

ITERATIVNI PRORAČUN RAZMENJIVAČA TOPLOTE

AUTOR: Rikalović R. Milan dipl.ing.
PROTEUS, d.o.o, Loznica, M. Toplice br.2

OBJAVLJENO u KGH br. 4/2001, SMEITS, Beograd Kneza Miloša 7a/II

Abstract: U radu se definiše sistem: ulaz – aparat – izlaz (odziv) i navode raspoložive jednačine koje povezuju termodinamičke i geometrijske veličine pri razmeni toplote, za razne konfiguracije strujanja. Obzirom na postavku problema da li je nepoznat izlaz ili aparat, daju se dva postupka proračuna (rejtning i dizajn problem). Iterativnost postupka je posledica zavisnosti veličina stanja fluida od srednje temperature. U zaključnom razmatranju analizira se pitanje može li izabrani aparat proizvoljne konfiguracije u dizajn problemu obezbediti zahtevani odziv.

Razmenjivači toplote su aparati u kojima se vrši razmena toplote između fluida različitog toplotnog potencijala. Elementi sistema su: Ulaz, aparat i izlaz (odziv sistema). U ovom radu se razmatra veza elemenata sistema i diskutuju mogućnosti određivanja odziva sistema (poznat aparat) ili aparata (poznat odziv sistema). Veličine stanja fluida nosioca toplote se uzimaju za srednje temperature u procesu razmene, što povezuje ulaz i izlaz sistema i zahteva postupak približavanja (iteracija).

OSNOVNE VELIČINE I ODNOSI

Geometrija razmenjivača toplote predstavlja konstrukciju sa definisanim presecima strujanja i površinom razmene toplote, kao i raspored fluida u strujnim tokovima.

Konfiguracija strujanja predstavlja međusobni odnos strujanja radnih fluida duž površine razmene. Strujanje može biti: suprotnosmerno, istosmerno, unakrsno ili kombinovano.

Primarni (topliji) fluid je fluid koji ima višu temperaturu na ulazu, koji predaje toplotu (toplotni izvor).

Sekundarni (hladniji) fluid je fluid koji ima nižu temperaturu na ulazu, prima toplotu (toplotni ponor).

Toplotni fluks razmene je usmeren od primarnog ka sekundarnom fluidu.

Q (kW) toplotna snaga razmene (količina razmenjene toplote po vremenu) u razmenjivaču toplote,

m_p, m_s (kg/s) maseni protok primarnog odnosno sekundarnog fluida,

c_p, c_s (kJ/kgK) srednja specifična toplota primarnog odnosno sekundarnog fluida pri t_{sr} ,

t_p', t_s' (°C) temperature primarnog odnosno sekundarnog fluida na ulazu u razmenjivaču toplote,

t_p'', t_s'' (°C) temperature primarnog odnosno sekundarnog fluida na izlazu iz razmenjivača toplote,

$t_{p sr}, t_{s sr}$ (°C) $t_{sr} = (t_p' + t_p'') / 2$ srednje temperature primarnog i sekundarnog fluida,

$\theta = t_p' - t_s'$ (K) najveća temperaturska razlika u razmenjivaču toplote (na ulazu u razmenjivaču),

$\Delta t_p = t_p' - t_p''$ (K) temperaturska razlika primarnog fluida na ulazu i izlazu,

$\Delta t_s = t_s'' - t_s'$ (K) temperaturska razlika sekundarnog fluida na izlazu i ulazu,

Δt_v (K) ve}e od Δt_p i Δt_s , ve}a temperaturska razlika radnog fluida,
 Δt_m (K) manje od Δt_p i Δt_s , manja temperaturska razlika radnog fluida.
 $W_p = m_p c_p = Q/\Delta t_p$ (kW/K) toplotni ekvivalent primarnog fluida,
 $W_s = m_s c_s = Q/\Delta t_s$ (kW/K) toplotni ekvivalent sekundarnog fluida,
 W (kW/K) manja vrednost toplotnog ekvivalenta od W_p i W_s .
 W_v (kW/K) ve}a vrednost toplotnog ekvivalenta od W_p i W_s .
 $R = W/W_v = \Delta t_m/\Delta t_v$ (-) odnos toplotnih ekvivalenata, $0 < R \leq 1$.
 $P = \Delta t_v/\theta$ (-) toplotna efikasnost razmenjiva-a toplote (efektivnost), $0 < P < 1$.
 k (kW/m²K) srednji koeficijent prolaza toplote kroz povr{inu razmene razmenjiva-a,
 A (m²) povr{ina razmene razmenjiva-a toplote,
 $NTU = k A/W$ (-) broj jedinica prenosa toplote.
 ϵ (-) korekcionni faktor konfiguracije strujanja u razmenjiva-u,
 $\epsilon = 1$ za suprotnosmernu struju,
 $\Delta t_e = \epsilon LMTD$ (K) srednja efektivna temperaturska razlika u razmenjiva-u.
 $LMTD$ (K) srednja logaritamska temperaturska razlika suprotnosmernog strujanja,

