

Pri načrtovanju se najprej pojavi vprašanje, koliko je sploh mogočih različnih strojev. Zaradi zapletenosti tega problema se omejimo samo na račun vseh možnih variant odrezovalnih strojev, upoštevajoč vse kinematične variante.

S slike 1 je razvidno, da je za glavno gibanje mogočih 28 variant (2.2.7), enako pa tudi za vsako podajalno gibanje, ker usmeritev podajalnih gibanj glede na glavno gibanje ni treba upoštevati, saj ta podatek vsebuje že šifra za koordinatno smer (0 ... 7). Stroja brez glavnega gibanja ni, zato pa so možni stroji, ki imajo samo 3, 2 ali 1 podajalno gibanje, izjemoma so celo brez vsakega podajalnega gibanja. Iz tega izhaja, da je teoretično mogoče naslednje število odrezovalnih strojev:

$$28 \binom{28}{4} + \binom{28}{3} + \binom{28}{2} + \binom{28}{1} + 1 = 676\,424$$

Jasno je seveda, da je veliko število teh možnosti nesmiselnih ali za prakso neuporabnih. Naloga konstrukterja je, da pri zasnovi sistematično izloča neprimerne variante in izbere optimalno.

Opisani predlog za kinematično klasifikacijo postopkov in strojev za odrezavanje naj bi bil vzpodbuda za razmišljanje o praktični uporabnosti. Zaželeno bi bilo, da bi praksa poskusila ta sistem sprejeti in ga ustrezno izpopolniti ter da bi poročala o dobljenih izkušnjah.

Avtorjev naslov: prof. dr. ing. Hinko Muren
Fakulteta za strojništvo
Univerze v Ljubljani

UDK 662.997

Izkoriščanje toplotne energije termalnih vod

MIRKO OPARA

1. NEKAJ MOŽNOSTI ZA UPORABO

V zunanji zemeljski skorji se temperatura poveča v poprečju za 3,3 °C na vsakih 100 m globine. Ob nekaterih zemeljskih prelomnicah in na področjih, kjer so še vidni znaki vulkanskega delovanja, dosega temperature vrednosti, ki so tudi do desetkrat višje od poprečnih. Na teh področjih prihaja navadno geotermična energija na površino z gejzirji ali vročimi in toplimi vreli, kjer se kot nosilec toplote pojavlja voda v parnem ali kapljevitem agregatnem stanju, pogosto pa tudi kot zmes pare in kapljevine. Vreli so lahko naravni, ali pa so nastali z umetnimi vrtinami.

Če imamo geotermično energijo na voljo v pregreti ali mokri pari, se sama od sebe ponuja možnost pretvarjanja te energije v električno. Za vire geotermične energije, ki so daleč od potencialnih porabnikov, je ta tudi edina možnost racionalnega izkoriščanja zaradi preprostega prenosa električne energije na večje razdalje. V preteklosti je bilo veliko prizadevanj usmerjenih v neposredno pretvarjanje geotermične energije v električno. Nastale so pomembne geotermične električne centrale [1], od katerih največja stoji v Kaliforniji v ZDA in ima moč 500 MW. Večji del geotermične energije se na površini zemlje pojavlja pri razmeroma nizkih temperaturah, zato se v novejšem času intenzivno iščejo možnosti za pretvarjanje nizkotemperaturne toplote v električno energijo. V Sovjetski zvezi [2] so razvili naprave za proizvodnjo električne energije, ki kot delovno sredstvo uporabljajo freon, ker ima nižje vrelišče od vode. Taka naprava obratuje od leta 1970 in ima moč 0,5 MW, uporablja pa termalno vodo s temperaturo 90 °C.

Pretvarjanje geotermične energije v električno je seveda povezano s precejšnjimi izgubami toplote, saj je ta energija na voljo pri razmeroma nizkih temperaturah in ima majhno eksergijo [3]. Prav zaradi te lastnosti je geotermična energija primerna za ogrevanje pri nižjih temperaturah.

Na Islandiji živi blizu 100 000 ljudi ali okrog 45 % vsega prebivalstva v hišah, ogrevanih s toplotno energijo iz termalnih vrelecev. V sistem je vključenih tudi več notranjih in zunanjih bazenov in rastlinjakov [4]. Geotermična energija se uporablja za ogrevanje stanovanj v Novi Zelandiji, Sovjetski zvezi, na Japonskem, na Madžarskem in še bi lahko naštevali. Zaradi prenizkih temperatur termalnih vrelecev se ponekod uporabljajo toplotne črpalke. Znane so tudi kombinacije toplotnih črpalk, ki izkoriščajo geotermično energijo z običajnim ogrevanjem za pokrivanje konic pri neugodnih zunanjih temperaturah [5].

