehaničkog rada.

Dotjerani uređaji za ukapljivanje zraka primjenom Joule-Thomsonova prigušnog efekta danas troše praktički manje od 1 kWh energije za proizvodnju 1 kg kapljevitoz zraka.

Parni procesi

Parni procesi u rashladnoj su tehnici ljevokretni procesi za koje je odabrana takva radna tvar koja mijenja svoje agregatno stanje na temperaturama odvijanja procesa prigodom izmjene topline. Uređaj teorijskoga parnog procesa sastoji se od istih elemenata kao i plinski proces (sl. 7 i 21 a), ali su pojave ponešto različite.



Sl. 21. Parni rashladni uređaj (a) i teorijski parni rashladni proces u T,s -dijagramu (b). K kompresor, E ekspanzer, C kondenzator, I isparivač, q_0 specifični rashladni učinak, q_c specifična odvedena toplota, a_c specifični utrošeni kompresijski rad, a_e specifični dobiveni ekspanzijski rad

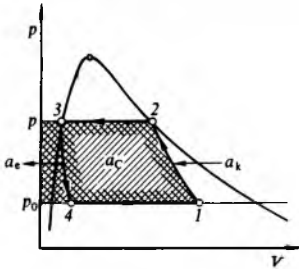
Parni se proces odvija u načelu unutar zasićenog područja radne tvari (sl. 21 b), i to što niže ispod kritične točke. Vlažnu paru niske temperature i tlaka, stanje 1, siše rashladni kompresor te uz utrošak mehaničkog rada adijabatski je tlači na viši tlak. Temperatura tako stlačene pare poraste sve do temperature koja je tek malo viša od temperature okoliša. Tako toplota $q_c = q_0 + a_c$ prelazi na okoliš, a suhozasićena para stanja 2 pri tome kondenzira uz konstantnu temperaturu kondenzacije u vrelu kapljevinu radne tvari, stanje 3. Zato se izmjenjivač topline s okolišem naziva *kondenzatorom*. Kapljevita radna tvar stanja 3 ulazi u ekspanzer i širi se opet adijabatski uz isparivanje dijela kapljevine ($x_4 > 0$) i pri tome se ohladi na temperaturu T_0 . Ipak, pretežno kapljevita, radna tvar temperature T_0 u stanju 4 hladnija je za vrlo malu vrijednost ΔT_0 od tražene temperature hladionice T_h , pa toplota q_0 prelazi sama iz hladionice na radnu tvar koja zbog toga isparuje pri konstantnoj nižoj temperaturi isparivanja T_0

od stanja 4 do 1. Zato se izmjenjivač topline u hladionici naziva isparivačem. Time je kružni proces zatvoren i može se ponavljati. Pri razmatranju teorijskog procesa smatra se da su razlike temperature ΔT i ΔT_0 po volji malene, čak i jednake nuli. Tada je $T = T_{ok}$, a $T_0 = T_h$. Opisani parni proces identičan je s Carnotovim procesom, pa mu je i faktor hlađenja jednak Carnotovu faktoru

$$\epsilon_c = \frac{q_0}{a_c} = \frac{T_0}{T - T_0} \quad (47)$$

Prva je velika termodinamička prednost parnih procesa da se ne moraju prekoračivati potrebne temperature ni iznad T , niti ispod T_0 . Toplina se izmjenjuje s radnom tvari koja pri tome zadržava postojanu temperaturu i tlak. Zato se za provedbu opisanoga teorijskog procesa troši minimalno mogući rad a_c , pa faktor hlađenja poprima najveću moguću teorijsku vrijednost.

Druga je prednost što se proces odvija unutar zasićenog područja, tako da se pri promjeni agregatnog stanja može radnoj tvari prenijeti mnogo veći iznos energije nego što je to bilo moguće plinovima. Masa radne tvari $G = Q_0/q_0$ za jednaki je rashladni učinak Q_0 mnogostruko manja, jer je specifični rashladni učinak q_0 mnogostruko veći nego kad se kao radna tvar upotrebljava neki plin. Zbog toga parni rashladni uređaji imaju mnogo manje dimenzije od plinskih.



Sl. 22. Prikaz teorijskoga parnog procesa u p, V -dijagramu. a_k specifični utrošeni kompresijski rad, a_e specifični dobiveni ekspanzijski rad, $a_c = a_k - a_e$

Treća prednost proizlazi iz omjera utrošenoga kompresorskog rada a_k i rada dobivenog ekspanzijom a_e . To se vidi iz p, V -dijagrama zasićenog područja radne tvari (sl. 22). Utrošeni rad kompresije a_k prikazan je kao tehnički rad površinom lijevo od adiabatne 1-2 do ordinatne osi između tlakova p i p_0 . Dobiveni rad ekspanzije a_e prikazan je opet kao tehnički rad površinom lijevo od adiabatne 3-4 do ordinatne osi između tlakova p i p_0 . Rezultirajući rad je prikazan površinom 1-2-3-4 i iznosi

$$a_c = a_k - a_e \quad (48)$$

On je, dakle, razlika relativno velikog utrošenog rada a_k i sasvim malog rada a_e . To je važno pri prijelazu od teorijskog procesa na praktičnu izvedbu uređaja, uz stupanj djelovanja η_k realnog kompresora i η_e realnog ekspandera. Rezultirajući rad, naime, potreban za realni proces ostaje ipak istog reda veličine i iznosi

$$a_r = \frac{a_k}{\eta_k} - a_e \eta_e \quad (49)$$

opet kao razlika relativno velikog rada a_k/η_k i malog rada $a_e \eta_e$, pa faktor hlađenja ϵ_r realnog procesa neće biti mnogo lošiji od teorijskoga

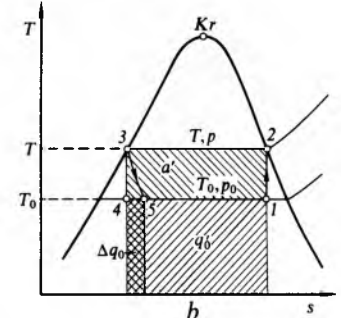
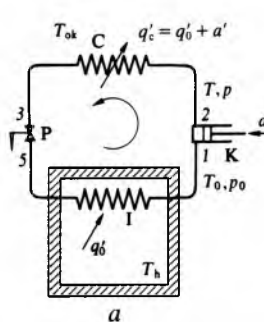
$$\epsilon_r = \frac{q_0}{a_r} = \frac{q_0}{\frac{a_k}{\eta_k} - a_e \eta_e} \quad (50)$$

To ne vrijedi za plinske procese gdje je rezultirajući rad razlika velikog kompresijskog i samo malo manjeg ekspanzijskog rada. Rezultirajući je rad tada malen i svako povećanje kompresijskog i smanjenje ekspanzijskog rada može u realnom uređaju čak umnogostručiti rezultirajući utrošeni rad. To još više smanjuje vrijednost faktora hlađenja realnih plinskih rashladnih uređaja u usporedbi s teorijskim procesom, koji ionako ima malu vrijednost faktora hlađenja.

Prigušivanje kondenzata. Tokom ekspanzije vrele kapljavine stanja 3 u cilindru ekspanzijskog stroja (sl. 21) nastaju

neugodne pojave djelomičnim isparivanjem kapljavite radne tvari zbog snižavanja tlaka uz sniženje temperature. Sve se to događa u mehaničkoj i termičkoj neravnoteži uz burno izjednačavanje tlaka i temperature u tako nastaloj heterogenoj smjesi radne tvari unutar cilindra, osim ako se širenje ne obavlja oprezno i vrlo sporo. Stapni ekspanzijski stroj, međutim, mora brzo uzastopno ponavljati promjenu od stanja 3 do 4, pa se zato ne može upotrijebiti u parnim rashladnim uređajima, već se mora sniženje tlaka ostvariti na neki drugi način.

Rješenje je u upotrebi jednostavnoga prigušnog ventila u kojemu se sniženje tlaka postiže uz konstantnu entalpiju struje radne tvari. To znači da se odustaje od iskorištavanja ekspanzijskog rada, ali ta žrtva i nije tako teška, jer je taj rad ionako tako malen da se praktički utroši na svladavanje trenja u stapnom stroju (sl. 22), pogotovo što je tako parni rashladni proces postao i ostvarljiv.



Sl. 23. Parni rashladni uređaj s prigušivanjem radne tvari (a) i teorijski rashladni proces u T, s -dijagramu (b). K kompresor, P prigušni ventil, C kondenzator, I isparivač, q'_0 specifični rashladni učinak, q'_c specifična odvedena toplina

Takva termodinamička promjena vidi se na shemi uređaja i pripadnom procesu u T, s -dijagramu na slici 23. Budući da procesom s ekspandrom (sl. 21b) postignuti specifični rashladni učinak iznosi

$$q_0 = h_1 - h_4, \quad (51)$$

a okolišu predana toplina

$$q_c = h_2 - h_3, \quad (52)$$

slijedi da je utrošeni rad

$$a_c = q_c - q_0 = (h_2 - h_3) - (h_1 - h_4) = a_k - a_e, \quad (53)$$

te faktor hlađenja

$$\epsilon_c = \frac{q_0}{a_c} = \frac{h_1 - h_4}{(h_2 - h_3) - (h_1 - h_4)} = \frac{T_0}{T - T_0} \quad (54)$$

Uvođenjem prigušnog ventila umjesto ekspandera očigledno se smanjio specifični rashladni učinak, jer tada radna tvar ulazi nakon prigušivanja ($h_3 = h_5 = \text{const.}$) u isparivač uređaja sa stanjem 5 (sl. 23b), tako da specifični rashladni učinak iznosi

$$q'_0 = h_1 - h_5 = (h_1 - h_4) - (h_5 - h_4) = q_0 - \Delta q_0, \quad (55)$$

dok je okolišu predana toplina ostala nepromijenjena

$$q'_c = h_2 - h_3 = q_c. \quad (56)$$

Rezultirajući je utrošeni rad

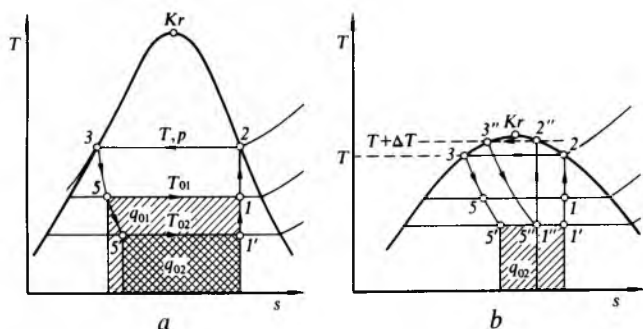
$$a' = q'_c - q'_0 = (q_c - q_0) + \Delta q_0 = a_c + \Delta q_0, \quad (57)$$

a faktor hlađenja parnog procesa s prigušivanjem

$$\epsilon' = \frac{q'_0}{a'} = \frac{q_0 - \Delta q_0}{a_c + \Delta q_0} < \epsilon_c. \quad (58)$$

Specifični se rashladni učinak smanjio za iznos $\Delta q_0 = h_5 - h_4$, a utrošeni se rad povećao upravo za isti iznos. Zbog prigušivanja kondenzata umjesto adiabatne ekspanzije umanjio se faktor hlađenja, pa se više rada troši za manji rashladni učinak.

Negativni utjecaj primjene nepovratljivog prigušivanja postaje uvjerljiv ako se umjesto temperature T_0 traži niža

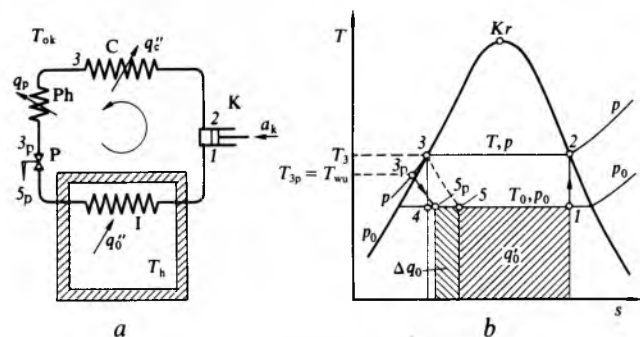
Sl. 24. Utjecaj sniženja temperature hlađenja T_0 na specifični rashladni učinak

temperatura hlađenja, odnosno isparivanja (sl. 24a). Ostvarljivi specifični rashladni učinak q_{01} pri temperaturi isparivanja T_{01} prikazan je površinom ispod izoterme 5-1. Pri nižoj temperaturi isparivanja T_{02} moguće je ostvariti još samo rashladni učinak q_{02} , prikazan površinom ispod izoterme 5'-1'. Budući da se u oba slučaja okolišu predaje jednaka toplina, faktor se hlađenja procesa drastično smanjuje prelaskom na niže temperature isparivanja, pa je

$$\varepsilon_2 = \frac{q_{02}}{q - q_{02}} \ll \varepsilon_1 = \frac{q_{01}}{q - q_{01}}. \quad (59)$$

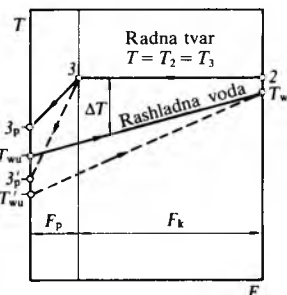
Opasnost može nastupiti ako je rashladni uređaj punjen radnom tvari kritične temperature T_{Kr} koja je samo malo viša od temperature kondenzacije (sl. 24b). Ako je npr. uređaj punjen ugljik-dioksidom (CO_2), kojemu je kritična temperatura $T_{Kr} = 304 \text{ K}$, a temperatura kondenzacije $T \approx 300 \text{ K}$, svaka neznatna promjena temperature intenzivno utječe na rashladni učinak. Već neznatno povišenje temperature kondenzacije na $T + \Delta T$, zbog nešto toplije rashladne vode za hlađenje kondenzatora, uzrokuje pomicanje stanja 3 u 3'', a time i stanja 5' u 5'' koje je jednako stanju 1'', pa specifični rashladni učinak iščezava i uređaj prestaje hladiti.

Pothlađivanje kondenzata. Uvođenjem prigušivanja kondenzata u parni rashladni proces ostvaruje se manji specifični rashladni učinak radne tvari (sl. 23b). Proces je termodinamički postao lošiji prema (58). Postoji, međutim, realna mogućnost da se prigušivanjem smanjeni specifični rashladni učinak poveća, možda čak i na vrijednost teorijskog procesa, prema izrazu (51). To se postiže dodatnim pothlađivanjem kondenzata radne tvari pri konstantnom tlaku od stanja 3 do 3_p, odvođenjem topline q_p hladnom rashladnom vodom, a tek nakon toga prigušivanjem na tlak p_0 , stanje 5_p ≈ 4 (sl. 25).

Sl. 25. Parni rashladni uređaj s prigušivanjem radne tvari i pothlađivanjem kondenzata (a) te teorijski parni proces u T,s -dijagramu (b). K kompresor, P prigušni ventil, C kondenzator, I isparivač, Ph izmjenjivač za pothlađivanje

U kondenzatoru se, naime, kondenzira radna tvar pri postojanoj tlaku i , dakako, pri postojanoj temperaturi. Toplina kondenzacije predaje se rashladnoj vodi (okolišu) koja se pri tome zagrijava na temperaturu koja mora kad napušta kondenzator ostati manja od temperature kondenzacije. Ti su odnosi prikazani na T,F -dijagramu (sl. 26). Da bi rashladna voda mogla preuzeti toplinu kondenzacije, a da njezina temperatura ne prekorači najvišu vrijednost T_{wi} na izlazu iz kondenzatora površine F_k , rashladna voda mora

ulaziti u kondenzator s mnogo nižom temperaturom $T_{wu} = T_{ok}$. To omogućuje da najhladnija voda početne temperature T_{wu} najprije preuzme toplinu pothlađivanja radne tvari q_p i pothladi je na temperaturu T_{3p} pred prigušnim ventilom na najviše do $T_{3p} = T_{wu}$. Zanimljivo je utvrditi da se s manjim količinama raspoložive rashladne vode, ali niže temperature T'_{wu} , može postići pri jednakoj temperaturi kondenzacije veće pothlađivanje kondenzata u pothlađivaču površine F_p , naime na temperaturu $T_{3p'}$, a tako i veće povećanje specifičnog rashladnog učinka. Dakle, djelotvornost pothlađivanja kondenzata bitno ovisi o količini i temperaturi raspoložive rashladne vode.

Sl. 26. Temperaturni odnosi u kondenzatoru i pothlađivaču u T,F -dijagramu. F_k površina kondenzatora, F_p površina pothlađivača

Ako se pothlađivanjem kondenzata postigne da je

$$q'' = q'_0 + \Delta q_0 = q_0, \quad (60)$$

a uz povećano odvođenje topline na okoliš

$$q'' = h_2 - h_{3p} = (h_2 - h_3) + (h_3 - h_{3p}) = q_c + q_p, \quad (61)$$

slijedi da je potreban rad

$$a'' = q'' - q''_0 = q_c + q_p - (q'_0 + \Delta q_0) = q_c + q_p - (q_0 - \Delta q_0 + \Delta q_0) = (q_c - q_0) + q_p = a_c + q_p. \quad (62)$$

Tada je faktor hlađenja parnog procesa s prigušivanjem i pothlađivanjem kondenzata

$$\varepsilon'' = \frac{q''}{a''} = \frac{q'_0 + \Delta q_0}{a_c + q_p} = \frac{q_0 - \Delta q_0 + \Delta q_0}{a_c + q_p} = \frac{q_0}{a_c + q_p}. \quad (63)$$

Ako se usporede izrazi (63), (58) i (54), slijedi zaključak da je

$$\varepsilon_c > \varepsilon'' > \varepsilon'. \quad (64)$$

Dakle, proces je s prigušivanjem i pothlađivanjem kondenzata termodinamički bolji od procesa bez pothlađivanja, no još uvijek lošiji od teorijskog procesa bez prigušivanja.

Suho usisavanje. Parni rashladni proces s pothlađivanjem radne tvari prije njezina prigušivanja na tlak isparivanja već je uvelike dotjeran za praktičnu primjenu u rashladnim uređajima. Usisavanje vlažne pare, međutim, u kompresor predstavljalo je tokom razvoja rashladnih uređaja velike smetnje u pogonu. Naime, radna je tvar koju usisava kompresor u svoj cilindar u heterogenom stanju. Masa od 1 kg te heterogene smjese sastoji se od x_1 kg suhozasićene pare i $(1 - x_1)$ kg još neisparenih kapljica. Unutar cilindra kompresora može se sakupiti toliko neisparenih kapljica radne tvari da njihov volumen bude veći od volumena štetnog prostora kompresora (v. *Kompresor*, TE 7, str. 224). Tad se pojavljuje hidraulički udar nestišljive kapljevite radne tvari u cilindru stroja, što može uzrokovati lom konstrukcije kompresora.

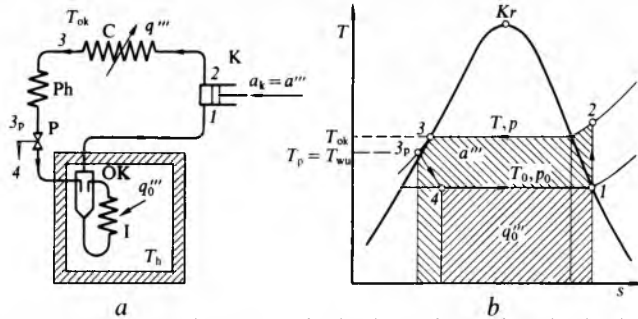
Da bi se takva opasnost uklonila, nadopunjuje se shema rashladnog uređaja dopunskim elementom, *odvajačem kapljica* (sl. 27a). Vlažna para tada struji iz isparivača u prošireni prostor odvajača kapljica, pa se brzina strujanja znatno smanjuje i para više ne može nositi sa sobom kapljice, nego se one talože na dno odvajača i vraćaju kao kapljevina u isparivač. Ostala para, oslobođena kapljica, postaje suhozasićena ($x = 1$) na gornjoj graničnoj krivulji zasićenog područja (stanje I na sl. 27b).

Takvim se postupkom povećava specifični rashladni učinak, ali se također povećava i utrošeni mehanički rad. Komprimiranje pare radne tvari odvija se tada u području

pregrijane pare do stanja 2, pa para poprima temperaturu mnogo višu od potrebne temperature T_{ok} . Ta je okolnost termodinamički nepovoljna, pa će usprkos povećanom specifičnom rashladnom učinku faktor hlađenja u procesu sa suhim usisavanjem biti nešto lošiji:

$$\varepsilon'' < \varepsilon'' \quad (65)$$

Međutim, takvo pogoršanje termodinamičkog procesa ipak je prihvatljivo jer omogućuje da se proces sa sigurnošću primijeni u realnim rashladnim uređajima.



Sl. 27. Parni rashladni proces s prigušivanjem radne tvari, pothlađivanjem kondenzata i suhim usisavanjem. OK odvajač kapljica, K kompresor, P prigušni ventil, C kondenzator, I isparivač, Ph izmjenjivač za pothlađivanje

Ako se promatra T_s -dijagram procesa (sl. 27b), vidi se da je ostalo malo sličnosti s termodinamički najboljim Carnotovim procesom (sl. 21b). Ipak, ostala je velika termodinamička prednost parnog rashladnog procesa: čitav rashladni učinak predaje se radnoj tvari pomoću isparivača pri konstantnoj temperaturi isparivanja, a najveći dio topline predaje se okolišu također pri konstantnoj temperaturi kondenzacije. Tako dotjerani rashladni proces s parama postao je osnova realnih rashladnih uređaja.

Zanimljivo je pitanje koja se najniža temperatura isparivanja može postići takvim parnim rashladnim procesom. To je ograničeno mogućim povećanjem kompresijskog omjera i fizikalnim svojstvima odabrane radne tvari. Uz neku postojanu temperaturu okoliša i tlak je kondenzacije u zasićenom području radne tvari konstantan. Također je temperatura isparivanja ovisna jedino o tlaku, pa ako se želi postići niža temperatura, mora se u kompresoru postići veći omjer tlakova. Povećani kompresijski omjer smanjuje volumetrijski stupanj djelovanja kompresora, te se njegov volumetrijski učinak zbog toga smanjuje. Stapni se kompresor može ekonomično upotrijebiti do kompresijskog omjera $p/p_0 = 6 \dots 7$. Ako se, npr., kao radna tvar odabere amonijak NH_3 i temperatura kondenzacije $\vartheta = +30^\circ C$ ($p = 1,1665$ MPa, sl. 27), uz praktički najveći dopustivi kompresijski omjer $p/p_0 = 7$, pripadna najniža temperatura isparivanja procesa bit će, uz $p_0 = p/7 = 0,1666$ MPa, $\vartheta_0 = -23^\circ C$. Ako se, uz iste uvjete, kao radna tvar odabere difluordiklormetan CF_2Cl_2 , postiže se temperatura isparivanja $\vartheta_0 = -28,3^\circ C$. Dakle, negdje unutar temperaturnih granica $\vartheta_0 = -20^\circ C \dots -30^\circ C$ mogu se postići najniže racionalno prihvatljive temperature primjenom rashladnog procesa prema sl. 27.

Stupnjevanje rashladni procesi. Danas se zahtijevaju sve niže i niže temperature hlađenja, pa se sve više prigovara jednostavnom rashladnom procesu s prigušivanjem pothlađenog kondenzata i suhim usisavanjem (sl. 27).

Prijelazom na niže temperature i tlakove isparivanja smanjuje se specifični rashladni učinak od q_0 na q'_0 (sl. 28). To znači da za jednaki rashladni učinak Q_0 pri nižoj temperaturi T'_0 u optoku unutar rashladnog uređaja mora kružiti veća masa radne tvari:

$$G' = \frac{Q_0}{q'_0} > G = \frac{Q_0}{q_0} \quad (66)$$

Nadalje, sniženjem temperature od T_0 na T'_0 gustoća suhozasićene pare koju siše kompresor također se smanjuje od ρ'_1 na ρ''_1 , pa volumen para koji mora odsisavati kompresor intenzivno raste, jednom zbog veće potrebne mase radne tvari

G' , a drugi put zbog toga što ta masa ima manju gustoću ρ''_1 , pa je

$$V_{1'} = \frac{G'}{\rho''_1} \gg V_1 = \frac{G}{\rho'_1} \quad (67)$$

Kompresor mora usisavati veći volumen para radne tvari $V_{1'}$ pri nižoj temperaturi T'_0 za jednaki rashladni učinak Q_0 . Osim toga, kompresoru se pogoršavaju i radni uvjeti jer mora komprimirati paru uz veći kompresijski omjer, pa mu se zbog toga umanjuje volumetrijski stupanj djelovanja λ . Budući da volumetrijski učinak kompresora V_λ (v. *Kompresor*, TE 7, str. 226) mora biti jednak volumenu usisanih para u jedinici volumena $V_{1'}$, slijedi da je

$$V_\lambda = V_{1'}, \quad (68)$$

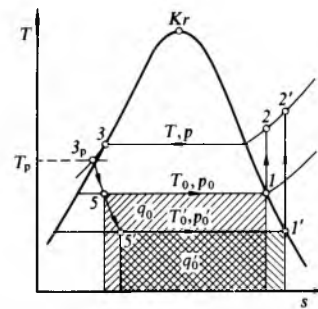
odnosno

$$\lambda V_s n = \frac{G'}{\rho''_1}, \quad (69)$$

pa se potrebni stapajni volumen kompresora $V_s = Fs$ morao znatno povećati, te iznosi

$$V_s = \frac{G'}{\lambda n \rho''_1}, \quad (70)$$

jer je pri nižoj temperaturi isparivanja protočna masa G' veća, a λ i ρ''_1 imaju manje vrijednosti. Kompresor postaje relativno velik i skup, a s njime i svi ostali dijelovi rashladnog uređaja.



Sl. 28. Prikaz utjecaja sniženja temperature isparivanja u parnom rashladnom procesu

Sniženje temperature isparivanja povećava specifični utrošeni rad kompresora od $a = h_2 - h_1$ na $a' = h_2' - h_1'$, te je za ostvarivanje rashladnog učinka Q_0 potrebna veća snaga

$$P' = G' a' = \frac{Q_0}{q'_0} (h_2' - h_1'). \quad (71)$$

Zbog povećanoga kompresijskog omjera kompresija seže mnogo dalje u pregrijano područje (stanje 2'), pa previsoka konačna temperatura kompresije postaje neprihvatljiva za praktični rad kompresora. Očito je da se zbog svega toga znatno smanjuje faktor hlađenja za vrijednost

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon' - \varepsilon = \frac{q'_0}{a'} - \frac{q_0}{a}. \quad (72)$$

Proces dvokratne kompresije. Naglo smanjivanje faktora hlađenja i pojava neprihvatljivo visoke temperature na kraju kompresije mogu se ublažiti dvokratnom kompresijom s međuhlađenjem u krugu rashladnog procesa (sl. 29).

Najprije se pare radne tvari iz isparivača komprimiraju u niskotlačnom kompresoru od tlaka p_0 na neki srednji tlak p_m , od stanja 1 do 2, i za to se troši snaga

$$P_a = h_2 - h_1, \quad (73)$$

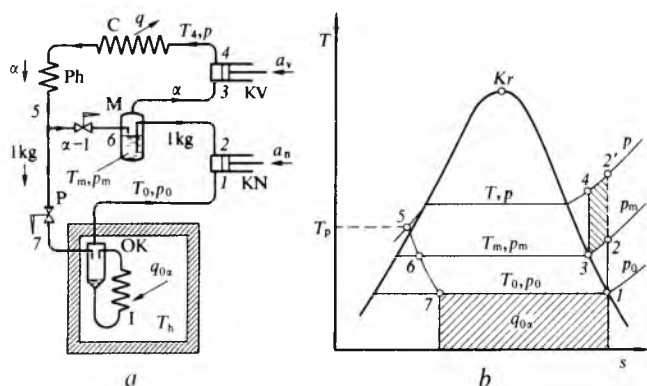
po jedinici mase tvari u jedinici vremena.

Pregrijana para stanja 2 prisiljena je da se dalje probija kroz sloj hladne kapljevite radne tvari temperature T_m u međuhladnjaku pri tlaku p_m . Time se para ohladi na temperaturu T_m , stanje 3, ali se zato određena masa kapljevine u međuhladnjaku ispari, pa kompresor visokog

tlaka siše veću količinu pare. Zbog toga je snaga visokotlačnog kompresora

$$P_{va} = \alpha(h_4 - h_3), \quad (74)$$

gdje je α omjer između mase radne tvari koja je bila komprimirana u niskotlačnom kompresoru i mase radne tvari koja će biti komprimirana u visokotlačnom kompresoru. Nakon kondenzacije i prigušivanja mase αG radne tvari prigušuje se masa $(\alpha - 1)G$ od stanja 5 do 6 u međuhladnjak radi namirivanja isparene kapljevine, a preostatak G prigušuje se od 5 do 7 i ulazi u isparivač uređaja. Proces u T,s -dijagramu (sl. 29b) pokazuje da se dvokratnom kompresijom štedi na radu (površina 2-3-4-2') i da je temperatura $T_4 < T_2'$, dakle praktički prihvatljiva. Ušteda na radu u T,s -dijagramu prikazana je kad bi i kroz kompresor visokog tlaka prolazila masa G radne tvari. Budući da kroz visokotlačni kompresor protječe veća masa ($\alpha > 1$), ušteda će biti nešto veća od prikazane u T,s -dijagramu. Treba napomenuti da se uvođenjem dvokratne kompresije nije promijenio specifični rashladni učinak, pa se termodinamičko poboljšanje procesa očekuje samo zbog smanjenja utrošenog rada.



Sl. 29. Parni rashladni uređaj s dvokratnom kompresijom (a) i teorijski rashladni proces u T,s -dijagramu (b). KN niskotlačni kompresor, KV visokotlačni kompresor, C kondenzator, Ph izmjenjivač za pothlađivanje, P prigušni ventil, M međuhladnjak, I isparivač, OK odvajач kapljica

Da bi se odredio faktor hlađenja, najprije se odredi iz toplinske bilance međuhladnjaka omjer α pomoću jednakosti

$$h_2 + (\alpha - 1)h_6 = \alpha h_3, \quad (75)$$

a odatle je

$$\alpha = \frac{h_2 - h_6}{h_3 - h_6} > 1. \quad (76)$$

Ostvareni je rashladni učinak

$$Q_{0a} = G(h_1 - h_7), \quad (77)$$

toplina odvedena u kondenzatoru i pothlađivaču

$$Q_a = \alpha G(h_4 - h_5), \quad (78)$$

a ukupno utrošena snaga za pogon kompresora

$$P_a = P_n + P_{va} = G(h_2 - h_1) + \alpha G(h_4 - h_3). \quad (79)$$

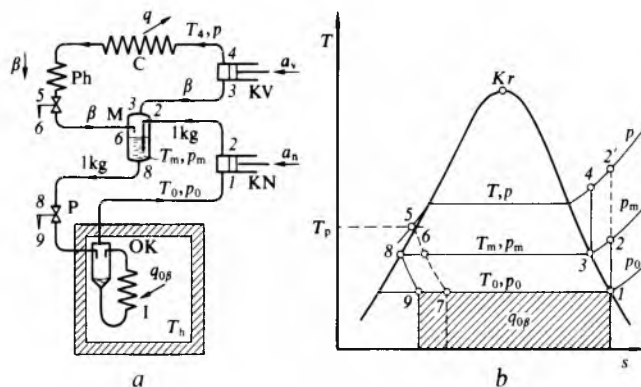
Faktor je hlađenja procesa s dvokratnom kompresijom i međuhlađenjem

$$\varepsilon_a = \frac{Q_{0a}}{P_a} = \frac{(h_1 - h_7)}{(h_2 - h_1) + \alpha(h_4 - h_3)}. \quad (80)$$

Proces dvokratne kompresije i prigušivanja. Uvođenjem dvokratne kompresije u rashladni proces ubrzo se javila ideja da se i prigušivanje provede dvokratno, te da se tako proces termodinamički dalje poboljša povećanjem specifičnoga rashladnog učinka (sl. 30).

