

# **PRESEK**

**List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje**

ISSN 0351-6652

Letnik **10** (1982/1983)

Številka 3

Strani 124-134, 128-129

Janez Strnad:

## **HLADILNI STROJI IN TOPLOTNE ČRPALKE**

Ključne besede: fizika.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/10/617-Strnad.pdf>

© 1983 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

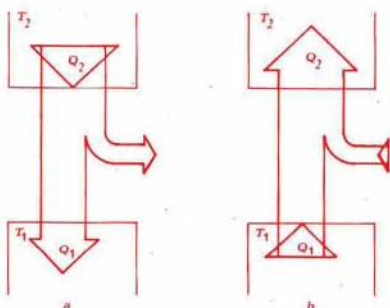
© 2009 DMFA - založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.



## HLADILNI STROJI IN TOPLOTNE ČRPALKE

Na obisku v šoštanjski elektrarni smo spoznali, kako deluje *toplotni stroj* (Presek X, 1. številka). Za to, da oddaja delo, mu je treba pri višji temperaturi dovajati toploto in jo pri nižji temperaturi odvajati (sl. 1). Dovedemo več toplote, kot je odvedemo; razlika je odvedeno delo:  $-A = Q_2 - |Q_1|$ . To razberemo iz *energijskega zakona* za stroj, ki deluje periodično in mu pri višji temperaturi dovedemo toploto  $Q_2$  in od njega pri nižji temperaturi odvedemo toploto  $Q_1$ . Da mora toploto neizkoriščeno oddajati okolici, je neizogibno zaradi *entropijskega zakona* (*drugega zakona termodinamike*). Kako lahko to toploto uporabimo za daljinsko ogrevanje, smo ugotovili med obiskom v ljubljanski toplotni elektrarni (Presek X, 2. številka).



Slika 1 Toplotni stroj (a) in hladilni stroj (b). Enega dobimo iz drugega, če obrnemo delovanje - na risbi spremenimo le smer puščic.

Zdaj nas zanimajo *hladilni stroji*. Morda misli kdo, da ne kaže govoriti v isti sapi o toplotnih in hladilnih strojih. Gospodinjski hladilnik ni na videz niti malo podoben toplotni elektrarni. Vendar bomo videli, da sta oba v veliko tesnejšem sorodstvu, kot kaže videz.

Premislimo! V hladilnik damo živila, da se ohladijo, ostanejo hladna in se ne pokvarijo. V notranjosti hladilnika je nižja temperatura kot v okolici in vedno uhaja nekaj toplote iz okolice v notranjost. Sicer poskrbimo, da je notranjost kolikor mogoče dobro toplotno izolirana, vendar se uhajanju toplote ne moremo povsem izogniti. Če bi hladilnik nehal delati, bi se živila prej ali slej segrela na temperaturo okolice in pokvarila. To se zares zgodi, če zmanjka elektrike.

Naloga hladilnika je torej, da črpa toploto iz notranjosti, kjer je temperatura nižja, v okolico, kjer je višja. Vemo, da teče toplota sama od sebe z mesta z višjo temperaturo na mesto z nižjo, denimo iz okolice v notranjost hladilnika. Ta trditev je ena izmed oblik entropijskega zakona. Ali ne zahtevamo tedaj od hladilnika nečesa nemogočega? Ne, toploto je mogoče črpati z mesta z nižjo temperaturo na mesto z višjo, če ob tem dovajamo delo. Hladilniku dovajamo delo z elektromotorjem, prav s tistim, ki preneha delati, če zmanjka elektrike.

Zdaj se nam posveti. Hladilni stroj prejema toploto pri nižji temperaturi in jo oddaja pri višji, če mu dovajamo delo. Deluje torej ravno obratno (sl. 1b) kot toplotni stroj. Pravimo, da je hladilni stroj *obrnjeni* toplotni stroj. Za hladilni stroj, ki deluje periodično, pove energijski zakon, da mu moramo dovesti delo

$$A = |Q_2| - Q_1, \quad (2)$$

če pri višji temperaturi odvedemo toploto  $Q_2$  in mu pri nižji dovedemo toploto  $Q_1$ .

