

DK 536.73:621.574:621.577

## Izgube eksergije pri hladilnih in grelnih procesih

MIRAN OPREŠNIK

Tako pri hladilnih kakor tudi pri grelnih procesih, ki jih izvajamo s toplotno črpalko, je potrebno delo za pogon črpalke sestavljeno iz ustreznih eksergij in izgub eksergije. Eksergije so pri danih temperaturnih pogojih natanko določene. Izgube eksergije pa so odvisne od kvalitete procesa. V članku je prikazana grafična metoda določitve teh izgub za hladilne in grelne procese.

Ce upoštevamo, da je bistvo toplotne črpalke proces, pri katerem prehaja toplota ob uporabi dela z nivoja nižje temperature na višji temperaturni nivo, ugotovimo, da z njeno pomočjo lahko hladimo, grejemo ali pa hkrati hladimo in grejemo. V prvem primeru — pri hladilnih procesih — prehaja toplota z nivoja temperature, ki je nižji od

temperature okolice, na temperaturo okolice. V drugem primeru — pri grelnih procesih — prehaja toplota z nivoja temperature okolice na nivo, ki leži pri temperaturi, višji od okoliške. V tretjem primeru — pri kombiniranih procesih — združujemo hladilni in grelni efekt.

Znano je, da je za grelne in hladilne procese potrebna natanko določena zmes eksergije in anergije [1], [2], [3], [4]. Ker je toplota, ki se izmenjuje med dvema sistemoma, sestavljena iz eksergije in anergije,

$$Q = E_Q + B_Q \quad (1)$$

je njena eksergija

$$E_Q = \frac{T - T_0}{T} Q \quad (2)$$

njena anergija pa

$$B_Q = \frac{T_0}{T} Q \quad (3)$$

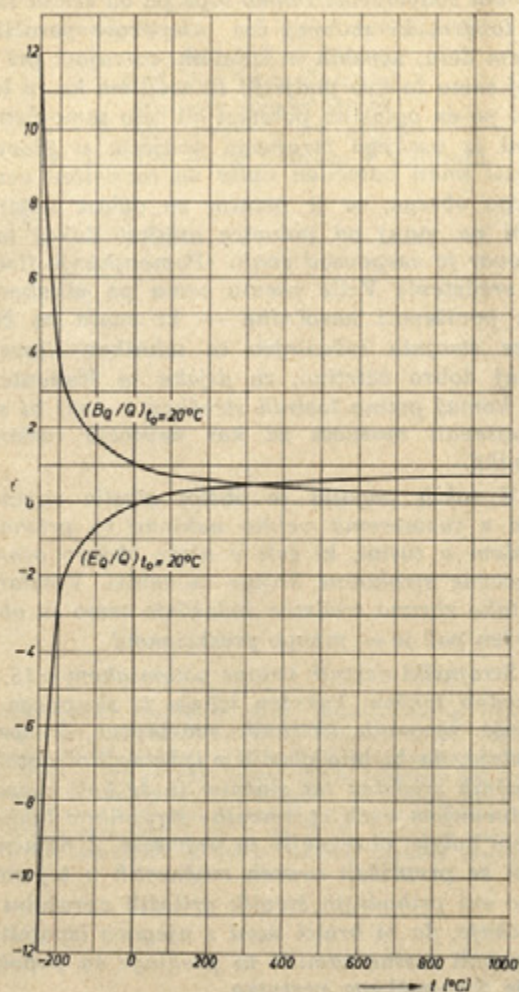
Vrednost deleža eksergije

$$\frac{E_Q}{Q} = \frac{T - T_0}{T} \quad (4)$$

in deleža anergije

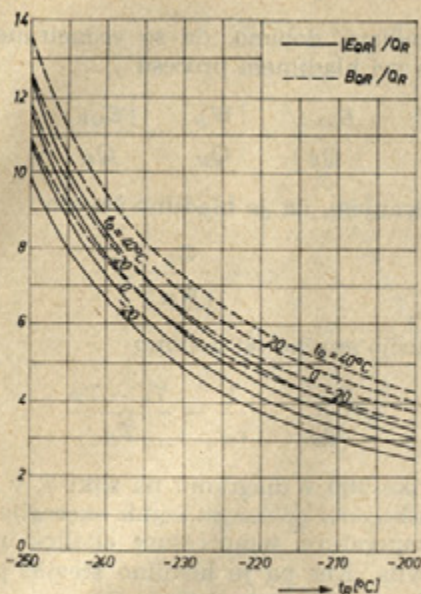
$$\frac{B_Q}{Q} = \frac{T_0}{T} \quad (5)$$