Odlučujuća promjena sastoji se u tome da se ukupna masa radne tvari koja kruži visokotlačnim dijelom procesa prigušuje najprije na međutlak p_m u međuhladnjaku M, promjena stanja od 5 do 6 (sl. 30b). Stanje 6 predstavlja heterogenu smjesu pare i kapljevine radne tvari temperature T_m koja se

u međuhladnjaku razdvaja u suhozasićenu paru stanja 3 i vrelu kapljevitu paru stanja 8. Zatim se tako odvojena kapljevita radna tvar prigušuje od tlaka p_m na tlak p_0 , promjena stanja od 8 do 9. Takvim je postupkom postignuto povećanje specifičnoga rashladnog učinka za $G(h_7 - h_9)$, odnosno na $q_{0\beta} = G(h_1 - h_9)$.



Sl. 30. Parni rashladni uređaj s dvokratnom kompresijom i prigušenjem (a) i teorijski proces u T,s -dijagramu (b). KN niskotlačni kompresor, KV visokotlačni kompresor, C kondenzator, Ph izmjenjivač za pothlađivanje, P prigušni ventil, M međuhladnjak, I isparivač, OK odvajач kapljica

Ako se sa β označi omjer između mase tvari koja kruži visokotlačnim dijelom procesa i mase tvari u niskotlačnom dijelu, taj se omjer određuje opet iz toplinske bilance međuhladnjaka

$$h_2 + \beta h_6 = \beta h_3 + h_8, \quad (81)$$

pa je

$$\beta = \frac{h_2 - h_8}{h_3 - h_6} = \frac{(h_2 - h_6) + (h_6 - h_8)}{h_3 - h_6} = \alpha + \frac{h_6 - h_8}{h_3 - h_6}. \quad (82)$$

Omjer β nešto je veći od omjera α u procesu bez dvokratnog prigušivanja. Ostvareni rashladni učinak $Q_{0\beta}$ veći je od Q_{0a} i iznosi

$$Q_{0\beta} = G(h_1 - h_9), \quad (83a)$$

dok je toplina odvedena u kondenzatoru i pothlađivaču

$$Q_\beta = \beta G(h_4 - h_5), \quad (83b)$$

a ukupna utrošena snaga za pogon kompresora

$$P_\beta = P_n + P_{v\beta} = G(h_2 - h_1) + \beta G(h_4 - h_3), \quad (84)$$

pa je faktor hlađenja

$$\varepsilon_\beta = \frac{Q_{0\beta}}{P_\beta} = \frac{h_1 - h_9}{(h_2 - h_1) + \beta(h_4 - h_3)}. \quad (85)$$

Dvotemperaturno isparivanje. Međuhladnjak M u procesima dvokratne kompresije i prigušivanja omogućuje da se istim procesom može ostvarivati hlađenje na dvije različite temperature isparivanja T_{0m} i T_0 (sl. 31).

Rashladni se proces dakako provodi s dvokratnom kompresijom i prigušivanjem, ali je na međuhladnjak M priključen dodatni isparivač DI u kojemu isparuje radna tvar pri temperaturi T_{0m} . Tako rashladni uređaj, prema shemi na sl. 31a, procesom prema sl. 31b osigurava da se radna tvar isparuje i da se ostvari rashladni učinak q_0 i q_{0m} uz dvije različite temperature T_0 i T_{0m} .

Često u praksi tek istodobno hlađenje na dvije temperature zadovoljava potrebne tehnološke zahtjeve. Tako je, npr., za skladištenje svježeg mesa potrebna viša temperatura T_{0m} nego za dugotrajno čuvanje smrznutog mesa, kad je potrebna vrlo niska temperatura T_0 .

Materijalna i energetska analiza takva procesa polazi, dakako, od traženih rashladnih učinaka Q_0 i Q_{0m} i za to potrebnog protoka mase radne tvari G_n kroz isparivač temperature T_0 i potrebnog protoka G_m kroz isparivač temperature T_{0m} , jer je

$$Q_0 = G_n q_{0m} = G_n (h_1 - h_9), \quad (86)$$

$$Q_{0m} = G_m q_{0m} = G_m (h_3 - h_8). \quad (87)$$

Zatim se postavlja bilanca međuhladnjaka M uz oznaku da visokotlačnim dijelom uređaja protječe protok G radne tvari koja se bilancom želi odrediti, pa se dobiva

$$G h_6 + G_m h_3 + G_n h_2 = G h_3 + G_n h_8 + G_m h_8, \quad (88)$$

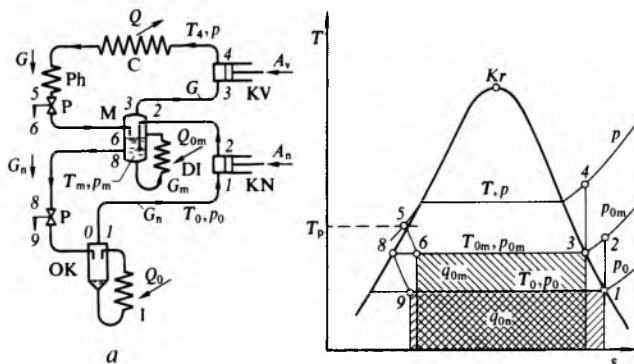
odakle je

$$G = G_n \frac{h_2 - h_8}{h_3 - h_6} + G_m \frac{h_3 - h_8}{h_3 - h_6}, \quad (89)$$

odnosno

$$G = G_n \gamma_n + G_m \gamma_m, \quad (90)$$

gdje je $G_n \gamma_n$ dio mase radne tvari koja protječe visokotlačnim dijelom uređaja (kompresor, kondenzator) i ostvaruje rashladni učinak Q_0 , a $G_m \gamma_m$ dio mase radne tvari koja protječe kroz isparivač i ostvaruje rashladni učinak Q_{0m} .



Sl. 31. Parni rashladni uređaj za dvotemperaturno hlađenje (a) i teorijski rashladni proces u T,s -dijagramu (b). DI dodatni isparivač, KN niskotlačni kompresor, KV visokotlačni kompresor, C kondenzator, Ph izmjenjivač za pothlađivanje, P prigušni ventili, M međuhladnjak, I isparivač, OK odvajaj kapljica

Procesom se odaje okolišu toplina

$$Q = G (h_4 - h_5). \quad (91)$$

Ukupna utrošena mehanička snaga za takav proces suma je snaga koja se troše radi ostvarivanja rashladnih učinaka Q_0 i Q_{0m} , pa je

$$P = P_n + P_m = G_n [(h_2 - h_1) + \gamma_n (h_4 - h_3)] + G_m \gamma_m (h_4 - h_3), \quad (92)$$

ili, ako se uzme u obzir izraz (90),

$$P = G_n (h_2 - h_1) + G (h_4 - h_3). \quad (93)$$

Pri određivanju faktora hlađenja potreban je poseban oprez. Naime, rashladni učinci Q_0 i Q_{0m} ne smiju se zbrajati jer je termodinamički za njihovo ostvarivanje potrebno utrošiti različitu kompenzacijsku energiju (mehanički rad), pa faktor hlađenja treba odrediti za svaki od tih učinaka posebno. Tako je za ostvarivanje rashladnog učinka Q_0 uz nisku temperaturu isparivanja T_0 faktor hlađenja

$$\varepsilon_n = \frac{Q_0}{P_n} = \frac{G_n (h_1 - h_9)}{G_n [(h_2 - h_1) + \gamma_n (h_4 - h_3)]}, \quad (94)$$

a za ostvarivanje rashladnog učinka Q_{0m} pri temperaturi T_{0m}

$$\varepsilon_m = \frac{Q_{0m}}{P_m} = \frac{G_m (h_3 - h_8)}{G_m \gamma_m (h_4 - h_3)}, \quad (95)$$

koji ima veću vrijednost nego ε_n . To znači da se za ostvarenu jedinicu rashladnog učinka Q_0 utroši više mehaničke snage nego za jedinicu rashladnog učinka Q_{0m} .

Procesom dvokratne kompresije i prigušivanja može se ostvariti kompresijski omjer 6...7 u svakom od cilindara kompresora, odnosno ukupni kompresijski omjer $p/p_0 = 6^2 \dots 7^2$. Ako kao radna tvar služi amonijak (NH_3), najniža temperatura isparivanja u procesu dvokratne kompresije i prigušivanja iznosi $\vartheta_0 = -54^\circ\text{C} \dots -58,7^\circ\text{C}$, a ako je to

difluordiklormetan, tada je $\vartheta_0 = -61,6^\circ\text{C} \dots -66,1^\circ\text{C}$. Pri tako niskim temperaturama isparivanja sve je više ograničen izbor radnih tvari, jer se mnoge od njih već nalaze blizu temperature zamrzavanja ili su je već prekoračile, pa ne mogu više prenositi energiju kružeći unutar rashladnog uređaja. Zbog toga su za hlađenje na još niže temperature potrebna druga rješenja.

Kaskadni rashladni procesi. Međuhladnjak M u rashladnom procesu dvokratne kompresije i prigušivanja može se shvatiti i kao izmjenjivač topline u kojemu se para stanja 2 (sl. 31) kondenzira pri konstantnom tlaku p_m , odajući toplinu radnoj tvari koja isparuje, pa je

$$Q_m = G (h_2 - h_8) = \beta G (h_3 - h_6). \quad (96)$$

Praktički nema zapreke da se ta izmjena topline umjesto miješanjem u međuhladnjaku obavi u nekom posrednom izmjenjivaču topline. Međutim, termodinamička je razlika u tome što je za prijenos topline Q'_m u izmjenjivaču potrebna temperaturna razlika ΔT_m , pa je (sl. 32)

$$Q'_m = G (h_2' - h_8') = \beta' G (h_3 - h_6). \quad (97)$$

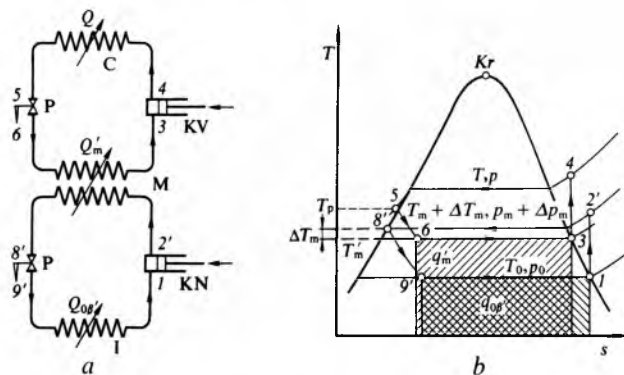
Zbog toga proces s posrednim izmjenjivačem topline postaje termodinamički lošiji, jer se umanjuje specifični rashladni učinak od $q_{0\beta} = h_1 - h_9$ na $q_{0\beta'} = h_1 - h_9'$ (sl. 32b), a ukupna se utrošena mehanička snaga povećava na vrijednost

$$P_{\beta'} = G (h_2' - h_1) + \beta' G (h_4 - h_3) > P_{\beta}, \quad (98)$$

pa je faktor hlađenja takva procesa

$$\varepsilon_{\beta'} = \frac{Q_{0\beta'}}{P_{\beta'}} = \frac{h_1 - h_9'}{(h_2' - h_1) + \beta' (h_4 - h_3)} < \varepsilon_{\beta}. \quad (99)$$

To je jedan od razloga primjene međuhladnjaka u kojemu se toplina izmjenjuje neposrednim miješanjem masa radne tvari. Osim toga, takav je međuhladnjak jeftiniji i manji od posrednog izmjenjivača u kojemu se toplina prenosi posredovanjem neke metalne stijenke.



Sl. 32. Parni kaskadni rashladni uređaj (a) i teorijski rashladni proces u T,s -dijagramu (b). KN niskotlačni kompresor, KV visokotlačni kompresor, I isparivač, M međupregrijač, C kondenzator, P prigušni ventili

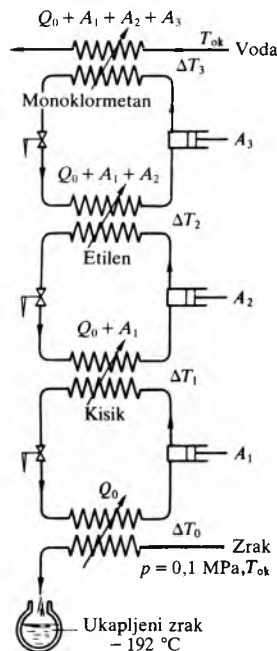
Ipak, rashladni proces višekratne kompresije i prigušivanja s posrednim izmjenjivačem topline dobiva posebno značenje za hlađenje do ekstremno niskih temperatura, npr. do $\vartheta_0 = -200^\circ\text{C}$.

Uvođenjem posrednog izmjenjivača topline razdvaja se jedinstveni rashladni proces na dva odvojena pojedinačna procesa, vezana samo posredno izmjenjivačem topline. To ujedno znači da se za radnu tvar u niskotlačnom stupnju može odabrati neka druga tvar, neovisno o tome koja je radna tvar odabrana za visokotlačni stupanj. Tako se radna tvar niskotlačnog stupnja može odabrati primjereno radnim uvjetima samo tog dijela procesa između temperatura T_m i T_0 i ne mora više zadovoljavati uvjete rada jedinstvenog procesa između temperatura T i T_0 .

Tako nanizani pojedinačni procesi jedan iza drugoga, obavljajući svaki svoj zadatak u svojem području tlakova i temperatura, čine tzv. *kaskadni rashladni proces*. Dakle, proces prikazan na slici 32 kaskadni je proces sa samo dva

stupnja, no može ih biti i više, već prema traženoj niskoj temperaturi. Što je tražena temperatura T_0 niža, kaskada mora imati više stupnjeva.

Kaskadnim uređajem sa tri stupnja (sl. 33) uspjelo je K. Olszewskom i S. Wroblewskom već potkraj prošlog stoljeća u Krakovu laboratorijski ukapljivati atmosferski zrak pri temperaturi $\vartheta_0 = -192^\circ\text{C}$. U trećem stupnju kaskade, u području, najviših temperatura, radna je tvar monoklormetan (CH_3Cl), u drugom stupnju, u srednjem temperaturnom području etilen (C_2H_4), a u prvom stupnju kaskade, gdje se u isparivaču postiže temperatura isparivanja $T_0 < 80\text{ K}$, isparuje kapljeviti kisik.



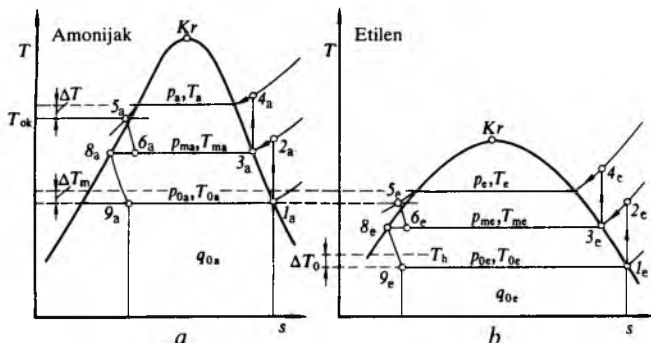
Sl. 33. Trostepeni kaskadni uređaj za ukapljivanje zraka

Pojedini stupnjevi kaskadnog rashladnog uređaja mogu biti i rashladni procesi dvokratne kompresije i prigušivanja (sl. 32). Primjer povezivanja dvaju procesa dvokratne kompresije i prigušivanja (sl. 30) u kaskadu prikazan je u dva toplinska T, s -dijagrama na slici 34. Za radnu tvar u gornjem stupnju predviđen je amonijak, a u donjem stupnju, već vrlo niske temperature (npr. -100°C), etilen. Rashladni učinak Q_{0e} ostvaruje se pri niskoj temperaturi T_{0e} u uređaju punjenom etilenom, uz specifični rashladni učinak $q_{0e} = (h_{1e} - h_{9e})$. Za to je potreban optok etilena u niskotlačnom dijelu

$$G_e = \frac{Q_{0e}}{q_{0e}}, \quad (100)$$

a u visokotlačnom dijelu

$$\beta_e G_e = \frac{h_{2e} - h_{8e}}{h_{3e} - h_{6e}} G_e. \quad (101)$$



Sl. 34. T, s -dijagrami rashladnog procesa sa dvije kaskade. a) amonijačni stupanj, b) etilenski stupanj

Budući da je specifični potrošak rada niskotlačnog kompresora $a_{ne} = (h_{2e} - h_{1e})$, a visokotlačnoga $a_{ve} = (h_{4e} - h_{3e})$, potrebna je snaga za pogon obaju kompresora etilenskog stupnja kaskade

$$P_e = G_e (a_{ne} + \beta_e a_{ve}) = G_e a_e, \quad (102)$$

a faktor je hlađenja etilenskog stupnja

$$\varepsilon_e = \frac{Q_{0e}}{P_e} = \frac{q_{0e}}{a_e} = \frac{q_{0e}}{a_{ne} + \beta_e a_{ve}}. \quad (103)$$

Toplina kondenzacije etilenskog stupnja kaskade iznosi

$$Q_c = Q_{0e} + P_e = Q_{0e} + G_e a_e \quad (104)$$

i prenosi se na isparivač rashladnog učinka $Q_{0a} = G_a q_{0a}$ amonijačnog stupnja kaskade, pa mora biti ispunjen uvjet da je $Q_{0e} = Q_{0a}$, odnosno

$$Q_{0e} + G_e a_e = G_a q_{0a}. \quad (105)$$

Odatle slijedi potrebni tok mase amonijaka kroz isparivač niskotlačnog dijela amonijačnog stupnja

$$G_a = \frac{G_e q_{0e} + G_e a_e}{q_{0a}} = G_e \frac{q_{0e} + a_e}{q_{0a}}, \quad (106)$$

a zatim kroz visokotlačni dio stupnja

$$\beta_a G_a = \frac{h_{2a} - h_{8a}}{h_{3a} - h_{6a}} G_e \frac{q_{0e} + a_e}{q_{0a}}. \quad (107)$$

Uz specifični utrošak rada $a_{na} = h_{2a} - h_{1a}$ i $a_{va} = h_{4a} - h_{3a}$ dobiva se ukupno potrebna snaga za pogon amonijačnih kompresora kaskade

$$P_a = G_a a_a = G_a (a_{na} + \beta_a a_{va}). \quad (108)$$

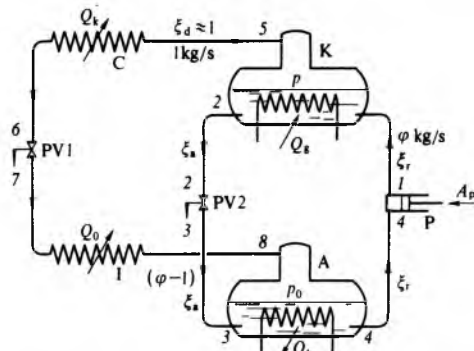
Jedinstveni faktor hlađenja rashladnih procesa povezanih u kaskadu određuje se prema (100), (102) i (108) i glasi

$$\varepsilon = \frac{Q_{0e}}{P_e + P_a} = \frac{G_e q_{0e}}{G_e a_e + G_a a_a} = \frac{\frac{q_{0e}}{a_e}}{1 + \frac{G_a a_a}{G_e a_e}} = \frac{\varepsilon_e}{1 + \frac{P_a}{P_e}}. \quad (109)$$

Izraz (109) pokazuje da je faktor hlađenja kaskade proporcionalan s faktorom hlađenja etilenskog stupnja ε_e , pa pri izboru radnih parametara toga stupnja treba nastojati da se postigne što veći mogući ε_e , tj. da bude $P_e > P_a$. Kad je $P_e = P_a$, faktor hlađenja kaskade ε polovična je vrijednost faktora ε_e .

Apsorpcijski rashladni procesi

Rashladni učinak Q_0 pri nekoj niskoj temperaturi $T_0 < T_{0k}$ može se postići i apsorpcijskim rashladnim procesima, koji se razlikuju od kompresijskih samo po tome što je mehanički kompresor zamijenjen termičkim kompresorom (sl. 35). To znači da kao kompenzacijska energija više ne služi mehanički rad, već toplinska energija privedena procesu pri temperaturi T_g višoj od temperature okoliša T_{0k} . Izvor te ogrjevne topline



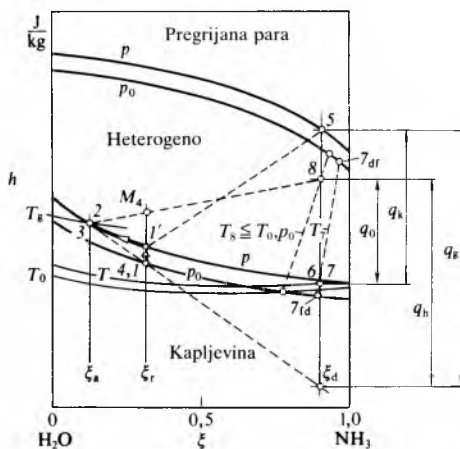
Sl. 35. Osnovni apsorpcijski rashladni uređaj. K kuhalo, C kondenzator, I isparivač, A apsorber, P pumpa, PV1 i PV2 prigušni ventili

može biti vodena para, neka vruća kapljevina ili vrući plinovi. Prednost je u tome da je kompenzacijska energija obično neka jeftina otpadna toplina.

Međutim, da bi se upotrijebio termički kompresor, potrebno je umjesto jednostavne radne tvari upotrijebiti smjesu dviju tvari. Jedna je od njih zapravo rashladna radna tvar koja kondenzira u kondenzatoru C na tlaku p i isparuje u isparivaču I na tlaku p_0 kao u kompresijskom rashladnom uređaju, a druga radna tvar mora imati sposobnost da prvu apsorbira (otopi) da bi kao smjesa kružila u krugu termokompresora. Većina industrijskih apsorpcijskih rashladnih uređaja i malih kućnih apsorpcijskih hladnjaka rade sa smjesom amonijaka i vode ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$). Za hlađenje u uređajima za klimatizaciju ponekad se upotrebljava smjesa vode i litij-bromida ($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$).

Da bi se odredilo fizikalno i toplinsko stanje neke dvojne smjese, kakva je $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$, nije dovoljno poznavati samo njezin tlak i temperaturu, već i udjele ξ pojedinih sastojaka u smjesi, npr. kg NH_3 u kg smjese NH_3 i H_2O . Tako udio $\xi = 1$ znači čisti NH_3 , $\xi = 0$ čistu vodu, a npr. udio $\xi = 0,3$ znači da takva smjesa sadrži 0,3 kg NH_3 u kilogramu smjese NH_3 i H_2O .

Tok apsorpcijskoga rashladnog procesa može se pratiti u Merkelovom toplinskom h, ξ -dijagramu za dvojni smjesu $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ (sl. 36). Dovođenjem energije Q_g kuhlalu K (sl. 35) u kojemu vrije smjesa stvara se manje ili više čista para onog sudionika koji ima niže vrelište pri tlaku p , a to je u promatranom primjeru amonijak. Dakle, na izlazu iz kuhala zasićena para, stanje 5 (sl. 36), praktično je čisti amonijak ($\xi_d \approx 1$). Nastala je vrenjem kapljevite smjese $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ s udjelom amonijaka ξ_r , stanje 1', pri temperaturi T_1 i tlaku p .



Sl. 36. Apсорpcijski rashladni proces, prikazan na sl. 35, u h, ξ -dijagramu dvojne smjese $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$

Odvođenjem topline kondenzacije Q_k u kondenzatoru C, para amonijaka kondenzira od stanja 5 do 6 pri tlaku p i uz $\xi_d = \text{const.}$ u kapljeviti amonijak stanja 6, pothlađen na temperaturu rashladne vode T . Prigušivanjem pomoću ventila PV1, uz $h_6 = h_7 = \text{const.}$, položaji se točaka 6 i 7 u h, ξ -dijagramu pokrivaju jer je $h = \text{const.}$ i $\xi_d = \text{const.}$ Ali dok stanje 6 znači pothlađenu kapljevinu tlaka p , stanje 7 predstavlja heterogenu smjesu koja se sastoji od vrlo malo pare stanja 7_{dr} i pretežno kapljevine stanja 7_{id} pri tlaku p_0 . Pri tome se temperatura snizi na $T_7 < T_6$. Nakon prigušivanja smjesa 7 ulazi u isparivač I i dovođenjem se topline Q_0 ostvaruje rashladni učinak isparujući od stanja 7 do 8, koje može ležati najviše na izoterma tražene temperature hlađenja T_0 , dakle $T_8 \leq T_0$ pri tlaku p_0 . Iz isparivača para stanja 8 ulazi u krug termokompresora u apsorber A gdje se sastaje sa smjesom s manjim udjelom amonijaka ξ_a u stanju 3. U smjesi se para apsorbira (pravac miješanja 8-3) uz odvođenje topline apsorpcije Q_h rashladnom vodom temperature T i uz promjenu od stanja M_4 do 4 pri niskom tlaku p_0 . Tada je smjesa, koja napušta apsorber, ponovno obogaćena amonijakom (udio ξ_r), a pumpa P tlačí je u kuhlalu na visoki tlak p . Iz te

amonijakom obogaćene smjese s udjelom ξ_r u kuhlalu se dovođenjem topline Q_g iskuhava pretežno amonijačna para ($\xi_d \approx 1$), stanje 5, koja ponovno odlazi u kondenzator C, a u kuhlalu ostaje osiromašena smjesa s udjelom amonijaka ξ_a u stanju 2. Ta se smjesa prigušuje u prigušnom ventilu PV2 od tlaka p na niski tlak p_0 , stanje 3, i uvodi u apsorber. Oba kruga kolanja radne smjese unutar uređaja time su zatvorena i proces se može ponavljati neograničeno.

Bilanca tvari. Kuhlalu apsorpcijskoga rashladnog uređaja ključni je aparat za koji se postavlja bilanca tvari. U ustaljenom pogonu količina amonijaka što ulazi u kuhlalu mora se naći u tokovima koji ga napuštaju, dakle

$$\varphi \xi_r = (\varphi - 1) \xi_a + \xi_d, \quad (110)$$

pa je specifični tok φ smjese s udjelom amonijaka ξ_r koju pumpa mora dobavljati u kuhlalu

$$\varphi = \frac{\xi_d - \xi_a}{\xi_r - \xi_a}, \quad (111)$$

dok se u apsorber prigušuje specifični tok

$$\varphi - 1 = \frac{\xi_d - \xi_r}{\xi_r - \xi_a}. \quad (112)$$

Razlika $(\xi_r - \xi_a)$ u nazivniku izraza (111) i (112) naziva se širinom iskuhavanja i mnogo utječe na specifični optok φ . Za smjesu $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ obično je $\xi_r - \xi_a = 0,1 \dots 0,25$, a za smjesu $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$, $\xi_r - \xi_a = 0,04 \dots 0,06$, što pokazuje da je u apsorpcijskim rashladnim uređajima sa smjesom $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ potreban relativno mnogo veći specifični optok smjese φ , a zbog toga i veća cirkulacijska pumpa.

Bilanca energije. Suma dovedenih energija mora biti jednaka sumi odvedenih energija u ustaljenom pogonu, pa je

$$Q_g + A_p + Q_0 = Q_k + Q_h, \quad (113)$$

gdje je Q_g toplina dovedena kuhlalu, A_p rad pumpe, Q_0 postignuti rashladni učinak, Q_k toplina odvedena u okoliš i Q_h toplina odvedena iz apsorbera.

Dobrota apsorpcijskoga rashladnog procesa procjenjuje se stupnjem pretvorbe

$$\xi = \frac{Q_0}{Q_g + A_p} \approx \frac{Q_0}{Q_g}, \quad (114)$$

koji kaže koliko se rashladnog učinka Q_0 može postići utroškom jedinice ogrjevne topline Q_g u kuhlalu. Rad pumpe A_p toliko je malen prema toplini Q_g da se može zanemariti, ili kao ekvivalentna toplina pribrojiti toplini Q_g .

Uređaj (sl. 35) i proces u njemu (sl. 36) osnovni su oblik apsorpcijskoga rashladnog uređaja, ali u praktičnoj izvedbi moguće su preinake i dopune radi postizanja veće ekonomičnosti. Prikazani proces može se smatrati osnovnim, a njegov stupanj pretvorbe označiti sa ξ_{id} . U uređajima bez gubitaka vrijednosti ξ_{id} mnogo su veće od 1, no u stvarnosti apsorpcijski uređaji imaju stupanj pretvorbe jedva $\xi = 0,7$, a mali apsorpcijski kućni hladnjaci oko $\xi = 0,2 \dots 0,25$.

Za jednaki ostvareni rashladni učinak apsorpcijski rashladni uređaji veći su potrošači energije od kompresijskih parnih rashladnih uređaja, ali zato troše jeftinu otpadnu toplinsku energiju.

RADNE TVARI U RASHLADNIM UREĐAJIMA

Unutar rashladnog uređaja cirkulira radna tvar, prijenosnik energije. Radna tvar preuzima toplinsku energiju u jednom od dijelova rashladnog uređaja, prenosi je na drugi dio, odakle se predaje okolišu. Zbog toga radne tvari kojima se pune rashladni uređaji moraju zadovoljavati posebne termodinamičke, sigurnosne i fizikalno-kemijske zahtjeve. Njihova svojstva moraju biti takva da se toplina s niže na višu temperaturu može prenositi pod uvjetima koji vladaju unutar rashladnog uređaja i u okolišu koji ga okružuje.

Mnogo je tvari koje bi se mogle odabrati kao radne tvari u rashladnim uređajima, ali većina ih ima neko nepoželjno svojstvo koje ograničuje ili čak sprečava njihovu upotrebu.

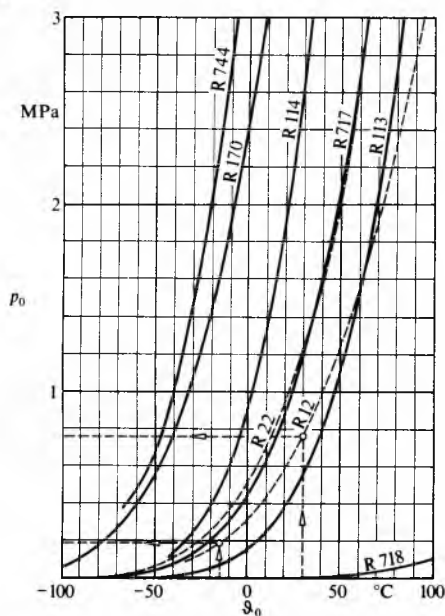
Internacionalno označivanje. Neka se tvar može opisati svojom kemijskom formulom, ili nazvati stručnim, odnosno komercijalnim nazivom. Nastojeći da se označivanje radnih tvari u rashladnoj tehnici svede na kratke i jasne oznake, internacionalno je prihvaćen jedinstveni način njihova označivanja. Za svaku radnu tvar u rashladnim uređajima oznaka započinje velikim slovom R (refrigerant), a iza njega slijede dvije ili tri brojke.

