

UDK 536.73:621.56/.59

Eksergijski izkoristek hladilnih procesov pri nizkih temperaturah

MIRAN OPRESNIK

Hladilnim procesom je za izvedbo potreben natanko določen delež eksergije. Čim nižja je hladilna temperatura, tem večji delež eksergije je potreben. To pa pomeni, da je potrebno delo večje. Zato se z zniževanjem hladilne temperature zmanjšuje tudi hladilno število. V članku so prikazane te zakonitosti in je podana grafična metoda za določanje eksergijskega izkoristka hladilnih procesov pri nizkih in zelo nizkih temperaturah.

Toploto, ki jo nekemu sistemu odvajamo pri hladilni temperaturi t_R , ki je nižja od temperature okolice t_o , imenujemo hladilno toploto Q_R . Eksergija hladilne toplote je seveda odvisna od obeh temperatur

$$|E_{QR}| = Q_R \frac{T_o - T_R}{T_R} \quad (1)$$

Čim nižja je hladilna temperatura, tem večja je pri enaki temperaturi okolice in enaki hladilni toploti njena eksergija. Te zakonitosti so grafično prikazane v [1]. Čim večja pa je eksergija hladilne toplote, tem večje je delo, ki ga moramo dovesti v proces. Pri povračljivem procesu bi bilo potrebno delo

$$W_{R\text{pov}} = E_{QR}, \quad (2)$$

pri nepovračljivem procesu pa se to delo poveča še za izgube eksergije

$$|W_R| = |E_{QR}| + E_{izgR}. \quad (3)$$

Ustrezno povečanju dela pa se zmanjšuje tudi hladilno število

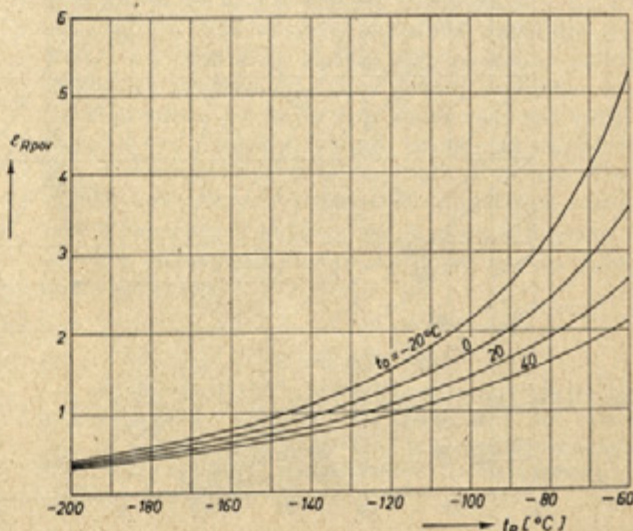
$$\varepsilon_R = \frac{Q_R}{|W_R|}. \quad (4)$$

Največje bi bilo hladilno število v primeru povračljivega procesa

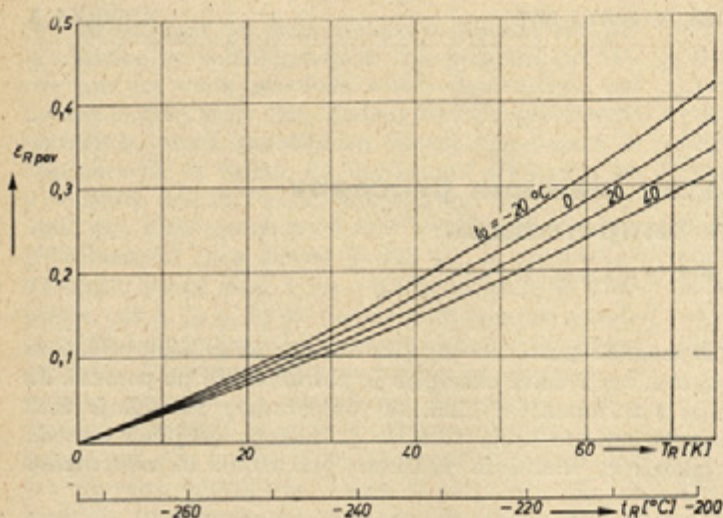
$$\varepsilon_{R\text{max}} = \varepsilon_{R\text{pov}} = \frac{T_R}{T_o - T_R}. \quad (5)$$