Seveda ne kaže obračati delovanja toplotne elektrarne, da bi jo uporabili na primer kot hladilnico, ali delovanja gospodinjkega hladilnika, da bi z njim poganjali na primer vrtni strojček.

Vendar obstajajo manjše naprave, ki jih je mogoče uporabiti kot toplotni ali kot hladilni stroj. Še posebno je taka možnost dobrodošla v računih. Denimo, da neki stroj odda delo  $A$ , ko deluje kot toplotni stroj, in mu dovedemo toploto  $Q_2$  in odvedemo od njega toploto  $Q_1$ . Če odda enako toploto  $Q_2$ , ko deluje kot hladilni stroj, in mu dovedemo enako delo  $A$  in enako toploto  $Q_1$ , imamo opraviti z *reverzibilnim strojem*. Reverzibilni stroj, ki prejme ali odda toploto samo pri višji temperaturi  $T_2$  in odda ali prejme toploto samo pri nižji temperaturi  $T_1$  je *idealni*. To pomeni, da odda največje mogoče delo, ko deluje kot toplotni stroj, in prejme najmanjše mogoče delo, ko deluje kot hladilni stroj.

Že zadnjič (Presek X, 1. števil., str. 31) smo ugotovili, da sta pri idealnem stroju toploti  $Q_2$  in  $Q_1$  v razmerju temperatur:

$$Q_1/|Q_2| = T_1/T_2. \quad (2)$$

Idealnemu hladilnemu stroju moramo potemtakem dovesti delo

$$A = Q_1(|Q_2|/Q_1 - 1) = Q_1(T_2/T_1 - 1),$$

če prejme pri nižji temperaturi toploto  $Q_1$ .

Vzemimo, da damo v hladilnik s temperaturo  $0^\circ\text{C}$  kilogram vode s to temperaturo in bi radi spremenili vodo v led pri  $0^\circ\text{C}$ . Če ima rebrasta cev na hrbtne strani hladilnika temperaturo  $30^\circ\text{C}$  in če deluje hladilnik kot idealni stroj, mu moramo za to dovesti delo:

$$A = 0,34 \text{ MJ} (303 \text{ K}/273 \text{ K} - 1) = 0,037 \text{ MJ}.$$

Pri tem odda pri višji temperaturi toploto

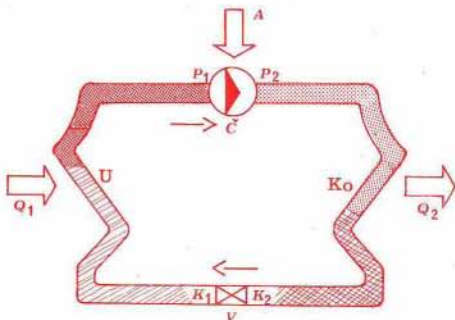
$$|Q_2| = A + Q_1 = 0,34 \text{ MJ} + 0,037 \text{ MJ} = 0,38 \text{ MJ}.$$

Upoštevali smo, da je talilna toplota ledu 0,34 milijonov joulov (megajoulov, MJ) na kilogram in da je treba vstaviti v enačbo absolutno temperaturo.

Gospodinjski hladilnik seveda ne deluje kot idealni stroj in porabi precej več dela, da zamrzne kilogram do ledišča ohlajene vode, po oceni kako desetinko MJ.

Doslej smo razpravljali o namišljenem hladilnem stroju, zdaj pa

opišimo resničnega. Pri tem se ne spuščamo v tehnične podrobnosti. V stroju teče po sklenjenem krogu (sl.2) *hladilna snov*, ki je v navadnih okoliščinah plin, a ima pri navadnem zračnem tlaku razmeroma visoko vrelišče. *Kompresor* (č) stisne plin (tehniški govorijo v tem primeru o pari) do višjega tlaka nekaj barov.