$$LMTD = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{q - \Delta t_m}{q - \Delta t_v}} = q \frac{P(1-R)}{\ln \frac{1-RP}{1-P}} \quad (1)$$

Iz definicije korekcionnog faktora konfiguracije ϵ mo`e se izvesti slede}a relacija:

$$e = \frac{\Delta t_e}{LMTD} = \frac{\frac{Q}{kA}}{\frac{W \Delta t_v}{kA}} = \frac{1}{q} \frac{\Delta t_v}{\frac{P(1-R)}{\ln \frac{1-RP}{1-P}}} = \frac{1}{NTU(1-R)} \ln \frac{1-RP}{1-P} \quad (2)$$

Osnovnim re`imom rada razmenjiva-a toplote zadaju se: Maseni protoci, temperature i specifi-ne toplote radnih fluida na ulazu u razmenjiva- toplote. Jedna-ine bplotnog bilansa i razmene toplote glase:

$$Q = m_p c_p (t_p' - t_p'') = W_p \Delta t_p = m_s c_s (t_s'' - t_s') = W_s \Delta t_s = k A e LMTD = NTU W \Delta t_e \quad (3)$$

Poznato je da postoji jo{ jedna veza izme|u termi-kih veli-ina i geometrije i konfiguracije aparata, koja se mo`e napisati u implicitnom obliku $f(NTU, P, R) = 0$. Ista se mo`e odrediti u jednom broju slu-ajeva eksplicitno, a za slo`enije konfiguracije strujanja odre|uje se empirijski [2] u obliku slede}e jedna-ine:

$$e = \frac{1}{(1 + a_o R^{db} NTU^b)^c}, \text{ odnosno } NTU = \frac{(1 + a_o R^{db} NTU^b)^c}{1-R} \ln \frac{1-RP}{1-P}, \text{ odavde je:}$$

$$E = e \frac{NTU(1-R)}{(1 + a_o R^{db} NTU^b)^c} = \frac{1-RP}{1-P}, \text{ odnosno } P = \frac{E-1}{E-R} \quad (4)$$

gde se parametri a_o , b , c i d empirijski utvr|uju. Za osnovna strujanja i neke kombinacije osnovnih strujanja jedna-inu (4) mo`emo dobiti analiti-ki u obliku $NTU = f(P, R)$., Prema [1] mo`emo pisati:

Istosmerno strujanje:

$$NTU_i = \frac{1}{1+R} \ln \frac{1}{1-P(1+R)}, \quad E = e^{NTU(1+R)} = \frac{1}{1-P(1+R)}, \quad P = \frac{1-E^{-1}}{1+R}, \quad (5)$$

Suprotnosmerno strujanje:

$$NTU_s = \frac{1}{1-R} \ln \frac{1-RP}{1-P}, \quad E = e^{NTU(1-R)} = \frac{1-RP}{1-P}, \quad P = \frac{E-1}{E-R}. \quad (6)$$

Unakrsno strujanje:

$$NTU_u = \ln \frac{1 - \frac{RP}{2}}{1 - P(1 + \frac{R}{2})}, \quad E = e^{NTU} = \frac{2 - RP}{2 - P(2 + R)}, \quad P = \frac{2(E-1)}{E(2+R) - R}. \quad (7)$$

Kombinovano strujanje, tipa 2n1:

$$NTU_{21} = \frac{\ln \frac{2 - P(1+R) + P\sqrt{1+R^2}}{2 - P(1+R) - P\sqrt{1+R^2}}}{\sqrt{1+R^2}}, \quad E = e^{NTU \sqrt{1+R^2}} = \frac{2 - P(1+R) + P\sqrt{1+R^2}}{2 - P(1+R) - P\sqrt{1+R^2}},$$

$$P = \frac{2(E-1)}{(1+R)(E-1) + (E+1)\sqrt{1+R^2}} \quad (8)$$

Multiplikacija kombinovanog strujanja, tipa a(2n1)

