BIBLID 0350–1426 (1998) 27:1 p. 57–62. UDK 697.93.001

Termička povratna sprega

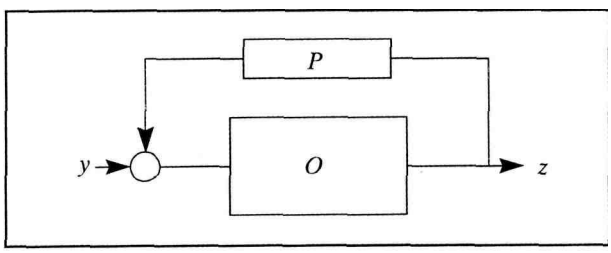
Dr N. Kažić, dipl. inž., Mašinski fakultet, Podgorica, i dr M. Novaković, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

U radu se analizira termička povratna sprega (TPS), definisana po analogiji sa povratnom spregom koja se koristi u teoriji upravljanja. Po definiciji, pri korišćenju TPS, jedan dio fluida sa izlaza iz sistema, vraća se povratnom vezom na njegov ulaz, razmjenjujući to-plotni fluks sa fluidom na ulazu. Efekat TPS se analizira u tri slučaja: zagrijavanja fluida, hlađenja vazduha adijabatskim vlaženjem i u procesu sagorijevanja u reaktoru sa intenzivnim miješanjem. Primjena TPS u svim siučajevima poboljšava procese, izazivajući neku vrstu prelaza "kvantiteta u kvalitet".

Ključne reči: toplotna povratna sprega; upravljanje; fluid; hlađenje vazduha; adijabatsko vlaženje ***Key words:*** thermal feed-back; control; fluid; air cooling; adiabatic humidifying

I.Uvod

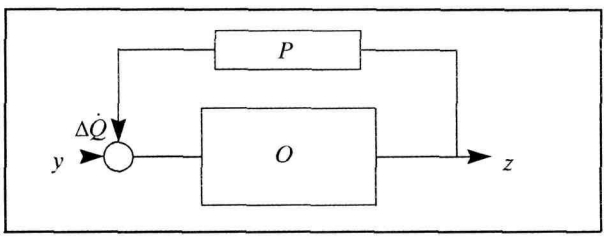
Termin povratna sprega (feed-back) ekskluzivno se koristi u elektronici i regulaciji. Njegovo značenje se ogleda u povratnoj vezi kojom se izlazna veličina (z) vraća na ulaz u sistem (O), pri čemu ona može u toj povratnoj putanji pretrpjeti određenu transformaciju, već prema tome kakav se njen uticaj želi ostvariti na sistem (sl. 1). Međutim, shema sistema sa povratnom spregom može predstavljati i fizički sistem u raznim varijantama. Interesantno je posvetiti malo pažnje takvim sistemima u kojima veličina (z) pretrpi u povratnoj vezi transformaciju, tako da se na ulazu njen uticaj manifestuje kao toplotni fluks *(AC)* koji se razmijenjuje sa ulaznom veličinom (y) (si. 2). Ovakva funkcionalna konfiguracija će se u daljem tekstu zvati *termička povratna sprega* (thermal feed-back, TFB).



Slika 1. Shema povratne sprege

2. Termička povratna sprega (TFB)

Po definiciji, termička povratna sprega pretpostavlja vraćanje na ulaz sistema jednog dijela fluida sa izlaza koji procesiran napušta sistem. Ta količina fluida koja se vraća nazad u sistem, ima smisao recirkulacionog toka. Pri tome se ne miješa sa ulaznim fluidom, već samo sa njim razmjenjuje toplotni fluks preko razmjenjivača toplote. Da bi se analiza problema bar donekle pojednostavila, uvode se sledeće



Slika 2. Shema termičke povratne sprege

globalne pretpostavke:

- razmjenjivač toplote na ulazu je "idealan", tj. smatramo da se u njemu uvijek razmijeni maksimalna moguća količina toplote; iako je ova pretpostavka samo aproksimacija stvarnog stanja, to se neće suštastveno odraziti na vrijednost zaključaka do kojih će se doći;
- zanemaruju se svi toplotni gubici sistema u odnosu na okolinu;
- kinetička i potencijalna energija fluida, odnosno njihove promjene, ne uzimaju se u obzir, tj. jedinična energija fluida je $e = u + fw^2/2 + gz$ «u.