Še večje možnosti kakor za ogrevanje stanovanjskih prostorov ima energija termalnih vod na področju ogrevanja rastlinjakov in farm za pridobivanje živalskega mesa. S termalnimi vodami ogrevani rastlinjaki se po svetu uporabljajo za gojenje najrazličnejših vrtnin in drugih kmetijskih pridelkov. Različna perutnina in svinje pa so živali, ki so jih doslej najpogosteje gojili v prostorih, ogrevanih s termalno vodo. Uporaba termalnih vod v balneološke, terapevtske in rekreacijske namene je razširjena po vsem svetu.

2. TERMALNI VRELICI V SLOVENIJI

V Sloveniji imamo dva tipa termalnih vrelecev [6], ki se ločita po nastanku ter fizikalnih in kemičnih lastnostih. Prvi tip so v glavnem že dolgo znani termalni izviri, ki pritekajo na površino iz dolomita in apnenca. Nizka koncentracija raztopljenih mineralnih snovi (do 0,5 g/dm³) in njihova konstantna sestava kažeta na podzemeljsko cirkulacijo vode, ki prenika v globino s površja in obnavlja podzemeljska nahajališča.

Drugi tip so termomineralne vode, na katere so naleteli pri iskanju nafte v Prekmurju. Vsebujejo do 10 g/dm³ raztopljenih mineralnih snovi. Nakopičene so v poroznih peščenih plasteh. Njihovo obnavljanje je mogoče le tam, kjer prihajajo porozne plasti na zemeljsko površino.

Tabela 1. Termalni vrelci v Sloveniji [6]

	Dotok kg/s	Temperatura °C
Vrhnika	15	26
Bled	13	19 ... 22
Topolšnica	28	29 ... 31
Stranice	20	21
Trbovlje	12	32
Laško	18	34 ... 40
Podčetrtek	25	34 ... 37
Dolenjske Toplice	20	32 ... 38
Šmarješke Toplice	40	28 ... 35
Topličnik pri Kostanjevici	30	21 ... 28
Bušeča vas	30	27
Čateške Toplice	120	57 ... 64
Moravci	14	55 ... 75

V tabeli 1 je zbranih nekaj največjih za zdaj znanih termalnih vrelcev v Sloveniji.

Termalni vrelci v Sloveniji še niso dokončno raziskani, zato še ni mogoče sklepati o največjem dotoku niti o najvišjih razpoložljivih temperaturah. V preteklosti je bilo opravljeno večje število osnovnih geoloških raziskav, ki so bile v celoti zelo uspešne.

Temperature znanih termalnih vrelcev v Sloveniji so le v nekaterih primerih dovolj visoke, da jih je mogoče uporabljati za neposredno ogrevanje. V drugih primerih je termalne vode mogoče izkoriščati kot vir toplote v procesu toplotne črpalke. Termalne vode imajo v primerjavi z drugimi viri toplote, ki se lahko izkoriščajo s toplotno črpalko, to prednost, da je njihova temperatura navadno znatno višja od povprečne temperature okolice, s čimer se močno izboljša učinkovitost naprave.

3. NEPOSREDNO OGREVANJE

Stroški geoloških raziskav, vrtanja in ureditve črpališč so v nekaterih primerih lahko zelo visoki, zato si je treba prizadevati, da enkrat pridobljeno geotermično energijo čim bolj izkoristimo. Pri neposrednem ogrevanju uporabljamo take izvedbe ogrevalnih sistemov, ki omogočajo izkoriščanje toplote termalne vode pri čim nižjih temperaturah četudi na račun večjih ogrevalnih površin kakor smo jih vajeni pri običajnih sistemih. Največ se ta način ogrevanja uporablja v kmetijske namene za ogrevanje rastlinjakov, cvetličnjakov in toplih gred. Pri nas se termalna voda na Čateškem polju uporablja za ogrevanje prek 4 ha rastlinjakov.

Termalne vode vsebujejo navadno raztopljene snovi, ki lahko povzročajo in pospešujejo korozijo kovinskih delov ali se v cevovodih in armaturah izločajo v obliki oblog. Te v ugodnih primerih celo ščitijo naprave pred korozijo, vedno pa slabšajo prenos toplote. Pred začetkom gradnje ogrevalnih sistemov je treba analizirati sestavo termalne vode in narediti korozijske teste.