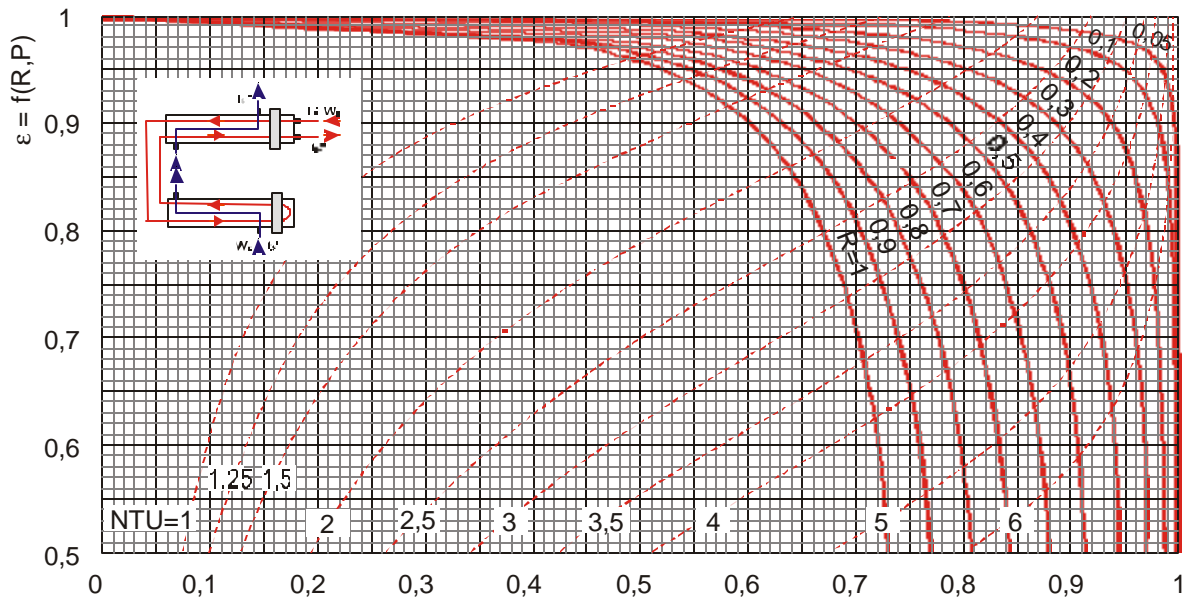
$$NTU_a = \frac{a \ln \frac{2 - P_a(1+R) + P_a\sqrt{1+R^2}}{2 - P_a(1+R) - P_a\sqrt{1+R^2}}}{\sqrt{1+R^2}}, \quad E = e^{\frac{\sqrt{1+R^2}}{a} NTU} = \frac{2 - P_a(1+R) + P_a\sqrt{1+R^2}}{2 - P_a(1+R) - P_a\sqrt{1+R^2}}$$

$$P_a = \frac{2(E-1)}{(E-1)(1+R) + (E+1)\sqrt{1+R^2}}, \quad P_a = \frac{\sqrt[1+R^2]{\frac{1-RP}{1-P}} - 1}{\sqrt[1+R^2]{\frac{1-RP}{1-P}} - R}, \quad P = \frac{\left(\frac{1-RP_a}{1-P_a}\right)^a - 1}{\left(\frac{1-RP_a}{1-P_a}\right)^a - R} \quad (9)$$

U izrazima (4) do (9) uvedena je smena $E = e^{f(R, NTU, a)}$, radi linearizacije eksponencijalnog dela jedna-ina i data zavisnost toplotne efikasnosti u eksplicitnom obliku.

Pri kombinovanom strujanju uvedena je pomo}na vrednost P_a , uslovna efikasnost strujanja tipa 2n1. Pri $a=1$ izraz (9), postaje izraz (8). Kombinovano strujanje nastaje razli-itim brojem prolaza u registru i omota-u razmenjiva-a toplote, pri -emu se javlja suprotno i istosmerno strujanje. Kombinovano strujanje tipa RT 2n1 nastaje kada u registru imamo parni broj prolaza, a u omota-u jedan prolaz (npr. RT 21, RT 41, RT 61 itd.) Multiplikacija strujanja tipa RT 2n1 nastaje kada se konfiguracija 2n1 ponovi (multiplicira) "a" puta. Na primer, konfiguracija tipa RT 82=RT 2(41) ima osam prolaza u registru a dva prolaza u omota-u i predstavlja multiplikaciju strujanja strujanja 41 sa $a=2$, RT 63=RT 3(21), $a=3$.