je za različne vrednosti temperatur  $t$  in za temperaturo okolice  $t_0 = 20^\circ\text{C}$  prikazana na sliki 1. Iz diagrama lahko na pogled razberemo, kolikšen delež eksergije in anergije moramo dovesti pri grelnih procesih, torej pri temperaturah  $T > T_0$ . Prav tako pa lahko iz diagrama razberemo tudi, kolikšen delež moramo zaradi negativne eksergije toplote kompenzirati z dovedeno eksergijo pri hladilnih procesih, torej pri temperaturah  $T < T_0$ , in kolikšen delež anergije moramo iz hladilnice odvesti. Iz diagrama lahko tudi vidimo, da so deleži eksergij posebno pri nizkih temperaturah zelo veliki. Za primerjavo je na sliki 2 narisana absolutna vrednost deleža eksergije in pa delež anergije za zelo nizke temperature ob upoštevanju, da sta obe vrednosti po enačbi (4) in enačbi (5) tudi funkciji temperature okolice  $t_0$ , in na sliki 3 z enakimi pogoji narisana

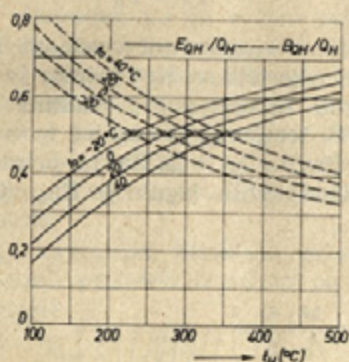


Sl. 1. Delež eksergije toplote  $E_Q/Q$  in delež anergije toplote  $B_Q/Q$  pri različnih temperaturah





Sl. 2. Delež eksergije in delež energije za zelo nizke temperature



Sl. 3. Delež eksergije in delež energije za višje grelne temperature

deleža eksergije in energije za višje grelne temperature. Če primerjamo dve ekstremni vrednosti pri temperaturi okolice  $t_o = 0^\circ\text{C}$ , tedaj je pri hladilni temperaturi  $t_R = -250^\circ\text{C}$  delež eksergije  $|E_{QR}|/Q_R = 10.799$ , delež eksergije pri grelni temperaturi  $t_H = +250^\circ\text{C}$  pa  $E_{QH}/Q_H = 0.478$ , torej 22,6-krat manjši. Kakšno zvezo ima delež eksergije s porabljenim delom? Da to prikažemo, je na sliki 4 narisana Rantov diagram pretoka eksergije in energije za: a) povračljivo in b) nepovračljivo gretje s toplotno črpalko. V primeru povračljivega gretja je za pogon toplotne črpalke potrebno delo ravno enako eksergiji grelne toplote pri grelni temperaturi  $T_H$

$$|W_{pov H}| = E_{QH} \quad (6)$$

Za ta primer veljajo tudi naslednje zakonitosti:

$$Q_H = E_{QH} + B_{QH} \quad (7)$$

$$W_{pov H} = Q_H - |Q_o| \quad (8)$$

$$Q_o pov = B_{Qo} = B_{QH} \quad (9)$$

$Q_o$  je toplota, ki jo odvezamo okolici. V primeru nepovračljivega gretja je potrebno delo večje za izgube eksergije, ki so posledica nepovračljivosti

$$|W_H| = E_{QH} + E_{izg H} \quad (10)$$

Tudi za ta primer lahko navedemo še nekatere zakonitosti:

$$Q_o = B_{QH} - E_{izg H} = B_{Qo} \quad (11)$$

$$E_{izg H} = B_{QH} - B_{Qo} \quad (12)$$

Analogno je na sliki 5 narisana Rantov diagram za povračljivo in nepovračljivo hlajenje s toplotno črpalko. Tudi v tem primeru je povračljivo delo enako eksergiji hladilne toplote