Proanalizirać se oblik i efekat TFB u tn slučaja:

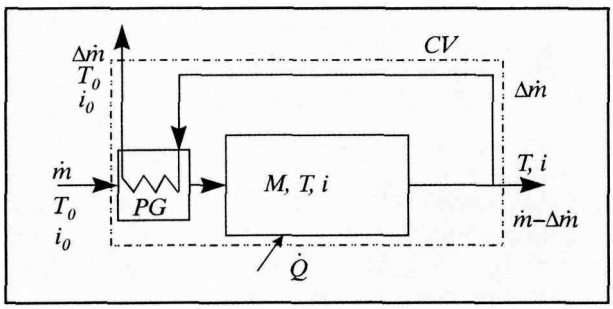
- zagrijavanja fluida konstantnim toplotnim fluksom;
- hladenja vazduha vlaženjem;
- procesa sagorevanja u reaktoru sa intenzivnim miješanjem, u "stirred reactor"-u.

Mada je u svakom od ovih procesa dejstvo TFB specifično, jedna osobenost je zajednička: TFB dovodi do određenog efekta prelaska "kvantiteta u kvalitet". Uostalom, to će se najbolje i vidjeti iz analize koja slijedi.

2.1. Zagrijavanje fluida konstantnim toplotnim fluksom

Maseni protok nekog fluida *(rh)*, stanja 0 (T_0) prolazi kroz grejač koji mu predaje konstantan toplotni fluks *(Q)* (si. 3) [1]. Na izlazu iz sistema fluid ima temperaturu T. Od ukup-

ne mase fluida na izlazu, oduzima se jedan dio *(Am)* i vodi se u predgrejač (PG), gdje predaje toplotu fluidu na ulazu. U skladu sa uvedenim pretpostavkama, predgrejač je "idealan" razmjenjivač toplote koji razmijenjuje maksimalno moguću količinu toplote između ulazne i recirkulacione stru-je fluida dovedene povratnim vodom. Drugim riječima, iz predgrijača će recirkulacioni fluid izaći sa temperaturom T_0, tj. sa temperaturom koju ima nezagrejani fluid na ulazu u sistem.



Slika 3. Zagrijavanje fluida

U skladu sa Prvim zakonom termodinamike, za kontrolnu zapreminu (CV), energetski bilans za nestacionaran slučaj ima oblik:

$$\frac{\partial E_{CV}}{\partial t} = \dot{m} i_0 + \dot{Q} - (\dot{m} - \Delta\dot{m}) i - \Delta\dot{m} i_0 \qquad (1)$$

Energija fluida u kontrolisanoj zapremini (CV) je:

$$E_{CV} = \int_{CV} \rho e dV \approx \int_{CV} \rho u dV \approx (Mu)_{CV},$$

odnosno:

$$\frac{\partial E_{CV}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}(Mu)_{CV} \approx \frac{\partial}{\partial t}(Mi/\chi)_{CV} \approx (Mi/\chi)\frac{\partial i}{\partial t} \qquad (2)$$

gdje je M masa fluida u CV.

Entalpija se može napisati kao:

$$i = \chi u \qquad (3)$$

gdje je: $\chi = c_p/c_v$

Nakon malo sređivanja (1) postaje:

$$(M/\chi)\frac{\partial i}{\partial t} = (\dot{m} - \Delta\dot{m})(i_0 - i) + \dot{Q} \qquad (4)$$

Integraljenjem se dobija rešenje diferencijalne jednačine (4):

$$i - i_0 = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} - \Delta\dot{m}}\left[1 - exp\left(-\frac{\chi(\dot{m} - \Delta\dot{m})}{M}t\right)\right] \qquad (5)$$

Razmotrimo neke karakteristične slučajeve.

Slučaj a. Stacionarno stanje (f = <*x)*. Zamjenjujući t = oo u izrazu (5), dobijamo vrijednost entalpije na izlazu iz sistema kada se on nalazi u stacionarnom stanju:

$$\lim_{t\to\infty}(i - i_0) = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} - \Delta\dot{m}} \qquad (6)$$

Dakle, uspostavljeno stacionarno stanje svodi se na slučaj kada kroz sistem prolazi reducirani maseni protok *m- Δm* od ulaza do izlaza. Ovo je i očigledno na samoj slici; jer se u sistem uvodi "neto" pomenuti reducirani maseni protok sa entalpijom i_0.