Zavisnost (2), korespondira sa jedna-inama (4) do (9), odnosno ubacivanjem vrednosti $NTU=f(P, R, a)$, mo`e se dobiti zavisnost $\varepsilon=f(P, R, a)$. Dijagramski prikaz jedna-ina (4) do (9) dat je za konfiguraciju RT 2(2n1), u obliku $\varepsilon=f(P)$, gde parametar mo`e biti R ili NTU. Ovakav oblik prikazivanja gubi na zna-aju, upotrebom odgovaraju}eg softvera za brzo ra-unanje i za veliki broj ponavljanja.



D.RT42 Koeficijent efikasnosti strujne {eme:

$$P = \Delta t_p / \theta \quad (\text{pri } W_p < W_s)$$

Fluid u omota-u ima dva prolaza ($z_o=2$) - Fluid u registru ima $z_r = 4, 8, 12, 16, \dots$ prolaza. Fluidi mogu da menjaju mesto.

$$P = \Delta t_r / \theta \quad (\text{pri } W_s < W_p)$$

U jedna-ini (3) nepoznate veli-ine su: Toplotna snaga, izlazne temperature radnih fluida, povr{ina razmene, koeficijent prolaza toplote i korekzioni faktor konfiguracije, dakle nepoznatih je {est veli-ina, a na raspolaganju su tri jedna-ine (dve bilansne i jedna razmene toplote). Dodamo li navedenom sistemu od tri jedna-ine vezu, $NTU = f(P, R, a)$, neka od jedna-ina (4) do (9), jo{ uvek je sistem neodre|en.

Specifi-na toplota radnih fluida (c_p , c_s) je poznata ako je konstantna veli-ina u temperaturskom podru-ju, ina-e je u funkciji srednje temperature radnih fluida. Koeficijent prolaza toplote (k) se mo`e odrediti samo za poznatu geometriju, konfiguraciju razmenjiva-a toplote i poznate veli-ine stanja na srednjim temperaturama. Zbog toga je neophodno prethodno pretpostaviti izlazne temperature radnih fluida, da bi veli-ine stanja radnih fluida birali za srednje temperature. Posle upore|ivanja izra-unatih izlaznih temperatura sa predpostavljenim, ukoliko je dobijena razlika ve|a od zadate potreban je novi prora-un sa drugim predpostavljenim izlaznim temperaturama. Ukoliko razlika predpostavljene i izra-unate temperature konvergira, kona-nim brojem operacija (iteracija), mo`e se dobiti izlazna temperatura jednaka predpostavljenoj.

Za re{enje problema treba jo{ jedna veza ili parametrizacija neke od nepoznatih veli-ina. Mogu se postaviti dve opcije: **Rejting problem**, kada je poznata geometrija razmenjiva-a toplote iskazana preko proizvoda koeficijenta prolaza toplote i povr{ine razmene kA i **dizajn problem**, kada je poznata jedna od izlaznih temperatura radnih fluida.

REJTING PROBLEM (PRORA^UN RT POZNATE GEOMETRIJE)

Poznate veli-ine:

- maseni protoci radnih fluida: m_p i m_s ,
- temperature radnih fluida na ulazu: t_p' , t_s' ,
- specifi-na toplota radnih fluida na ulazu c_p i c_s ,
- konfiguracija strujanja, neka od jedna-ina (4) do (9),
- proizvod koeficijenta prolaza toplote i povr{ine kA (dobijen iz geometrije aparata).

U prvij iteraciji veli-ine stanja uzimamo za temperature fluida na ulazu u razmenjiva-toplote.