$$|W_{pov R}| = E_{QR} \quad (13)$$

nepovračljivo delo pa je večje za izgube eksergije

$$|W_R| = |E_{QR}| + E_{izg R} \quad (14)$$

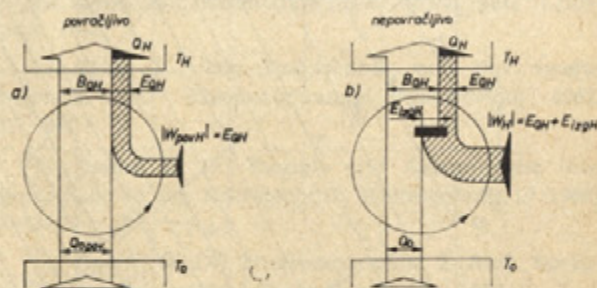
Pri povračljivem procesu je toplota, ki preide na okolico, enaka hladilni energiji

$$Q_o pov = B_{QR} \quad (15)$$

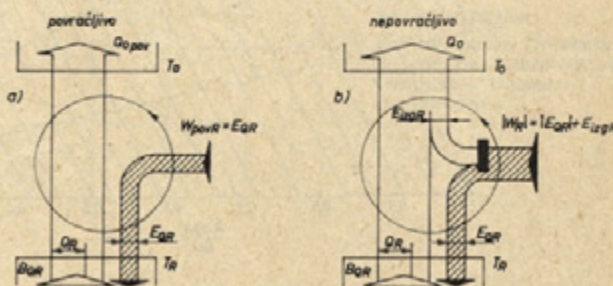
medtem ko je pri nepovračljivem procesu večja za izgube eksergije:

$$Q_o = B_{QR} + E_{izg R} \quad (16)$$

Iz enačb (6) oz. (10) in (13) oz. (14) jasno izhaja, da je potrebno delo za pogon toplotne črpalke neposredno odvisno od eksergije ustrezne toplote.

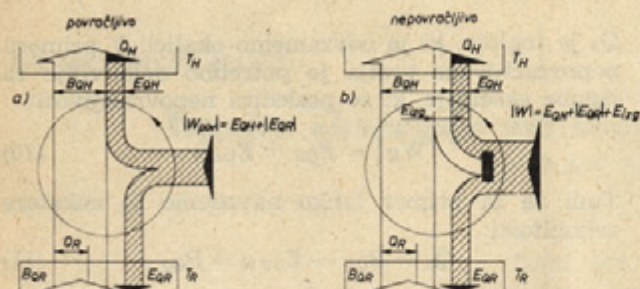


Sl. 4. Rantov diagram pretoka eksergij in energij za gretje s toplotno črpalko



Sl. 5. Rantov diagram za hlajenje s toplotno črpalko





Sl. 6. Rantov diagram za hkratno gretje in hlajenje s toplotno črpalko

S slik 1 oz. 2 in 3 pa zato tudi jasno izhaja, zakaj je potrebno delo pri zelo nizkih temperaturah tako veliko.

Na sliki 6 je narisana Rantov diagram za povračljivo in nepovračljivo hkratno gretje in hlajenje s toplotno črpalko. Pri povračljivem procesu je potrebno delo enako vsoti hladilne in grelne eksergije:

$$|W| = |E_{QR}| + E_{QH}, \quad (17)$$

pri nepovračljivem procesu pa je tudi v tem primeru potrebno povečati delo za izgube eksergije