Kako se povračljivo hladilno število spreminja v odvisnosti od ustreznih temperatur, je za območje hladilnih temperatur od -60°C do -200°C narisano v diagramu na sliki 1. Razviden je tudi vpliv temperature okolice. Razumljivo je, da se ta vpliv zmanjšuje pri hladilnih temperaturah, ki so bolj oddaljene od temperature okolice. Tako se npr. zmanjša povračljivo hladilno število pri spremembi temperature okolice od -20°C na 40°C pri hladilni

temperaturi -60°C za 60 %, pri hladilni temperaturi -200°C pa samo še za 25 %. Če upoštevamo, da pomeni hladilno število razmerje, ki pove, koliko enot hladilne toplote dobimo iz ene enote vloženega dela, tedaj morajo biti razmere ob nizkih temperaturah resno opozorilo, da ne smemo pretiravati z zniževanjem temperatur. Oglejmo si primer pri temperaturi okolice -20°C ! Tako je povračljivo hladilno število pri hladilni temperaturi -40°C približno $\varepsilon_{R\text{pov}} \approx 10$. To pomeni, da bi iz ene vlozene enote dela dobili v hladilne namene 10 enot hladilne toplote. Pri hladilni temperaturi -145°C je vrednost povračljivega hladilnega števila približno $\varepsilon_{R\text{pov}} \approx 1$. To pomeni, da moramo za vsako enoto hladilne toplote vložiti tudi enako količino dela. Pri hladilni temperaturi -250°C pa je vrednost povračljivega hladilnega števila približno $\varepsilon_{R\text{pov}} \approx 0,1$, kar seveda pomeni, da moramo za enoto hladilne toplote vložiti v proces kar 10 enot dela. Za ob-



Sl. 1. Povračljivo hladilno število $\varepsilon_{R\text{pov}}$ za območje hladilnih temperatur od -60°C do -200°C



Sl. 2. Povračljivo hladilno število $\epsilon_{R\text{ pov}}$ za območje hladilnih temperatur do 75 K

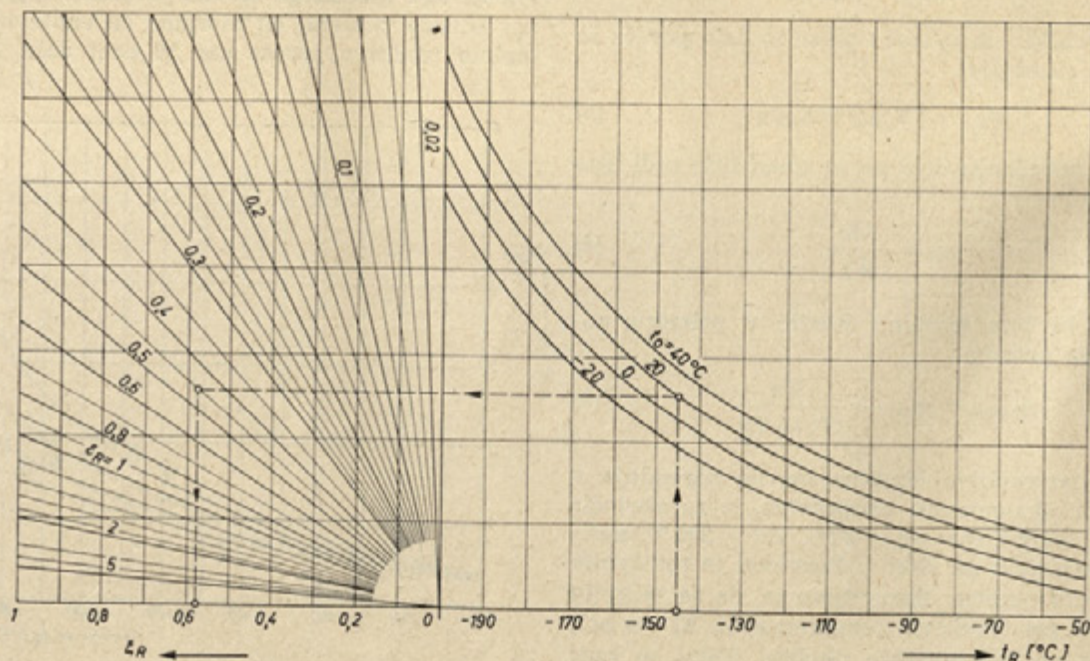
močje zelo nizkih temperatur do 75 K so te razmere prikazane v diagramu na sliki 2. Na vse to moramo misliti, kadar postavljamo zahteve o hladilni temperaturi. Vsako nepotrebno zniževanje hladilne temperature bistveno vpliva na obratovalne stroške, ki so še posebno veliki pri nizkih temperaturah. Pri tem je treba upoštevati, da so resnične vrednosti hladilnih števil manjše od povračljivih, ker se zaradi izgub eksergije povečuje potrebno delo.