Iz poznatih veli-ina se mogu odrediti toplotni ekvivalenti W_p i W_s , W i W_w , odnos toplotnih ekvivalenata R , broj jedinica prenosa NTU i maksimalna temperaturska razlika θ :

$$W_p = m_p c_p, \quad W_s = m_s c_s, \quad R = W / W_v, \quad NTU = \frac{k A}{W}, \quad \mathbf{q} = t'_p - t'_s \quad (10)$$

Iz jedna-ine zadate konfiguracije sistema (neka od jedna-ina 4 do 9) se odre|uje $P=f(NTU,R,a)$, a zatim i LMTD iz jedna-ine (1). Po{to je odre|ena efikasnost razmenjiva-a, dalji prora-un je jednostavan.

$$\Delta t_v = P \mathbf{q}, \quad \Delta t_m = R \Delta t_v = R P \mathbf{q}, \quad \Delta t_e = \frac{\Delta t_v}{NTU} = \frac{P \mathbf{q}}{NTU}, \quad \mathbf{e} = \frac{\Delta t_e}{LMTD} = \frac{P}{NTU} \frac{\mathbf{q}}{LMTD}. \quad (11)$$

Temperature radnih fluida na izlazu iz razmenjiva-a toplote su:

$$t''_p = t'_p - \Delta t_v \text{ ako je } W_p = W, \quad t''_p = t'_p - \Delta t_m \text{ ako je } W_s = W \quad (12)$$

$$t''_s = t'_s + \Delta t_m \text{ ako je } W_p = W, \quad t''_s = t'_s + \Delta t_v \text{ ako je } W_s = W. \quad (13)$$

Toplotna snaga razmene mo`e se ra-unati preko bilansnih jedna-ina ili preko jedna-ine razmene toplote (bilo koji od izraza):

$$Q = W \Delta t_v = W_v \Delta t_m = k A \Delta t_e = k A \frac{P \mathbf{q}}{NTU} = W P \mathbf{q} = k A \mathbf{e} LMTD. \quad (14)$$

Za drugu iteraciju prora-una, veli-ine stanja radnih fluida uzimamo za srednje temperature: $t_{p,sr} = (t'_p + t''_p) / 2$, $t_{s,sr} = (t'_s + t''_s) / 2$ i postupak se ponavlja po istom redosledu kao za prvu iteraciju.

Broj iteracija je odre|en tolerancijom razlike izlaznih temperatura dve uzastopne iteracije. Za temperature je dovoljno da rezultat prora-una bude ta-an na dve decimale. Excel aplikacija iterativnog prora-una automatski daje zavr{nu iteraciju.

PRIMER 1: Dobo{asti razmenjiva- toplote ima $kA=40$ kW/K. Primarni fluid, voda protoka $m_p=2,5$ kg/s temperature na ulazu $t_p=130$ °C. Sekundarni fluid, voda protoka $m_s=5$ kg/s temperature na ulazu $t_s=70$ °C. Utvrditi odziv sistema za osnovne i kombinovane konfiguracije strujanja

RE[ENJE. Radi se o rejting problemu. Prora-un se daje iterativno tabelarno

a) Prva iteracija. Veli-ine stanja se uzimaju za ulazne parametre radnih fluida.

No	Veli-ina:	Izraz	Istosm.	Suprot.	Unakr.	RT2n1	RT4n2	RT6n3	RT 8n4
1	c_p (kJ/kg K)	$t_p=130$ °C	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25
2	c_s (kJ/kg K)	$t_s=70$ °C	4,197	4,197	4,197	4,197	4,197	4,197	4,197
3	W_p (kW/ K)	$W_p=m_p c_p$	10,63	10,63	10,63	10,63	10,63	10,63	10,63
4	W_s (kW/ K)	$W_s=m_s c_s$	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00
5	W (kW/ K)	W_p	10,63	10,63	10,63	10,63	10,63	10,63	10,63
6	W_v (kW/ K)	W_s	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00
7	R	$R=W/W_v$	0,506	0,506	0,506	0,506	0,506	0,506	0,506
8	NTU	$NTU=k A / W$	3,765	3,765	3,765	3,765	3,765	3,765	3,765
9	a	multipl. konfigur.	-	-	-	1	2	3	4
10	θ (K)	$\theta=t'_p-t'_s$	60	60	60	60	60	60	60
11	$E = f(NTU,a,R)$	Pomo}na vredn.	290,3	6,415	43,15	68,01	8,247	4,082	2,872
12	$P_a = f(E,R)$	Pomo}na vredn.	-	-	-	0,752	0,681	0,596	0,523
13	$P = f(P_a,E,R)$	Efikasnost RT (jedna-ina br.)	0,661 (5)	0,916 (6)	0,783 (7)	0,752 (8)	0,867 (9)	0,894 (9)	0,904 (9)
14	Δt_v (K)	$\Delta t_v = P \theta$	39,70	54,99	46,99	45,10	52,02	53,65	54,23
15	Δt_m (K)	$\Delta t_m = R \Delta t_v$	20,10	27,84	23,79	22,84	26,34	27,16	27,46
16	$LMTD$ (K)	Jedna-ina (1)	29,01	14,61	22,66	24,36	17,84	16,12	15,48
17	ϵ	$\epsilon = P \theta / NTU LMTD$	0,363	1	0,551	0,492	0,775	0,884	0,931
18	Δt_e (K)	$\Delta t_e = LMTD \epsilon$	10,55	14,47	12,38	11,90	13,71	14,12	14,27
19	Q_p (kW)	$Q_p = W_p \Delta t_v$	421,8	584,2	499,26	479,2	552,8	570,0	576,2
20	Q_s (kW)	$Q_s = W_s \Delta t_m$	421,8	584,2	499,26	479,2	552,8	570,0	576,2
21	Q (kW)	$Q = k A \Delta t_e$	421,8	584,2	499,26	479,2	552,8	570,0	576,2
22	t_p'' (°C)	$t_p'' = t_p' - \Delta t_p$	90,30	75,01	83,01	84,90	77,98	76,35	75,77
23	t_s'' (°C)	$t_s'' = t_s' + \Delta t_s$	90,05	97,84	93,79	92,84	96,34	97,16	97,46