$$|W| = |E_{QR}| + E_{QH} + E_{izg}. \quad (18)$$

Če sedaj enačbo (14) delimo s hladilno toploto  $Q_R$

in jo uredimo, dobimo, da so reducirane izgube eksergije pri hladilnem procesu

$$\frac{E_{izg R}}{Q_R} = \frac{|W_R|}{Q_R} - \frac{|E_{QR}|}{Q_R} \quad (19)$$

Z upoštevanjem, da je hladilno število

$$\varepsilon_R = \frac{Q_R}{|W_R|} \quad (20)$$

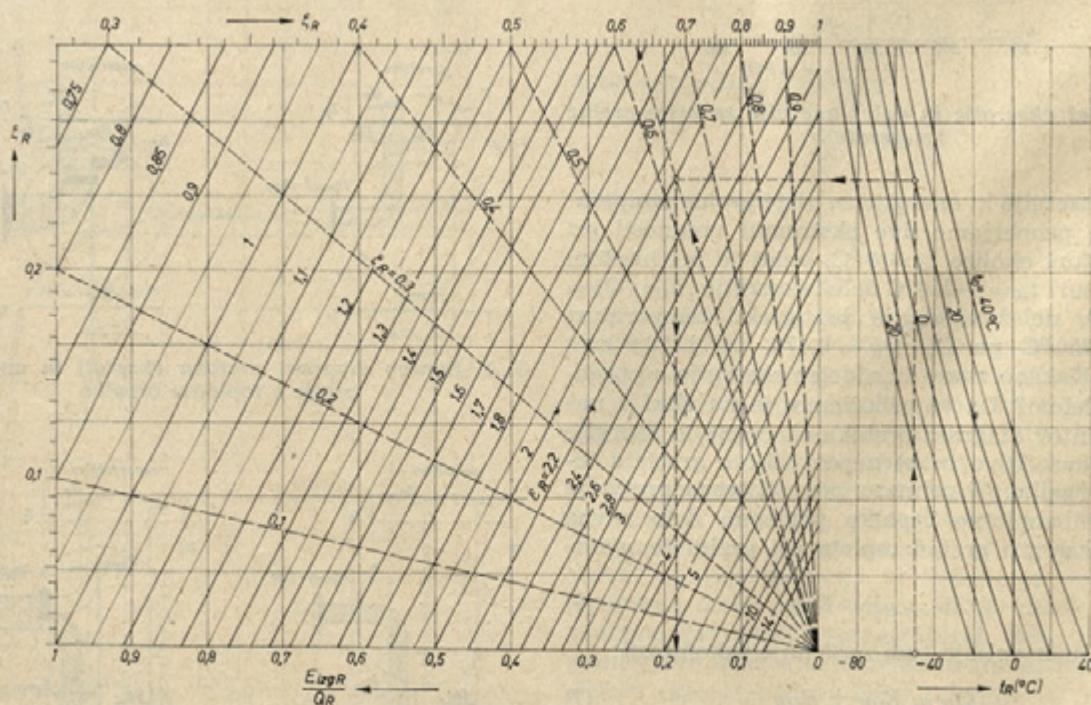
in s pomočjo enačbe (4) dobimo

$$\frac{E_{izg R}}{Q_R} = \frac{1}{\varepsilon_R} - \frac{T_o - T_R}{T_R} \quad (21)$$

To je prikazano v diagramu na sliki 7, v katerem lahko razberemo odvisnost izgub eksergije od hladilne temperature, temperature okolice in hladilnega števila. Ker pa je hladilno število povezano tudi z eksergijskim izkoristkom [5]

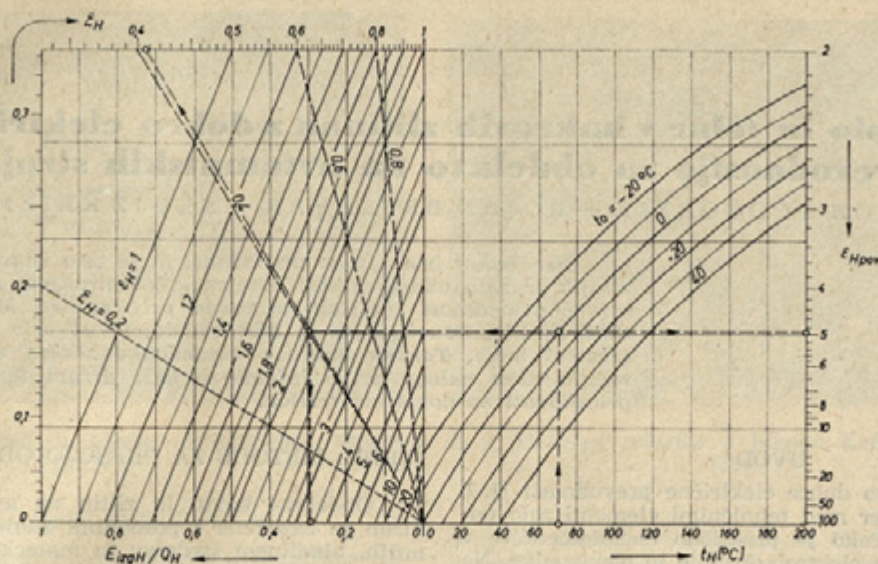
$$\varepsilon_R = \frac{T_R}{T_o - T_R} \zeta_R, \quad (22)$$