Slučaj b. Totalna recirkulacija *(Am* = ***m)***. Zamjenom gornjeg uslova u rešenju (5), dobija se neodreden izlaz 0/0. Zato treba potražiti graničnu vrijednsot izraza (5) kada *Δm* ->m . Nakon primjene Lopitalovog pravila, dobija se:

$$\lim_{t\to\infty}(i - i_0) = \chi\frac{\dot{Q}t}{M}, \qquad (7)$$

Smisao rešenja (7) je očigledan i manifestuje se kroz povećanje unutrašnje energije kontrolne zapremine (CV) sa pro-tokom vremena. To je posljedica nagomilavanja energije u sistemu, jer se od sistema ne odvodi energija već sva ostaje u njemu.

Uporedimo sada promjenu entalpije fluida u stacionarnom stanju za slučajeve sa *(Am* > 0, *A i)* \ bez povratne sprege *(Am = 0, Ai$_N$)*. Primjenjujući rješenje (6), dobija se odnos promjene entalpija fluida pri prolasku kroz sistem sa TFB i bez nje:

$$\frac{\Delta i}{\Delta i_N} = \frac{1}{1 - \Delta\dot{m}/\dot{m}},$$

ili za monofazni fluid:

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_N} = \frac{1}{1 - \Delta\dot{m}/\dot{m}}. \qquad (8)$$

Dakle, izvedeni izrazi ukazuju da TFB u procesu zagrijavanja fluida, na račun smanjenja količine zagrijanog fluida koji napušta sistem, povećava njegovu temperaturu. Uočimo dakle, da se radi o nekoj vrsti transformacije "kvantiteta u kvalitet".

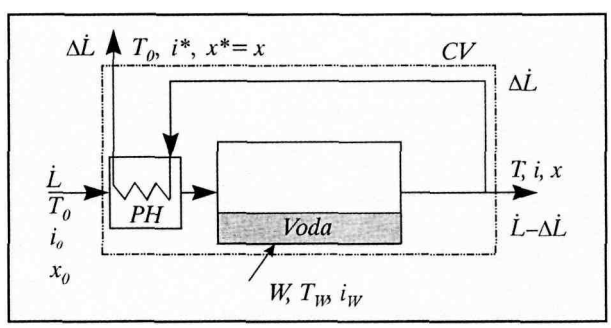
Analogan postupak, uz manje izmjene, može se primjeniti i na procese sa faznim prelazom.

2.2. Adijabatsko hlađenje vazduha vlaženjem

Poznato je da se vazduh može hladiti procesom adijabatskog vlaženja [2]. Takozvana "granica hlađenja", odnosno najniža temperatura do koje se može ohladiti vazduh, jeste temperatura "vlažnog termometra".

Posmatrajmo sada ovakav jedan proces adijabatskog hlađenja vazduha vlaženjem, u koji je uključen i recirkulacioni krug, tj. TFB (si. 4). Vazduh stanja 0 *(T_0, i_0, x_0)* hlad: se vlaženjem u kontaktu sa vodom. Na izlazu, slično prethodnom slučaju, odvaja se jedan dio protoka i vraća u prethladnjak (PH), gdje mu se predaje toplotni fluks na račun ulaznog vazduha. Dakle, na taj način se "prethladuje" vazduh na ulazu.

Usredsredimo pažnju samo na stacionaran slučaj, kao do-minantan po svojoj važnosti. Pretpostavljamo da vazduh iz ovlaživača izlazi potpuno zasićen, a u prethladnjaku se razmjenjuje maksimalno mogući toplotni fluks, tako da vazduh iz PH izlazi sa temperaturom ulaznog vazduha T_0. Tokom procesa dodaje se voda *W*, tako da se njena masa u sistemu održava konstantnom.