Radne tvari anorganskog porijekla karakterizira prva brojka koja je uvijek 7, što upravo označuje da pripadaju anorganskim tvarima, dok preostale dvije brojke predstavljaju zaokruženu vrijednost relativne molekularne mase tvari. Tako je amonijak (NH_3) označen sa R 717, ugljik-dioksid (CO_2) sa R 744, sumpor-dioksid (SO_2) sa R 764, a voda (H_2O) sa R 718.

Radne tvari organskog porijekla u rashladnoj su tehnici neki ugljikovodici, a posebno halogenirani derivati metana i etana. Za tu grupu radnih tvari internacionalna oznaka počinje također slovom R, a zatim slijede dvije ili tri brojke. Posljednja brojka označuje broj fluorovih atoma u molekuli, pretposljednja broj vodikovih atoma uvećan za jedinicu, a brojka ispred toga broj ugljikovih atoma umanjnjen za jedinicu. U spojevima sa samo jednim ugljikovim atomom ta bi brojka bila 0 i ne piše se, pa takvi spojevi imaju u oznaci samo dvije brojke. U molekulama mogu biti još i atomi klora, ali oni ne ulaze u oznaku. Tako je označen npr. metan CH_4 sa R 50, etilen C_2H_4 sa R 150, etan C_2H_6 sa R 170, propan C_3H_8 sa R 290, difluormonoklormetan CHF_2Cl sa R 22, difluordiklormetan CF_2Cl_2 sa R 12, monoklormetan CH_3Cl sa R 40 i trifluortrikloreten $\text{CFCl}_2\cdot\text{CF}_2\text{Cl}$ sa R 113.

Termodinamička svojstva. U rashladnoj je tehnici poželjno da radna tvar ima: nisku temperaturu vrenja pri standardnom atmosferskom tlaku ($p_{\text{ok}} = 0,1013 \text{ MPa}$); umjeren omjer tlakova kondenzacije i isparivanja p/p_0 , uz $p_0 \cong p_{\text{ok}}$; što veću latentnu toplinu r pri promjeni agregatnih stanja; što manji specifični volumen pare v'' , odnosno što veću gustoću pare ρ'' pri usisavanju pare iz isparivača u kompresor; što više položenu kritičnu točku ($p_{\text{Kr}}, T_{\text{Kr}}$) s obzirom na područje tlakova i temperatura u kojima se odvija rashladni proces.

Za neke radne tvari prikazane su na slici 37 temperature vrenja θ_0 prema pripadnom tlaku zasićenja p_0 .

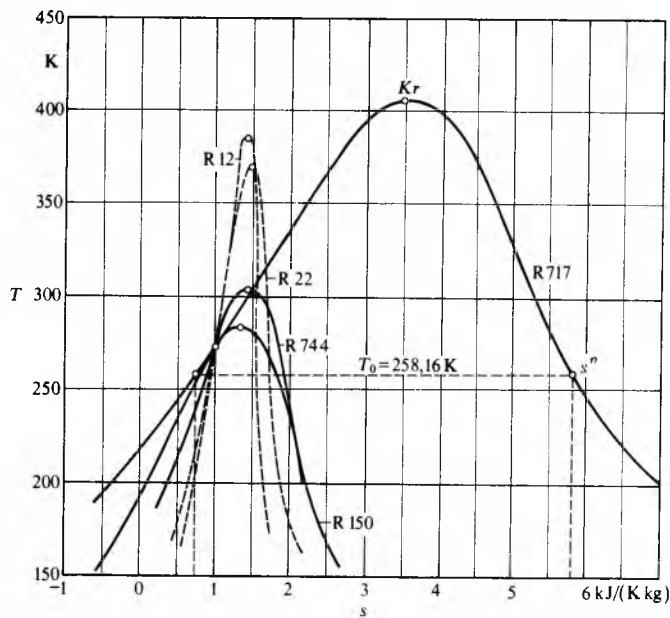


Sl. 37. Linije napetosti (zasićenja) pare za neke radne tvari koje se upotrebljavaju u rashladnoj tehnici

Za svaku radnu tvar može se pomoću pripadne linije napetosti pare odrediti i pripadni tlak u kondenzatoru p za određenu temperaturu kondenzacije θ , te tlak isparivanja p_0 za temperaturu isparivanja u isparivaču θ_0 . Tako je npr. za R 12 pri temperaturi kondenzacije $\theta = +30^\circ\text{C}$, tlak konden-

zacije $p = 0,7581 \text{ MPa}$, a pri temperaturi isparivanja $\theta_0 = -15^\circ\text{C}$, tlak u isparivaču $p_0 = 0,1862 \text{ MPa}$. Računanjem kvocijenta $p/p_0 = 0,7581/0,1862 = 4,071$ dobiva se i pripadni kompresijski omjer u radu kompresora.

Latentne topline isparivanja, odnosno kondenzacije najpreglednije se uspoređuju na T, s -dijagramu (sl. 38) pomoću širina njihovih zasićenih područja za jednaku temperaturu T_0 . Zasićeno područje svake radne tvari s lijeve je strane ograničeno donjom graničnom linijom, a s desne gornjom graničnom linijom, koje se sastaju u kritičnoj najvišoj točki zasićenog područja Kr. Tako se može uspoređivati i položaj kritične točke različitih radnih tvari s obzirom na radno područje rashladnog uređaja.



Sl. 38. Zasićena područja u T, s -dijagramu radnih tvari koje se upotrebljavaju u rashladnoj tehnici

Kad se očitaju pripadne vrijednosti entropije s'' i s' na gornjoj, odnosno donjoj graničnoj liniji pri nekoj temperaturi isparivanja, npr. za $T_0 = 258,16 \text{ K}$, može se izračunati prema drugom glavnom zakonu termodinamike (2) pripadna toplota isparivanja r_0 . Ona je za R 717:

$$r_0 = T_0(s'' - s') = 258,16(5,82 - 0,735) = 1312,69 \text{ kJ/kg,}$$

za R 12:

$$r_0 = T_0(s'' - s') = 258,16(1,565 - 0,939) = 161,48 \text{ kJ/kg,}$$

a za R 150:

$$r_0 = T_0(s'' - s') = 258,16(1,825 - 0,778) = 270,29 \text{ kJ/kg.}$$

Fiziološka i sigurnosna svojstva. Zbog sigurnosti poželjno je da radna tvar: a) nije otrovna ili opasna za ljude, životinje i biljke, da ne nadražuje kožu, sluznicu i dišne organe, da ne onečišćuje živežne namirnice i vodu; b) nije zapaljiva, odnosno da njezine pare pomiješane sa zrakom neće eksplodirati, bilo u čistom stanju, ili u prisutnosti vlage ili mazivog ulja; c) da ima takav kemijski sastav da se njezina prisutnost u okolišu rashladnog uređaja može jednostavno otkriti i identificirati jednostavnim kemijskim reagensima, odnosno fizikalnim metodama; d) da ne uzrokuje koroziju, da ne nagriza ili otapa konstrukcijske materijale rashladnog uređaja, bilo u čistom stanju, ili u prisutnosti vlage ili mazivog ulja; e) da kemijski ne reagira s mazivim uljem pri radnim uvjetima unutar rashladnog uređaja; f) da je fizikalno i kemijski stabilna, da unutar rashladnog uređaja ne stvara talog ili čvrste produkte raspadanja, ili plinove koji se ne kondenziraju u rashladnom uređaju.

Osim ostalih važnih svojstava radnih tvari, potrebno je poznavati i njihovo fiziološko štetno djelovanje na ljude, životinje i biljke. Da bi se fiziološko i toksično djelovanje

pojedinih radnih tvari moglo ocjenjivati i međusobno uspoređivati, prihvaćena je klasifikacija stupnjeva štetnosti (tabl. 2), prema istraživanjima na zamorcima u Underwriter's Laboratories, SAD. Ta se štetnost procjenjuje na osnovi udjela radne tvari u zraku.

Tablica 2
FIZIOLOŠKO DJELOVANJE RADNIH TVARI

Stupanj štetnosti	Volumni udio	Djelovanje
1	0,5...1%	uzrokuje smrt unutar 5 min
2	0,5...1%	uzrokuje smrt unutar 1 sata
3	2,0...2,5%	uzrokuje smrt unutar 1 sata ili ostavlja trajne štetne posljedice
4	2,0...2,5%	uzrokuje tek nakon 2 sata primjetno škodljive posljedice
5	do 20%	ne uzrokuje ni nakon 2 sata nikakvih trajnih oštećenja
6	više od 20%	ne uzrokuje ni nakon 2 sata nikakve posljedice

Nakon tako nabrojanih zahtjeva koje bi istodobno morala zadovoljavati neka radna tvar, može se zaključiti da takva tvar ne postoji. Izbor radne tvari, naime, uvijek ovisi o ocjeni veće ili manje važnosti svojstava za provedbu nekog hlađenja pri odvijanju rashladnog procesa u određenom području temperatura i tlakova.

Izbor radne tvari. Od svih tvari koje bi mogle poslužiti kao radna tvar u rashladnim uređajima u najuži izbor dolazi samo njih desetak. Tablica 3 prikazuje fizikalna i sigurnosna svojstva najčešće upotrebljivanih radnih tvari u suvremenoj rashladnoj tehnici prema kojima se mogu tvari uspoređivati i odabirati. Navedene vrijednosti za tlak isparivanja p_0 , kompresijski omjer p/p_0 i volumni specifični rashladni učinak $q_{ov} = q_0 \varrho_1$ navedene su za prilike kad se radna tvar upotrebljava za provedbu normalnoga rashladnog procesa u temperaturu isparivanja -15°C , temperaturu pothlađenog kondenzata $+25^\circ\text{C}$ i temperaturu kondenzacije $+30^\circ\text{C}$.

Amonijak (NH_3 , oznaka R 717) radna je tvar anorganskog porijekla koja se često upotrebljava u rashladnoj tehnici. Plin amonijak odavno je poznat i uvijek je prisutan kad se raspadaju organski otpaci. Industrijski se dobiva uglavnom sintezom dušika i vodika. U suvremenoj rashladnoj tehnici R 717 jedva se može zamijeniti u velikim industrijskim rashladnim uređajima. Ledište mu je nisko ($-77,9^\circ\text{C}$), a temperatura je kritičnog stanja ($132,4^\circ\text{C}$) visoko iznad

područja odvijanja rashladnih procesa. Tlak je isparivanja u normalnom procesu $p_0 = 0,2363\text{ MPa}$, dakle $p_0 > p_{ok}$, pa će u slučaju propusnosti uređaja amonijak izlaziti u okoliš i svojim ostrim mirisom najaviti kvar. Kad je $p_0 < p_{ok}$, okolišni vlažni zrak ulazi u uređaj i nastaju smetnje. Tlak je kondenzacije umjeren ($p = 1,167\text{ MPa}$), a također i kompresijski omjer ($p/p_0 = 4,94$). Od svih danas upotrebljivanih radnih tvari R 717 ima najveći volumni specifični rashladni učinak $q_{ov} = q_0 \varrho_1 = 2214,2\text{ kJ/m}^3$, pa su dimenzije kompresora i ostalih dijelova uređaja relativno male, što ga svrstava na prvo mjesto kao radnu tvar za industrijske rashladne uređaje.

Međutim, R 717 svrstan je u stupanj štetnosti 2, pa može biti i vrlo opasan. To ipak treba shvatiti uvjetno. Naime, volumni udio amonijaka od $0,5\ldots0,6\%$ u zraku intenzivno nadražuje sluznicu, pa i površinu kože, a to sili čovjeka da neodložno napusti zatrovanu prostoriju prije no što može postati za život opasno.

Od navedenih anorganskih tvari samo je R 717 zapaljiv i eksploziv. Temperatura je zapaljenja 651°C , a eksplozivnost je kad volumni udio u zraku iznosi $15,3\ldots27\%$. Amonijačne pare na izlazu iz uske cijevi gore mirno, kao npr. gradski plin, no pomiješane sa zrakom unutar navedenih granica nakon paljenja žestoko eksplodiraju.

R 717 vrlo je stabilan kemijski spoj i u dodiru s vlagom i mazivim uljem. Kapljeviti amonijak praktički se ne miješa s mineralnim uljima, a zbog toga što je manje gustoće, pliva povrhu ulja kao odvojena kapljevita faza.

R 717 miješa se s vodom u svim omjerima i intenzivno apsorbira u vodi, čak do 900 L u litri vode. Zbog toga je R 717 neosjetljiv na vlagu unutar rashladnog sustava, što je poželjno u velikim industrijskim uređajima.

U prisutnosti vlage R 717 poprima svojstva lužine, pa postaje agresivan prema metalima. Napada sve metale osim željeza i čelika, a osobito bakar i njegove legure. Zbog toga amonijačni rashladni uređaj nema dijelova od obojenih metala.

Prisutnost R 717 dokazuje se u reakciji s fenolfaleinskim papirom uz prisutnost vlage; papir poprima intenzivnu purpurnu boju. Manje je pogodna reakcija sa sumpor-dioksidom koji sa R 717 tvori gustu bijelu maglu. Za otkrivanje amonijaka već otopljenog u vodi najčešće se upotrebljava crveni lakmusov papir koji se u prisutnosti R 717 oboji modro.

Dakle, R 717 uvjetno je opasan kemijski spoj koji se zbog izvrsnih termodinamičkih svojstava ipak mnogo upotrebljava kao radna tvar u industrijskim rashladnim uređajima, ali uvijek s velikom pažnjom i pod stručnim nadzorom.

Voda (H_2O , oznaka R 718) odmah se isključuje kao radna tvar u užem smislu jer se ledi već pri 0°C . Voda se može primijeniti samo ako se ne traže niže temperature od 0°C .

Tablica 3
FIZIKALNA SVOJSTVA RADNIH TVARI

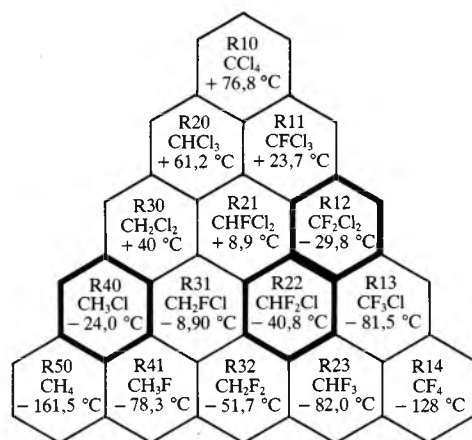
Spojivi	Oznaka	Formula	Relativna molekularna masa	Ledište $^\circ\text{C}$	Kritična temperatura $^\circ\text{C}$	Tlak isparivanja p_0 MPa	Kompresijski omjer $\frac{p}{p_0}$	Volumni specifični rashladni učinak q_{ov} kJ/m^3	Stupanj štetnosti	Plamište $^\circ\text{C}$	Volumni udio u eksplozivnoj smjesi %
Anorganski	R 717	NH_3	17,03	$-77,9$	132,4	0,2363	4,94	2214,2	2	651	15,3...27
	R 718	H_2O	18,02	0	374,2	—	—	—	6	—	—
	R 744	CO_2	44,01	$-56,6$	31	2,279	3,14	9559,0	5	—	—
	R 764	SO_2	64,06	$-75,5$	157,5	0,0807	5,73	781,2	1	—	—
Ugljikovodici	R 50	CH_4	16,04	$-182,5$	$-82,5$	—	—	—	5...6	540	5...15
	R 170	C_2H_6	30,07	$-182,3$	$+32,2$	—	—	—	5...6	430	2,9...13
	R 290	C_3H_8	44,09	$-188,0$	$+96,8$	0,289	3,74	1933,3	5...6	510	2,1...9,5
Halogenirani derivati metana i etana	R 11	CFCl_3	137,38	-111	198,0	0,0201	6,27	54,75	5	—	—
	R 12	CF_2Cl_2	120,92	-155	112,0	0,1826	4,07	1333,2	6	—	—
	R 13	CF_3Cl	104,47	-181	28,8	—	—	—	6	—	—
	R 22	CHF_2Cl	86,48	-160	96,0	0,2971	4,04	2170,3	5	—	—
	R 40	CH_3Cl	50,49	$-97,6$	143,0	0,1458	4,48	1282,0	3...4	632	8...18
	R 113	$\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$	187,39	$-36,6$	214,1	0,0069	7,86	76,50	4...5	—	—
	R 114	$\text{C}_2\text{F}_6\text{Cl}_2$	170,93	$-94,0$	145,7	0,0466	5,47	397,94	6	—	—

Ugljik-dioksid (CO_2 , oznaka R 744) ima dovoljno nisko ledište ($-56,6^\circ\text{C}$), ali je temperatura kritičnog stanja $+31^\circ\text{C}$, što je red veličine temperature kondenzacije, pa je negativni utjecaj prigušivanja kondenzata intenzivan, a pogon uređaja nesiguran. Osim toga, tlak je isparivanja $p_0 = 2,279\text{ MPa}$ pri temperaturi isparivanja -15°C , a tlak kondenzacije čak $p = 7,156\text{ MPa}$ pri $+30^\circ\text{C}$, što postavlja izuzetne zahtjeve na čvrstoću i brtvenje uređaja. Usprkos velikom volumnom specifičnom rashladnom učinku $q_{0v} = 9559\text{ kJ/m}^3$ (mali kompresori), R 744 se danas više ne upotrebljava kao radna tvar.

Sumpor-dioksid (SO_2 , oznaka R 764) zbog svoje agresivnosti i stupnja štetnosti 1 (s vlagom stvara sumpornu kiselinu) danas više ne dolazi u obzir kao radna tvar u rashladnoj tehnici, već se zamjenjuje radnim tvarima organskog porijekla.

Ugljikovodici i halogenirani derivati metana i etana (tabl. 3) organske su radne tvari koje se danas upotrebljavaju u rashladnoj tehnici. Ugljikovodici su pogodni za rad u posebnim rashladnim uređajima za vrlo niske temperature isparivanja u donjim stupnjevima kaskadnoga rashladnog uređaja, npr. etilen (R 150), ali svi su zapaljivi i vrlo eksplozivni.

Neki derivati metana i etana, kao npr. R 12 i R 22, a manje R 40, zbog svojih odličnih svojstava posebno su se potvrdili kao radne tvari u rashladnim uređajima. Od halogeniranih se derivata metana u rashladnoj tehnici upotrebljavaju oni u kojima su jedan ili više vodikovih atoma zamijenjeni atomima fluora i klora. Tako npr. od R 50 nastaje R 12 ili R 22. Postoji 14 takvih mogućih kombinacija (sl. 39), pa tako nastaju derivati vrlo različitih fizikalno-kemijskih svojstava. Pripadne temperature, navedene na sl. 39, vrelišta su pri normalnom atmosferskom tlaku. U grupi halogeniranih derivata metana nalaze se najviše upotrebljavani R 12 i R 22, koji su bez mirisa i okusa, neotrovni i kemijski izvanredno stabilni, ali i kloroform (R 20), koji ima snažno anestetičko djelovanje i može biti vrlo opasan, kao i monoklormetan (R 40), koji se donedavno mnogo upotrebljavao u malim rashladnim uređajima, a ima također opojno djelovanje, gori i može eksplodirati.



Sl. 39. Fluorirani i klorirani derivati metana

Na analogan način nastaje i 27 derivata etana (R 170), od kojih npr. R 113, R 114 i još neki drugi također služe kao radne tvari pod posebnim uvjetima.

Difluordiklormetan (CF_2Cl_2 , oznaka R 12) radna je tvar organskog porijekla, pripada grupi freona (v. Fluor, TE 5, str. 503) i ima vrlo široku primjenu u najmanjim rashladnim uređajima kućnih i komercijalnih hladnjaka, te u posebnim industrijskim i klimatizacijskim uređajima. Razlog su tome njegova izvanredna fizikalna i kemijska svojstva. R 12 ima ledište na -155°C , a temperatura je kritičnog stanja $+112^\circ\text{C}$. Tlak isparivanja u normalnom procesu upravo je idealan i iznosi $p_0 = 0,1826\text{ MPa}$, tlak je kondenzacije nizak ($p = 0,743\text{ MPa}$), a kompresijski omjer samo $p/p_0 = 4,07$. Volumni je specifični rashladni učinak $q_{0v} = q_0 q_1' = 1333,2$

kJ/m^3 , manji nego za R 717, pa za jednaki rashladni učinak Q_0 kompresor sa R 12 mora imati $2214,2/1333,2 = 1,66$ puta veći usisni volumen V_s . Upravo zato je R 12 pogodan za primjenu u najmanjim rashladnim uređajima, jer i najmanji rashladni uređaji ostaju dovoljno veliki za ekonomičnu izvedbu. R 12 nema mirisa ni okusa, a ima stupanj štetnosti 6, dakle kad je njegov volumni udio u zraku i veći od 20%, nema štetnog djelovanja na ljude, životinje i biljke. Ako tada i nastaju teškoće u disanju, razlog tome nije R 12, već smanjeni udio kisika u smjesi zrak/R 12. Stupanj štetnosti 6 svrstava R 12 kao radnu tvar na prvo mjesto za kućne i trgovačke hladnjake, rashladne uređaje za ugostiteljstvo, prehrambenu industriju, medicinske ustanove, i pogotovo za klimatizacijske uređaje.

R 12 kemijski je vrlo stabilan zasićeni spoj i ne napada materijale rashladnih uređaja, kao što su čelik, lijevano željezo, obojeni metali i njihove legure. Međutim, halogenirani derivati metana izrazita su organska otapala, pa treba biti oprezan pri izboru brtvenih materijala. Ne dolaze u obzir brtveni materijali na osnovi prirodnog kaučuka, već pogodni polimeri, kao npr. teflon, perbunan, neopren itd.

R 12, za razliku od R 717, miješa se s mineralnim uljima u svim omjerima, ali se ne miješa s vodom. Na temperaturi od 0°C otapa vrlo malo vode, najviše do masenog udjela 0,0025%. O tome treba posebno voditi računa pri projektiranju i održavanju rashladnih uređaja sa R 12.

Difluoromonoklormetan (CHF_2Cl , oznaka R 22) najbliži je srodnik R 12 u grupi freona. Upotrebljava se kao radna tvar kao i R 12, ali pretežno u uređajima većih rashladnih učinaka pri relativno nižim temperaturama. Naime, R 22 ima temperaturu zamrzavanja čak -160°C , a temperaturu kritičnog stanja još uvijek dosta visoku, $+96^\circ\text{C}$. Tlak isparivanja ima u normalnom procesu viši nego R 12, pa čak i nešto viši nego R 717 i iznosi $p_0 = 0,2971\text{ MPa}$, tlak je kondenzacije $p = 1,2\text{ MPa}$, a kompresijski omjer samo $p/p_0 = 4,04$, pa je vrlo sličan amonijaku. Volumni je rashladni učinak $q_{0v} = 2170,3\text{ kJ/m}^3$, pa za jednak rashladni učinak kompresor treba imati samo za $2214,2/2170,3 = 1,02$ veći usisni volumen V_s nego za R 717. Dakle, kompresori za R 22 i R 717 praktički su jednakih dimenzija za jednaki rashladni učinak.

R 22 ima stupanj štetnosti 5, pa je još posve bezopasan kemijski spoj. Ostala su svojstva približno jednaka R 12.

Metil-klorid (CH_3Cl , oznaka R 40) mnogo se upotrebljavao kao radna tvar u malim i srednjim rashladnim uređajima prije pojave R 12 poslije drugoga svjetskog rata. R 40 ima dobra termodinamička svojstva, no ima stupanj štetnosti 3...4, pa može biti opasan za zdravlje, osim toga zapaljiv je i eksplodira kad mu je volumni udio u zraku 8...18%. Zbog toga se danas više ne upotrebljava.

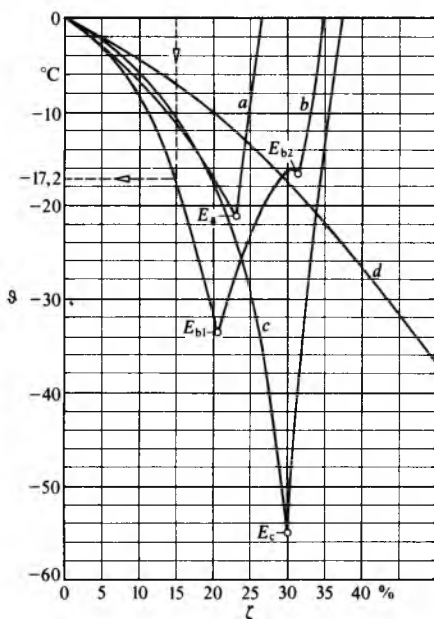
R 11, R 113 i R 114 su freoni s veoma malim volumnim specifičnim rashladnim učinkom q_{0v} , pa se relativno velika masa radne tvari nalazi u optoku unutar rashladnog uređaja za iole veće rashladne učinke. Tada turbokompresori dolaze u obzir kao rashladni kompresori.

Sekundarni nosioci topline

U nekim postupcima hlađenja predaje se toplina hlađenog tijela primarnoj radnoj tvari unutar isparivača posredovanjem sekundarne rashladne tvari, koja mora biti kapljevinu pogodna da prenosi toplinu, a pri hlađenju na niske temperature ne smije se smrznuti. Takve se kapljevine nazivaju prenosio-cima topline ili sekundarnim rashladnim tvarima (rasoline, glikolne smjese i halogenirani ugljikovodici).

Rasoline su u rashladnoj tehnici otopine soli u nekoj kapljevinu, najčešće vodi. Tokom zaleđivanja temperatura rasoline ne ostaje stalna, kao što je to slučaj kad se zaleđuju čiste tvari. Zaleđivanje započinje na višoj, a završava na nižoj temperaturi (v. Fazne ravnoteže, TE 5, str. 386). Što je veći maseni udio soli ζ u smjesi, temperatura je početka zaleđivanja niža (sl. 40). Npr. za smjesu magnezij-klorida (MgCl_2) i vode s masenim udjelom $\zeta = 15\%$ temperatura je početka zaleđivanja $-17,2^\circ\text{C}$, pa se rasolina tog sastava neće zaleđiti

sve do te temperature. Međutim, povećavanjem udjela magnezij-klorida do $\xi_{Eb} = 20,5\%$ temperatura se zaleđivanja snizuje do najniže moguće, $\vartheta_{Eb1} = -33,6^\circ\text{C}$. Postignuta je eutektička ili kriohidratna točka E_{b1} . Osobitost je zaleđivanja eutektika da se leđi na određenoj temperaturi, kao čista tvar.



Sl. 40. Temperatura početka zaleđivanja solnih otopina. a NaCl + H₂O, b MgCl₂ + H₂O, c CaCl₂ + H₂O, d etilen-glikol + H₂O

Sve solne otopine ili rasoline imaju jednu ili više kriohidratnih točaka. Tako smjesa kalcij-klorida (CaCl₂) i vode ima kriohidratnu točku uz maseni udio soli od 29,9% i stalnu temperaturu zaleđivanja $\vartheta_{Ec} = -55^\circ\text{C}$, a smjesa natrij-klorida (NaCl) i vode uz maseni udio soli od 23,1% i stalnu temperaturu zaleđivanja $\vartheta_{Ea} = -21,2^\circ\text{C}$. Smjesa magnezij-klorida i vode ima osim već navedene kriohidratne točke (udio 20,5%, $-33,6^\circ\text{C}$) još jednu uz udio soli od 31,3% i temperaturu zaleđivanja $\vartheta_{Eb2} = -16,7^\circ\text{C}$ (sl. 40).

Svakim povećavanjem udjela soli iznad eutektičkog udjela povisuje se temperatura početka zamrzavanja.

Dakle, dodavanjem neke soli vodi dobiva se pogodna kapljevit smjesa za prijenos topline pri temperaturi nižoj od 0°C . Solne otopine snažno korodiraju građevne materijale uređaja, pa se prije primjene moraju neutralizirati do vrijednosti pH 7,0...8,5.

Glikolne smjese. Etilen-glikol i propilen-glikol kapljevine su koje pomiješane s vodom snizuju temperaturu zaleđivanja smjese. Tako se npr. miješanjem 40% etilen-glikola sa 60% vode dobiva smjesa koja se zaleđuje tek pri temperaturi $-26,4^\circ\text{C}$. Smjesama glikola i vode dodaju se također inhibitori protiv korozije da bi se postigla vrijednost pH > 7,0.

Halogenirani ugljikovodici u kapljevitoj agregatnoj stanju također služe kao sekundarne rashladne tvari, jer zadovoljavaju tražena fizikalna svojstva, kao što su niska temperatura zamrzavanja, relativno niska viskoznost, nezapaljivost i dobra fizikalna i kemijska stabilnost. Zbog povoljnih svojstava iz te se grupe upotrebljavaju kao sekundarni nosioci topline R 11 s temperaturom zamrzavanja -111°C , R 12 sa -155°C i R 30 sa $-96,7^\circ\text{C}$. Takvi nosioci topline kolaju u sustavu koji je zatvoren i pod tlakom.

Svi se postupci hlađenja u kojima hlađena tvar predaje toplinu neposredno primarnoj radnoj tvari koja isparuje u isparivaču nazivaju *neposrednim* postupcima hlađenja. Kada hlađena tvar odaje toplinu najprije nekom posredniku, nekoj sekundarnoj rashladnoj kapljevine koja primljenu toplinu ponese i preda primarnoj radnoj tvari u isparivaču, govori se o *posrednom* hlađenju.

NORMALNI RASHLADNI UČINAK KOMPRESORA

Zadatak je rashladnog uređaja postići, a zatim održati nisku temperaturu isparivanjem radne tvari u isparivaču. Ako kompresor volumetrijskog učinka (v. *Kompresor*, TE 7, str. 221) odisava sav volumen pare nastale isparivanjem radne tvari zbog dovođenja topline, ustalit će se u isparivaču stalna temperatura isparivanja. Dakle, kompresor je u rashladnom uređaju onaj činilac koji u sprezi s isparivačem određuje temperaturu isparivanja i rashladni učinak. Zato se učinak *rashladnog kompresora* ne određuje kao volumetrijski učinak, već kao rashladni učinak koji može ostvariti u krugu rashladnog uređaja.

Budući da zadani rashladni učinak Q_0 ovisi o masi radne tvari G u optoku unutar rashladnog uređaja te o postizivom specifičnom rashladnom učinku q_0 za odabranu radnu tvar i temperaturu isparivanja T_0 prema izrazu

$$Q_0 = Gq_0, \quad (115)$$

bit će volumen pare, gustoće ρ'' , na izlazu iz isparivača

$$V_1 = \frac{G}{\rho''} = \frac{Q_0}{q_0 \rho''}. \quad (116)$$

Da bi rashladni kompresor mogao ostvarivati zadani rashladni učinak pri stalnoj temperaturi isparivanja T_0 , mora njegov volumetrijski učinak V_λ biti upravo jednak volumenu V_1 .