so v diagramu vrisane tudi vrednosti konstantnih eksergijskih izkoristkov. Kot primer je vrisano določanje izgub eksergije pri hladilni temperaturi  $t_R = -50^\circ\text{C}$ , temperaturi okolice  $t_o = 20^\circ\text{C}$  in pri hladilnem številu  $\varepsilon_R = 2$ . Za ta primer določena vrednost eksergijskih izgub je  $E_{izg R}/Q_R = 0,1863$ ,



Sl. 7. Določitev reduciranih izgub eksergije  $E_{izg R}/Q_R$  pri hladilnem procesu





Sl. 8. Določitev reduciranih izgub eksergije  $E_{izgH}/Q_H$  pri grelnem procesu

eksergijski izkoristek pa je v tem primeru  $\zeta_R = 0,6274$ . Iz diagrama se dobro vidi, da so izgube manjše in z njimi povezani eksergijski izkoristek večji pri enaki hladilni temperaturi in enakem hladilnem številu, če je temperatura okolice višja. Manjše so izgube eksergije tudi v primeru, če se pri sicer nespremenjenih ostalih vrednostih poveča hladilno število.

Podobno kakor pri hladilnih procesih, lahko tudi pri grelnih procesih izrazimo po enačbi (10) izgube eksergije

$$\frac{E_{izgH}}{Q_H} = \frac{|W_H|}{Q_H} - \frac{E_{QH}}{Q_H} \quad (23)$$

Z upoštevanjem, da je grelno število

$$\varepsilon_H = \frac{Q_H}{|W_H|} \quad (24)$$

in s pomočjo enačbe (4) dobimo

$$\frac{E_{izgH}}{Q_H} = \frac{|W_H|}{Q_H} - \frac{E_{QH}}{Q_H} = \frac{1}{\varepsilon_H} - \frac{T_H - T_0}{T_H} \quad (25)$$

Te izgube so prikazane na sliki 8, kjer so nanesene v odvisnosti od grelne temperature, temperature okolice in grelnega števila. Ker pa je grelno število povezano tudi z eksergijskim izkoristkom

$$\varepsilon_H = \frac{Q_H}{E_{QH}} \frac{E_{QH}}{|W_H|} = \frac{T_H}{T_H - T_0} \zeta_H \quad (26)$$

so v diagramu vrisane tudi vrednosti konstantnih eksergijskih izkoristkov  $\zeta_H$ . Vrisan je naslednji primer: pri grelni temperaturi  $t_H = 70^\circ\text{C}$  in temperaturi okolice  $t_0 = 0^\circ\text{C}$  razberemo na desni strani maksimalno grelno število  $\varepsilon_{H\max} = \varepsilon_{H\text{pov}} = 4,90$ . Pri dejanskem grelnem številu  $\varepsilon_H = 2$  pa dobimo izgube eksergije  $E_{izgH}/Q_H = 0,296$  in eksergijski izkoristek  $\zeta_H = 0,408$ .

#### LITERATURA

- [1] Rant, Z.: Termodinamika. Univ. zal., Ljubljana, 1963.
- [2] Rant, Z.: Die Heiztechnik und der zweite Hauptsatz der Thermodynamik. Gaswärme, 1963, 297—304.
- [3] Baehr, H. D.: Exergie und Anergie und ihre Anwendung in der Kältetechnik. Kältetechnik, 17 (1965) 14—22.
- [4] Baehr, H. D.: Thermodynamik. 2. Aufl. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 1966.
- [5] Oprešnik, M.: Ocenjevanje hladilnih procesov. Stroj. V., 1966 (6) 175—181.

Avtorjev naslov:

dr. ing. Miran Oprešnik,  
docent na Fakulteti za  
strojništvo Univerze  
v Ljubljani