4. OGREVANJE Z UPORABO TOPLOTNE ČRPALKE

S toplotno črpalko dvignemo toploto z nižje temperature na višjo in tako povečamo njeno kakovost in uporabnost. Čim višjo temperaturo ima razpoložljiva toplota termalne vode, tem manj energije bomo potrebovali za pogon toplotne črpalke. Tehnična izvedba toplotne črpalke danes v osnovi ne prinaša težav, zato so prizadevanja usmerjena v izpopolnjevanje procesa in izboljšavo izkoristkov. Odločitev o uporabi toplotne črpalke je mogoče sprejeti po gospodarni primerjavi z ogrevalnim sistemom na običajna goriva, pri čemer ne smemo pozabiti na večje onesnaževanje okolja.

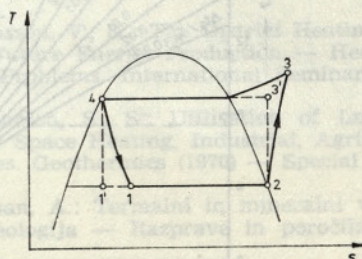
Osnovni kriterij za presojo procesa toplotne črpalke je grelno število ε , ki je razmerje med pridobljeno grelnno toploto $\dot{Q}_H$ (ali grelnim toplotnim tokom $\dot{Q}_H$) in porabljenim delom W (ali močjo P) za pogon kompresorja toplotne črpalke.

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_H}{W} = \frac{\dot{Q}_H}{P} \quad (1)$$

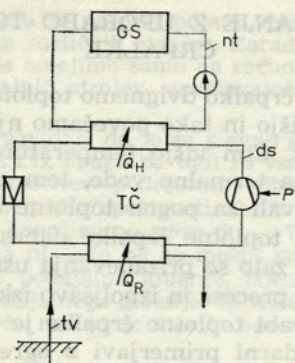
Če si proces toplotne črpalke zamislimo kot levi Carnotov proces, računamo grelnno število po znani enačbi

$$\varepsilon = \frac{T_H}{T_H - T_R} \quad (2)$$

kjer sta T_H temperatura odvoda grelnega toplotnega toka $\dot{Q}_H$ in T_R temperatura dovoda razpoložljivega toplotnega toka $\dot{Q}_R$. Dejanski proces toplotne črpalke se seveda od Carnotovega razlikuje. Grelni toplotni tok se v celoti ne odvaja pri konstantni temperaturi kondenzacije izbrane delovne snovi, ampak deloma pri spremenljivi višji temperaturi ob izobari v pregretem področju. Kompresija in ekspanzija ne potekata izentropno. Ekspanzija je zamenjana s preprosto dušitvijo, kompresija pa se zaradi nepovračljivosti bolj ali manj približa izentropi. Na sl. 1 je v diagramu T, s črtkano narisana Carnotov krožni proces (1', 2, 3', 4), izvalčeno pa dejanski proces toplotne črpalke (1, 2, 3, 4), pri čemer so zanemarjene tlačne izgube pri pretoku delovne snovi skozi uparjalnik in kondenzator.



Sl. 1. Carnotov proces in proces toplotne črpalke v diagramu T, s



Sl. 2. Običajen proces toplotne črpalke

TČ — toplotna črpalka, GS — greti sistem, tv — termalna voda, ds — delovno sredstvo, nt — nosilec toplote

Večje nepovračljivosti kakor v samem krožnem procesu toplotne črpalke se pojavljajo pri prenosu toplote v uparjalniku in kondenzatorju. Kakor je razvidno iz poenostavljene sheme običajnega procesa toplotne črpalke na sl. 2, prestopa toplota v uparjalniku iz razpoložljivega vira toplote, ki je v našem primeru termalna voda, na delovno sredstvo krožnega procesa toplotne črpalke in v kondenzatorju iz delovnega sredstva na greti sistem oziroma nosilec toplote, ki nato teče skozi greti sistem. Nepovračljivosti prenosa toplote bistveno prispevajo k zmanjšanju grelnega števila procesa glede na grelno število Carnotovega procesa, ki bi potekal med temperaturo razpoložljive toplote T_r in temperaturo gretega sistema oziroma nosilca toplote T_h .