Izraz za računanje volumetrijskog učinka stapnog kompresora

$$V_\lambda = \lambda V_s n i \quad (117)$$

pokazuje da je taj učinak ovisan o stapajnom volumenu $V_s = Fs$ (gdje je F površina presjeka cilindra, a s stapaj), o učestalosti n uzastopnih punjenja volumena V_s parom, o broju jednakih cilindara i , ako je kompresor višecilindričan, te o volumetrijskom stupnju djelovanja λ .

Izjednačavanjem izraza (116) i (117) dobiva se izraz za određivanje rashladnog učinka kompresora

$$\frac{Q_0}{q_0 \rho''} = \lambda V_s n i, \quad (118)$$

a odatle

$$Q_0 = V_\lambda q_0 \rho''. \quad (119)$$

Sve veličine koje određuju volumetrijski učinak kompresora V_λ određene su već konstrukcijom kompresora, uz izuzetak volumetrijskog stupnja djelovanja λ koji ovisi i o uvjetima rada, naime o kompresijskom omjeru p/p_0 . Što je taj omjer manji, λ je veći. Budući da unutar zasićenog područja svakoj temperaturi odgovara točno pripadni tlak, λ ovisi i o pripadnom omjeru temperatura T/T_0 , dakle o uvjetima rada rashladnog procesa. Gustoća suhozasićene pare ρ'' fizikalna je veličina i, osim o vrsti radne tvari, bitno ovisi o temperaturi i tlaku isparivanja. Specifični rashladni učinak q_0 energetska je veličina koja prema prethodnim razmatranjima ovisi o temperaturi isparivanja, ali zbog utjecaja prigušivanja mnogo ovisi i o najnižoj temperaturi pothlađenog kondenzata T_p .

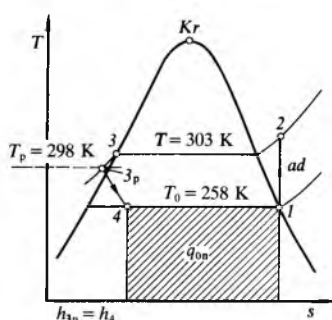
Prema svemu slijedi da učinak rashladnog kompresora Q_0 nije jednoznačno određen, već njegova vrijednost ovisi o izboru temperatura rashladnog procesa T_0 , T_p i T . Te tri temperature utječu na promjenu stanja radne tvari unutar rashladnog uređaja, pa su mjerodavne za njegovo unutrašnje ponašanje.

Bilo je potrebno da se međunarodno utvrdi i prihvati normalni rashladni proces koji se odvija između normalnih temperatura (sl. 41), i pomoću kojega se određuje normalni rashladni učinak Q_{0n} rashladnog kompresora. Normalni je rashladni proces već opisani proces s prigušivanjem pothlađenog kondenzata, suhim usisavanjem i adijabatskom kompresijom pare radne tvari, i to uz propisane temperature: isparivanja $\vartheta_0 = -15^\circ\text{C}$ ($T_0 = 258\text{ K}$), kondenzacije $\vartheta = +30^\circ\text{C}$ ($T = 303\text{ K}$) i pothlađivanja $\vartheta_p = +25^\circ\text{C}$ ($T_p = 298\text{ K}$).

Time su normalni specifični rashladni učinak q_{0n} i gustoća usisavane pare ρ'_{in} (stanje 1, sl. 41) za svaku radnu tvar jednoznačno određivi, a prema (118) i normalni rashladni učinak kompresora

$$Q_{0n} = \lambda_n F s n i \rho'_{in} q_{0n}. \quad (120)$$

Normalni rashladni učinak za svaki rashladni kompresor ima jednoznačnu vrijednost prema kojoj se razlikuje od drugih kompresora i prema kojoj se izabire, ocjenjuje i uključuje u rad rashladnih uređaja. Valja još jednom istaknuti činjenicu da neki izvedeni kompresor ostvaruje normalni rashladni učinak jedino kad se upotrebljava u normalnom procesu, unutar normalnih graničnih temperatura. Svako odstupanje od normalnih temperatura u toku procesa mijenja rashladni učinak Q_0 istog kompresora. Tako, npr., ako je $T_1 < T_{in}$, rashladni je učinak kompresora $Q_0 < Q_{0n}$, a ako je pak $T_1 > T_{in}$, učinak je $Q_0 > Q_{0n}$, zahvaljujući promjenama vrijednosti veličina λ , ρ'_i i q_0 zbog promjene temperature T_0 . Stapajni volumen V_s i učestalost punjenja cilindra n ostaju pri tome neizmijenjeni.



Sl. 41. T,s-dijagram normalnog parnoga rashladnog procesa

Kad bi i bio unaprijed poznat normalni rashladni učinak Q_{0n} odabranoga rashladnog kompresora, vrlo je malo vjerojatno da će on u praktičnoj primjeni raditi upravo u uvjetima normalnoga rashladnog procesa. No, i za granične temperature različite od normalnih, rashladni učinak kompresora može se opet odrediti pomoću izraza koji slijedi iz izraza (118)

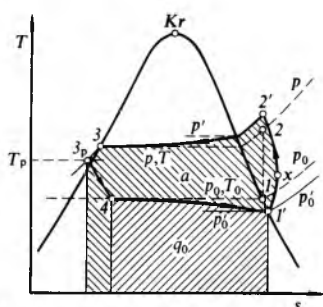
$$Q_0 = \lambda F s n i \rho'_i q_0, \quad (121)$$

ali tako da vrijednosti λ , ρ'_i i q_0 sada vrijede za temperature praktičnog procesa.

Dijeljenjem izraza (121) sa (120) dobiva se jednostavan odnos za preračunavanje normalnoga rashladnog učinka odabranog kompresora na druge radne temperature

$$Q_0 = Q_{0n} \frac{\lambda}{\lambda_n} \cdot \frac{\rho'_i}{\rho'_{in}} \cdot \frac{q_0}{q_{0n}}. \quad (122)$$

Efektivna snaga rashladnog kompresora. Stvarni rashladni procesi osjetno se razlikuju od prethodno opisanih teorijskih procesa. Na ulazu u stvarni isparivač brzina je strujanja malena zbog malog specifičnog volumena v_4 (stanje 4, sl. 42) pretežno kapljevite radne tvari nakon prigušivanja. No, kako isparivanje napreduje, razvija se sve više pare, koja konačno napušta isparivač kao suhozasićena para mnogo većeg specifič-



Sl. 42. Usporedba stvarnog i teorijskoga rashladnog procesa

nog volumena v'_1 (stanje 1'). Tako se brzina strujanja radne tvari od ulaza do izlaza isparivača morala stalno povećavati i svladavati sve veće trenje, pa suhozasićena para radne tvari napušta isparivač sa znatno povećanom kinetičkom energijom. Za svladavanje trenja i povećanje brzine strujanja radne tvari potrebno je utrošiti potencijalnu energiju razlike tlakova na ulazu i izlazu isparivača $\Delta p_0 = p_0 - p'_0$. Dakle, isparivanje se odvija u stvarnom isparivaču uz promjenjivi tlak, što uzrokuje i promjenjivu sve nižu temperaturu isparivanja. Zbog toga kompresor u stvarnom rashladnom procesu siše paru radne tvari s nižeg tlaka $p'_0 = (p_0 - \Delta p_0)$, stanje 1', nego u teorijskom procesu. Očita je posljedica da je specifični rashladni učinak stvarnog procesa $q_0 = h_{1'} - h_4$ manji od onoga teorijskog $q_{0t} = h_1 - h_4$. Nadalje, znatna razlika nastaje tokom kompresije para radne tvari u stvarnom kompresoru promjenom stanja od 1' do 2'. Kompresija se ne odvija ni približno kao adijabatska promjena stanja u teorijskim rashladnim procesima, već po politropi promjenljivog eksponenta n . U toku kompresije od stanja od 1' do x eksponent je politrope $n > \kappa$, jer se još hladne pare radne tvari griju na toploj stijenci cilindra kompresora, sve dok se njihove temperature ne izjednače u stanju x . Daljom kompresijom od stanja x do 2' para postaje toplija od stijenke cilindra, pa se na njoj hladi, tada je eksponent politrope $n < \kappa$.

Komprimirana para stanja 2' utiskuje se u stvarni kondenzator pri većem tlaku p' nego u teorijskom procesu. Tako ostvarena potencijalna energija razlike tlakova $\Delta p = p' - p$ troši se za utiskivanje pare u kondenzator i svladavanje trenja strujanja u njemu.

Prijelazom od teorijskog na stvarni proces, rashladni se proces znatno termodinamički pogoršao, specifični se rashladni učinak smanjio, a utrošeni rad povećao. Zato se pri određivanju stvarne snage P_e koju troši realni rashladni kompresor rashladnog učinka Q_0 moraju uzeti u obzir razlike između stvarnog i teorijskog procesa. Ako teorijski proces za ostvarivanje rashladnog učinka Q_0 troši snagu P_t , a stvarni izmjerenu indiciranu snagu P_i , indicirani je stupanj djelovanja kompresora određen izrazom

$$\eta_h = \frac{P_t}{P_i} = \frac{\frac{Q_0}{\varepsilon_i}}{\frac{Q_0}{\varepsilon}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_i}. \quad (123)$$

Stvarno utrošena snaga uz mehanički stupanj djelovanja kompresora η_m , prema (123), iznosi

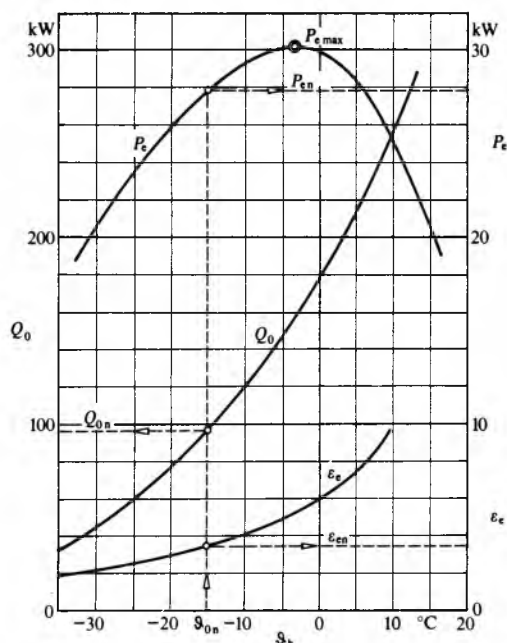
$$P_e = \frac{P_i}{\eta_m} = \frac{Q_0}{\eta_m \varepsilon} = \frac{Q_0}{\eta_m \eta_h \varepsilon_i}. \quad (124)$$

Prema tome, efektivna se snaga rashladnog kompresora može odrediti iz zadanoga rashladnog učinka Q_0 , izračunatog faktora hlađenja pripadnoga teorijskog procesa $\varepsilon_i = Q_0/A_i = (h_1 - h_4)/(h_2 - h_1)$ i ocijenjenih vrijednosti η_m i η_h . Mehanički stupanj djelovanja iznosi $\eta_m = 0,85 \dots 0,93$, gdje manja vrijednost vrijedi za sasvim male, a veća za velike kompresore. Za indicirani stupanj djelovanja, koji je ovisan o λ i p/p_0 kompresora, preporučuju se vrijednosti na temelju izvedenih analiza kao funkcija kompresijskog omjera:

p/p_0	2	3	4	5	6
η_h	0,855	0,84	0,825	0,80	0,77

Radna karakteristika rashladnog kompresora. Rashladni učinak Q_0 prema (121) ovisan je o temperaturama procesa ϑ_0 , ϑ_p i ϑ . Ako se mijenja temperatura isparivanja ϑ_0 , a održavaju temperatura kondenzacije ϑ i temperatura pothlađivanja kondenzata ϑ_p konstantnima, dobiva se tzv. *radna karakteristika rashladnog kompresora* $Q_0 = f(V_s, \vartheta_0, \vartheta_p, \vartheta)$. Za kompresor s difluordiklormetanom (R 12, CF_2Cl_2) stapajnog volumena $V_s = 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ proračunata rashladna karakteristika (sl. 43) pokazuje da se rashladni učinak kompresora Q_0 intenzivno umanjuje sa sniženjem temperature isparivanja ϑ_0 .

Ta karakteristika također pokazuje koliki će rashladni učinak imati kompresor pri određenoj temperaturi isparivanja, pa se može odrediti i njegov normalni rashladni učinak Q_{0n} , koji iznosi 96 kW. Prema karakteristikom učinka rashladnog kompresora može se odrediti i karakteristika efektivne snage P_e prema izrazu (124). Zanimljivo je da kompresor troši najveću snagu $P_{e\max} \approx 30$ kW kad je temperatura isparivanja u isparivaču između $-5^\circ\text{C} \dots 0^\circ\text{C}$. Za normalnu temperaturu isparivanja $\vartheta_0 = -15^\circ\text{C}$ utrošena je snaga $P_{en} = 27,8$ kW, a stvarni faktor hlađenja $\varepsilon_n = Q_{0n}/P_{en} = 96/27,8 = 3,45$.



Sl. 43. Radne karakteristike rashladnog kompresora s difluordiklormetanom (CF_2Cl_2 , R 12): stupajni volumen $V_s = 0,1$ m³/s, temperatura kondenzacije $\vartheta = 30^\circ\text{C}$, temperatura pothlađivanja kondenzata $\vartheta_p = 25^\circ\text{C}$. Q_0 rashladni učinak, ϑ_0 temperatura isparivanja, P_e efektivna snaga, ε_e efektivni faktor hlađenja

Elektromotor svakog rashladnog kompresora mora biti odabran prema $P_{e\max}$, iako je kompresor predviđen za rad na nižoj temperaturi isparivanja, tj. kad je $P_{en} < P_{e\max}$. Naime, u stvarnom radu rashladnog kompresora pojaviti će se kad-tad temperature isparivanja $\vartheta_0 = -5^\circ\text{C} \dots 0^\circ\text{C}$, a svakako pri upuštanju toplog uređaja (isparivača) u pogon. I tada elektromotor kompresora mora imati dovoljno snage da pokrene kompresor.

Ravnoteža rada kompresora i isparivača. Kompresor i isparivač rashladnog uređaja dva su njegova bitna elementa, a o njihovu međusobnom odnosu u pogonu ovisi postignuta temperatura isparivanja. Kompresor će ostvariti rashladni učinak Q_0 pri temperaturi isparivanja ϑ_0 samo ako isparivač, posredovanjem svoje metalne stijenke površine F_0 , uzmogne prenijeti jednak rashladni učinak Q_0 hlađenog tijela na radnu tvar koja u isparivaču isparuje.

Isparivač je izmjenjivač topline u kojemu se toplina prenosi od hlađenog tijela temperature ϑ_h na hladniju radnu tvar za vrijeme dok ona isparuje pri temperaturi ϑ_0 , pa je preneseni rashladni učinak

$$Q_0 = kF_0(\vartheta_h - \vartheta_0) \quad (125)$$

proporcionalan koeficijentu prijenosa topline k , površini na kojoj se odvija prijenos topline F_0 i razlici temperatura hlađenog tijela i radne tvari u isparivaču $\Delta\vartheta_0 = (\vartheta_h - \vartheta_0)$. Budući da se hlađenoj tvari odvodi rashladni učinak, dogovorno on ima negativni predznak, pa je

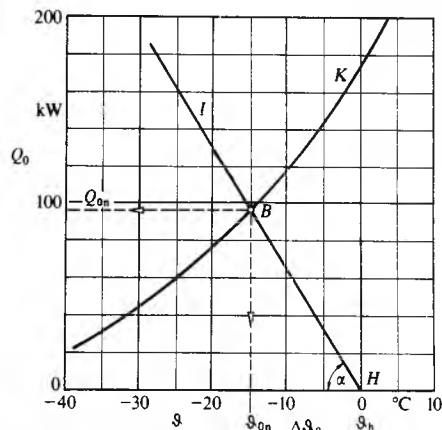
$$Q_0 = -kF_0\Delta\vartheta_0, \quad (126)$$

a to je jednadžba pravca u koordinatnom sustavu ϑ , Q .

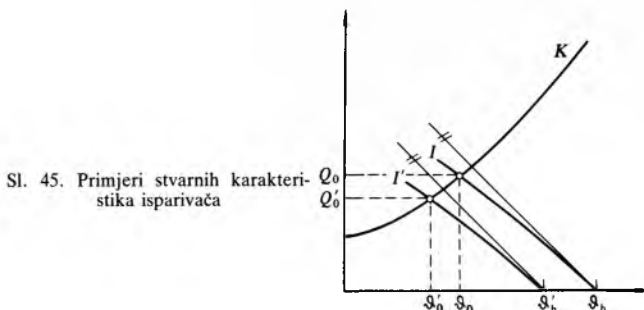
Radna je karakteristika isparivača, dakle, pravac s nagibom $a = -kF_0 = \tan\alpha$, ako se privremeno prihvati da se

koeficijent prijenosa topline ne mijenja s temperaturom (sl. 44). Točka B u kojoj se siječe karakteristika kompresora K s karakteristikom isparivača I ravnotežna je radna točka kojom je određena temperatura isparivanja u isparivaču ϑ_0 .

Zanimljivo je sada koliku površinu F_0 mora imati isparivač da bi kompresor iz prethodnog primjera ostvario upravo normalni rashladni učinak $Q_{0n} = 96$ kW ako se u hladionici zahtijeva temperatura hlađenja $\vartheta_h = 0^\circ\text{C}$. Dakle, zadano je $\Delta\vartheta_0 = \vartheta_h - \vartheta_{0n} = 15^\circ\text{C}$. Povučeni pravac kroz točke H i B predstavlja radnu karakteristiku isparivača I . Njezin se nagib $-kF_0 = \tan\alpha$ jednostavno određuje i on iznosi $\tan\alpha = Q_{0n}/\Delta\vartheta_0 = 96000/15 = 6400 = kF_0$. Uz koeficijent prijenosa topline reda veličine $k = 16$ W/Km² potrebna je površina za ostvarivanje rashladnog učinka isparivača $F_0 = 6400/16 = 400$ m².



Sl. 44. Ravnoteža rada kompresora i isparivača. K radna karakteristika kompresora, I radna karakteristika isparivača, radna tvar difluordiklormetan (CF_2Cl_2 , R 12) temperature kao na sl. 43



Sl. 45. Primjeri stvarnih karakteristika isparivača

U stvarnosti radna karakteristika isparivača nije pravac. Ako se žele niže temperature hlađenja, npr. zraka u hladionici, gustoća se zraka i ostale fizikalne veličine mijenjaju i umanjuju vrijednost koeficijenta prijenosa topline. Smanjenjem temperature isparivanja snizuje se temperatura površine stijenke isparivača, pa se na stijenkama stvara sve deblji sloj inja i leda smrznute vodene pare iz zraka, a to dalje znatno umanjuje koeficijent prijenosa topline. Radna je karakteristika isparivača krivulja koja se to više otklanja od pravca što su temperature ϑ_h niže, a površina isparivača jače zaleđena (sl. 45). Ravnotežne se temperature isparivanja zbog toga pomiču prema nižim vrijednostima. Osobito treba uočiti da naslaga inja i leda na isparivaču uvjetuje nižu temperaturu isparivanja i niži tlak isparivanja p_0 , zbog čega se povećava kompresijski omjer kompresora i kompresor troši više snage, a proizvodi manji rashladni učinak. Faktor je hlađenja uređaja manji. Zato se preporuča da se isparivači rashladnog uređaja redovito oslobađaju leda (odleđuju) ako se želi iskoristiti njihov puni učinak i uštedjeti pogonska energija.

AUTOMATIKA U RASHLADNOJ TEHNICI

Za vođenje i održavanje pogona suvremenih rashladnih uređaja potrebni su automatska regulacija i automatsko

upravljanje. Razlog je tome što vrlo mnogo rashladnih uređaja nije pod nadzorom stručnog osoblja, npr. kućni i komercijalni hladnjaci, odnosno što su uređaji toliko razgranati i složeni da ni stručno osoblje ne bi moglo uvijek u pravi trenutak i na pravom mjestu izvršiti potrebnu regulaciju, npr. u industrijskim rashladnim uređajima.

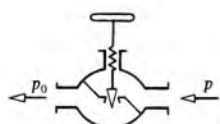
Zato se u osnovi automatski regulira: a) dotok radne tvari u isparivače za različite uvjete rada i toplinskog opterećenja isparivača; b) temperatura hladenog tijela, najčešće zraka u hladionici ili neke kapljevine i c) učinak rashladnog kompresora prema trenutnom toplinskom opterećenju rashladnog uređaja.

U automatsko upravljanje spada: a) automatsko vođenje cjelokupnog pogona rashladnog uređaja prema unaprijed utvrđenom programu i b) trajni nadzor važnih pogonskih veličina i sigurnosna zaštita uređaja.

Regulatori prigušivanja

Prigušni ventil jedan je od četiriju osnovnih sastavnih dijelova svakoga rashladnog uređaja. Zadatak mu je dvojak, da prigušuje kapljevitu radnu tvar s tlaka kondenzacije na tlak isparivanja i pri tome prilagođuje, regulira dotok radne tvari u isparivač, već prema trenutnom toplinskom opterećenju isparivača. Toplinsko se opterećenje isparivača očituje u promjeni razine kapljevite radne tvari u isparivaču ili u promjeni tlaka i temperature isparivanja. Što je toplinsko opterećenje isparivača veće, razina kapljevite radne tvari u isparivaču brže opada jer se više isparuje, ili raste tlak, a s njim i temperatura isparivanja. Kad je pak toplinsko opterećenje isparivača manje, razina radne tvari opada sporije, ili se smanjuje tlak i temperatura isparivanja. Budući da se u suvremenoj rashladnoj tehnici upotrebljavaju skoro jedino automatski prigušni ventili, njihov zadatak može biti, ili da održavaju stalnu razinu radne tvari u isparivaču, ili da održavaju stalan tlak isparivanja, ili pak da održavaju stalno pregrijavanje pare na izlazu iz isparivača. Prema načinu rada postoje sljedeće prigušne naprave: a) ručni prigušni ventili, b) regulatori stalne razine, c) regulatori stalnog tlaka, d) regulatori stalnog pregrijavanja i e) kapilarne prigušnice.

Ručni prigušni ventili (sl. 46) građeni su tako da se okretanjem vretena precizno regulira dotok radne tvari u isparivač uz istodobno prigušivanje s tlaka kondenzacije p na tlak isparivanja p_0 .



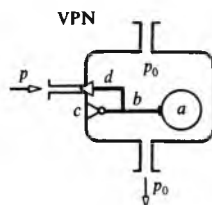
Sl. 46. Ručni prigušni ventil

Ručni prigušni ventil ispunio je svoj zadatak na početku razvoja rashladne tehnike i jednostavnih rashladnih uređaja, a danas se kao samostalna prigušna naprava više ne upotrebljava. Za upravljanje ručnim prigušnim ventilom potrebno je posebno stručno iskustvo i stalna prisutnost, pa otkada se rashladni uređaji masovno upotrebljavaju (npr. kućni hladnjak), takav je ventil postao neupotrebljiv. Zamijenile su ga automatske prigušne naprave.

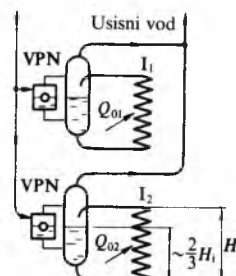
Regulatori stalne razine služe za prigušivanje i regulaciju napajanja isparivača u kojima treba održavati slobodnu površinu kapljevite radne tvari na stalnoj razini. Osjetilo razine šuplji je metalni plovak a koji plivajući na površini radne tvari prati njezine promjene i zakreće polugu b oko okretišta c (sl. 47). Pokretanjem poluge b pokreće se i konični ventil d koji upravlja prigušivanjem dotoka radne tvari iz kondenzatora u isparivač. Spuštanjem plovka otvara se ventil, a dizanjem se zatvara. To je prigušni ventil s plovkom na niskotlačnoj strani (VPN), jer se plovak nalazi u komorici gdje, nakon prigušivanja, vlada niski tlak isparivanja p_0 . Regulijska je karakteristika te naprave da propušta u isparivač upravo onu količinu radne tvari koja se u njemu

isparila. Upotrebljava se za napajanje pojedinačnog isparivača ili paralelno za napajanje više isparivača (sl. 48).

Svaki isparivač mora imati svoj prigušni ventil s plovkom na niskotlačnoj strani. Tako se u svaki isparivač prigušuje upravo toliko radne tvari koliko se u njemu isparuje. Komorica plovka i isparivač tvore spojene posude, pa je potrebno postaviti prigušni ventil na ispravnu visinu s obzirom na isparivač. Obično je razina radne tvari u komorici plovka na $\sim 2/3$ visine najviše cijevi isparivača. Uz previsoko postavljen prigušni ventil postoji opasnost da se isparivač prepuni kapljevitom radnom tvari i da nastane hidraulički udar u kompresoru. Ako je takav ventil prenisko postavljen, tada se površina isparivača samo djelomično iskorištava, pa se smanjuje rashladni učinak.



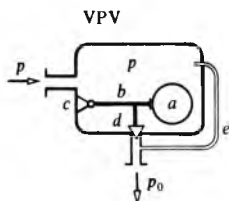
Sl. 47. Regulator razine na niskotlačnoj strani (VPN). a plovak, b poluga, c okretište, d konični ventil



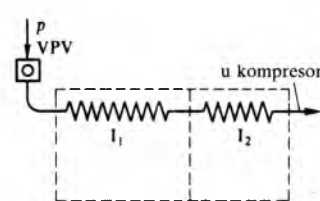
Sl. 48. Paralelno napajanje isparivača regulatorima razine na niskotlačnoj strani (VPN)

Prigušni ventil s plovkom može se izvesti i kao ventil s plovkom na visokotlačnoj strani (VPV, sl. 49). Plovak se tada nalazi u komorici gdje vlada visoki tlak kondenzacije prije prigušivanja. Dizanje plovka a otvara ventil d kojim se radna tvar prigušuje u isparivač. Regulijska je karakteristika te prigušne naprave da propušta u isparivač svekoliku količinu radne tvari koja je u kondenzatoru kondenzirala, bez obzira da li je potrebna isparivaču. Jedino kad rashladni uređaj ima jedan isparivač, količina kondenzirane radne tvari u kondenzatoru jednaka je količini radne tvari isparene u isparivaču.

Zato se ventil s plovkom na visokotlačnoj strani upotrebljava samo ako rashladni uređaj ima jedan isparivač ili isparivače vezane u seriju (sl. 50). Prigušni ventil na visokotlačnoj strani može se postaviti na bilo koju visinu s obzirom na isparivač, ali ipak ispod razine kapljevite radne tvari u kondenzatoru. Prema tome, ventil s plovkom na visokotlačnoj strani može se smatrati napravom koja održava stalnu razinu radne tvari u kondenzatoru.



Sl. 49. Regulator razine na visokotlačnoj strani (VPV). a plovak, b poluga, c okretište, d konični ventil, e kapilarna cjevčica



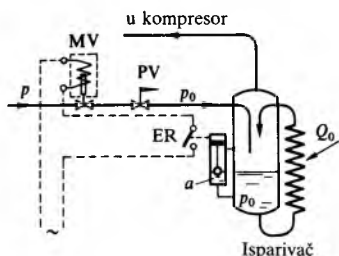
Sl. 50. Smještaj regulatora razine na visokotlačnoj strani (VPV) za napajanje isparivača spojenih u seriju

Kapilarna cjevčica e (sl. 49) služi za propuštanje plinova koji se ne kondenziraju na niskotlačnu stranu uređaja odakle ih odsisava kompresor. Bez takva bi spoja nakupljeni plinovi u komorici plovka mogli spriječiti dotok radne tvari iz kondenzatora, i tako onemogućiti napajanje isparivača.

Ventili s plovkom vrlo su jednostavni i predstavljaju prvu prigušnu napravu za automatsko napajanje isparivača radnom tvari u razvoju rashladne tehnike. Primjenom takvih prigušnih ventila postala je nepotrebna prisutnost i nadzor čovjeka.

Međutim, u praktičnoj primjeni ventili s plovkom imaju dosta nedostataka. Naime, razina radne tvari u komorici

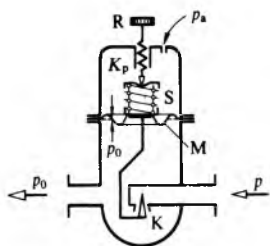
plovka nije mirna, jer se na nju prenose titraji uzrokovani burnim hidrauličkim procesom isparivanja u isparivaču. Na tako nemirnoj površini plovak poskakuje, a s njime i stožac prigušnog ventila. Zbog toga se prije ili kasnije erozivno oštećuju brušene površine stošca, pa ventil počinje propuštati radnu tvar u isparivač i onda kad bi prema položaju plovka morao biti zatvoren. Napajanje isparivača više nije regulirano, pa normalni rad rashladnog uređaja postaje nemoguć. Iste posljedice mogu uzrokovati i čestice nečistoće dospjele između stošca i sjedišta prigušnog ventila.



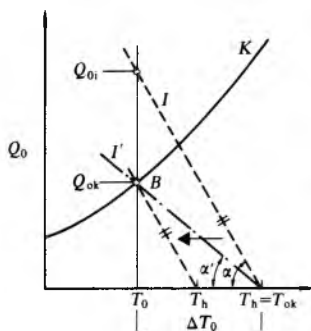
Sl. 51. Prigušna naprava s plovkom i relejem. a plovak, ER električni relej, PV ručni prigušni ventil, MV magnetni ventil

U suvremenim regulatorima razine odvojeno je prigušivanje od regulacije protoka radne tvari (sl. 51). Plovak *a* također poskakuje na nemirnoj površini radne tvari, ali on ne djeluje neposredno na prigušivanje i regulaciju dotoka radne tvari u isparivač. Plovak pokreće mehanizam električnog releja ER koji mjeri srednji položaj titrajućeg plovka, pa kad se srednji položaj spusti na donju još dopuštenu granicu razine radne tvari, relej ER uključi strujni krug magnetnog ventila MV. Magnet pomiče vreteno ventila nagore i ventil se otvori. Radna tvar kondenzatorskog tlaka *p* poteče kroz otvoreni magnetni ventil MV, prigušuje se u ručnom prigušnom ventilu PV na tlak *p*₀ i dotječe u isparivač. Razina radne tvari u isparivaču time raste i, kad srednji položaj titrajućeg plovka postigne još dopuštenu gornju granicu razine radne tvari, relej ER prekida strujni krug magnetnog ventila i on se zatvara, pa prestaje priticjanje radne tvari u isparivač. Ručni je prigušni ventil PV namješten na prigušivanje protoka radne tvari za najveći rashladni učinak isparivača. Regulacija je, dakle, digitalna, isparivač se napaja uvijek istim maksimalnim intenzitetom protoka radne tvari, ali na prekide u duljim ili kraćim vremenskim intervalima. Magnetni ventil ostaje to duže vremena otvoren što je veće trenutno toplinsko opterećenje isparivača. Kad hladnjak radi s maksimalnim učinkom, magnetni je ventil trajno otvoren.