Slika 4. Hlađenje vazduha vlaženjem

Prvi zakon termodinamike za kontrolisanu zapreminu (CV), u ovom slučaju za stacionarno stanje, ima oblik:

$$\dot{L} i_0 + \dot{W} i_W = (\dot{L} - \Delta\dot{L}) i + \Delta\dot{L} i \qquad (9)$$

Nakon dodavanja i oduzimanja člana $\Delta L i_0$ u izrazu (9), dobija se:

$$\left(\dot{L}-\Delta\dot{L}\right)\left(i_0-i\right)-\Delta\dot{L}\left(i^*-i_0\right)+\dot{W}i_W=0\,. \qquad (10)$$

Prema Zakonu o održanju mase, u ovom slučaju vlage:

$$\dot{W}=\dot{L}\left(x-x_0\right). \qquad (11)$$

Nakon malo algebre (10) postaje:

$$\frac{i_0-i}{i^*-i_0}=\frac{\Delta\dot{L}/\dot{L}}{1-\Delta\dot{L}/\dot{L}}-\frac{1}{1-\Delta\dot{L}/\dot{L}}\,\frac{x^*-x_0}{i^*-i_0}\,i_W \qquad (12)$$

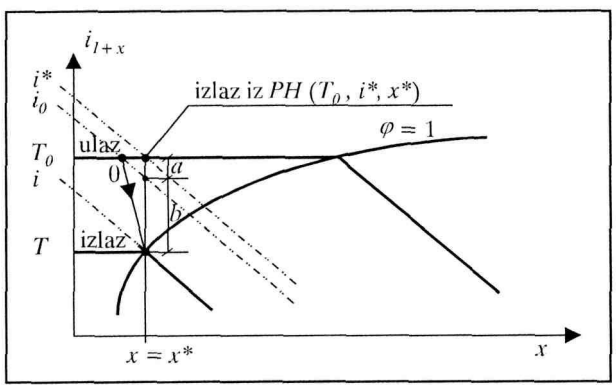
Pri čemu jex* = x.

Razlika apsolutnih vlažnosti u članu na desnoj strani (12) je relativno mala, pa se ovaj član može zanemariti u odnosu na ostale. U torn slučaju (12) se svodi na oblik:

$$\frac{i_0-i}{i^*-i_0}=\frac{\Delta\dot{L}/\dot{L}}{1-\Delta\dot{L}/\dot{L}} \qquad (13)$$

Grafička interpretacija ovoga izraza je na si. 5. Veza između entalpija ulaznog stanja (;$_0$), izlaznog stanja recirkulacionog vazduha (/*) iz PH, entalpije vazduha koji napušta sistem (/) i veličina prikazanih na slici je:

$$\frac{i_0-i}{i^*-i_0}=\frac{\Delta\dot{L}/\dot{L}}{1-\Delta\dot{L}/\dot{L}}=\frac{b}{a} \qquad (14)$$



Slika 5. Proces hlađenja vazduha

Treba se zaustaviti na trenutak na dva karakteristična (granična) slučaja u svjetlu izraza (14).

A) Slučaj bezTFB *(AL = 0).* Izraz (13), nakon zamjene *AL = 0* daje vrijednost odnosa entalpija"

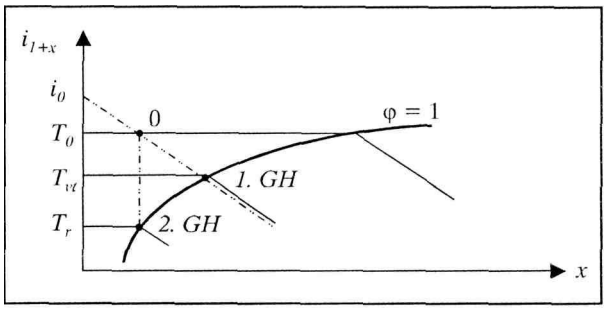
$$\frac{i_0-i}{i^*-i_0}=\frac{\Delta\dot{L}/\dot{L}}{1-\Delta\dot{L}/\dot{L}}=\frac{b}{a}=0\,,\ \ i=i_0 \qquad (15)$$

Vidimo da se ovaj slučaj svodi na adijabatsko hlađenje bez TFB, odnosno u idealnom slučaju izlazna temperatura vazduha je jednaka temperaturi vlažnog termometra *(T_a* = 7"$_w$). To je, kao što smo već naveli, granica hladenja pri adijabatskom hlađenju vazduha bez TFB (si. 6) i ubuduće je označimo kao "Prvu granicu hlađenja" (1. GH = T_{vl}).