(Kako je $W_p < W_s$, to je $W_p = W$, $\Delta t_p = \Delta t_v$, $\Delta t_s = \Delta t_m$)

U Excelovoj aplikaciji iterativnog rejting problema sa 1000 iteracija i tolerancijom od 0,00001 dobija se sledeji odziv sistema.

b) Excelova iteracija. Veli-ine stanja se uzimaju za srednju temperaturu radnih fluida.

No	Veli-ina:	Izraz	Istosm.	Suprot.	Unakr.	RT2n1	RT4n2	RT6n3	RT 8n4
21	Q (kW)	$Q=k A \Delta t_e$	420,0	580,7	496,6	476,9	549,7	566,7	572,8
22	t_p'' (°C)	$t_p''=t_p'-\Delta t_p$	90,23	74,88	82,92	84,80	77,85	76,22	75,64
23	t_s'' (°C)	$t_s''=t_s'+\Delta t_s$	90,03	97,67	93,67	92,74	96,20	97,00	97,30

DIZAJN PROBLEM (DIMENZIONISANJE RT)

Poznate veli-ine:

- maseni protoci radnih fluida: m_p i m_s ,
- temperature radnih fluida na ulazu: t_p' , t_s' ,
- specifi-na toplota radnih fluida na ulazu c_p' i c_s' ,
- izlazna temperatura jednog radnog fluida, npr. t_p'' , $\Delta t_p = t_p' - t_p''$.

U prvoj iteraciji veli-ine stanja uzimamo za fluid poznate temperature na izlazu za srednju temperaturu, a za drugi fluid za temperaturu fluida na ulazu u razmenjiva- toplote. Iz poznatih veli-ina se mogu odrediti toplotni ekvivalenti W_p i W_s , W i W_v , odnos toplotnih ekvivalenata R , temperaturska razlika fluida nepoznate temperature na izlazu i maksimalna temperaturska razlika θ :

$$W_p = m_p c_p, \quad W_s = m_s c_s, \quad R = W / W_v, \quad \Delta t_s = \frac{W_p}{W_s} \Delta t_p, \quad q = t_p' - t_s' \quad (15)$$

Odre|ivanjem temperaturskih razlika radnih fluida utvr|uje se koja je razlika ve}a, prema jedna-inami (13) ra-una se izlazna temperatura drugog fluida, logaritamska temperaturska razlika LMTD prema jedna-ini (1) i odre|uje efikasnost razmenjiva-a toplote P:

$$P = \frac{\Delta t_v}{q} \quad (16)$$

Dalji prora-un je uslovljen izborom konfiguracije strujanja, odnosno mora biti poznata neka od relacija (4) do (9) za odre|ivanje broja jedinica prenosa $NTU=f(a,P,R)$, bilo analiti-ki, grafi-ki ili empirijski. Dalje je iz definicije broja jedinica prenosa NTU :

$$k A = NTU W. \quad (17)$$

Dakle prema (17) bez geometrije aparata odre|eno je kA . Iz poznatih relacija dalje dobijamo:

$$\Delta t_e = \frac{Q}{k A} = \frac{W \Delta t_v}{k A} = \frac{\Delta t_v}{NTU} = \frac{P q}{NTU}, \quad e = \frac{\Delta t_e}{LMTD} = \frac{P}{NTU} \frac{q}{LMTD}, \quad Q = W \Delta t_v = W_v \Delta t_m = k A \Delta t_e \quad (18)$$

Geometrija aparata nije nam potrebna. Svaki razmenjiva- sa izra-unatim kA }e zadovoljiti sistem.