Slika 2 Močno poenostavljena risba hladilnega stroja: č kompresor, Ko kondenzator, V ekspanzijski ventil, U uparjalnik. Na desni strani kroga je tlak višji, na levi nižji.  $P_2$  je plin pri višjem tlaku in  $P_1$  pri nižjem,  $K_2$  je kapljevina pri višjem tlaku in  $K_1$  pri nižjem. V uparjalniku prejema hladilni stroj toploto pri nižji temperaturi in jo v kondenzatorju pri višji oddaja.

Plin ( $P_2$ ) ima nekaj višjo temperaturo od vrelišča pri tem tlaku (glej okvir 1). V *kondenzatorju* (Ko) oddaja toploto hladnejšemu okolnemu zraku in se ob tem postopno ohladi do vrelišča, utekočini in naposled ohladi še nekoliko pod vrelišče. Kapljevina pri višjem tlaku ( $K_2$ ) dospe do *ekspanzijskega ventila* (V) in preide skozi njegove šobe v del cevi z nižjim tlakom. Po prehodu ima kapljevina ( $K_1$ ) temperaturo malenkost nad vreliščem pri nižjem tlaku, nekaj pa je že med prehodom izpari. Preostala kapljevina pri nizki temperaturi v uparjalniku (U) prejema toploto od okolice in postopno izpari ter se naposled segreje še nekoliko nad vrelišče. S tem vzdržujemo v bližini uparjalnika v notranjosti hladilnika (po domače pravimo uparjalniku *zamrzovalnik*) nižjo temperaturo. Plin pri nižjem tlaku ( $P_1$ ) kompresor zopet stisne do višjega tlaka in igra se ponovi.

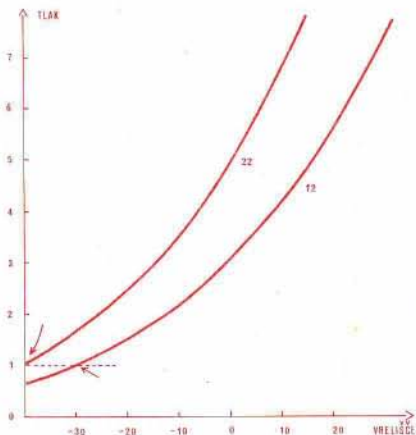
#### Vrelišče se spreminja s tlakom

Da je vrelišče odvisno od tlaka, se najhitreje prepričamo z vodo, za katero vemo, da vre pri navadnem zračnem tlaku 1 bar pri temperaturi  $100^{\circ}\text{C}$ . Vodo iz vodovodne napeljave nalijemo v steklenico in segrejemo na kakih  $25^{\circ}\text{C}$ . Ko s črpalko na vodni curek znižamo tlak v steklenici, začne voda



vreti pri tej temperaturi. Voda pri višjem tlaku kot 1 bar v tlačnem loncu (loncu ekonom) pa vre pri višji temperaturi od  $100^{\circ}\text{C}$  (jed se pri tem hitreje skuha). O tem, da voda vre, priča para, ki uhaja skozi ventil.

Vrelišče se potemtakem z naraščajočim tlakom zviša, s poje-majočim tlakom pa zniža. Tako je pri vseh snoveh, tudi pri hladilnih snoveh, ki jih uporabljamo v hladilnih strojih. Najbolje se obnesejo *klorofluorogljikovodiki*, ki niso stry peni in vnetljivi in se jim vrelišče zviša od nekaj deset stopinj pod ničlo na nekaj deset stopinj nad ničlo, ko se tlak poveča od 1 bara na nekaj barov (sl.3).