Temperatura uparjanja T_R v delovnem procesu toplotne črpalke je nižja od temperature termalne vode T_r za temperaturno razliko Δt_u , ki je potrebna za prenos toplote

$$T_R = T_r - \Delta t_u \quad (3)$$

Temperatura odvoda toplote T_H iz delovnega procesa toplotne črpalke je višja od temperature gretega sistema oziroma nosilca toplote T_h za tem-

peraturno razliko Δt_k , ki je potrebna za prenos toplote

$$T_H = T_h + \Delta t_k \quad (4)$$

Grelno število lahko izrazimo z znano temperaturo termalne vode T_r in temperaturo gretega sistema oziroma nosilca toplote T_h

$$\varepsilon = \frac{T_h + \Delta t_k}{T_h - T_r + \Delta t_u + \Delta t_k} \quad (5)$$

Grelno število je tem večje čim manjši sta temperaturni razliki, potrebni za prenos toplote v uparjalniku in kondenzatorju. Danes velja za spodnjo mejo temperaturne razlike za prenos toplote približno 5°C .

Če označimo grelno število Carnotovega procesa, ki bi potekal med temperaturo termalne vode in temperaturo gretega sistema oziroma nosilca toplote, z

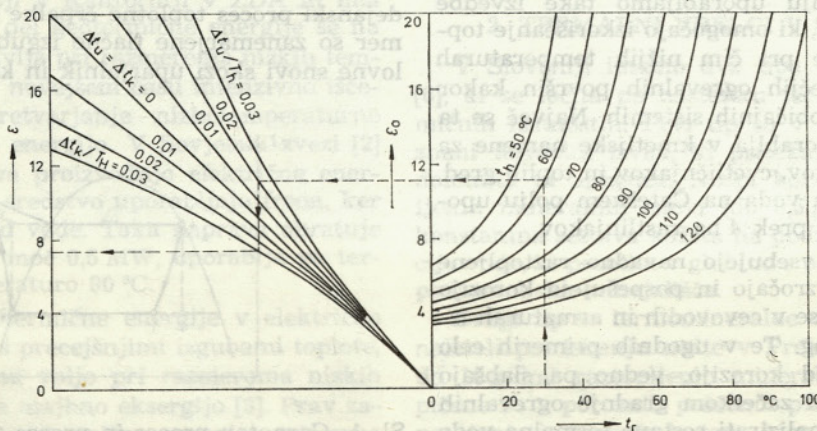
$$\varepsilon_0 = \frac{T_h}{T_h - T_r} \quad (6)$$

lahko enačbo (5) zapišemo tudi v naslednji obliki

$$\varepsilon = \frac{1 + \Delta t_k/T_h}{1/\varepsilon_0 + \Delta t_k/T_h + \Delta t_u/T_h} \quad (7)$$

Enačba (7) je za hitrejšo ovrednotenje prikazana kot nomogram na sl. 3. Po znani temperaturi termalne vode T_r in temperature gretega sistema oziroma nosilca toplote T_h lahko v desnem kvadrantu hitro odberemo grelno število ε_0 Carnotovega procesa, ki bi potekal med tema temperaturama. Zmanjšanje grelnega števila zaradi temperaturnih razlik Δt_u in Δt_k določimo v levem kvadrantu nomograma. To zmanjšanje je tem večje, čim manj se razlikujeta temperatura razpoložljive toplote T_r in temperatura gretega sistema oziroma nosilca toplote T_h .

V nomogramu na sl. 3 je črtkano narisano primer določanja grelnega števila za naslednje parametre: $t_r = 30^\circ\text{C}$, $t_h = 60^\circ\text{C}$, $\Delta t_u/T_h = 0,02$ in $\Delta t_k/T_h = 0,03$ oziroma $\Delta t_u = 6,66^\circ\text{C}$ in $\Delta t_k = 9,99^\circ\text{C}$. Za proces,



Sl. 3. Nomogram za določanje grelnega števila

ki bi potekal brez temperaturnih razlik, potrebnih za prenos toplote, bi znašalo grelno število $\varepsilon_0 = 11,1$; zaradi temperaturnih razlik Δt_u in Δt_k pa se grelno število zmanjša za 34 % na vrednost $\varepsilon = 7,35$.

Temperatura termalne vode se pri pretoku skozi uparjalnik toplotne črpalke zmanjša od T_{r1} na T_{r2} , zato moramo v zgornjih enačbah računati s srednjo temperaturo odvzete toplote Q_R

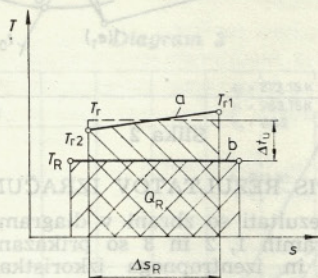
$$T_r = \frac{Q_R}{\Delta S_R} \quad (8)$$

kjer je ΔS_R sprememba entropije termalne vode pri pretoku skozi uparjalnik. Temperaturne razmere v uparjalniku toplotne črpalke so prikazane na sl. 4 v diagramu T, S . Šrafirani ploskvi pomenita toploto Q_R , ki s termalne vode prehaja na delovno sredstvo krožnega procesa toplotne črpalke.