PRIMER 2: Prora-unati dobo{asti razmenjiva- toplote za zagrevanje mazuta od 50 do 100 °C, protoka $m_p=1$ kg/s vodom protoka $m_s=1$ kg/s temperature na ulazu $t_p=130$ °C.

RE[ENJE. Radi se o dizajn problemu. Specifi-na toplota mazuta na srednjoj temperaturi $t_{s sr}=(50+100)/2=75$ °C iznosi $c_s=1,982$ kJ/kg K. Potrebna toplotna snaga iznosi: $Q_s=m_s c_s \Delta t_s=1 \cdot 1,982 (100-50)=99,1$ kW. Iz $Q_p=Q_s=m_p c_p \Delta t_p$ je: $\Delta t_p=Q_s / m_p c_p =99,1/1 \cdot 4,266=23,23$ K, (u prvoj iteraciji uzimamo specifi-nu toplotu na temperaturi ulaza $t_p'=130$ °C). Izlazna temperatura primarnog fluida je $t_p''=t_p'-\Delta t_p=130-23,23=106,77$ °C. U drugoj iteraciji uzimamo specifi-nu toplotu za srednju temperaturu primara $t_{p sr}=(130+106,77)/2=118,385$ °C, iznosi $c_p=4,230$ kJ/kgK, $\Delta t_p=Q_s/m_p c_p=99,1/1 \cdot 4,230 =23,43$ K. U kona-noj iteraciji se dobija $\Delta t_p=23,42$ K, $c_p=4,231$ kJ/kg K. Toplotni ekvivalenti su: $W_s=m_s c_s=1 \cdot 1,982=1,982$ kW/K, $W_p=m_p c_p=1 \cdot 4,231=4,231$ kW/K, a odnosi toplotnih ekvivalenata

$R=W/W_p=1,982/4,231=0,468$. Najve}a temperaturska razlika u razmenjiva-u iznosi: $\theta=\bar{t}_p-\bar{t}_s=130-50=80$ K. Toplotna efikasnost razmenjiva-a iznosi $P=\Delta t_p/\theta=\Delta t_s/\theta=50/80=0,625$. Slede}i korak prora-una je odre|ivanje konfiguracije strujanja u razmenjiva-u. Radi upore|jenja prora-un }emo izvesti za konfiguracije iz primera 1.

No	Veli-ina:	Izraz	Istosm.	Suprot.	Unakr.	RT2n1	RT4n2	RT6n3	RT 8n4
1	$P=\Delta t_p/\theta$	Efikasnost RT	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625
2	a	multipl. konfigur.	-	-	-	1	2	3	4
3	$P_a=f(a,P,R)$	Pomo}na vredn.				0,625	0,413	0,307	0,244
4	NTU	$NTU=kA/W$	1,702	1,194	1,317	1,366	1,229	1,209	1,202
5	kA	$kA=NTU W$	3,372	2,366	2,611	2,708	2,435	2,400	2,382
6	LMTD (K)	Jedna-ina (1)	41,89	41,89	41,89	41,89	41,89	41,89	41,89
7	ϵ	$\epsilon=P\theta/NTU$ LMTD	0,701	1	0,906	0,874	0,971	0,987	0,993
8	Δt_e (K)	$\Delta t_e=LMTD \epsilon$	29,39	41,89	37,95	36,60	40,69	41,37	41,60
9	Q_p (kW)	$Q_p=W_p \Delta t_p$	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1
10	Q_s (kW)	$Q_s=W_s \Delta t_m$	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1
11.	Q (kW)	$Q=kA \Delta t_e$	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1

Pod pretpostavkom da su koeficijenti prolaza toplote isti u svim konfiguracijama strujanja, onda najmanju povr{inu razmene ima onaj razmenjiva- sa najmanjom vredno}u kA, tj. suprotnosmerno strujanje, a najve}u istosmerno strujanje.