Regulator stalnog tlaka (VST) prigušna je naprava koja analognim otvaranjem ili zatvaranjem prigušnog otvora propušta u isparivač upravo toliko radne tvari koliko se u njemu može ispariti i kompresorom odsisati, a da se pri tome ne mijenja tlak isparivanja. Osjetilo je tlaka takve prigušne naprave metalna membrana M (sl. 52), opterećena s gornje strane tlačnim spiralnim perom S i tlakom atmosferskog zraka



Sl. 52. Regulator stalnog tlaka isparivanja (VST). M membrana, S spiralno tlačno pero, K stožac prigušnog ventila, R regulacijski vijak, K_p prednaprezanje pera



Sl. 53. Pomak radne točke regulatora stalnog tlaka isparivanja za vrijeme stavljanja u pogon

*p*_a, a s donje strane tlakom isparivanja radne tvari *p*₀. Na membranu je s donje strane pričvršćen nosač stošca K prigušnog ventila kojemu je položaj u prigušnom otvoru ovisan o položaju membrane.

Ravnoteža sila na membrani može se prikazati ako se uzme da membrana ima površinu *F*_m i da pero ima prednaprezanje *K*_p, pa je

$$p_a F_m + K_p = p_0 F_m, \quad (127)$$

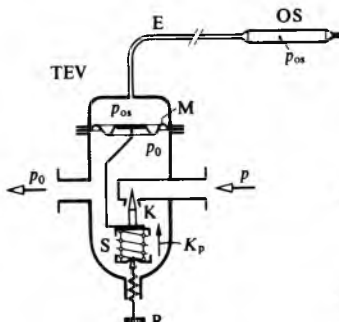
$$p_0 = p_a + \frac{K_p}{F_m}. \quad (128)$$

Dakle, tlak isparivanja ovisi o atmosferskom tlaku *p*_a i sili u peru *K*_p. Ako se regulacijski vijak R ne dira, tlak isparivanja ostaje praktički stalan, a prigušni ventil propušta u isparivač ustaljenu masu radne tvari.

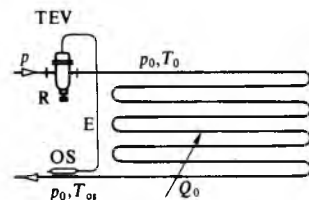
Svaka mala promjena tlaka *p*₀ uzrokuje pomak membrane, a time i promjenu duljine spiralnog pera i sile *K*_p do novoga ravnotežnog stanja. Ako se npr. tlak isparivanja *p*₀ trenutno smanji, membrana se spusti i više otvori prigušni ventil. Veća količina radne tvari uđe u isparivač i tamo ispari, pa se zato tlak isparivanja povisi i vrati na prvotnu vrijednost, što uzrokuje dizanje membrane, a prigušni se ventil vrati u prethodni položaj.

Regulacijska je karakteristika takve prigušne naprave održavanje stalnog tlaka isparivanja u svim uvjetima rada rashladnog uređaja, čak i kad je to nepoželjno, npr. u početku rada kad je hladena tvar još topla, možda toplija i od okolišne temperature *T*_h = *T*_{ok} (sl. 53). Prigušni regulator stalnog tlaka uvjetuje da budu od prvog trenutka rada uređaja *p*₀ = const. i *T*₀ = const., pa se na površini isparivača javlja nenormalno velika razlika temperature $\Delta T_0 = T_{ok} - T_0$, a prema (125) i veliki mogući rashladni učinak isparivača. Međutim, kompresor pri istoj temperaturi *T*₀ može ostvariti samo rashladni učinak *Q*_{ok}, točka B, pa će prigušni regulator propuštati u isparivač samo onoliko radne tvari koja će uz veliki ΔT_0 na jednom manjem dijelu površine isparivača ostvariti dotok topline radnoj tvari *Q*_{ok}. Na preostaloj površini isparivača pare radne tvari snažno se pregrijavaju. Isparivač se privremeno ponaša kao da mu njegova radna karakteristika *I'* ima manji nagib. Tek kad se radom rashladnog uređaja temperatura hlađenja snizi na traženu *T*_h, isparivač će na cijeloj površini, uz razliku temperature (*T*_h - *T*₀), prenijeti radnoj tvari za isparivanje toplinu *Q*_{ok}, točka B, pa prestaje nepoželjno pregrijavanje pare u isparivaču. Takvo pobuđivanje isparivača u radu može u stvarnosti potrajati i duže vremena, što je negativno svojstvo takve regulacije. Zato se regulator stalnog tlaka u prvom redu upotrebljava u rashladnim uređajima s jednim isparivačem stalnoga rashladnog učinka u trajnom radu bez prekida.

Regulator stalnog pregrijavanja. Prigušni regulator stalnog pregrijavanja pare (termoekspanzijski ventil, TEV) automatska je naprava koja prigušivanjem propušta u isparivač upravo toliko radne tvari da se ona u njemu potpuno ispari pri tlaku isparivanja, a zatim još i pregrije na temperaturu *T*_{os} > *T*₀. Razlika temperatura $\Delta T = T_{os} - T_0$ zove se pregrijanje pare



Sl. 54. Regulator stalnog pregrijavanja (TEV). OS temperaturno osjetilo, M membrana, K stožac prigušnog ventila, S tlačno pero, R regulacijski vijak, K_p sila pera, E kapilarna cjevčica



Sl. 55. Smještaj regulatora stalnog pregrijavanja (TEV) i temperaturnog osjetila (OS) uz pripadni isparivač

koje prigušna naprava održava stalnim. Pregrijanje obično iznosi $\sim 5^\circ\text{C}$. Tako se površina isparivača potpuno iskorišćuje za isparivanje u svim uvjetima rada rashladnog uređaja, a kompresor je zaštićen od hidrauličkih udara, jer se kapljevita radna tvar ne može ni pojaviti na izlazu iz isparivača.

Regulator stalnog pregrijanja (sl. 54) ima temperaturno osjetilo OS koje na izlaznoj cijevi isparivača (sl. 55) mjeri temperaturu T_{os} . Temperaturno osjetilo OS, kapilarna spojna cijev E i komorica iznad membrane M tvore zatvoreni sustav ispunjen istom tvari u zasićenom stanju (kapljevina i para) koja se isparuje i u isparivaču. Zato svakoj temperaturi na osjetilu T_{os} jednoznačno odgovara tlak zasićenja p_{os} u osjetilu, ali i u komorici iznad membrane M. S donje strane djeluju na membranu tlak isparivanja p_0 i sila tlačnog pera K_p prenesena nosačem prigušnog stošca K.

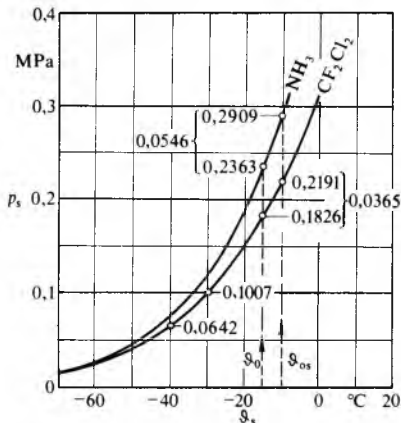
Ravnoteža sila na membrani površine F_m uspostavlja se kad je

$$p_{os} F_m = p_0 F_m + K_p, \quad (129)$$

pa je

$$\Delta p_{os} = p_{os} - p_0 = \frac{K_p}{F_m}. \quad (130)$$

Budući da temperatura isparivanja T_0 ovisi o postignutom tlaku isparivanja p_0 i tlak zasićenja u osjetilu p_{os} o postignutoj temperaturi osjetila T_{os} , svakoj razlici tlakova $p_{os} - p_0 = K_p/F_m$ odgovara određeno pregrijanje pare radne tvari na izlazu iz isparivača $\Delta T = T_{os} - T_0$. Tako, npr., ako se želi održavati pregrijanje pare $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ pri temperaturi isparivanja u isparivaču $\vartheta_0 = -15^\circ\text{C}$ (sl. 56), kad se radi s difluordiklormetanom (R 12), treba vijkom R zategnuti pero tako da bude $\Delta p_{os} = 0,2191 - 0,1826 = 0,0365 \text{ MPa}$, a kad se radi s amonijakom (R 717), tako da bude $\Delta p_{os} = 0,2909 - 0,2363 = 0,0546 \text{ MPa}$. Ipak, ako se prati tok linija zasićenja (sl. 56) prema nižim temperaturama isparivanja ϑ_0 , očigledno je da isti tlak pera $K_p/F_m = 0,0365 \text{ MPa}$ pri temperaturi isparivanja $\vartheta_0 = -15^\circ\text{C}$ održava pregrijanje $\Delta T = 5^\circ\text{C}$, a pri temperaturi $\vartheta_0 = -40^\circ\text{C}$, pregrijanje iznosi $\Delta T \approx 10^\circ\text{C}$, što nepovoljno utječe na rad kompresora, jer kompresija završava u području visokih temperatura. To je u vezi sa sve manjim nagibom linija zasićenja pri nižim temperaturama.

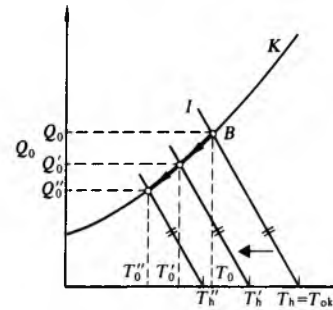


Sl. 56. Ovisnost vrelišta ϑ_s o tlaku p_s za amonijak (NH_3) i difluordiklormetan (CF_2Cl_2)

Da bi se izbjeglo to neugodno svojstvo pri nižim temperaturama isparivanja, danas se sustav temperaturnog osjetila OS prigušnih naprava sa stalnim pregrijanjem sve više puni, umjesto zasićenom tvari, tzv. adsorpcijskim parom, npr. plinom CO_2 i aktivnim ugljenom. Promjenom temperature ϑ_{os} takve smjese mijenja se tlak p_{os} skoro linearno u širokim granicama, pa regulatori stalnog pregrijanja održavaju jednako i stalno pregrijanje pare pri višim i pri niskim temperaturama isparivanja.

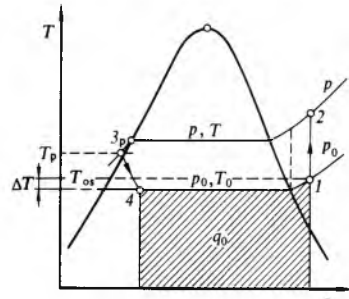
Regulacijom prigušnog ventila sa stalnim pregrijanjem temperatura isparivanja T_0 nije konstantna i mijenja se s toplinskim opterećenjem isparivača Q_0 i temperaturom hla-

dene tvari T_h (sl. 57). Velika je prednost takve regulacije da u početku rada rashladnog uređaja, kada je hlađena tvar još topla, možda $T_h = T_{ok}$, rashladni uređaj ostvaruje najveći rashladni učinak Q_0 i hladi brzo na nižu temperaturu T'_h . Pri tome radna točka B klizi po radnoj karakteristici kompresora K naniže sve dok se ne postigne tražena temperatura hlađenja, možda T''_h , pri temperaturi isparivanja T''_0 .

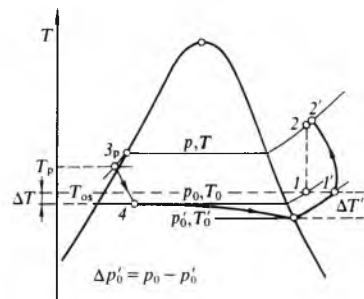


Sl. 57. Regulacija prigušnim ventilom stalnog pregrijanja

U T,s-dijagramu (sl. 58) stanje pregrijane pare koju siše kompresor definirano je sjecištem tlaka isparivanja p_0 i izoterme T_{os} , stanje 1. Temperatura je pregrijane pare na izlazu isparivača $T_1 = T_{os}$, a pregrijanje $\Delta T = T_{os} - T_0$. Međutim, osim regulatora pregrijanja, na pregrijanje pare ΔT utječe i pad tlaka u isparivaču zbog svladavanja otpora strujanja (sl. 59). Temperatura T_{os} nije se promijenila zbog pada tlaka u isparivaču jer se nije promijenio ni tlak p_{os} u osjetilu. Tlak p_{os} ovisi o nepromijenjenom tlaku p_0 na ulazu u isparivač, gdje se nalazi regulator, i o nepromijenjenom omjeru K_p/F_m . No, na izlazu iz isparivača zbog pada tlaka $\Delta p'_0$ pojavljuje se niži tlak p'_0 i pripadna niža temperatura zasićenja T'_0 , pa je pregrijanje $\Delta T' = T_{os} - T'_0 > \Delta T$. Stanje 1' leži više desno na nižem tlaku p'_0 u T,s-dijagramu, pa zbog većeg kompresijskog omjera $p/p'_0 > p/p_0$, kompresor troši više snage. Zagrijavanje je kompresora također veće jer je temperatura $T_2' > T_2$.



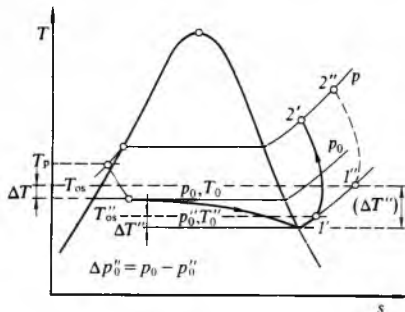
Sl. 58. Utjecaj pregrijanja pare za ΔT na stanje na ulazu u kompresor kad nema gubitka tlaka u isparivaču



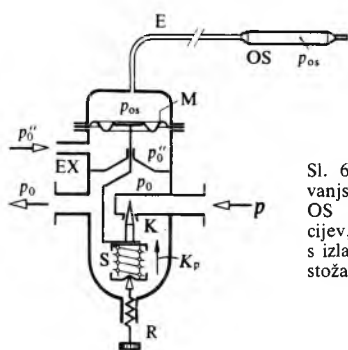
Sl. 59. Utjecaj pada tlaka u isparivaču na pregrijanje pare i na rad kompresora

Zbog optoka strujanja radne tvari, u isparivačima vrlo velike površine za izmjenu topline (npr. za klimatizaciju), nastaju i veći padovi tlaka $\Delta p'_0$, što vrlo nepovoljno utječe na

povećanje pregrijanja pare $\Delta T''$ (sl. 60). Ako se ništa ne poduzme, pregrijanje bi iznosilo $\Delta T'' = T_{os} - T_0'' \gg T'$, pa bi se ne samo znatno povećala snaga utrošena za pogon kompresora nego bi se i kompresor nedopustivo zagrijavao do temperature T_2' . Zato se tada primjenjuju prigušni regulatori pregrijanja prilagođeni za takve uvjete rada.



Sl. 60. Utjecaj velikog pada tlaka u isparivaču na pregrijanje pare i na rad kompresora



Sl. 61. Prigušni regulator pregrijanja s vanjskim izjednačenjem tlaka (TEVV). OS osjetilo temperature, E kapilarna cijev, M membrana, EX cijevica za spoj s izlazom iz isparivača, S tlačno pero, K stožac prigušnog ventila, R regulacijski vijak, K_p prednapon pera

To su *regulatori pregrijanja s vanjskim izjednačenjem tlaka* (TEVV, sl. 61). Prostor ispod membrane M spojen je cjevčicom ex na izlaz isparivača gdje vlada niži tlak $p_0'' = p_0 - \Delta p_0''$, pa će se traženi tlak u osjetilu p_{os} ravnati prema tlaku na izlazu isparivača p_0'' i biti veći od njega za K_p/F_m . Bit će dakle

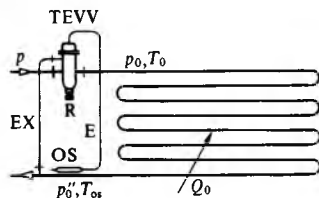
$$\Delta p_0'' = p_{os}'' - p_0'' = \frac{K_p}{F_m}, \quad (131)$$

odnosno

$$\Delta p_0'' = \Delta p_{os}, \quad (132)$$

kao da nema pada tlaka $\Delta p_0''$ u isparivaču. Zbog toga će i prihvatljivo pregrijanje $\Delta T'' = T_{os}'' - T_0''$ biti jednako pregrijanju $\Delta T = T_{os} - T_0$ (sl. 59). Kompresor usisava paru koja je pregrijava samo za ΔT , kompresija u kompresoru počinje pri nižem tlaku i s nižom temperaturom, pa je i konačna temperatura nakon kompresije osjetno niža.

Sl. 62. Smještaj regulatora s vanjskim izjednačenjem tlaka (TEVV) uz pripadni isparivač. OS osjetilo temperature, E kapilarna cijev, EX cjevčica za spoj s izlazom iz isparivača, R regulacijski vijak

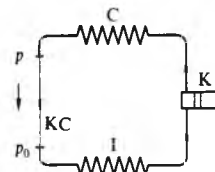


Prigušni regulator pregrijanja s vanjskim izjednačenjem tlaka priključuje se na pripadni isparivač prema shemi na sl. 62. Prigušni regulatori pregrijanja vrlo se mnogo primjenjuju za regulaciju napajanja isparivača malih i srednjih rashladnih uređaja, posebno kad uređaj ima više isparivača s različitim zadacima hlađenja. Svaki je isparivač reguliran svojim regulatorom pregrijanja za tražene uvjete rada i toplinsko opterećenje, uvijek uz sigurnost da u kompresoru neće nastati hidraulički udar zbog malog pregrijanja pare radne tvari na izlazu iz isparivača. Ako bi kapljevita zasićena radna tvar

temperature T_0 ipak dospjela do izlaza isparivača na kojemu se nalazi osjetilo OS, tlak u osjetilu bi se odmah snizio na pripadni $p_{os} = p_0$. Uz tako ostvarenu jednakost tlakova iznad i ispod membrane M, sila pera K_p zatvara ventil i napajanje isparivača prestaje, pa se isparivač ne može prepuniti uz hidraulički udar u kompresoru.

Kapilarna prigušnica najjednostavnija je prigušna naprava za napajanje isparivača radnom tvari. Između kondenzatora C i isparivača I (sl. 63) umeće se bakrena kapilarna cijev KC unutrašnjeg promjera 0,4...1 mm i određene duljine. Tako se ostvaruje prigušivanje radne tvari praktički u svim manjim i najmanjim rashladnim uređajima (komercijalnim i kućanskim), u kojima bi npr. prigušni regulator pregrijanja ili regulator stalnog tlaka zbog sitnih dimenzija bili vrlo skupi, pa i neizvedljivi. Naprotiv, nekoliko metara kapilarne cijevi smotane u svitak mogu se u cijeni rashladnog uređaja i zanemariti.

Sl. 63. Prigušivanje kapilarnom prigušnicom. K kompresor, C kondenzator, I isparivač, KC kapilarna cijev



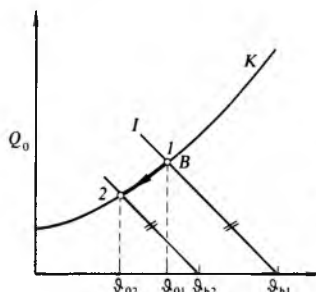
Karakteristika je prigušivanja kroz kapilarnu cijev da se u isparivač propušta svakolika radna tvar kondenzirana u kondenzatoru, pa je prigušivanje kapilarnom u smislu regulacije jednako regulaciji pomoću ventila s plovkom na visokotlačnoj strani. Kad se prigušuje kapilarnom, uređaj smije imati samo jedan jedini isparivač. Budući da se sva kapljevita radna tvar nalazi pretežno unutar isparivača, kritična je količina radne tvari kojom se smije napuniti uređaj. Prevelika količina radne tvari u isparivaču uzrokuje hidrauličke udare u kompresoru, osobito pri uključivanju u pogon, a premala količina ne pokriva dovoljno površinu isparivača za isparivanje, pa se smanjuje rashladni učinak i pregrijava kompresor.

Unutrašnji promjer i duljina kapilarne cijevi određuje protok radne tvari uz potrebno prigušivanje, a time i rashladni učinak uređaja. Dimenzije kapilare obično se provjeravaju pokusom.

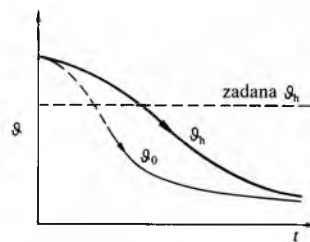
Hlađenje zraka

Toplinsko opterećenje neke hladionice mijenja se tokom rada u širokim granicama, već prema temperaturi okoliša, količini i temperaturi unesene ili iznesene robe, učestalosti otvaranja vrata i promjeni ostalih mogućih toplinskih opterećenja.

Rashladni učinak isparivača (125) mora osigurati održavanje zadane niske temperature u hladionici i pri njezinu najvećem toplinskom opterećenju. Kako napreduje ohlađivanje robe unesene u hladionicu, tako se smanjuje potrebno hlađenje, a održavanje zadane temperature u hladionici zahtijeva sve manji rashladni učinak. Ako se rashladni učinak ne smanji na potrebnu vrijednost, temperatura u hladionici će se sniziti možda na nepoželjne niske vrijednosti, a time i temperatura isparivanja radne tvari u isparivaču (sl. 64). Ravnotežna radna točka B, sjecište radnih karakteristika



Sl. 64. Klizanje radne točke rashladnog uređaja

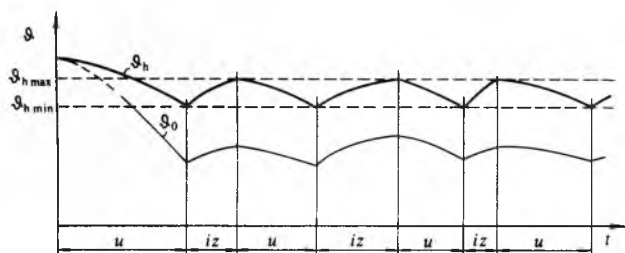


Sl. 65. Vremenski tok temperature hlađenog prostora (θ_h) i temperature isparivanja (θ_0) bez regulacije rashladnog učinka

kompresora K i isparivača I , klizi po radnoj karakteristici kompresora sve niže, a time se snižuje i temperatura hlađenog prostora ϑ_h i pripadna temperatura isparivanja ϑ_0 . Vremenski tok temperatura ϑ_h i ϑ_0 (sl. 65) pokazuje da obje temperature teže sve nižim vrijednostima i da je među njima sve manja razlika. Osim možda nepoželjnih okolnosti u hladionici, to posebno nepovoljno utječe na rad kompresora, jer je tlak usisavanja sve niži, a kompresijski omjer sve veći.

Dakle, da bi se temperatura hlađenja održala unutar dopuštenih granica, mora se rashladni učinak kompresora regulirati prema trenutnom toplinskom opterećenju hlađenog prostora. Za to postoji više mogućnosti (v. *Kompresor, Regulacija učinka stapnih kompresora*, TE 7, str. 230), a u rashladnoj se tehnici pretežno primjenjuju sljedeće dvije regulacije učinka rashladnog kompresora: vremenska ili stupnjevana regulacija i neprekidna ili progresivna regulacija.

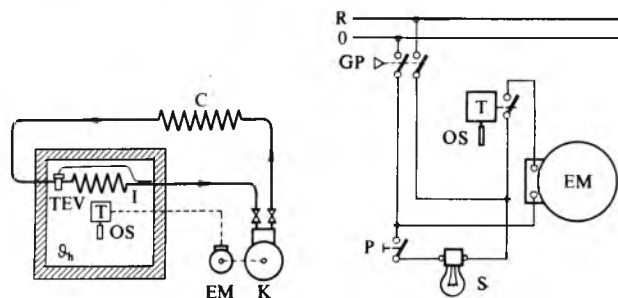
Vremenska regulacija (digitalna) prekida rad rashladnog kompresora u času kad je u hladionici postignuta dopuštena minimalna temperatura ϑ_{hmin} . Za vrijeme prekida rada hladionica se ne hladi, pa zbog dotoka topline izvana u njoj raste temperatura. Kad temperatura naraste na najvišu dopuštenu vrijednost ϑ_{hmax} , pokrene se opet rashladni kompresor i hlađenje započinje iznova. Kolebanje temperature ϑ_h pri vremenskoj regulaciji iznosi npr. $1 \dots 5^\circ\text{C}$. Primjer vremenskog toka temperatura ϑ_h i ϑ_0 prikazan je na sl. 66.



Sl. 66. Vremenski tok temperature hlađenog prostora (ϑ_h) i temperature isparivanja (ϑ_0) s vremenskom regulacijom rashladnog učinka

U suvremenoj rashladnoj tehnici vremenska se regulacija provodi automatski (sl. 67). Temperaturu u hladionici mjeri termostat T . Kad se pojavi najviša dopuštena temperatura ϑ_{hmax} na osjetilu OS , termostat uključi strujni krug pogonskog elektromotora EM rashladnog kompresora K , a kad se temperatura hlađenja opet snizi na ϑ_{hmin} , termostat isključuje elektromotor.

Vremenska regulacija rashladnog učinka upotrebljava se za male i srednje rashladne uređaje u kućanstvu, ugostiteljstvu i trgovini kada rashladni uređaj ima samo jedan isparivač, a termostat nadzire temperaturu jednog hlađenog prostora.



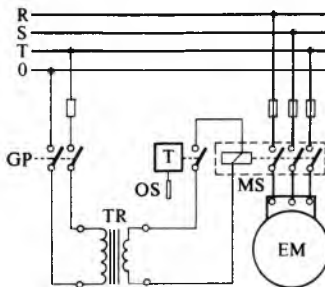
Sl. 67. Vremenska regulacija rashladnog učinka termostatom. K kompresor, EM pogonski elektromotor, C kondenzator, I isparivač, T termostat, OS temperaturno osjetilo, TEV regulator stalnog pregrijanja

Sl. 68. Električna spojna shema za pokretanje jednofaznog motora za pogon kompresora. EM električni motor, T termostat, S žarulja, P prekidač za uklopavanje žarulje, GP glavni prekidač

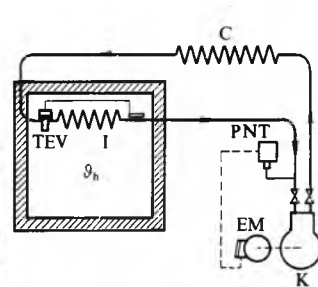
U najmanjim rashladnim uređajima (kućni hladnjak, škrinja za zamrzavanje i sl.) prekidač termostata (T) uključen je neposredno u strujni krug jednofaznog elektromotora (sl. 68). Električna spojna shema prikazuje spoj žarulje S (za

unutrašnju rasvjetu hladnjaka) i prekidača P koji se zatvori kada se otvore vrata hladnjaka.

U rashladnim uređajima većega rashladnog učinka Q_0 za pogon kompresora služi trofazni elektromotor, a termostat upravlja radom motora posredno relejnom magnetnom sklopkom (MS , sl. 69). Upravljački napon u krugu prekidača termostata i svitka magnetne sklopke transformator TR transformira na napon od 24 V .

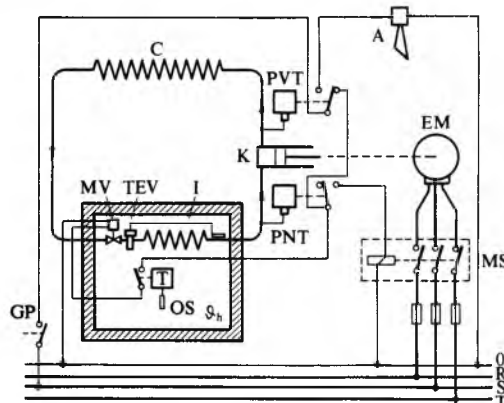


Sl. 69. Električna spojna shema za pokretanje trofaznog motora za pogon kompresora. EM elektromotor, MS magnetna sklopka, T termostat, TR transformator, GP glavni prekidač



Sl. 70. Vremenska regulacija presostatom niskog tlaka (PNT). K kompresor, EM elektromotor, C kondenzator, I isparivač, TEV regulator stalnog pregrijanja

Vremenska regulacija temperature u hlađenom prostoru može se automatski provesti i pomoću presostata niskog tlaka (PNT), instrumenta priključenog na usisni vod kompresora (sl. 70), koji svojim osjetilom prati promjene tlaka isparivanja. Budući da se snižavanjem temperature isparivanja snižuje i tlak, presostat će, kad je postignut najniži još dopušteni tlak isparivanja, prekidom strujnog kruga elektromotora obustaviti rad kompresora K . Kad uređaj ne radi, tlak u isparivaču polagano raste zbog dovođenja topline izvana, pa kad poraste do maksimalno još dopuštenog tlaka, presostat će ponovno uključiti pogon kompresora i hlađenje se nastavlja. Takva regulacija doduše sprečava da se temperature spuste do nedopustivo niskih vrijednosti, ali se temperatura hlađenog prostora može mijenjati u širim granicama nego kad hlađenjem upravlja termostat.



Sl. 71. Vremenska regulacija termostatom i presostatom. K kompresor, C kondenzator, I isparivač, GP glavni prekidač, MV magnetni ventil, TEV regulator stalnog pregrijanja, T termostat, OS osjetilo temperature, PNT presostat niskog tlaka, PVT presostat visokog tlaka, EM elektromotor, MS motorna sklopka, A alarmna sirena

Prema posebno zamišljenom programu automatizirani uređaj ima termostat i presostat niskog tlaka (sl. 71). Svi su kontakti prekidača termostata i presostata nacrtani u položaju kad je rashladni uređaj u pogonu, dakle kad je temperatura u hladionici iznad tražene temperature. Uznapredovalim hlađenjem temperatura se u hladionici snižuje i kad termostat T ustanovi da je u okolišu njegova osjetila OS postignuta minimalna temperatura, prekine strujni krug magnetnog ventila, on se zatvori i napajanje isparivača radnom tvari prestane. Kompresor, međutim, i dalje je u pogonu jer strujni

krug svitka magnetne sklopke elektromotora nije prekinut. U tom razdoblju kompresor ispumpava preostalu radnu tvar iz isparivača I, pa se u isparivaču snizuje tlak, a tek kada se snizi na minimalnu vrijednost, presostat niskog tlaka prekida strujni krug svitka magnetne sklopke. Elektromotor se zaustavlja, a s njime i kompresor, pa hlađenje prestaje. Isparivač je praktički prazan i u njemu vlada minimalni tlak.

Kad temperatura u hladionici poraste na maksimalno dopuštenu vrijednost, termostat T uključuje strujni krug magnetnog ventila, on se otvara, a radna tvar nahrupi iz kondenzatora u isparivač u kojemu vlada niski tlak. Pri tome radna tvar isparuje, a tlak u isparivaču raste, pa kad poraste na maksimalno dopušteni tlak, presostat niskog tlaka uključuje strujni krug svitka magnetne sklopke elektromotora i kompresor se stavlja u pogon te uređaj počinje opet hladiti.

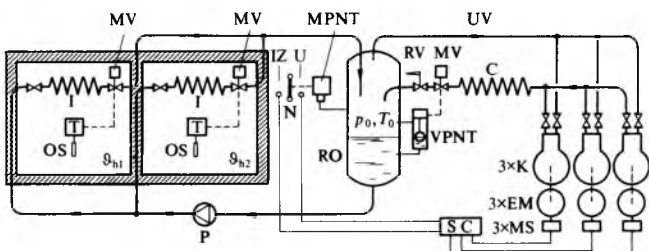
U hladionici se održava temperatura $\vartheta_{hmin} < \vartheta_h < \vartheta_{hmax}$, a tlak isparivanja ne može postati manji od p_{0min} . Uređaj je također automatski osiguran protiv hidrauličkih udara pri pokretanju kompresora jer je isparivač prije obustavljanja pogona ispražnjen.