Podobno se v kondenzatorju toplotne črpalke spreminja temperatura nosilca toplote, zato moramo računati s srednjo temperaturo grelne toplote Q_H

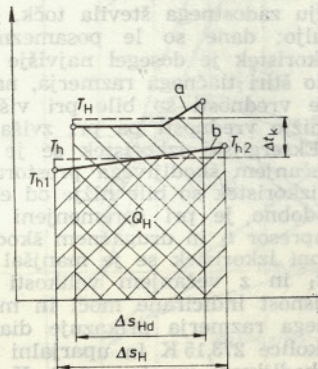
$$T_h = \frac{Q_H}{\Delta S_H} \quad (9)$$

kjer je ΔS_H sprememba entropije nosilca grelne toplote pri pretoku skozi kondenzator. Temperaturne razmere v kondenzatorju toplotne črpalke vi-



Sl. 4. Temperaturne razmere v uparjalniku

a — termalna voda, b — delovno sredstvo



Sl. 5. Temperaturne razmere v kondenzatorju

a — delovno sredstvo, b — nosilec toplote

dimo na sl. 5 v diagramu T, S . Ker se v kondenzatorju spreminja tudi temperatura delovnega sredstva krožnega procesa toplotne črpalke, velja analogno

$$T_H = \frac{Q_H}{\Delta S_{Hd}} \quad (10)$$

kjer pomeni ΔS_{Hd} spremembo delovnega sredstva pri pretoku skozi kondenzator.

5. SKLEP

V skladu z vedno večjo porabo energije, zmanjševanjem zalog in naraščanjem cen najpomembnejših goriv v zadnjem času rastejo prizadevanja za izkoriščanje novih virov energije, ki doslej v industrijskem merilu niso bili širše uporabljeni. Sem sodi nedvomno tudi geotermična energija, ki se predvsem v termalnih vrelih pojavlja na zemeljski površini v številnih deželah in je praktično neizčrpana.

V Sloveniji imamo razmeroma veliko številu termalnih vrelov, od katerih imajo le nekateri tako visoke temperature, da jih je mogoče uporabljati za neposredno ogrevanje. Glede na cenenost neposrednega ogrevanja je smiselno uporabljati tudi nižje temperature termalne vode od običajnih temperatur nosilcev toplote, pa čeprav na račun povečanja ogrevalnih površin.

Večina naših termalnih vod ima temperature, ki jih je mogoče izkoriščati za ogrevanje z vključitvijo toplotne črpalke. Odločitev o uporabi toplotne črpalke je mogoče sprejeti po ekonomski primerjavi z običajnimi ogrevalnimi sistemi. Pri izvedbi toplotne črpalke moramo skrbeti za čim manjše temperaturne razlike pri prenosu toplote v uparjalnik in kondenzatorju, ker te najbolj znižujejo grelno število in s tem povečujejo porabo električne energije za pogon toplotne črpalke.

LITERATURA

- [1] Kruger, P., Otte, C.: Geothermal Energy. Stanford University Pres. Stanford, California 1973.
- [2] Moskvicheva, V. N.: Utilisation of Heat of Geothermal Springs and Waste Hot Waters in the Power Plants Operating on Freon. Future Energy Production — Heat and Mass Transfer Problems, International Seminar, Dubrovnik 1975.
- [3] Oprešnik, M.: Termodinamika. Univerza v Ljubljani 1974.
- [4] Jonsson, V., K.: The District Heating System in Iceland. Future Energy Production — Heat and Mass Transfer Problems. International Seminar, Dubrovnik 1975.
- [5] Einarson, S., S.: Utilisation of Low Enthalpy Water for Space Heating, Industrial, Agricultural and Other Uses. Geothermics (1970) — Special Issue 2, str. 112/121.
- [6] Nosan, A.: Termalni in mineralni vreli v Sloveniji. Geologija — Razprave in poročila, 16. knjiga 1973.

Avtorjev naslov: dr. Mirko Opara,
Fakulteta za strojništvo
univerze v Ljubljani