B) Slučaj sa TFB pri potpunoj recirkulaciji *(AL=L)* Analogno prethodnom postupku nakon zamjene *AL=L,* izraz (14) postaje:

$$\frac{i_0-i}{i^*-i_0}=\frac{\Delta\dot{L}/\dot{L}}{1-\Delta\dot{L}/\dot{L}}=\frac{b}{a}=\infty\,. \qquad (16)$$

Ovaj uslov može biti zadovoljen samo pri /'* = i_0, tako da se pri približavanju ovoj vrijednosti izlazno stanje iz sistema po-



Slika 6. Prva (1. GH) i druga (2. GH) granica hlađenja

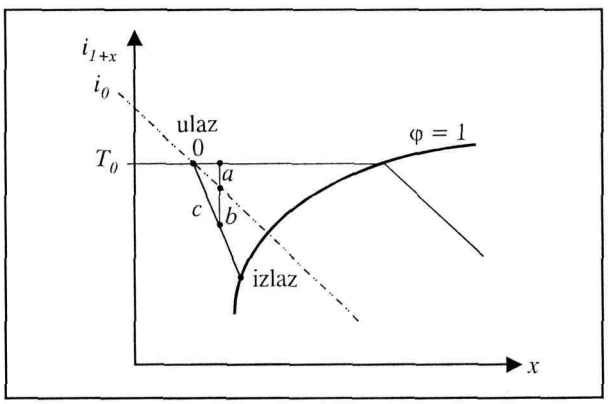
mjera ulijevo, dok se ne nade na liniji x = x_0 (si. 6). To je istovremeno granica hlađenja ovoga procesa. Dakle, vidimo da se u slučaju maksimalnog dejstva TFB, granica hlađenja pomjera naniže, i u graničnom slučaju ona se izjednačava sa "tačkom rose" ulaznog vazduha. Ovu temperaturu nazovimo "druga granica hlađenja" (2. GH = *Tr).*

Na si. 6 je očigledno da se u slučaju TFB u odnosu na standardno adijabatsko hlađenje vazduha, postiže dodatno smanjenje izlazne temperature vazduha *(AT)* i ono je smješteno između graničnih vrijendosti, tj.

$$0<\Delta T<T_{vl}-T_r\,. \qquad (17)$$

Izraz (14) je pogodan za grafičko određivanje izlaznog stanja vazduha u zavisnosti od recirkulacionog protoka *AL* (si. 7):

- nakon što se pomoću (14) odredi odnos b/a, uzme se proizvoljna vertikalna duž a između pravih T_0 = *const,* i /'„ = *const.;*
- zatim se nanese *b* u izračunatom odnosu i kroz krajnu tako dobijenu tačku i tačku koja označava ulazno stanje vazduha (0), povuče se prava linija (c) koja u presjeku sa krivom zasićenja (cp = 1) daje izlazno stanje vazduha.



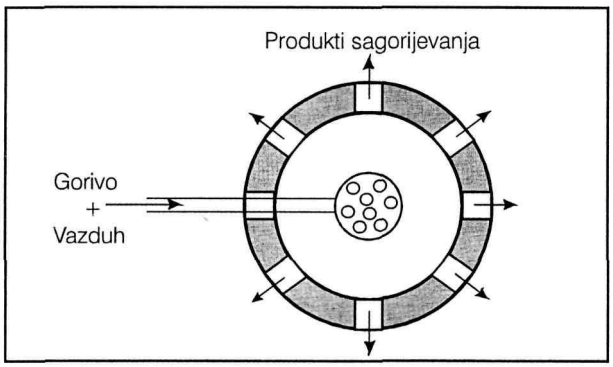
Slika 7. Grafičko određivanje izlaznog stanja

Kao i u prethodnom slučaju, vidimo da je upotrebom TFB došlo do transformacije "kvantiteta u kvalitet": smanjena je količina dobijenog ohlađenog vazduha, ali je na račun toga njegova temperatura snižena.