Uređaj je osiguran i sigurnosnim presostatom visokog tlaka (PVT), koji otvara svoj prekidač kada tlak u kondenzatoru premaši najviši dopušteni tlak. Napajanje je strujnih krugova automatike tako prekinuto i uređaj se automatski zaustavlja, a uključi se alarmna sirena A. Kad se u kondenzatoru tlak ponovno snizi na minimalno dopušteni tlak, presostat visokog tlaka uključuje napon upravljanja i uređaj može odmah automatski raditi ako je to potrebno. Tako je uređaj osiguran protiv opasno visokih tlakova na tlačnoj strani, npr. kad nestane rashladne vode za hlađenje kondenzatora.

Prema shemi na slici 71 može se izvesti vremenska regulacija učinka i kad uređaj ima više isparivača slične namjene, ali je svaki upravljan svojim termostatom. Tada presostat niskog tlaka prekida rad kompresora tek kada zadnji od termostata prekine rad svojeg isparivača, a uključuje kompresor u rad kad prvi od njih zatraži hlađenje.

Kao prigušni regulatori dotoka radne tvari u isparivač služe ili kapilarne prigušnice (najmanji uređaji) ili regulatori stalnog pregrijanja (srednji i veći uređaji).

Stupnjevana regulacija rashladnog učinka rashladnih kompresora primjenjuje se u sustavima velikih industrijskih rashladnih uređaja pumpnog, recirkulacijskog načina djelovanja (sl. 72). Iako su na slici prikazane samo dvije hladene prostorije, njih može biti i više, no svaka mora imati svoj termostat, a svaki isparivač magnetni ventil. Također je potrebno i više kompresora u paralelnom radu.



Sl. 72. Pumpni, recirkulacijski rashladni uređaj sa stupnjevanom regulacijom učinka kompresora. I isparivač, T termostat, OS temperaturno osjetilo, MV magnetni ventil, P pumpa, MPNT modulacijski presostat niskog tlaka, N preklopnik, RO recirkulacijski odvajач, RV regulacijski ventil, VPNT prigušni regulator s plovkom, UV usisni vod, C kondenzator, K kompresor, EM elektromotor, MS motorna sklopka, SC naprava za stupnjevano upravljanje radom kompresora

Kapljevita radna tvar niskog tlaka i tražene niske temperature isparivanja dobavlja se pumpom u isparivače I smještene u pojedinim hladionicama. Protjecanjem kroz isparivač dio radne tvari (npr. 10%...20%) ispari i ostvari rashladni učinak u pripadnoj hladionici, a nastala smjesa pare i vrele kapljevine radne tvari vraća se u recirkulacijski odvajач. Para se odvajа od kapljevina i usisnim se vodom privodi paralelno spojenim kompresorima. Nakon kompresije od tlaka p_0 na

tlak kondenzacije para se u kondenzatoru ukaplji i pothladi, a nastali se kondenzat prigušnim regulatorom s plovkom prigušuje u recirkulacijski odvajач, i tako se u njemu održava stalna razina kapljevite radne tvari niskog tlaka i temperature.

Kada je hlađenjem u nekoj od hladionica postignuta tražena temperatura, termostat u njoj zatvara magnetni ventil na izlazu iz isparivača, pa prestaje cirkulacija radne tvari kroz taj isparivač, a time i hlađenje pripadne hladionice. Naime, nakon što se zatvori magnetni ventil isparivanje se kraće vrijeme dalje nastavlja, pa stvorena para potisne kapljevitu radnu tvar natraške iz isparivača, te isparivač ostane praktički prazan.

Tada kompresori sišu manji volumen pare radne tvari, pa se tlak u recirkulacijskom odvajачu RO počinje smanjivati. Tu promjenu tlaka prati modulacijski presostat niskog tlaka koji prebaci svoj preklopnik N iz neutralnog, srednjeg položaja na kontakt IZ, te tako prenese informaciju napravi za stupnjevano upravljanje radom kompresora (*step controller*) da treba smanjiti rashladni učinak. Posredovanjem magnetnih sklopki pojedini se kompresori (ili pojedini cilindri kompresora) u određenim vremenskim razmacima jedan iza drugoga zaustavljaju sve dok se rashladni učinak preostalih kompresora u pogonu ne prilagodi trenutnim potrebama hlađenja. Modulacijski presostat tada vrati svoj preklopnik u neutralni srednji položaj, jer se i tlak u odvajачu vratio na zadanu vrijednost, pa naprava za stupnjevano upravljanje prestane s daljim isklapanjem kompresora.

Pri porastu tlaka u odvajачu modulacijski presostat prebacuje svoj preklopnik na kontakt U i tako informira napravi za stupnjevano upravljanje da treba povećati rashladni učinak kompresora, pa započinje sekventno upućivanje kompresora u rad dok se ne postigne ponovna ravnoteža rashladnog učinka kompresora i potrebnog hlađenja.

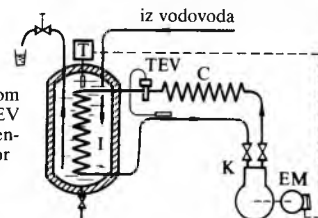
Stupnjevana regulacija upotrebljava se u velikim i razgranatim rashladnim uređajima, npr. za industrijske i komunalne hladnjače, za industriju mesa, ribe i drugih prehrambenih proizvoda, za umjetna klizališta i sl.

Velika je prednost takva sustava da se prigušivanje radne tvari postiže u jednom jedinom prigušnom regulatoru, uvijek pod nadzorom stručnog osoblja, da se automatika u svakoj hladionici sastoji samo od termostata i magnetnog ventila, te da se cirkulacijom kapljevite hladne radne tvari jednostavno ostvaruje hlađenje i na udaljenim mjestima uz sekventnu regulaciju rashladnog učinka kompresora.

Hlađenje kapljevina

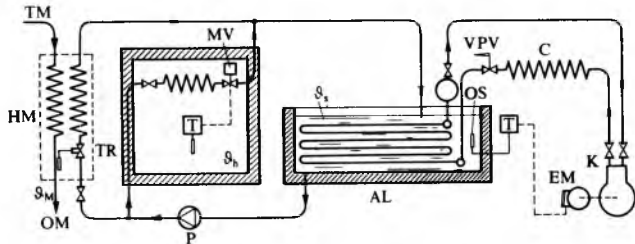
Počevši od pitke vode, često se hlade različiti kapljeviti proizvodi kao što je mlijeko, pivo, vino, mineralna voda, bezalkoholna pića i voćni sokovi, ali i druge kapljevite u industrijskim procesima i sekundarne rashladne tvari (rasoline) u postupcima posrednog hlađenja. U suvremenim se postupcima hlađenja automatski održavaju zahtijevane niske temperature hlađenja kapljevina.

Hlađenje pitke vode (sl. 73) u malim rashladnim automatima obavlja se tako da voda pod tlakom iz vodovoda ispunjava spremnik S u kojemu se nalazi isparivač I rashladnog uređaja. Termostat, kojemu je osjetilo uronjeno u hladenu vodu, osigurava da se voda ohladi na traženu temperaturu. Kad je to postignuto, isključuje se elektromotor EM rashladnog kompresora K. Trošenjem ohlađene vode toplija voda iz vodovoda ulazi u spremnik S, pa temperatura u njemu poraste na maksimalno dopuštenu temperaturu, a termostat ponovno uključuje rashladni kompresor i voda se ponovno hladi. Rad isparivača I regulira se regulatorom stalnog pregrijanja.



Sl. 73. Hlađenje pitke vode u rashladnom automatu. T termostat, I isparivač, TEV regulator stalnog pregrijanja, C kondenzator, K kompresor, EM elektromotor

Akumuliranje rashladnog učinka. Slatka voda ohlađena do temperature zaleđivanja služi u mljekarama za brzo ohlađivanje toplog mlijeka (sl. 74) i posredno hlađenje hladionica na temperaturu višu od 0°C .



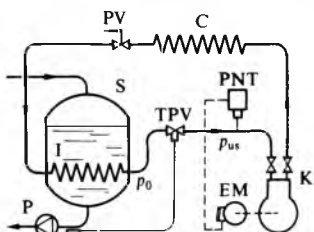
Sl. 74. Hlađenje mlijeka vodom uz akumulaciju rashladnog učinka u ledu. HM izmjenjivač za hlađenje mlijeka, TM toplo mlijeko, OM ohlađeno mlijeko, TR termostatski regulator protoka hladne vode, MV magnetni ventil, T termost, P pumpa, AL akumulator leda, VPV ventil s plovkom, C kondenzator, K kompresor, EM elektromotor

To je poseban uređaj koji treba odvesti mnogo toplinske energije za brzo hlađenje mlijeka kroz 1–2 sata tokom ranog jutra. Stoga se iskorištava mogućnost akumulacije rashladnog učinka u vodenom ledu kroz veći dio dana i noći kad se mlijeko ne hladi. U akumulatoru leda (sl. 74), ispunjenom slatkom vodom, ugrađen je isparivač rashladnog uređaja s temperaturom isparivanja mnogo nižom od 0°C , zbog čega se na cijevima isparivača s vanjske strane stvara kora leda. Tako rashladni kompresor relativno maloga rashladnog učinka, radeći dnevno dvadesetak sati, akumulira svoj rashladni učinak stvaranjem debele kore leda na cijevima isparivača. Kad ledena kora poraste na predviđenu debljinu, posebno oblikovano osjetilo OS osjeti dodirnom nižu temperaturu leda i termostatski regulator obustavi rad rashladnog kompresora, jer je akumulacija dovršena. Tako se u većim mljekarama akumulira više tona leda, a otapanjem kilograma leda ostvari se rashladni učinak od $r_s = 333 \text{ kJ/kg}$. Velika je prednost akumuliranja rashladnog učinka da je potrebni rashladni uređaj mnogostruko manjeg učinka od uređaja koji bi proizvodio veliki rashladni učinak potreban da se mlijeko ohladi kroz vrlo kratko vrijeme. Uz to, led se akumulira pretežno noću kad je i električna energija za pogon kompresora obično jeftinija.

Na početku hlađenja mlijeka pumpa recirkulira ledenu vodu iz akumulatora leda AL kroz izmjenjivač za brzo hlađenje mlijeka. Oduzimanjem topline mlijeku ledena se voda zagrije za nekoliko stupnjeva i vraća se u AL gdje otapa ledenu koru na isparivaču, pa se opet ohladi na izlaznu temperaturu od 0°C . Tražena temperatura ohlađenog mlijeka održava se automatski termostatskim regulatorom TR protoka ledene vode kroz hladionik mlijeka. Termostatski uključuje rashladni uređaj u rad i za vrijeme hlađenja mlijeka čim se kora akumuliranog leda na isparivaču počinje zbog otapanja stanjivati.

Regulaciju temperature u posredno hlađenoj hladionici ledenom vodom preuzima termostatski koji upravlja magnetnim ventilom na već opisani način.

Hlađenje kapljavine u protoku upotrebljava se kad se struja neke kapljavine mora hladiti (sl. 75). Hlađena kapljavina protječe kroz spremnik u kojemu je ugrađen isparivač I rashladnog uređaja. Temperatura ohlađene kapljavine održava se regulacijom rashladnog učinka kompresora tako da paru radne tvari u usisnom vodu prigušuje termoregulator prigušivanja. Ako se temperatura kapljavine želi sniziti, npr. zbog



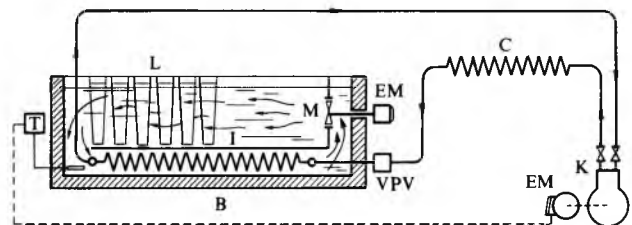
Sl. 75. Hlađenje kapljavine u protoku. PV ručni prigušni ventil, S spremnik, I isparivač, P pumpa, C kondenzator, PNT presostat niskog tlaka, TPV termoregulator prigušivanja, K kompresor, EM elektromotor

smanjenog protoka hladene kapljavine, termoregulator priguši paru u usisnom vodu i tako smanji rashladni učinak kompresora. Presostat niskog tlaka obustavlja rad kompresora kad se tlak usisavanja snizi prigušivanjem na vrlo nisku vrijednost.

Takva regulacija učinka rashladnog kompresora predstavlja tipičnu progresivnu (analognu) regulaciju smanjivanjem tlaka usisavanja.

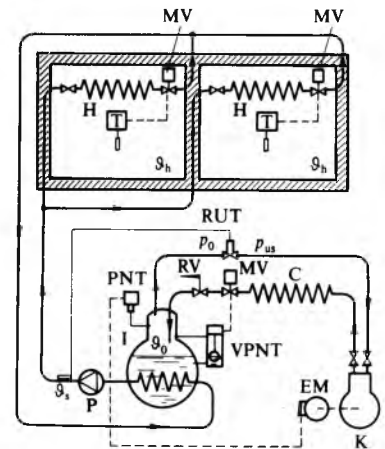
Hlađenje sekundarnih rashladnih tvari. Posredni se prijenos topline od hlađene tvari na radnu tvar u isparivaču primjenjuje u posebnim postupcima hlađenja, npr. kad neposredno hlađenje nije izvedljivo, kad se traži povećana sigurnost u djelovanju uređaja ili kad je i na temperaturi hlađenja $\vartheta_h \leq 0^{\circ}\text{C}$ potrebno akumulirati rashladni učinak u sekundarnoj radnoj tvari.

Posredno hlađenje primjenjuje se npr. u proizvodnji vodenog leda u čeličnim kalupima (sl. 76). Sekundarna rashladna kapljavina, rasolina, ispunjava toplinski dobro izolirani bazen koji ima na dnu ugrađen isparivač rashladnog uređaja. U rasolinu koja je ohlađena na temperaturu $-15^{\circ}\text{C} \dots -18^{\circ}\text{C}$ uronjeni su čelični kalupi L ispunjeni pitkom vodom. Voda se u njima smrzava odajući toplinu zamrzavanja ($r_s = 333 \text{ kJ/kg}$) rasolini koja, miješana propelerom miješalicom, prenosi tu toplinu na primarnu radnu tvar u isparivaču. Za automatsko prigušivanje i dotok radne tvari u isparivač upotrebljava se ventil s plovkom na visokotlačnoj strani VPV.



Sl. 76. Proizvodnja vodenog leda u kalupima neposrednim hlađenjem. T termostatski, L čelični kalupi, B termički izolirani bazen, I isparivač, M miješalica, EM elektromotor, VPV ventil s plovkom na visokotlačnoj strani, C kondenzator, K kompresor

Sl. 77. Posredno hlađenje u hladionicama. MV magnetni ventil, H hladionica, T termostatski, RUT regulator usisnog tlaka, PNT presostat niskog tlaka, RV ručni prigušni ventil, C kondenzator, P cirkulacijska pumpa, I isparivač, VPNT ventil s plovkom na niskotlačnoj strani, EM elektromotor, K kompresor



Pri proizvodnji leda jedva bi bilo potrebno regulirati temperaturu rasoline, no ako bazen, umjesto za proizvodnju leda, služi npr. kao hladna kupka za hladno navlačenje strojnih dijelova ili za nešto drugo, tada termostatski osigurava da se postigne i održava tražena temperatura hladne kupke, npr. vremenskom ili stupnjevanom regulacijom učinka kompresora.

Ponekad nije poželjno da primarna radna tvar neposredno hladi zrak u hladionicama, pa se tada primjenjuje posredno hlađenje cirkulacijom ohlađene sekundarne rashladne tvari kroz izmjenjivače topline H u hladionicama (sl. 77). Nakon komprimiranja kompresorom K, primarna se radna tvar kondenzira u kondenzatoru, te prigušnom napravom s plov-

kom na niskotlačnoj strani prigušuje u isparivač I, i tamo isparuje oko cijevi u kojima se hladi rasolina na traženu temperaturu. Tu temperaturu na izlazu iz isparivača održava regulator usisnog tlaka u usisnom vodu kompresora. Pri porastu tražene temperature regulator se sve više otvara, a pri sniženju se pritvara. Dakle, rashladni učinak kompresora regulira se proporcionalno ili analogno, pa se rasolina na izlazu isparivača održava automatski na traženoj temperaturi.

Tako ohlađenu rasolinu tjera pumpa P kroz izmjenjivače topline H u hladionicama. Regulacija temperature hlađenja zraka u pojedinoj hladionici obavlja se termostatom i magnetnim ventilom na već opisani način. Kada je postignuta tražena temperatura zraka, termostat zatvori magnetni ventil i prestane cirkulacija rasoline kroz izmjenjivač topline H, a time i hlađenje.

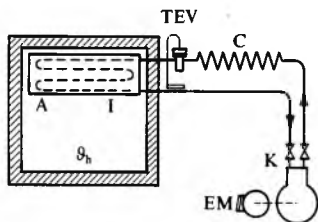
Kad se svi magnetni ventili u hladionicama zatvore, zagrijana se rasolina više ne vraća u isparivač, a tlak se u njemu počinje snižavati. Kad tlak postane viši od minimalnog tlaka, presostat niskog tlaka isključuje elektromotor kompresora i uređaj stane. No, kad bilo koji od termostata otvori svoj magnetni ventil, toplija rasolina poteče u isparivač, isparivanje započne i tlak poraste, pa presostat niskog tlaka uključi kompresor i hlađenje ponovno započne.

Količina rasoline koja cirkulira odabire se tako da se nakon preuzimanja topline u hladionicama vraća u isparivač na ponovno ohlađivanje s temperaturom za 2°C – 3°C višom od polazne temperature.

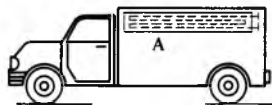
Posrednim hlađenjem povećava se sigurnost u radu uređaja. U hladionicama nema isparivača s neposrednim isparivanjem primarne radne tvari koja, pri propuštanju, može biti i opasna za ljude i hlađenu robu. Čitav, često razgranati sustav razvoda rasoline do hladionica i kroz izmjenjivače topline u hladionicama nalazi se pod niskim, praktički okolišnim tlakom, pri propuštanju izlazi bezopasna rasolina, a primarna se radna tvar nalazi samo u uređajima u strojarnici pod stalnim nadzorom stručnog osoblja.

Ipak se posredni rashladni sustavi danas rijetko upotrebljavaju, jer za jednaki rashladni učinak troše više energije od sustava s neposrednim hlađenjem. Razlog je tome dvokratni prijenos topline od zraka u hladionici tražene temperature najprije posredovanjem hladionika na hladniju rasolinu, a zatim u isparivaču na primarnu radnu tvar s temperaturom isparivanja. Zbog toga za jednaku temperaturu u hladionici temperatura isparivanja mora biti barem za 7°C – 10°C niža nego za neposredno hlađenje. To traži i veći kompresijski omjer i veći potrošak energije.

Akumulacijsko hlađenje. Kada se zbog osjetljivosti hladnog materijala traži da se hlađenje nastavi i za vrijeme nenadanog prekida dovoda električne energije za pogon kompresora, primjenjuje se posredno akumulacijsko hlađenje (sl. 78). U hladionicu se ugradi spremnik A s posebno izvedenim isparivačem I. Prostor između cijevi isparivača i oplata spremnika ispunjen je nekom sekundarnom rashladnom tvari eutektičkog sastava, npr. smjesom magnezij-klorida i vode ($\text{MgCl}_2/\text{H}_2\text{O}$). Ostvarivanjem rashladnog učinka kroz određeno vrijeme odvodi se eutektičkoj smjesi ukupna toplota zamrzavanja u akumulatoru pri stalnoj niskoj temperaturi zamrzavanja eutektika od $-33,6^{\circ}\text{C}$. Kad je zamrzavanje dovršeno, akumulator je ispunjen eutektičkim ledom, koji



Sl. 78. Akumulacijsko hlađenje eutektičkom smjesom. A akumulator, I isparivač, TEV prigušni ventil stalnog pregrijanja, C kondenzator, EM elektromotor, K kompresor



Sl. 79. Hlađenje kamiona eutektičkom pločom. A akumulator s isparivačem

je u stanju da kao hladnije tijelo ostvaruje rashladni učinak (veže na sebe toplotu okoliša) otapajući se kroz određeno vrijeme pri stalnoj temperaturi od $-33,6^{\circ}\text{C}$. Budući da takvo otapanje može potrajati i više sati, što ovisi o toplinskom opterećenju hladionice i masi rasoline u akumulatoru, hlađenje je osigurano i kada rashladni uređaj ne radi, ili se nenadano zaustavi zbog nestanka električne energije. To omogućuje da se rashladni učinak akumulira u eutektičkom ledu i noću uz nižu cijenu električne energije.

Takvi rashladni uređaji služe za hlađenje i čuvanje bioloških preparata, za čuvanje derivata krvi i krvne plazme, pri provedbi osjetljivih pokusa u znanstvenim laboratorijima itd.

Zanimljiva je primjena posrednog akumulacijskog hlađenja u kamionima za razdiobu smrznutih namirnica na području grada (sl. 79). U teretni prostor ugrađeni su pločasti eutektički akumulatori s cijevima isparivača. Kamion nema vlastitog rashladnog uređaja, već se isparivač eutektičkog akumulatora tokom noći priključuje na centralni rashladni uređaj u garaži, pa se do jutra eutektička smjesa u akumulatoru smrzne. Tokom dana eutektička se smjesa u prostoru kamiona polagano otapa pri stalnoj temperaturi i održava unutrašnjost kamiona na određenoj niskoj temperaturi.

Na istom načelu djeluju i tzv. izletnički hladnjaci, toplinski izolirane kutije u koje se ulažu plastične vrećice ispunjene pogodnom eutektičkom smjesom koja se prethodno zamrzne u kućnom hladnjaku.

Miješanjem različitih kapljevina i soli mogu se postizati poželjne temperature zamrzavanja eutektičkih smjesa.

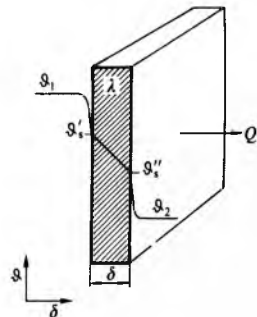
IZMJENJIVAČI TOPLINE RASHLADNIH UREĐAJA

Da bi se tokom rashladnog procesa toplota prenijela s niže na višu temperaturu, potrebna su u principu najmanje dva izmjenjivača topline. Jedan od njih omogućuje da se toplota s hladnog tijela prenese na radnu tvar procesa pri niskoj temperaturi ϑ_0 , a drugi da se toplota ponesena radnom tvari preda okolišu pri višoj temperaturi ϑ . Izmjena topline između dvaju različitih nosilaca topline odvija se uvijek kroz neku stijenku koja ih razdvaja, pa zato materijal stijenke treba da ima što veću toplinsku provodljivost. Velika toplinska provodljivost svojstvo je metala.

Prijenos topline kroz razdjelnu stijenku složena je termodinamička pojava. Toplota Q koja prolazi kroz materijalnu stijenku u smjeru njezine normale proporcionalna je s površinom stijenke F , s razlikom temperature $\vartheta'_s - \vartheta''_s$ na jednoj i na drugoj strani stijenke, te toplinskom provodljivošću materijala stijenke λ , a obrnuto proporcionalna s debljinom stijenke δ (sl. 80). To je Fourierov zakon koji glasi

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} F (\vartheta'_s - \vartheta''_s). \quad (133)$$

Da bi se toplota provodila kroz stijenku, mora se stijenici na njezinoj toplijoj strani toplota privoditi, a na hladnijoj odvoditi.



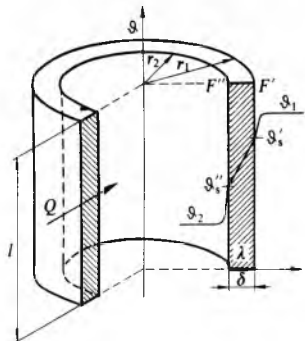
Sl. 80. Prijenos topline kroz ravnu stijenku

Prijelaz topline Q od nosioca topline temperature ϑ_1 na površinu stijenke F' temperature ϑ'_s , te prijelaz istog iznosa topline s druge strane stijenke s površine F'' temperature ϑ''_s na primaoca topline temperature ϑ_2 ovisi o veličini površina F' i F'' , razlici temperatura $\vartheta_1 - \vartheta'_s$ i $\vartheta''_s - \vartheta_2$, te koeficijentima

prijelaza topline α_1 i α_2 . To je Newtonov zakon koji glasi za prijelaz topline s nosioca topline na stijenku, odnosno od stijenke na nosioca topline,

$$Q = \alpha F \Delta \vartheta. \quad (134)$$

U rashladnoj se tehnici najviše upotrebljavaju različite cijevne konstrukcije kao površine za prijenos topline (sl. 81).



Sl. 81. Prijenos topline kroz stijenku cijevi

U stacionarnom stanju toplina Q privedena vanjskoj površini cijevi $F' = 2r_1\pi l$ mora proći kroz stijenku cijevi debljine δ i toplinske vodljivosti λ , a zatim se odvodi s unutrašnje površine $F'' = 2r_2\pi l$, dakle mora postojati jednakost između relacije (133) i relacije (134), pa je

$$Q = \alpha_1 F' (\vartheta_1 - \vartheta'_s) = \frac{\lambda}{\delta} F (\vartheta'_s - \vartheta''_s) = \alpha_2 F'' (\vartheta''_s - \vartheta_2). \quad (135)$$

Mjerodavna površina za prolaz topline u stijenci računa se prema izrazu

$$F = \frac{F' - F''}{\ln \frac{F'}{F''}}, \quad (136)$$

dok je za cijevi normalnih debljina stijenke dovoljno točno računati prema izrazu

$$F = \frac{F' + F''}{2}. \quad (137)$$

Eliminacijom temperatura ϑ'_s i ϑ''_s iz izraza (135) dobiva se toplina prenesena kroz stijenku cijevi

$$Q = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{\frac{1}{\alpha_1 F'} + \frac{\delta}{\lambda F} + \frac{1}{\alpha_2 F''}}, \quad (138)$$

ili svedena na unutrašnju površinu stijenke F''

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \frac{F''}{F'} + \frac{\delta}{\lambda} \frac{F''}{F} + \frac{1}{\alpha_2}} F'' (\vartheta_1 - \vartheta_2) = k'' F'' (\vartheta_1 - \vartheta_2). \quad (139)$$

Jednak izraz vrijedi i kad cijevi imaju rebra, uz uvjet da je α_1 koeficijent prijelaza topline na rebra ukupne površine F' , a α_2 na unutrašnjoj strani cijevi površine F'' .

Za ravne je stijenke $F' = F'' = F$, pa izraz (139) prelazi u oblik

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} F (\vartheta_1 - \vartheta_2) = k F \Delta \vartheta, \quad (140)$$

gdje je k koeficijent prijenosa topline koji uključuje koeficijente prijelaza topline α_1 i α_2 , te toplinsku provodljivost materijala stijenke λ i debljinu stijenke δ .

U tabl. 4 navedene su vrijednosti toplinske provodljivosti λ za neke materijale koji su važni u rashladnoj tehnici.

Vrijednosti koeficijenata prijelaza topline α_1 i α_2 ne mogu se dati na jednostavan način jer ovise o mnogo čimilaca kao što su: vrsta nosioca topline, režim strujanja, gustoća, viskoznost, specifični toplinski kapacitet i toplinska provodljivost radne tvari, temperatura radne tvari i stijenke, te geometrijski oblik površine na kojoj se izmjenjuje toplina.

Zato su za pojedine tipove prijelaza topline bila potrebna mnoga mjerenja na modelima, pa je iz dobivenih rezultata primjenom teorije sličnosti trebalo odrediti stvarne vrijednosti koeficijenta α . Ipak, mogu se navesti granične vrijednosti unutar kojih se vjerojatno nalazi tražena vrijednost α (tabl. 5).

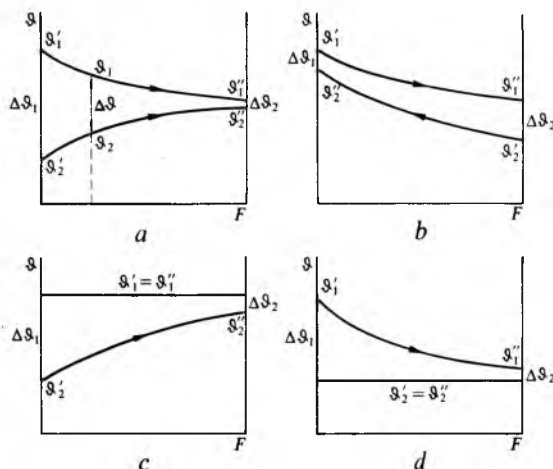
Tablica 4
TOPLINSKA PROVODLJIVOST
NEKIH MATERIJALA

Materijal	λ W K ⁻¹ m ⁻¹
Bakar	372
Aluminij	209
Čelik	45
Mazivo ulje	0,14
Vodeni led	2,56
Snijeg, inje	0,14
Ustajali snijeg	0,46

Tablica 5
ORIJENTACIJSKE VRIJEDNOSTI KOEFICIJENATA
PRIJELAZA TOPLINE α

Nosilac topline i okolnosti	α W K ⁻¹ m ⁻²
Zrak i plinovi, slobodna konvekcija	5,8...11,6
Zrak i plinovi uz brzinu strujanja $w = 3 \dots 5$ m/s	20...90
Voda, slobodna konvekcija	230...1 100
Voda uz brzinu $w = 1 \dots 2$ m/s	3 200...6 500
Rasolina NaCl i CaCl ₂ , slobodna konvekcija	230...350
Rasolina NaCl uz brzinu $w = 1 \dots 2$ m/s	350...1 100
R 717, isparivanje	580...1 200
R 12, isparivanje	460...1 000
R 22, isparivanje	580...1 200
R 717, kondenzacija	2 300...5 800
R 12, kondenzacija	1 100...2 300
R 718, filmska kondenzacija	4 600...17 000
R 718, kapljčasta kondenzacija	46 000...100 000

Izmjenjivači topline. Osnovna svojstva izmjenjivača topline ovise o tome da li nosioci topline 1 i 2 teku uzduž površine prijenosa topline u istom ili u suprotnim smjerovima. U izmjenjivaču topline s istosmjernim tokovima (sl. 82a) izlazna temperatura ϑ''_2 toka 2 uvijek ostaje niža od izlazne temperature ϑ'_1 toka 1. One bi se izjednačile tek na beskonačno velikoj površini F . Ako su tokovi 1 i 2 suprotnih smjerova (sl. 82b), izlazna temperatura ϑ''_2 može biti i viša od izlazne temperature ϑ'_1 .