Za pravilno termodinamično oceno procesa pa ni dovolj, da upoštevamo samo hladilno število. To zajema le prvi glavni zakon termodinamike. Popolna termodinamična ocenitev procesa pa mora upoštevati tudi drugi glavni zakon termodinamike.

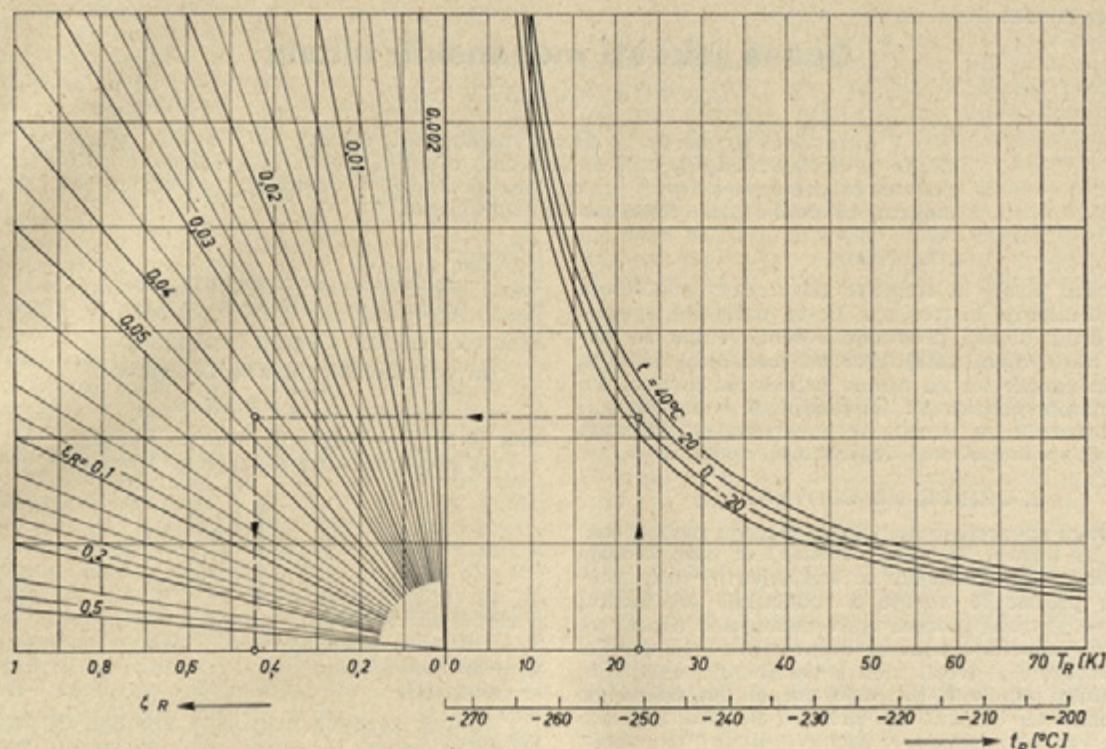
Tega upoštevamo z določitvijo eksergijskega izkoristka

$$\zeta_R = \frac{T_0 - T_R}{T_R} \epsilon_R. \quad (6)$$

Za območje hladilnih temperatur do -60 °C je grafična določitev eksergijskega izkoristka objavljena v [2]. Za območje nizkih temperatur od -50 °C do -200 °C je ustrezni diagram prikazan na sliki 3. Vrisan je naslednji primer: hladilna temperatura $t_R = -145\text{ °C}$, temperatura okolice $t_0 = 20\text{ °C}$, hladilno število $\epsilon_R = 0,45$. Z grafično rešitvijo, ki je razvidna iz diagrama, dobimo vrednost eksergijskega izkoristka $\zeta_R = 0,579$. Za območje zelo nizkih temperatur od $T_R = 75\text{ K}$ ($t_R =$