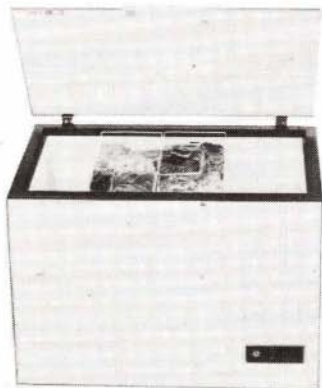
Slika 3 Odvisnost vrelišča od tlaka za diklordifluorometan (12) in klordifluorometan, ki imata pri navadnem tlaku vrelišče (V) pri  $-30^{\circ}\text{C}$  in  $-41^{\circ}\text{C}$ . Za primerjavo: metilklorid vre pri navadnem tlaku pri  $-24^{\circ}\text{C}$ , eter pri  $-25^{\circ}\text{C}$ , žveplov dioksid pri  $-73^{\circ}\text{C}$ , amoniak pri  $-78^{\circ}\text{C}$ , ogljikov dioksid pa pri  $-78,5^{\circ}\text{C}$  sublimira.

Kompresor je priključen na majhen elektromotor, ki ne deluje ne prekinjeno, ampak ga vključi termostat, ko temperatura v hladilniku naraste do določene meje. Tako smo opisali glavne sestavne dele gospodinjskih hladilnikov in najpomembnejše pojave, ki se v njih dogajajo.

*Hladilne skrinje* (sl.4) se odlikujejo le po nižji temperaturi.

V današnjem času pomanjkanja energije kaže posebej razmisliti o zanimivi možnosti. Kondenzator na hrbtni strani hladilnika oddaja toploto pri temperaturi, ki je nekoliko višja kot temperatu-

ra okolnega zraka. Zato je v prostoru s hladilnikom nekoliko topleje, čeprav nihče ne bo trdil, da se da s hladilnikom ogrevati kuhinjo. Če pa se načrta lotimo dovolj velikopotezno, dosežemo lahko prav to. Prej moramo hladilnik preurediti, saj nam zdaj ne gre več za toploto, ki jo jemlje živilom v zmrzovalniku, ampak za toploto, ki jo oddaja v kondenzatorju.



Slika 4 Hladilna skrinja ZS-220 Loških tovarn hladilnikov. Kot hladilno snov uporablja diklordifluorometan. Kompresor poganja elektromotor z močjo 140 W in skrinja porabi v povprečju okoli 1,6 kWh električnega dela na 24 ur. Skrinja vzdržuje v različnih predalih temperaturo od  $-18$  do  $-28^{\circ}\text{C}$ .

Hladilnemu stroju, ki ga rabimo za ogrevanje, pravimo *toplotna črpalka*. Toploto jemlje zraku ali vodi v okolici, jo "oplemeniti" s svojim delom in jo odda pri višji temperaturi. To, da se zrak ali voda v okolici ohladita za nekaj stopinj, nikogar ne moti: toploto dobimo tako rekoč zastonj. Toploto pri višji temperaturi lahko izkoristimo za ogrevanje vode v napeljavi za centralno ogrevanje ali sanitarne vode za umivanje in pomivanje. Naredimo kratek račun! Kako bi bilo, če bi toplotna črpalka delovala kot idealni hladilni stroj? Iz enačb (1)

#### Iz zgodovine

V starih časih so uporabljali za ohlajanje jedil in pijač led, ki so ga pozimi nalomili na rekah in jezerih. Okoli leta 1600 so ugotovili, da je mogoče zmrzniti vodo z zmesjo kuhinjske soli in stolčenega ledu ali snega. Že Rimlja-

ni so ohlajali prostore z glinastimi vrči, skozi stene katerih je pronicala voda in izhlapevala.