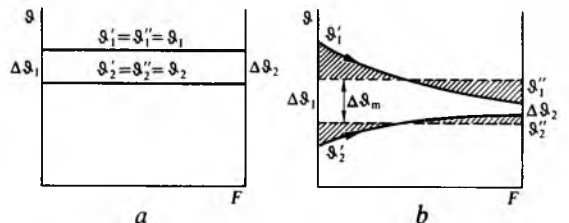


Sl. 82. Promjena temperatura u izmjenjivačima topline. a istosmjerni tok, b protusmjerni tok, c kondenzacija nosioca topline 1, d isparivanje nosioca topline 2

Kad pri izmjeni topline jedan od nosilaca topline mijenja agregatno stanje, svejedno je u kojemu se smjeru kreće uzduž površine, jer zadržava svoju stalnu temperaturu. Tako je tokom kondenzacije $\vartheta'_1 = \vartheta''_1 = \vartheta_1 = \text{const.}$, a drugi tok, npr. rashladna voda, zagrijava se od ϑ'_2 na ϑ''_2 (sl. 82c). Pri isparivanju je $\vartheta'_2 = \vartheta''_2 = \vartheta_2 = \text{const.}$, a drugi se tok, npr. zrak u hladionici, hladi od ϑ'_1 na ϑ''_1 (sl. 82d).

Sve to pokazuje da se razlika temperatura $\Delta\vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_2$ uzduž izmjenjivača topline mijenja.

Temperaturna razlika. Osnovne jednadžbe prijenosa topline (139) i (140) tako su izvedene da vrijede uz stalne temperature nosilaca topline koji oplakuju unutrašnju i vanjsku površinu stijenke, dakle kad je $\Delta\vartheta = \text{const.}$ (sl. 83).



Sl. 83. Temperaturne razlike pri izmjeni topline uzduž površine izmjenjivača topline. a) temperaturna razlika konstantna, b) temperaturna razlika promjenljiva

Taj je uvjet zadovoljen u isparivaču kondenzatoru između stupnjeva kaskadnoga rashladnog uređaja (sl. 32). U ostalim izmjenjivačima topline se ne prenosi uz konstantnu razliku temperatura (sl. 83b), pa se mora odrediti tzv. srednja logaritmička razlika temperatura, koja iznosi

$$\Delta\vartheta_m = \frac{\Delta\vartheta_1 - \Delta\vartheta_2}{\ln \frac{\Delta\vartheta_1}{\Delta\vartheta_2}} \quad (141)$$

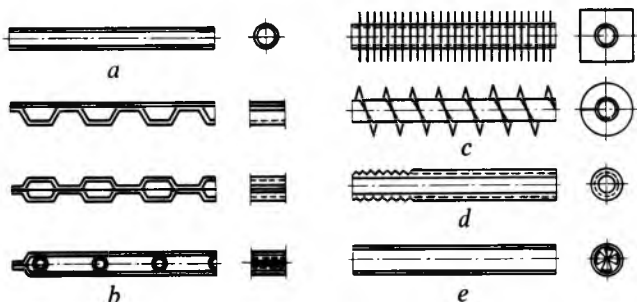
Time izrazi (139) i (140) dobivaju općeniti oblik

$$Q = \frac{\Delta\vartheta_m}{\frac{F}{\alpha_1 F'} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{F}{\alpha_2 F''}} \quad (142)$$

odnosno

$$Q = k F \Delta\vartheta_m \quad (143)$$

Površine za prijenos topline oblikuju se od metalnih cijevi i limova bakra, aluminija ili čelika. Tu površinu tvore glatke bešavne cijevi (sl. 84a) ili konstrukcije posebno oblikovanih limova i cijevi (sl. 84b).



Sl. 84. Oblikovanje površina za prijenos topline. a) glatke bešavne cijevi, b) posebno oblikovani limovi i cijevi, c) cijevi s limenim lamelama i namotanom spiralnom metalnom trakom, d) cijevi s utisnutim žljebovima, e) cijevi s uloženim tankim limovima

Kad jedan od nosilaca topline ima malen koeficijent prijelaza topline α (npr. zrak, tabl. 5), na njegovoj se strani povećava površina tako da se na cijev navuku limene lamele okruglog ili pravokutnog oblika, ili se na glatku cijev namota spiralna metalna traka (sl. 84c), ili se posebnim postupcima na vanjskoj strani bakrene cijevi utisnu žljebovi i tako povećava površina (sl. 84d). Kad nosilac topline s malom vrijednošću koeficijenta prijelaza topline struji unutar cijevi, ulažu se u cijev posebno profilirane dodatne površine tankog lima (sl. 84e), ali se tako povećava otpor strujanja unutar cijevi. Zato se takvo povećanje površine primjenjuje samo izuzetno.

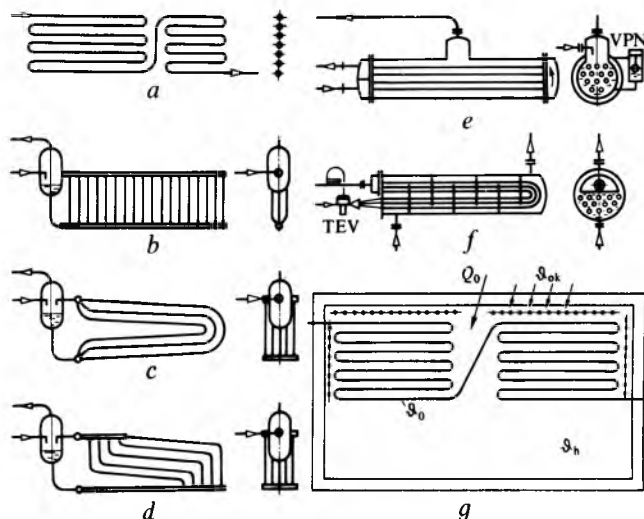
Isparivači

Isparivači se u rashladnoj tehnici razvrstavaju na nekoliko načina: prema obliku površine prijenosa topline, prema

načinu rada i regulacije napajanja, prema režimu strujanja donosioca topline (zrak, rasolina) i prema uvjetima djelovanja i primjeni.

Prema obliku površine prijenosa topline isparivači mogu biti glatkocijevni, pločasti i orebreni. Prema načinu rada i mogućoj regulaciji napajanja radnom tvari razlikuju se potopljeni i suhi isparivači. Prema namjeni postoje isparivači za hlađenje zraka i isparivači za hlađenje kapljevine.

Glatkocijevni isparivači mogu biti različitih izvedbi i namjena (sl. 85). Vijuge glatkih cijevi služe kao isparivači za hlađenje zraka u prostorima za trajnije skladištenje već prethodno smrznute robe (sl. 85a i 85g). Tada je jedino toplinsko opterećenje hladnog skladišta smrznute robe toplina koja iz toplijeg okoliša prodire u hladionicu kroz izolirane zidove, pa se zato glatkocijevni isparivači postavljaju tik do zidova i stropa hladionice (sl. 85g). Isparivanjem primarne radne tvari u cijevima topline se odvodi prije no što dospije u hladionicu. Tako se sprečava prekomjerna cirkulacija zraka u hladnom prostoru koja inače pogoduje prijenosu vlage iz robe (sublimacijom) na hladnije površine isparivača. Vлага se cijevima isparivača zaleđuje u inje koje, zbog izuzetno loše provodljivosti topline (tabl. 4), stvara dodatni otpor prijenosu topline.



Sl. 85. Glatkocijevni isparivači. a) isparivač od vijuga glatkih cijevi, b) isparivač s kratkim vertikalnim cijevima, c i d) isparivači s oblikovanim cijevnim vijugama, e) isparivač s horizontalnim cijevima u limenom plaštu, f) glatkocijevni isparivači savijeni u obliku slova U, g) smještaj isparivača uz zidove i strop hladionice

Prijenosu vlage na isparivačke cijevi pogoduje i preniska temperatura isparivanja primarne radne tvari. Naime, pri nižoj temperaturi površine isparivača niži je i parcijalni tlak vodene pare u zraku oko cijevi. Stoga vlaga u zraku putuje u smjeru nižeg parcijalnog tlaka i završava kao led na površini isparivača.

Kad se prenosi topline od zraka slobodnom konvekcijom na radnu tvar u isparivaču, koeficijent prijenosa topline vrlo je malen i iznosi $k = 3,5 \dots 4,5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, a temperaturna razlika mora biti također malena, $\Delta\vartheta_m = 7 \dots 10^\circ \text{C}$, da se ograniči prijenos vlage iz robe na isparivače, pa je zato i toplinska opteretivost glatkocijevnih isparivača malena i iznosi oko $q_F = k \Delta\vartheta_m = 25 \dots 45 \text{ W/m}^2$. To znači da za takvo mirno hlađenje treba ugraditi relativno veliku površinu glatkocijevnih isparivača $F = Q/q_F$.

U suvremenim rashladnim uređajima sustavi glatkocijevnih isparivača uključuju se u pumpni recirkulacijski rashladni uređaj neposrednog hlađenja prema shemi na sl. 72, ili posrednog hlađenja prema shemi na sl. 77.

Glatkocijevni isparivači s kratkim vertikalnim cijevima (sl. 85b) i s duljim, različito oblikovanim cijevnim vijugama (sl. 85c i d) primjenjuju se samo za hlađenje kapljevine. Uronjeni u bazen s rasolinom, takvi isparivači ostvaruju rashladni učinak u rashladnim uređajima posrednog hlađenja prema shemi na

sl. 76. Regulacija prigušivanja i dotoka radne tvari u isparivač postiže se pomoću jednog od regulatora s plovkom prikazanih na sl. 47, 49 ili 51.

Prijenos topline od rasoline (kapljevine) na glatku cijev mnogo je povoljniji nego kad se hladi zrakom, pogotovo ako se rasolina tjera miješalicom da struji oko cijevi. Vrijednost koeficijenta prijenosa topline nalazi se unutar granica $k = 520 \dots 580 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, a specifično toplinsko opterećenje $q_F = 2200 \dots 2500 \text{ W/m}^2$. Primarna je radna tvar u takvim isparivačima samo R 717. Isparivači toga tipa, prilagođene konstrukcije, upotrebljavaju se i u akumulatorima leda prema shemi na sl. 74.

Glatkocijevni se isparivači grade i za prisilno strujanje sekundarne rashladne tvari za vrijeme hlađenja. Rasolina, tj. cirkulacijskom pumpom, protječe kroz horizontalne cijevi koje se nalaze u vanjskom limenom plaštu (sl. 85e). Prostor oko cijevi, a unutar vanjskog plašta, ispunjen je do određene visine kapljevnom R 717 koja, preuzimajući toplinu od hladne rasoline unutar cijevi, isparuje oko cijevi s vanjske strane. Pri tome se postiže koeficijent prijenosa topline $k = 460 \dots 520 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, odnosno specifično toplinsko opterećenje površine izmjene topline $q_F = 2300 \dots 3500 \text{ W/m}^2$, uz $\Delta \theta_m = 5 \dots 7 \text{ }^\circ\text{C}$. Prigušivanjem i dotokom radne tvari u plašt isparivača upravlja regulator s plovkom na niskotlačnoj strani VPN.

Svi isparivači prikazani na sl. 85b, c, d i e spadaju u potopljene isparivače.

U uređajima za klimatizaciju hladi se slatka voda u posebno građenim glatkocijevnim isparivačima (sl. 85f). Primarna radna tvar R 12 ili R 22 isparuje unutar snopa glatkih bakrenih cijevi savijenih u obliku slova U, ugrađenih u vanjski plašt. Prostorom oko hlađenih cijevi, a unutar vanjskog plašta, struji hlađena voda obilazeći segmentne pregrade. Tako se povećava inače mala brzina strujanja vode oko cijevi, što utječe na povećanje prijenosa topline. Suvremeno izvedeni isparivači te vrste imaju koeficijent prijenosa topline $k = 1800 \dots 2000 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, odnosno toplinsko opterećenje površine prijenosa topline $q_F = 3000 \dots 5000 \text{ W/m}^2$. Više se vrijednosti postižu ako su cijevi iznutra orebrane. Cijeli snop isparivačkih cijevi vodi se iz vanjskog plašta prigodom čišćenja njihovih vanjskih površina. Prigušivanje i dotok primarne radne tvari regulira regulator stalnog pregrijanja TEV s posebnim razdjelnikom za uštrcavanje u svaku pojedinu cijev. Budući da para radne tvari izlazi iz snopa isparivačkih cijevi malo pregrijana, takav se isparivač svrstava u suhe isparivače.

Pločasti isparivači imaju površinu prijenosa topline sastavljenu od elemenata prikazanih na sl. 84b. Prve konstrukcije u razvoju pločastih isparivača imale su glatkocijevne bakrene vijuge obložene tankim pocinčanim limom i hermetiski zatvorene (sl. 86a). Budući da se u takvu isparivaču toplina prenosi

od okolišnog zraka na površinu limene oplate, a od nje posredovanjem bakrene cijevi na radnu tvar, potrebno je ostvariti što bolji metalni kontakt između vanjskog lima i uložnih isparivačkih cijevi. Radi toga se prostor unutar oplate evakuira, pa vanjski atmosferski tlak pritišće limenu oplatu na cijevi. Tako nastaju vakuumske ploče.

Ponekad se prostor između isparivačkih cijevi i vanjske oplate puni metalnom piljevinom (aluminij) i tako se ostvaruje metalni, za toplinu dobro vodljivi sloj između oplate i isparivačkih cijevi. Takve punjene ploče manje su osjetljive na propusnost oplate, no ipak se rjeđe primjenjuju.

Kao punilo može se odabrati i neka sekundarna rashladna tvar, npr. smjesa etilen-glikola i vode, ili neka rasolina eutektičkog sastava. Takve se isparivačke ploče nazivaju *akumulacijske* ili *eutektičke ploče*, a upotrebljavaju se u uređajima prikazanim na sl. 78 i 79.

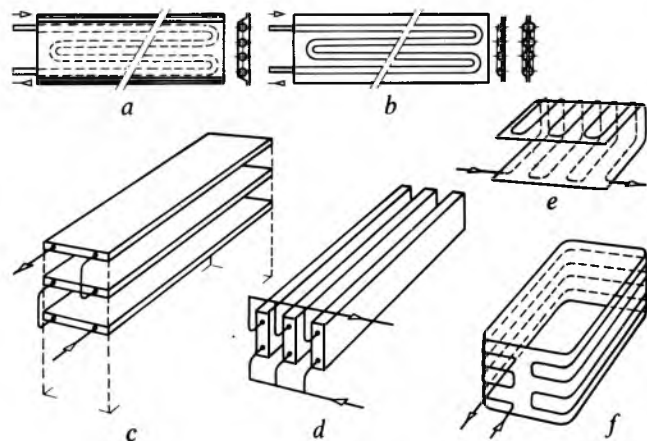
Suvremena tehnologija omogućuje izvedbe pločastih isparivača s više-manje glatkim površinama od posebno formiranih limova (od aluminija, bakra i sl.). Kanali potrebni za strujanje i isparivanje primarne radne tvari oblikuju se utiskivanjem u limove (sl. 84b), a zatim se limovi međusobno spajaju tračnim zavarivanjem uzduž kanala. Tako se proizvode lagani i jeftini pločasti isparivači bez punila, koji se primjenjuju samo za neposredno hlađenje zraka (sl. 86b).

Pločasti se isparivači mogu međusobno povezivati paralelno ili serijski, pa tako tvore isparivač s paralelnim horizontalnim pločama za hlađenje zraka u hladionici (sl. 86c), ili pak vertikalne police za kontaktno hlađenje ili smrzavanje namirnica (sl. 86d). Pločasti isparivači od limova s utisnutim kanalima za prolaz i isparivanje radne tvari jedina su suvremena izvedba isparivača za kućanske rashladne uređaje. Slika 86e prikazuje tipičan oblik savijenoga pločastog isparivača smještenog u najgornjem dijelu kućanskog hladnjaka, a slika 86f isparivač koji okružuje korisni prostor u škrinjama za zamrzavanje.

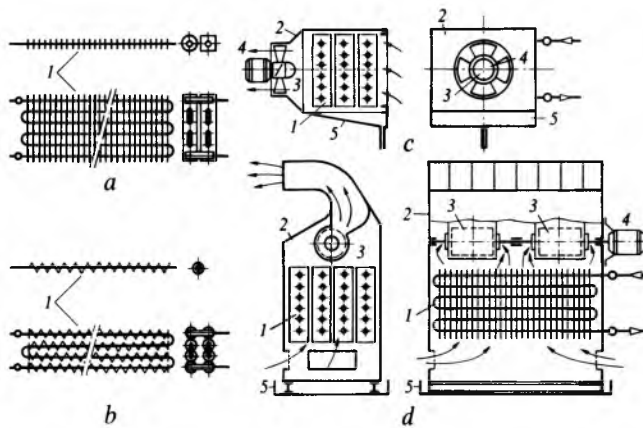
Pločasti se isparivači najčešće upotrebljavaju za mirno hlađenje zraka uz slobodnu konvekciju. Zbog toga je koeficijent prijenosa topline relativno malen i iznosi $k = 7 \dots 12 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, pa uz uobičajene temperaturne razlike $\Delta \theta_m = 7 \dots 20 \text{ }^\circ\text{C}$ specifično toplinsko opterećenje površine iznosi $q_F = 50 \dots 240 \text{ W/m}^2$.

Posebna su odlika pločastih isparivača njihove glatke površine, koje se jednostavno čiste, pa i kad se traži biološka čistoća. Zato se mnogo upotrebljavaju u uređajima za hlađenje živežnih namirnica u kućanstvu i prehrambenoj industriji, u proizvodnji lijekova, krvnih derivata i sl.

Orebreni isparivači upotrebljavaju se skoro uvijek za hlađenje zraka u hladionicama. Grade se od elemenata prikazanih na sl. 84c, od bakrenih i čeličnih glatkih cijevi s navučenim limnim lamelama od aluminija ili bakra (sl. 87a), ili sa spiralnim metalnim trakama (sl. 87b). Lamele navučene



Sl. 86. Pločasti isparivači. a isparivači od glatkocijevnih bakrenih vijuga obloženih tankim pocinčanim limom, b isparivači s kanalima utisnutim u limove, c isparivači s paralelnim horizontalnim pločama, d isparivači s vertikalnim pločama za kontaktno hlađenje, e savijeni pločasti isparivač kućanskog hladnjaka, f pločasti isparivač škrinje za zamrzavanje



Sl. 87. Orebreni isparivači za hlađenje zraka. a orebranje s lamelama, b orebranje sa spiralnim metalnim trakama, c orebreni isparivač s prisilnom cirkulacijom zraka pomoću ventilatora za smještaj na zidu, d kao c, ali za smještaj na podu; 1 paket orebranih cijevi, 2 obočje, 3 ventilator, 4 elektromotor, 5 tava okapnice

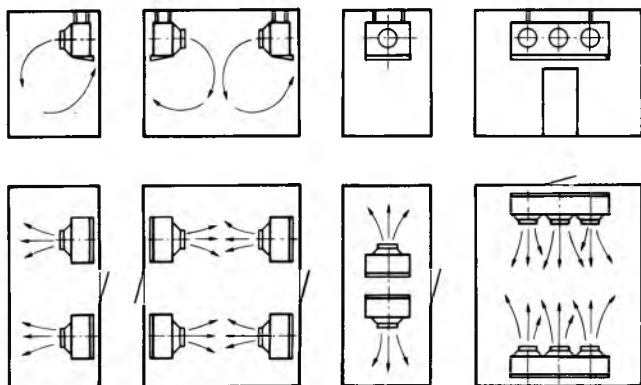
na cijev mogu biti kružnog ili kvadratnog oblika, ili su posebno oblikovane i navučene istodobno na više cijevi. Razmak je između lamela 2...20 mm, što ovisi o uvjetima rada orebrenog isparivača. Naime, što je temperatura isparivanja radne tvari u cijevi niža, a zrak u hladionici vlažniji, to se snažnije na orebrenoj površini isparivača stvaraju naslage inja. Najmanji razmak lamela imaju isparivači u uređajima za klimatizaciju zraka, jer temperatura isparivanja nije niža od 0 °C, pa struja zraka odnosi kapljice kondenzirane vlage s orebrenih površina. Najveći razmak lamela imaju isparivači u tunelima za duboko smrzavanje gdje su temperature isparivanja radne tvari u cijevima -45 °C... -50 °C. To je potrebno da zaleđena vlaga iz zraka nikada potpuno ne ispuni prostor između lamela, jer bi tada učinak isparivača praktički iščeznuo.

Analiza izraza (140) pokazuje da je vrijednost koeficijenta prijenosa topline k uvijek za red veličine manja od vrijednosti α_1 ili α_2 . Koeficijent prijelaza topline α_1 od zraka na metalnu stijenku ima vrlo malu vrijednost (tabl. 5), koja je manja od vrijednosti koeficijenta α_2 . Ako se površina na strani zraka poveća orebrivanjem, smanjuje se vrijednost kvocijenta $F''/(\alpha_1 F')$ u izrazu (139), zbog čega se povećava vrijednost koeficijenta k'' , pa i ukupno prenesena toplina.

Koeficijent prijenosa topline orebrenih isparivača uz slobodnu konvekciju zraka između lamela ipak je vrlo skroman i iznosi svega $k = 3,5 \dots 5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, pa se odabire razmjerno veliki $\Delta \theta_m \approx 15 \text{ °C}$ da bi se postiglo toplinsko opterećenje $q_F = 50 \dots 70 \text{ W/m}^2$.

Prijenos se topline znatnije povećava ako zrak prisilno struji između lamela brzinom $w = 3 \dots 10 \text{ m/s}$, jer se tada postiže $k = 17,5 \dots 35 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ i toplinsko opterećenje $q_F = 230 \dots 480 \text{ W/m}^2$.

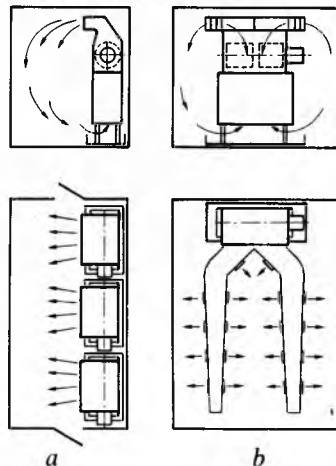
Zbog toga su orebreni isparivači najčešće s prisilnom cirkulacijom zraka pomoću ventilatora (sl. 87c). Paket orebrenih cijevnih vijuga smješta se u limeno obočje u koje je ugrađen jedan ili više aksijalnih ventilatora. Ispod isparivača nalazi se tava okapnica u kojoj se skuplja voda nastala za vrijeme odleđivanja isparivača. Ventilator siše zrak kroz poprečno postavljene paket orebrenih cijevi i ubacuje ga u hladni prostor. Tako je izveden *jedinični isparivač* s prisilnom cirkulacijom hladnog zraka (*Unitcooler*), predviđen za vješanje o strop hladionice. Smještaj jediničnih isparivača unutar hladionice ovisi o njezinoj veličini i obliku tlocrta. Naime, jedinične hladnjake zraka treba u prostoriji smjestiti tako da domet zračne struje njihovih ventilatora što bolje prekriva tlocrtnu površinu, kako bi cirkulacija unutar hladionice bila što jednoličnija. U hladionici se zato obično nalazi više jediničnih hladnjaka koji zajednički ostvaruju potrebni rashladni učinak (sl. 88). Regulacija prigušivanja i dotoka radne tvari u rashladnim uređajima sa R 12 i R 22 (sl. 67, 68 i 69) obično se odvija za svaki isparivač posebno, i to regulatorom stalnog pregrijanja TEV. U razgranatim rashladnim sustavima hladnjaka sa R 717 jedinični se isparivači s ventilatorima uključuju u središnji cirkulacijski sustav neposrednog isparivanja (sl. 72).



Sl. 88. Mogući smještaj stropnih jediničnih hladnjaka

Velika je prednost stropnih jediničnih isparivača da ne zauzimaju dragocjenu površinu poda na kojoj se skladišti hladena roba, čak se mogu zavjesiti i iznad vrata. Ipak, grade se u jedinicama do određenoga rashladnog učinka, odnosno težine koja još ne predstavlja posebne teškoće pri zavješanju na stropnu konstrukciju.

Orebreni jedinični isparivači većih rashladnih učinaka i težine, sa snažnijim radijalnim ventilatorima postavljaju se na pod (sl. 87d). Primjenjuju se kad je potrebna pojačana cirkulacija ohlađenog zraka, kao npr. u hladionicama za brzo hlađenje ili u tunelima za brzo zamrzavanje robe (sl. 89a). Kanali za razvođenje i jednoliku razdiobu ohlađenog zraka (sl. 89b) služe za hlađenje većih hladnih skladišta.



Sl. 89. Smještaj podnih jediničnih hladnjaka. a u tunelima za brzo hlađenje i zamrzavanje, b s razvodnim kanalima zraka u većim hladnim skladištima

Orebreni isparivači za niske temperature isparivanja od -40... -50 °C, velikih rashladnih učinaka sa snažnim ventilatorima, nalaze se u uređajima za naglo zamrzavanje mesa i ostalih namirnica u tunelima. Regulirani su ili regulatorima razine ili su uključeni u sustav protočnoga neposrednog isparivanja.

Određivanje isparivača. Taloženje vlage na hladenoj površini isparivača, od inja do kompaktnog leda, sprečava pravilno iskorištavanje isparivača. Nakupljeno inje, odnosno led, stvara oko cijevi dodatni sloj debljine δ_i izuzetno male toplinske provodljivosti λ_i . Kroz taj sloj mora se provesti toplina Q_0 , da bi zatim kroz stijenku cijevi debljine δ_c i vodljivosti λ_c doprla do radne tvari. To stvara dodatni toplinski otpor prijenosu topline, pa izraz (139) prelazi u prošireni oblik

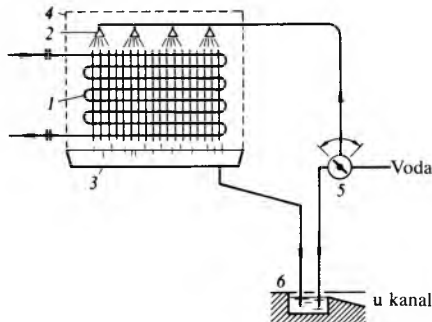
$$Q_0 = \frac{F''(\theta_1 - \theta_2)}{\frac{1}{\alpha_1} \frac{F''}{F'} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} \frac{F''}{F_c} + \frac{\delta_i}{\lambda_i} \frac{F''}{F_i} + \frac{1}{\alpha_2}} = k'' F'' \Delta \theta. \quad (144)$$

Zbog toga se vrijednost koeficijenta prijenosa topline k'' znatno umanjuje, pa je manja i mogućnost da se ostvari potreban rashladni učinak Q_0 . Sloj leda, dakle, na površini isparivača predstavlja toplinsku izolaciju. U urednom pogonu isparivači moraju biti bez ledenog omotača, a kad se led ipak na njima sakupi, treba ih redovno odleđivati. Da bi se primrznuti led otopio i uklonio s hladnih površina isparivača, potrebno je privesti toplinu.

Samoodleđivanje najjednostavniji je način odleđivanja, koji se primjenjuje kad je temperatura isparivanja $\theta_0 < 0 \text{ °C}$, ali je temperatura zraka u hladionici $\theta_h > 0 \text{ °C}$. Tada se u prekidima rada isparivača, kad u njemu prestane isparivanje radne tvari, led na njegovoj površini sam od sebe otopi prijelazom topline s toplijeg zraka u hladionici. No, radne prekide isparivača treba tada omogućiti i redovno provoditi.

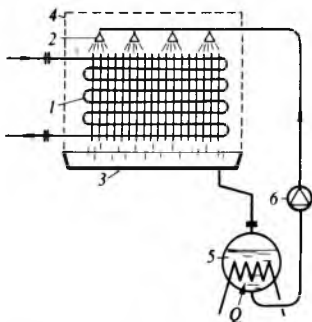
Vodom okolišne temperature (sl. 90) odleđuju se isparivači sve do temperatura od -25 °C u hladionici. Voda se dovodi iznad isparivača pumpom ili izravno iz vodovoda trokrakim ventilom, pa preko posebno oblikovanih mlaznica škropi po zaleđenim površinama s kojih ispire led. Potrošak vode iznosi od 4...6 L/kg otopljenog leda. Voda se skuplja u tavi okapnici

ispod isparivača i odvodi iz hladionice kroz vodeni zapor u okoliš. Nakon dovršenog odleđivanja prekrene se trovodni ventil i iz sustava mlaznica otpusti zaostalu vodu da se ne zamrzne u mlaznicama kad se isparivač ponovno stavi u pogon.

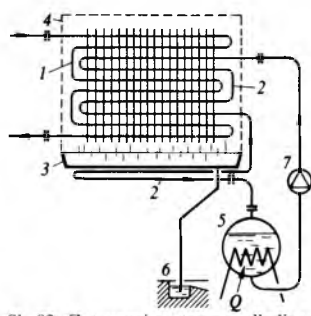


Sl. 90. Odleđivanje isparivača vodom. 1 isparivač, 2 mlaznice, 3 tava okapnica, 4 oplata isparivača, 5 trokraki ventil dovoda vode, 6 vanjski vodeni zapor

Smjesom etilenglikola i vode odleđuju se isparivači s nižim temperaturama isparivanja (sl. 91). Smjesa etilenglikola i vode zagrijava se električnim grijačem ili na neki drugi način. Toplu smjesu tjera pumpa kroz mlaznice iznad isparivača po zaleđenim površinama isparivača. Pri tome voda otopljenog leda razrjeđuje smjesu etilenglikola i vode, pa zato treba povremeno otpariti suvišak vode iz smjese.



Sl. 91. Odleđivanje isparivača smjesom etilenglikola i vode. 1 isparivač, 2 mlaznice, 3 tava okapnica, 4 oplata isparivača, 5 zagrijač smjese, 6 cirkulacijska pumpa



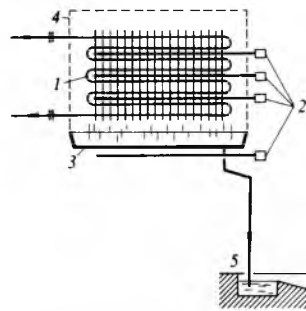
Sl. 92. Zatvoreni sustav za odleđivanje isparivača etilenglikolnom smjesom. 1 cijevi isparivača, 2 cijevi grijača, 3 tava okapnica, 4 oplata isparivača, 5 zagrijač smjese, 6 vanjski vodeni zapor, 7 cirkulacijska pumpa

Odleđivanje se može provoditi i toplom etilenglikolnom smjesom u zatvorenom krugu (sl. 92). Tada je isparivač složenije izvedbe jer uz cijevne vijuge za isparivanje radne tvari ima i cijevi za protok tople smjese za odleđivanje. Da se voda nastala otapanjem leda ne bi ponovno zamrzla na tavi okapnici pri vrlo niskim temperaturama, okapnica se također zagrijava za vrijeme odleđivanja. Jednim se zagrijačem etilenglikolne smjese može naizmjenično odleđivati i više isparivača istog rashladnog uređaja.

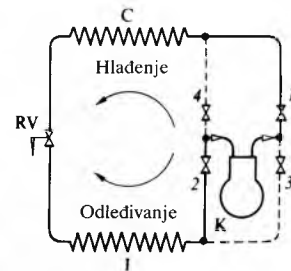
Električnim grijačima pogodne (štapne) izvedbe, ugrađenim u konstrukciju isparivača (sl. 93), postiže se vrlo djelotvorno odleđivanje. Zagrijavanje je električnom energijom čisto i jednostavno, ali se moraju poštivati posebni sigurnosni propisi za hladene i vlažne prostorije. Preporučuje se prije svakog odleđivanja isprazniti iz isparivača zaostalu kapljevitu radnu tvar. Ako se to ne učini, može u zagrijanom isparivaču znatno porasti tlak uz moguće oštećenje uređaja.