Sl. 3. Določanje eksergijskega izkoristka ζ_R za območje hladilnih temperatur od -50 °C do -200 °C

Sl. 4. Določanje eksergijskega izkoristka ζ_R za območje hladilnih temperatur od 10 K do 75 K

$= -198,15^\circ\text{C}$) navzdol pa je ustrezni diagram prikazan na sliki 4. Vrisan je naslednji primer: hladilna temperatura $T_R = 22,5\text{ K}$, temperatura okolice $t_o = 0^\circ\text{C}$, hladilno število $\varepsilon_R = 0,04$. Rezultat grafične rešitve je $\zeta_R = 0,446$.

Zanimiva je primerjava zadnjih dveh diagramov. Takoj lahko opazimo, da so zajete vrednosti hladilnih števil v diagramu na sliki 3 desetkrat večje od vrednosti na sliki 4. To se popolnoma ujema z uvodnimi razmišljanji o hladilnih številih. Tu bi rad opozoril na napačno razlago, ki je zelo pogostna. V praksi radi ocenjujemo hladilne procese s hladilnim številom. Res je, da je pri enakem hladilnem številu in enaki hladilni toploti tudi porabljeno delo enako. Pri tem pa ne smemo pozabiti, da so možnosti, kako doseči enako hladilno število, različne. Vzemimo za primer dva hladilna procesa, oba naj potekata pri temperaturi okolice 20°C in oba naj imata enako hladilno število $\varepsilon_R = 0,1$. Prvi proces naj poteka pri hladilni temperaturi -145°C , drugi pa pri 30 K . Če bi ocenjevali procesa samo s hladilnim številom, tedaj bi morali reči, da sta enakovredna, saj porabita za enako hladilno toploto enako delo. Če pa poiščemo vrednost eksergijskega izkoristka, pa takoj opazimo bistveno razliko. V prvem primeru, torej pri višji hladilni temperaturi (-145°C) bi bil eksergijski izkoristek $\zeta_R = 0,129$, v drugem primeru pa $\zeta_R = 0,876$. Vidimo, da je proces v drugem primeru neprimerno boljši.

Kako si lahko to razlagamo? Prvi proces je obremenjen z razmeroma velikimi izgubami eksergije zaradi nepovračljivosti, to se pravi z izgubami, ki bi jih s primernimi posegi lahko zmanjšali. Teoretično bi lahko v prvem primeru dosegli največjo vrednost hladilnega števila $\varepsilon_{R\text{pov}} = 0,778$, v drugem primeru pa le $\varepsilon_{R\text{pov}} = 0,114$. Če tega nismo dosegli, izvirajo razlogi iz človeka, ne pa iz naravnih zakonov. V prvem primeru trošimo veliko več energije, kakor bi bilo potrebno. Primerjavo v navedenih pogojih sem namenoma izbral nekoliko pretirano. V normalnih okoliščinah navadno primerjamo dva procesa, ki sta si precej podobna, to se pravi procesa, pri katerih je enak vsaj red veličine hladilne temperature. Izbrani primer pa naj bi razliko v ocenjevanju prikazal bolj plastično. Če še upoštevamo, da je v normalnih okoliščinah različna tudi temperatura okolice, tedaj mora biti jasno, da je edino eksergijski izkoristek pravo merilo za kvaliteto procesov.

LITERATURA

- [1] Oprešnik, M.: Izgube eksergije pri hladilnih in grelnih procesih. Stroj. V., XV (1969), št. 1, str. 2—5.
- [2] Oprešnik, M.: Der exergetische Wirkungsgrad der Wärmepumpe. Kältetechnik-Klimatisierung, 21 (1969) št. 7, str. 193—195.

Avtorjev naslov:

prof. dr. ing. Miran Oprešnik,
Fakulteta za strojništvo
Univerze v Ljubljani