Odre|ivanjem vrednosti kA, i dalje su nam nepoznate veli-ine k i A. Koeficijent prolaza toplote je u funkciji brzine strujanja, koja zavisi od baznog (popre-nog) preseka razmenjiva-a i konfiguracije strujanja. Usvajanjem strujne geometrije (koja odre|uje brzine strujanja radnih fluida) prema kriterijalnim jedna-inama mo`e se odrediti koeficijent prolaza toplote k, a zatim i povr{ina razmene, $A=kA/k$, (odnosno du`ina aparata, jer je popre-nim presekom definisana povr{ina po jedinici du`ine).

In`injerski pristup problemu dimenzionisanja se svodi na definisanje {iroke serije geometrija razmenjiva-a koji }e mo}i ostvariti kA u okviru granica kapaciteta razmene toplote ili grani-nih dimenzija aparata. Optimizacijom ili uz pomo} dodatnih uslova i ograni-enja mo`e se izabrati najpovoljniji razmenjiva- iz serije prema dizajn prora-unu.

ZAKLJU^NA RAZMATRANJA

I rejting i dizajn problem polaze od -injenice da je poznata konfiguracija razmenjiva-a (zadata ili izabrana). Rejting problem za razmenjiva- toplote poznate vrednosti kA (-ija je geometrija poznata, ali nebitna) utvr|uje odziv sistema pri promeni ulaza, a dizajn problem utvr|uje potrebnu vrednost kA da bi se ostvario zahtevani odziv sistema.

Rejting problem je jednozna-an i odnosi se na problem primene izabranog aparata u razli-itim re`imima. Dizajn problem nije jednozna-an i ovde se mogu postaviti dva pitanja: Pitanje optimuma proizvoda kA i pitanje da li svaka konfiguracija mo`e ostvariti zadati izlaz iz sistema. Ostvarenje optimalnog kA povezano je sa dodatnim uslovima i ograni-enjima, tehnologijom izrade aparata i cenom proizvoda. U svakom slu-aju treba te`iti ve}em koeficijentu prolaza toplote a manjoj povr{ini razmene.

Odgovor na drugo pitanje je u analizi funkcije $NTU=f(a,R,P)$, jedna-ine (5) do (9).

Mora biti:

za istosmerno strujanje	$P < 1/(1+R)$	U primeru 2: $P_{max} = 0,6810$
za suprotnosmerno strujanje	nema ograni-enja	
za unakrsno strujanje	$P < 1/(1+R/2)$	U primeru 2: $P_{max} = 0,8102$
za kombinovano strujanje tipa 2n1	$P < 2/(1+R+(1+R^2)^{0,5})$	U primeru 2: $P_{max} = 0,7774$
za kombinovano strujanje tipa a(2n1)	$P_a < 2/(1+R+(1+R^2)^{0,5})$	U primeru 2: $P_{a max} = 0,7774$

U primeru sve konfiguracije zadovoljavaju, efektivnost je manja od maksimalne.

Mo`e se desiti da nije ispunjen neki od gornjih uslova, {to je pokazatelj da se tom konfiguracijom ne mo`e ostvariti zadata izlazna temperatura jednog od radnih fluida bez obzira na povr{inu aparata. Me|utim, re{enje je uvek mogu}e, jer za suprotnosmerno strujanje nema ograni-enja. Ukoliko se izabere konfiguracija razmenjiva-a koja ne zadovoljava uslove maksimalne efektivnosti ne zna-i da isti ne}e imati odziv, odziv uvek postoji, ve} se dizajn problem prevodi u rejting problem, odnosno obe izlazne temperature }e biti odre|ene prora-unom, tj. nije mogu}e odr`ati zadatom ni jednu izlaznu temperaturu.

LITERATURA

- [1] Rikalovi}, M.: Dobo{asti razmenjivači toplote (u pripremi)
- [2] Spang, B. and Roetzel, W.: Neue Näherungsgleichung zur einheitlichen Berechnung von Wärmeübertragern. *Heat and Mass Transfer* 30 (1995), pp. 417-422
- [3] Mc Adams W.H.; Heat Transmission, third Edition, McGraw-Hill Book Company inc. New York Toronto London 1954, prevod Gradjevinska knjiga, Beograd 1969.
- [4] Mills A.F.; Heat Transfer, 2/e University of California, Berkeley, Prentice Hall 1999, ISBN 0-13-947624-5