Leta 1775 je Cullen v Edinburghu z zračno razredčevalko znižal tlak in dosegel, da je voda vrela pri nižji temperaturi kot  $100^{\circ}$ . Hladilniki so precej mlajša iznajdba. Leta 1834 je Jacob Perkins v Londonu zgradil prvi uporaben hladilnik s kompresorjem\*. Kot hladilno snov je uporabil eter ( $\text{CH}_3\text{OCH}_3$ ). Pozneje so uvedli druge hladilne snovi: Carl Linde leta 1873 v Nemčiji amoniak ( $\text{NH}_3$ ), Raoul Pictet leta 1876 v Franciji žveplov dioksid ( $\text{SO}_2$ ). Tedaj so že uporabljali na ladjah, ki so prevažale meso iz Argentine v Francijo, hladilnike na eter. Proti koncu prejšnjega stoletja so uporabili še metilklorid ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ ) in ogljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ).

Velika ovira za še močnejši razvoj hladilnikov v našem stoletju je bila v tem, da so bile vse znane hladilne snovi strupene ali gorljive ali pa so zahtevale previsok tlak. Leta 1928 pa je Thomas Midget s sodelavci v ZDA sintetiziral diklordifluormetan ( $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ) in s tem začel zmagoslavno pot klorofluorogljikovodikov. Leta 1931 so ga dali v rabo z imenom freon. Naslednje leto mu je sledil triklorfluormetan ( $\text{CCl}_3\text{F}$ ), za tem diklortetrafluoretan ( $\text{CClF}_2\text{-CClF}_2$ ) in naslednje leto še triklortrifluoretan ( $\text{CClF}_2\text{-CCl}_2\text{F}$ ). Med drugo svetovno vojno so jih prvič uporabili tudi v pršilih (sprejih). Po vojni so sintetizirali še veliko drugih klorofluorogljikovodikov. Brez njih si danes hlajenja ni mogoče zamišljati. Za vsak namen je mogoče najti pripraven klorofluorogljikovodik. Tovarne jih izdelujejo pod različnimi imeni (freon, frigen, kaltron,...), zaznamujejo pa jih kar s številkami: 12 diklordifluormetan, 22 klordifluormetan itd.

---

\* Drugo vejo v razvoju hladilnikov - *absorpcijske hladilnike* z dvema snovema, na primer vodo in amoniakom, smo pustili v nemar. Čeprav so bili pred desetletji mali absorpcijski hladilniki zelo razširjeni, je dandanes ta veja odmrta.



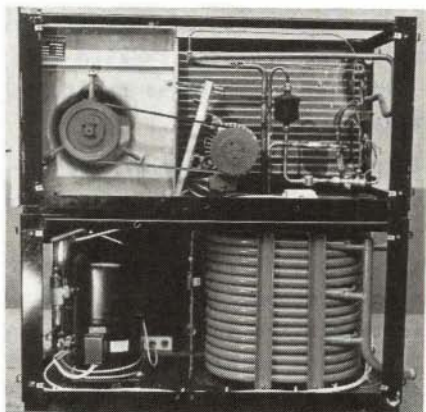
in (2) dobimo

$$A = |Q_2| - Q_1 = |Q_2| (1 - Q_1/|Q_2|) = |Q_2|(1 - T_1/T_2)$$

Razmerje med oddano toploto in dovedenim delom, tako imenovano *grelno število*, je v tem primeru

$$|Q_2|/A = T_2/(T_2 - T_1).$$

To je obratna vrednost izraza, ki smo ga dobili za izkoristek idealnega toplotnega stroja. Glej Presek X, 1. števil., str. 31.) Denimo, da je temperatura okolnega zraka  $10^{\circ}\text{C}$  in temperatura vode, ki doteka v napeljavo za centralno ogrevanje,  $40^{\circ}\text{C}$ . Grelno število je v tem primeru  $|Q_2|/A = 323 \text{ K}/(323 \text{ K} - 283 \text{ K}) = 8$ . Resnične toplotne črpalke tega seveda ne zmorejo. Črpalka, ki jo izdeluje Zavod za hlajenje in klimatizacijo Loških tovarn hladilnikov (sl.5), ima v navedenih okoliščinah grelno število 3. To je še vedno zelo ugodno in je ogrevanje z električno pečjo trikrat dražje. Če upoštevamo, da toplotna elektrarna izkoristi le približno tretjino toplote, ki se sprosti pri gorenju premoga, pri ogrevanju s toplotno črpalko izravnamo izgubo v elektrarni. V navedenih okoliščinah odda toplotna črpalka tolikšno toploto, kot smo jo vložili v elektrarno.