Kondenzacijom pare radne tvari unutar cijevi isparivača odleđuju se većinom veliki isparivači razgranatih rashladnih sustava punjenih sa R 717. Odleđuje se obrtanjem smjera kruženja radne tvari kroz uređaj (sl. 94). Uz otvorene ventile 1 i 2, a zatvorene 3 i 4, uređaj normalno radi, radna se tvar isparuje u isparivaču, a nakon kompresije kondenzira u

kondenzatoru. Kad je pak potrebno isparivač odleđiti, zatvaraju se ventili 1 i 2, a otvaraju 3 i 4, pa isparivač i kondenzator zamijene uloge. U isparivaču započne kondenzacija, a u kondenzatoru isparivanje radne tvari. Para kondenzira unutar cijevi isparivača i snažno ih iznutra zagrijava.



Sl. 93. Odleđivanje isparivača električnim grijačima. 1 cijevi isparivača, 2 električni grijači, 3 tava okapnica, 4 oplata isparivača, 5 vanjski vodeni zapor



Sl. 94. Odleđivanje isparivača kondenzacijom pare radne tvari. K kompresor, C kondenzator, I isparivač, RV prigušni ventil, 1, 2, 3 i 4 ventili

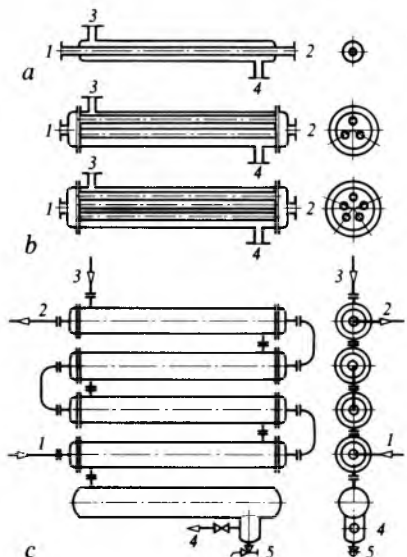
Razlika je prema prije opisanim postupcima odleđivanja isparivača u tome što se kondenzacijom pare radne tvari naslaga leda na cijevi grije i otapa iznutra, pa led otpada s cijevi i prije nego što se je sav otopio. Odleđivanje je vrlo intenzivno i brzo.

Kad je zaleđivanje isparivača znatno, odleđivanje kondenzacijom pare radne tvari unutar cijevi isparivača izvodi se uz istodobno otapanje i ispiranje leda s vanjske strane vodom ili etilenglikolnom smjesom. Tako se odleđuju npr. veliki orebreni isparivači sa R 717 u tunelima za smrzavanje.

Kondenzatori

Prema načinu odvođenja topline kondenzacije u rashladnoj tehnici kondenzatori mogu biti protočni, hladeni vodom ili zrakom, i optočni, hladeni ishlapljivanjem vode s njihovih vanjskih močenih površina. Prema konstrukciji površina za prijenos topline razlikuju se kondenzatori s glatkim i orebrenim cijevima.

Protočni kondenzatori grade se od glatkih cijevi složenih u elementne kondenzatore (sl. 95). Najjednostavniji je dvocijevni elementni kondenzator, sastavljen od šire vanjske



Sl. 95. Elementni glatko-cijevni kondenzatori. a elementni kondenzator s jednom cijevi za rashladnu vodu, b elementni kondenzator s više cijevi za rashladnu vodu, c kondenzator sastavljen od više u seriju spojenih elementnih kondenzatora; 1 ulaz rashladne vode, 2 izlaz rashladne vode, 3 ulaz pare radne tvari, 4 izlaz rashladne tvari, 5 ispušni ulaz

cijevi u kojoj se nalazi druga uža cijev kroz koju struji rashladna voda (sl. 95a). Komprimirana para radne tvari uvodi se u prostor između vanjske i unutrašnje vodom hladene cijevi i tu kondenzira. Višecijevni elementi obično sadrže 3...7 cijevi unutar šire vanjske cijevi (sl. 95b), a dugi su 2...5 m. Da bi se cijevi za rashladnu vodu iznutra očistile

od naslaga kamenca i rashladnom vodom unesenih nečistoća, skidaju se bočni poklopci i cijevni lukovi koji spajaju pojedine elemente. Čista para radne tvari kondenzira u prostoru oko cijevi koji nije pristupačan za čišćenje. Ispod kondenzatora smješta se sabirnik kapljevite radne tvari. Iz najnižeg mjesta sabirnika (sl. 95c) povremeno se odvodi izdvojeno mazivo ulje, prispjelo iz kompresora, ako je radna tvar R 717.

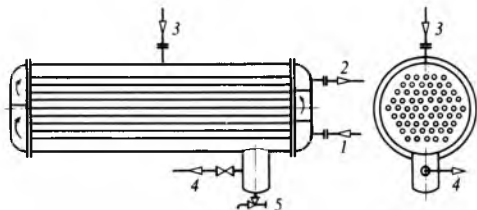
Protočni se kondenzatori hlade čistom vodom što manje tvrdoće, a potrebna količina vode iznosi

$$G_v = \frac{Q}{c \Delta \vartheta_v}, \quad (145)$$

gdje je Q toplina kondenzacije, c specifični toplinski kapacitet vode, a $\Delta \vartheta_v = (\vartheta_2 - \vartheta_1)$ zagrijavanje vode nakon preuzimanja topline prolazom kroz kondenzator. Budući da je vrijednost $c = 4,186 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, a zagrijavanje vode je samo od $4 \dots 8 \text{ }^\circ\text{C}$, količina je potrebne rashladne vode dosta velika.

Koeficijent prijenosa topline, uz brzinu strujanja rashladne vode u cijevi od $0,5 \dots 2 \text{ m/s}$, poprima vrijednosti $k = 400 \dots 900 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Srednja logaritamska temperaturna razlika obično iznosi $\Delta \vartheta_m = 4 \dots 7 \text{ }^\circ\text{C}$.

Protočni kondenzatori velikih učinaka imaju snop s mnogo horizontalnih glatkih čeličnih cijevi unutar vanjskoga limenog plašta (sl. 96). Rashladna voda struji unutar cijevi brzinom od $1,5 \dots 2 \text{ m/s}$. Da bi se takve brzine mogle postići, u bočnim poklopcima kondenzatora ugrađene su skretne pregrade, tako da voda protječe kroz cijevi nekoliko puta. Para radne tvari dovodi se na gornjoj strani i kondenzira na vanjskim površinama vodom hlađenih cijevi unutar vanjskog plašta. Stvoreni kondenzat skuplja se u prigradenoj posudi na donjem dijelu plašta, i odatle se odvodi u isparivače. Kad se kondenzira R 717, ta posuda služi i za taloženje mazivog ulja koje je s parom radne tvari dospjelo iz kompresora.



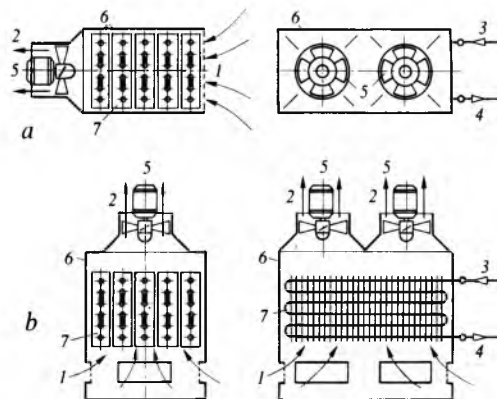
Sl. 96. Kondenzator sa snopom cijevi u plaštu. 1 ulaz rashladne vode, 2 izlaz rashladne vode, 3 ulaz pare radne tvari, 4 izlaz kondenzata radne tvari, 5 ispušni ulja

Protočni kondenzatori za kondenzaciju R 12 ili R 22 grade se od izvana orebrenih bakrenih cijevi (sl. 84d) zbog malog koeficijenta prijelaza topline tokom kondenzacije. Osim toga, otpada posuda za taloženje ulja, jer se ulje ne izdvaja iz R 12 ili R 22.

Koeficijent prijenosa topline u protočnom kondenzatoru ovisi o brzini strujanja rashladne vode u cijevima i o svojstvima radne tvari, a mogu se očekivati vrijednosti $k = 400 \dots 2000 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

Protočnim kondenzatorima smatraju se i kondenzatori s orebrenim cijevima hlađeni okolišnim zrakom (sl. 97). Služe samo za male učinke, i to kad se ne može upotrijebiti rashladna voda, npr. na vozilima, ili kad u okolišu rashladnog uređaja nema vode. Zrakom hlađeni kondenzatori upotrebljavaju se ponajviše za kondenzaciju R 12 i R 22 i tada se grade od bakrenih cijevi s aluminijskim lamelama. Imaju jedan ili više ventilatora, s horizontalnim (sl. 97a) i vertikalnim prostrujavanjem zraka (sl. 97b). Koeficijent prijenosa topline je malen i iznosi $k = 23 \dots 30 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, a ostvarivo specifično toplinsko opterećenje površine iznosi samo $q_F = 230 \dots 290 \text{ W/m}^2$ uz $\Delta \vartheta_m = 8 \dots 12 \text{ }^\circ\text{C}$. Specifični toplinski kapacitet zraka vrlo je malen ($c_p \approx 1 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), pa je potrebno, prema (145), pomoću ventilatora ostvariti snažan protok zraka kroz kondenzator da bi zrak preuzeo toplinu kondenzacije. Djelovanje takvih kondenzatora znatno ovisi o stanju okolišnog zraka. U ljetnim uvjetima poraste temperatura kondenzacije i na $50 \text{ }^\circ\text{C}$, pa pri projektiranju uređaja sa suhim zračnim

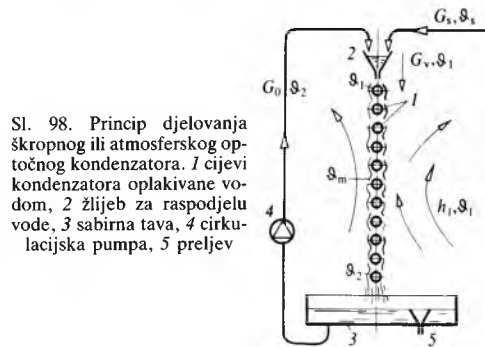
kondenzatorom to treba uzeti u obzir. Naime, u takvim uvjetima kompresor rashladnog uređaja troši više energije za ostvarivanje rashladnog učinka zbog povećanoga kompresijskog omjera.



Sl. 97. Zrakom hlađeni kondenzatori s orebrenim cijevima s horizontalnim (a) i vertikalnim (b) strujanjem zraka. 1 ulaz zraka kroz zaštitnu rešetku, 2 izlaz zraka, 3 ulaz pare radne tvari, 4 izlaz kondenzata radne tvari, 5 ventilator s elektromotorom, 6 oplata kondenzatora, 7 paket orebrenih cijevi

Optočni kondenzatori primjenjuju se kad je za kondenzaciju raspoloživa samo manja količina rashladne vode ili kad je ona skupa, muljevita i nečista, dakle kad se radi o odvođenju topline kondenzacije uz što manji utrošak svježe vode.

U škropnom ili atmosferskom optočnom kondenzatoru (sl. 98) radna tvar kondenzira unutar cijevi što ih izvana oplakuju tanki slojevi vode $G_v = G_o + G_s$, gdje je G_o količina vode u optoku pomoću pumpe, a G_s svježe dodavana voda temperature $\vartheta_s \text{ }^\circ\text{C}$. Preljevajući se po vanjskim površinama cijevi kondenzatora količina se vode G_v zagrijava od temperature ϑ_1 na temperaturu ϑ_2 i pri tome djelomično isparuje (hlapi) u okolišni zrak, odajući mu dio topline kondenzacije. Preostali dio te topline odnosi voda temperature ϑ_2 sa sobom u okoliš kroz preljev sabirne tave kondenzatora.



Sl. 98. Princip djelovanja škropnog ili atmosferskog optočnog kondenzatora. 1 cijevi kondenzatora oplakivane vodom, 2 žlijeb za raspodjelu vode, 3 sabirna tava, 4 cirkulacijska pumpa, 5 preljev

Uz udio svježe vode $\zeta = G_s/G_v$ u vodi G_v koja se preljeva preko cijevi kondenzatora dobiva se iz bilance topline izraz

$$G_v c_v \vartheta_1 = G_o c_v \vartheta_2 + G_s c_v \vartheta_s, \quad (146)$$

pa je temperatura zagrijane vode na izlaznom kraju kondenzatora

$$\vartheta_2 = \frac{\vartheta_1 - \zeta \vartheta_s}{1 - \zeta}. \quad (147)$$

Uz srednju temperaturu vode pri zagrijavanju na cijevima

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2} \quad (148)$$

dobiva se iz (147) formula

$$\vartheta_2 - \vartheta_s = \frac{1}{1 - 0,5\zeta} (\vartheta_m - \vartheta_s). \quad (149)$$

Toplina odvedena iz kondenzatora zagrijavanjem vode, uz $G_v = g_v F$, iznosi

$$Q_v = g_v F \frac{\zeta}{1 - 0,5\zeta} (\vartheta_m - \vartheta_s), \quad (150)$$

gdje je g_v količina vode za oplakivanje po jedinici vanjske površine, F vanjska površina cijevi, a ζ maseni udio utrošene svježe vode temperature ϑ_s .

Prijenos topline od vode na okolišni zrak, ostvaren ishlapljivanjem vode, određuje se prema izrazu

$$Q_i = \alpha F_v (\vartheta_m - \vartheta_z), \quad (151)$$

gdje je $F_v = \beta F$ površina vode u dodiru sa zrakom, koja je veća od vanjske površine cijevi F ($\beta > 1$), ϑ_m srednja temperatura vode, a ϑ_z temperatura okolišnog zraka. Ako se primijeni Lewisov zakon da je pri ishlapljivanju

$$\frac{\alpha}{\sigma} = c_{pz}, \quad (152)$$

gdje je α koeficijent prijelaza topline od površine vode na mirni zrak, c_{pz} specifični toplinski kapacitet okolišnog zraka, a σ koeficijent ishlapljivanja, slijedi

$$Q_i = \sigma c_{pz} \beta F (\vartheta_m - \vartheta_z) = \sigma \beta F (h_m'' - h_z), \quad (153)$$

gdje je $h_m'' = c_{pz} \vartheta_m$ entalpija zraka zasićenog vodom pri temperaturi ϑ_m , a h_z entalpija vlažnog zraka na dovoljnoj udaljenosti.

Zbrajanjem izraza (150) i (153) dobiva se ukupno odvedena toplina kondenzacije

$$Q = Q_v + Q_i = g_v F \frac{\zeta}{1 - 0,5\zeta} (\vartheta_m - \vartheta_s) + C \sigma \beta F (h_m'' - h_z), \quad (154)$$

gdje je C korekcijski faktor ovisan o temperaturi ϑ_m i iznosi $0,94 \dots 1,0$. Ako se izraz (154) podijeli sa F , dobiva se specifično toplinsko opterećenje vanjske površine cijevi

$$q_F = g_v \frac{\zeta}{1 - 0,5\zeta} (\vartheta_m - \vartheta_s) + C \sigma \beta (h_m'' - h_z). \quad (155)$$

Specifično toplinsko opterećenje pri prijenosu topline od radne tvari koja kondenzira unutar cijevi na sloj vode na vanjskoj površini cijevi iznosi

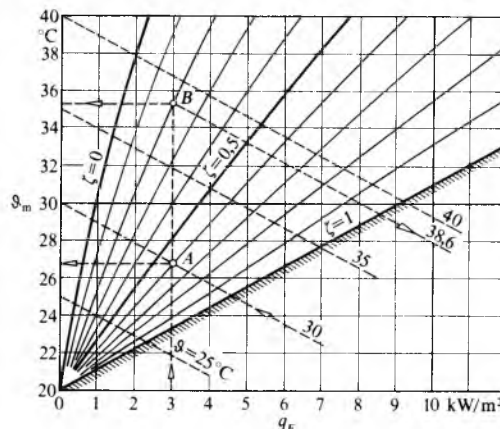
$$q_F = k (\vartheta - \vartheta_m), \quad (156)$$

gdje je k koeficijent prijenosa topline, ϑ temperatura kondenzacije radne tvari, a ϑ_m srednja temperatura vodenog sloja na vanjskoj površini cijevi. Budući da je koeficijent prijelaza topline od vode na mirni okolišni zrak $\alpha = 9 \dots 12 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, a specifični toplinski kapacitet prosječnog okolišnog vlažnog zraka $c_{pz} \approx 1,05 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, vrijednost je koeficijenta ishlapljivanja σ iz izraza (152) $\sigma = 0,0086 \dots 0,0111 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Ako je, npr., $\vartheta_s = 20^\circ \text{C}$, $\sigma \beta = 0,0222 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $G_v = 350 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, entalpija okolišnog vlažnog zraka $h_z = 54 \text{ kJ/kg}$ ($\vartheta_z = 28,5^\circ \text{C}$, $\varphi = 40\%$) i koeficijent prijenosa topline od radne tvari na vodu na cijevima $k = 0,93 \text{ kW m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, mogu se odrediti vrijednosti za q_F (155) koje su prikazane na slici 99. Da bi se kondenzirala radna tvar pri temperaturi $\vartheta = 30^\circ \text{C}$, uz odvođenje topline kondenzacije $Q = q_F F$ na vanjskoj površini F cijevi kondenzatora, treba ostvariti specifično toplinsko opterećenje površine q_F . Kad se traži da je npr. $q_F = 3 \text{ kW/m}^2$, uz navedene zadane uvjete, očita se udio potrebne svježe vode iz dijagrama i mora biti $\zeta = G_s/G_v = 0,6 \text{ kg/kg}$, točka A, pa će srednja temperatura površine vode u dodiru sa zrakom biti $\vartheta_m = 26,8^\circ \text{C}$. Ako se pak želi štedjeti svježa rashladna voda, pa se odabere npr. $\zeta = 0,2$, točka B, poraste naglo temperatura kondenzacije na $\vartheta = 38,6^\circ \text{C}$, a temperatura površine vode na $\vartheta_m = 35,3^\circ \text{C}$.

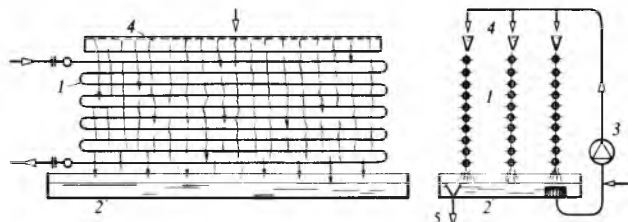
Kad je $\zeta = 0$, toplina se kondenzacije odvodi bez dovodenja svježe vode, a kad je $\zeta = 1,0$ preko cijevi se prelijeva samo svježa voda bez recirkuliranja pumpom (protočno hlađenje kondenzatora).

Velika je mana škropnih kondenzatora da veoma ovise o stanju okolišnog zraka, o njegovoj temperaturi ϑ_z , a pogotovo o njegovoj relativnoj vlažnosti φ i entalpiji h_z . Kad, naime, relativna vlažnost zraka poraste na $\varphi = 100\%$, tada je $h_m'' = h_z$, pa potpuno izostane hlađenje ishlapljivanjem vode (155). Tada cjelokupnu toplinu kondenzacije treba odvesti samo protokom rashladne vode ($\zeta = 1,0$).

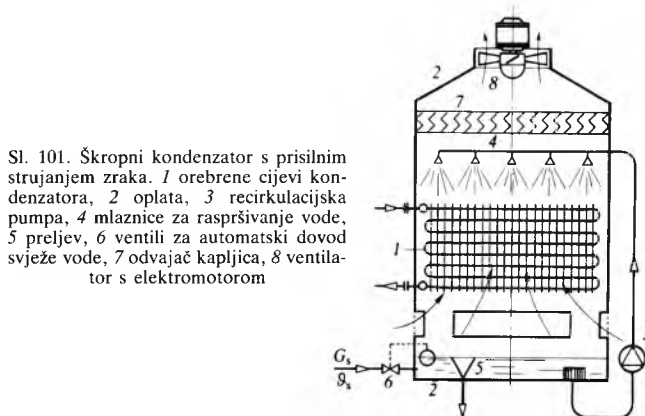


Sl. 99. Uvjeti rada škropnog kondenzatora. q_F specifično toplinsko opterećenje površine cijevi, ϑ_m srednja temperatura površine vode u dodiru sa zrakom, ϑ temperatura kondenzacije, ζ omjer svježe dodavane vode i ukupne vode

Škropni se kondenzatori grade s glatkim cijevima i slobodnim gibanjem okolišnog zraka (sl. 100), ili s orebrenim cijevima i prisilnim protokom zraka pomoću snažnih ventilatora (sl. 101). Tada su cijevi orebrene lamelama, pa je moćena površina veća uz povećanu vrijednost koeficijenta ishlapljivanja σ jer je povećan koeficijent α zbog prisilnog strujanja zraka većom brzinom. Zato je u pogonu takvih kondenzatora udio svježe vode samo $\zeta = 0,05 \dots 0,15$, ali ona mora biti čista. Količina je vode u optoku $50 \dots 100 \text{ L/m}^2$ oplakivane površine, a količina zraka u protoku $100 \dots 200 \text{ m}^3$ po kW odvedene topline kondenzacije.



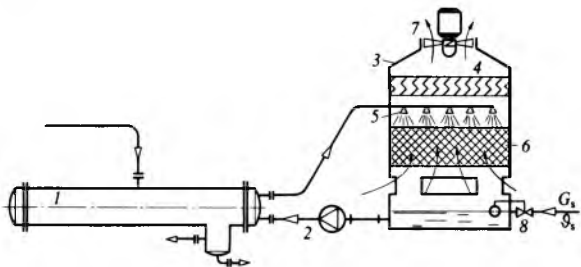
Sl. 100. Škropni kondenzator s prirodnim strujanjem zraka. 1 cijevi kondenzatora, 2 sabirna tava za vodu, 3 recirkulacijska pumpa, 4 razdjelni žlijeb, 5 prelijev



Sl. 101. Škropni kondenzator s prisilnim strujanjem zraka. 1 orebrene cijevi kondenzatora, 2 oplata, 3 recirkulacijska pumpa, 4 mlaznice za raspršivanje vode, 5 prelijev, 6 ventili za automatski dovod svježe vode, 7 odvajac kapljica, 8 ventilator s elektromotorom

Kada je za odvođenje topline kondenzacije na raspolaganju mala količina rashladne vode, može se primijeniti protočni kondenzator s cijevima u plaštu (sl. 96), ali uz

regenerativno hlađenje protočne vode djelomičnim ishlapljivanjem u rashladnom tornju (sl. 102).

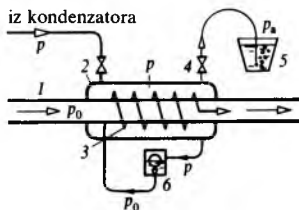


Sl. 102. Protočni kondenzator s tornjem za regenerativno hlađenje vode. 1 protočni kondenzator, 2 cirkulacijska pumpa za rashladnu vodu, 3 rashladni toranj, 4 odvajач kapljica, 5 mlaznice za raspršivanje vode, 6 punilo tornja, 7 ventilator s elektromotorom, 8 ventil za automatski dovod svježeg vode

Otplinjavanje kondenzatora. Prisutnost inertnih plinova koji se ne kondenziraju u rashladnom uređaju smeta urednom odvijanju rashladnog procesa. Ti se plinovi skupljaju u najhladnijim dijelovima kondenzatora i svojim parcijalnim tlakom povisuju ukupni tlak u kondenzatoru iznad tlaka zasićenja koji odgovara temperaturi kondenzacije. U težim slučajevima inertni plinovi zauzimaju veći dio unutrašnjosti kondenzatora, pa radna tvar više ne može nesmetano kondenzirati. Površina prijenosa topline postaje tako manja, pa tlak i temperatura u kondenzatoru znatno porastu. Poraste i kompresijski omjer, pa se kompresor pregrijava i troši više pogonske energije uz smanjeni rashladni učinak.

Inertni plinovi ulaze u rashladni uređaj ili za vrijeme remonta pojedinih dijelova uređaja ili kroz propusna mjesta na niskotlačnom dijelu (isparivači) kada je tlak isparivanja niži od okolišnog tlaka. Plinovi mogu nastati i unutar uređaja kemijskim reakcijama između radne tvari, mazivog ulja, vode i dr.

U malim rashladnim uređajima inertni se plinovi otpuštaju povremeno iz najhladnijeg dijela kondenzatora, u blizini ulaza hladne rashladne vode, gdje im je i parcijalni tlak najveći. Ručno se otvara predviđeni ventil i pažljivo prigušuje s tlaka kondenzacije na tlak u okolišu. Nedostatak je u tome što se uz inertne plinove otpušta ipak i manja količina radne tvari.



Sl. 103. Uređaj za automatsko otplinjavanje rashladnog uređaja. 1 usisna cijev rashladnog uređaja, 2 dovod smjese inertnih plinova i pare radne tvari, 3 kondenzator radne tvari, 4 ispušni inertnih plinova, 5 posuda s vodom, 6 prigušni ventil s plovkom

Veći rashladni uređaji otplinjavaju se trajno i automatski pomoću posebnih uređaja (sl. 103). Smjesa inertnih plinova i pare radne tvari dovodi se iz kondenzatora u međuprostor koji tvori šira cijev oko hladne usisne cijevi rashladnog uređaja. Na vrlo hladnoj površini cijevi kondenzira para radne tvari iz smjese, a ostaju inertni plinovi koji se prigušuju na tlak okoliša i kroz posudu s vodom odvedu u okoliš. Prolaz mjehurića plinova kroz vodu dokazuje da se otplinjavanje uredno odvija. Kondenzirana radna tvar iz smjese prigušuje se u ventilu s plovkom na visokotlačnoj strani i isparuje u spiralnoj cijevi, namotanoj oko usisne cijevi. Tako se u otplinjaču još potpunije kondenzira i odvaja para radne tvari iz smjese.

LIT.: R. Plank, Handbuch der Kältetechnik, Band 1–12. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1954–1967. – A. M. Розенфельд, А. Г. Ткачев, Холодильные машины и аппараты. Госторгиздат, Москва 1955. – Холодильная техника (1–3). Госторгиздат, Москва 1961. – J. R. Dossat, Principles of Refrigeration. John Wiley, New York 1961. – F. Bošnjaković, Nauka o toplini, II dio. Tehnička knjiga, Zagreb 1976. – F. Bošnjaković, Nauka o toplini, I dio. Tehnička knjiga, Zagreb 1978. – F. Bošnjaković, Nauka o toplini, III dio. Tehnička knjiga, Zagreb 1986.

V. Brlek

RATNI BROD, površinsko ili podvodno plovilo uvedeno u flotnu listu kao element vojno-pomorskih snaga, namijenjeno da borbenim aktivnostima i manevrom u akvatoriju izvršava borbene zadatke.

Ta se definicija odnosi na pravi ratni brod (borbeni brod), dok je s pravog gledišta pojam ratnog broda dosta širi. Prema Ženevskoj konvenciji o otvorenom moru iz 1958. god., ratni je brod plovilo koje pripada vojno-pomorskim snagama, nosi vanjske oznake brodova oružanih snaga države (zastava, flotni broj i sl.), ima zapovjednika kojega je imenovala vlada, uveden je u flotnu listu i ima posadu iz sastava oružanih snaga. Ratni je brod u pravnom pogledu slično definiran i Konvencijom Ujedinjenih naroda o pravu mora iz 1982. godine. Tako široka definicija obuhvaća mnogo površinskih brodova koji, iako u ratu i miru (ili samo u ratu) izvršavaju borbene zadatke u sastavu ratne mornarice, nisu pravi borbeni brodovi u tehničkom pogledu. U prvom se redu to odnosi na trgovačke i druge brodove građene za civilne namjene, koji se zbog ratnih potreba uvrštavaju u sastav flota ratnih mornarica, čak i uz velike rekonstrukcije i ugradnju naoružanja i vojne opreme. U tehničkom pogledu, takvi su *naoružani brodovi* osnovani, projektirani i građeni za određenu civilnu namjenu (v. *Brod*, TE 2, str. 157), bez obzira na naknadnu namjenu za ratne zadatke. Slično vrijedi i za brodove civilne namjene koji se u nekim zemljama već pri projektiranju djelomično osposobljavaju za *popisne ratne brodove*. I tada dominira civilna namjena, a samo su neki detalji tako izvedeni da se konverzija broda za ratne zadatke obavi što brže, lakše i uz što manje improvizacija. Osim toga, u sastavu flote ratne mornarice postoji mnogo pomoćnih brodova i plovila, stalno uvrštenih u flotnu listu i s vojnom posadom, koji se u tehničkom pogledu ništa ili vrlo malo razlikuju od sličnih brodova za civilne namjene. To nisu borbeni brodovi, i ne spadaju, prema tehničkoj definiciji, među ratne brodove.

Pravi je ratni brod (borbeni brod ili brod udarnih pomorskih snaga) građen za oružanu borbu, a vrlo se malo može upotrijebiti za druge svrhe. Osnovni je cilj gradnje pravog ratnog broda postizanje borbene efikasnosti, što je bitno različito od kriterija koji vrijedi za brodove civilne namjene. Oni se, naime, grade i eksploatiraju prema kriteriju ekonomičnosti. Počevši od brodova na vesla, preko jedrenjaka pa sve do suvremenih ratnih brodova, najbitnija su svojstva ratnog broda potpuno podređena borbenoj funkciji i zato se jako razlikuju od svojstava broda za civilne namjene.

KLASIFIKACIJA BORBENIH RATNIH BRODOVA

Podjela borbenih ratnih brodova na klase, vrste, podvrste i tipove nikada nije postojala kao čvrst, opće prihvaćen i u svijetu priznat jedinstveni pristup. Umjesto toga, još iz dalekih vremena postoje manje ili više ukorijenjene podjele s nejasno određenim granicama, koje polaze s različitih gledišta. U mnoštvu polaznih gledišta, upotrebljivanih kroz povijest ratnih brodova, mogu se izvoditi dvije izrazito različite klasifikacije: prva je prema specifičnoj namjeni, a druga prema tehničkim karakteristikama ratnih brodova.

Čini se da je najpogodnija klasifikacija koja polazi od namjene ratnih brodova. Iz nje bi mogla slijediti univerzalna klasifikacija, koja bi kao opće prihvaćena mogla poslužiti i kao neka vrsta standarda prema kojem bi se ratni brodovi mogli međusobno uspoređivati. Ipak, i uz takav naoko logičan pristup, klasifikacija prema namjeni ratnog broda nikada nije bila (za duže vremensko razdoblje) općenito prihvaćena. Za to ima više razloga, koji će vrijediti i u budućnosti: a) ratne su mornarice vrlo različite po veličini i strateškoj doktrini država kojima pripadaju, tako da definicija namjene ratnog broda ima različita značenja; b) univerzalna klasifikacija brodova podrazumijeva i klasifikaciju njihove namjene, što je blisko standardu, ali je posve oprečno najbitnijoj postavci ratne vještine, tj. postizanju iznenađenja, a ono je minimalno ako se ratni brodovi i, posebno, njihova namjena uklapaju u poznate sheme; c) tehnički i znanstveni progres u uzajamnoj interakciji s pomorskom ratnom vještinom kontinuirano, a