Slika 5 Kompaktna toplotna črpalka TČ 0300 Zavoda za hlajenje in klimatizacijo v izvedbi za zrak (pogled z zadnje

strani): levo spodaj je viden kompresor in desno spodaj kondenzator - v vijajnico navito dvojno cev, po notranji teče hladilna snov, po zunanji pa topla voda. Levo zgoraj je vidno ohišje ventilatorja in desno zgoraj ekspanzijski ventil (v desnem spodnjem kotu) in uparjalnik. Uparjalnik sestavljajo bakrene cevi z aluminijastimi rebri. - Kot hladilna snov uporablja klordifluormetan. Elektromotor kompresorja ima moč 2,2 kW, elektromotor ventilatorja za zrak pa 0,55 kW. Pri temperaturi zraka v okolici 5°C in temperaturi tople vode 50°C oddaja toplotni tok do 8,3 kW. Skozi uparjalnik steče dober kubični meter zraka v sekundi in se ohladi za okoli 5 stopinj.

Enačba kaže, da je ogrelno število manjše, če je zunanja temperatura nižja ali temperatura vode višja. Navedena toplotna črpalka ima pri zunanji temperaturi 5°C ogrelno število okoli 2,8, pri temperaturi 0°C pa okoli 2,4 (oboje pri temperaturi tople vode 40°C). Toplotna črpalka, ki jemlje toploto zraku, postane neekonomična, ko se zniža njegova temperatura za nekaj stopinj pod ničlo. Pri toplotni črpalki, ki jemlje toploto vodi, ni te težave, če je le pretok vode dovolj velik. V naših podnebni razmerah je pozimi mogoče računati s povprečnim grelnim številom med 2 in 3.

Ko uporabljamo toplotno črpalko za ogrevanje prostorov, speljemo toplo vodo skozi radiatorje napeljave za centralno ogrevanje ali - še bolje - skozi ogrelne cevi v podu. Pogosto hkrati ogrevamo sanitarno vodo. Navadno kombiniramo toplotno črpalko s kotlom na trdno gorivo ali kurilno olje, ki priskoči na pomoč, če se zunanja temperatura preveč zniža.

Ni dvoma, da se ogrevanje s toplotno črpalko v ugodnih vremenskih razmerah splača. Če pa bi hoteli podrobneje primerjati toplotno črpalko z električno pečjo in pečjo na trdno gorivo ali kurilno olje, bi morali upoštevati ceno električne energije, ceno goriva - tudi to, ali ga je sploh mogoče dobiti - in še nabavno ceno naprave. Ti podatki se tako hitro spreminjajo, da ne kaže delati podrobne primerjave. V tujini so pred leti močno spodbujali uporabo toplotnih črpalk za ogrevanje eno- in dvodružinskih hiš. V državah, ki nimajo težav z uvozom nafte, so zdaj nekoliko bolj zadržani. Pač pa povsod priporočajo toplotne čr-

palke za večje objekte, na primer za javna kopališča. V nekaterih primerih so toplotne črpalke še posebej ugodne, na primer v sušilnicah lesa. Toplotne črpalke, te vrste, ki jih gradi Zavod za hlajenje in klimatizacijo LTH, so se zelo obnesle.

Vsekakor kaže toplotne črpalke razvijati in preizkušati. Ne bi smeli biti presenečeni, če se bo v bližnji prihodnosti cena vsakršne energije tako povečala, da bodo postale toplotne črpalke nepogrešljive.

Janez Strnad