2.3. Sagorijevanje u reaktoru sa intenzivnim miješanjem (stirred reactor - SR)

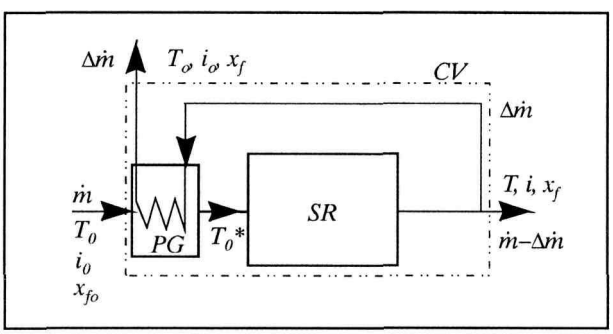
Kada se proces sagorijevanja odigrava u nekoj komori, kao što je to npr. slučaj kod gasnih turbina, proces sagorijevanja zavisi od vise faktora: koncentracije reaktanata, zapremine komore, pritiska, temperature, masenog protoka [3]. Za analizu ovakve vrste problema koristi se reaktor sa intenzivnim miješanjem (stirred reactor - SR). Fizički model ovakvog uređaja je predstavljen jednom sferom, u čijem se centru kroz male otvore ubacuje struja reaktanata - goriva

smiješa (sl. 8). Sama sfera je perforirana tako da kroz te otvore izlaze produkti sagorijevanja. Unutar sfere se odvija proces sagorijevanja, pri čemu je turbulentno miješanje veoma intenzivno, zbog prisustva recirkulacionih vrtloga koji izazivaju intenzivno miješanje fluida.



Slika 8. Reaktor sa intenzivnim miješanjem

Dakle, posmatra se SR spregnut sa TFB, gdje se jedan dio izlaznih produkata sagorijevanja vraća na ulaz u SR, i u predgrejaču (PG) predaje toplotu ulaznoj smješi koja usled toga ulazi u reaktor pregrijana. Cilj je da se utvrdi vrsta uticaja koji na proces sagorijevanja ima primenjena TFB veza. Sama instalacija je shematski prikazana na slici 9. Pri tome se posmatra stacionaran slučaj, jer nas u prvom redu interesuju efekti koji se javljaju u stacionarnom procesu.



Slika 9. Proces sagorijevanja u reaktoru (SR) sa intenzivnim miješanjem

Reaktivna smješa temperature T_0, koncentracije goriva x_{f0}, ulazi u SR unutar koga se odvija hemijska reakcija - sagorijevanje. Zagrijani produkti sagorijevanja izlaze napolje. Jedan dio ovih vrućih gasova se vraća u predgrejač (PG) na ulazu u sistem, gdje se zagrijava ulazna smješa od T_0 na T_0*. Tako pregrijana smješa ulazi u SR. Vidimo da je uloga TFB analogna ulozi koju je imala u prethodnim slučajevima.

U cilju pojednostavljenja problema, zanemariće se efekat hemijskih reakcija u predgrejaču. Isto tako pretpostavićemo da su specifične toplote pri konstantnom pritisku ulazne smješe (c) i produkata sagorijevanja iste, tako da će izraz za entalpiju gasa u bilo kom dijelu procesa imati oblik $I = cT$

Zanemarujući razmijenjenu toplotu sa okolinom, Prvi zakon termodinamike za kontrolisanu zapreminu *(CV)* prikazanu na slici 9 ima oblik:

$$\dot{m}\left(x_{f0}H_d + cT_0\right) = \left(\dot{m} - \Delta\dot{m}\right)\left(x_f H_d + cT\right) + \\ + \Delta\dot{m}\left(x_f H_d + cT_0\right)$$

ili:

$$\dot{m}\left(x_{f0} - x_f\right)H_d = \left(\dot{m} - \Delta\dot{m}\right)c\left(T - T_0\right) \tag{18}$$

Zakon o održanju mase (goriva) za ovaj sistem u kome se odvija hemijska reakcija, može se napisati u formi:

$$\dot{m}\left(x_{f0} - x_f\right) = S_f V\,. \tag{19}$$

U izrazu (19) veličina S, [kg s~^{1} rrr^{3}] predstavlja brzinu hemijske reakcije procesa sagorijevanja, koja ima oblik (Arrhenius):

$$S_f \approx K x_f x_{ox} p^2 T^{-3/2} \exp(-E/RT) \tag{20}$$

Kombinovanjem (18) i (19), dobija se izraz:

$$\dot{m}\left(1 - \frac{\Delta\dot{m}}{\dot{m}}\right)c\left(T - T_0\right) = S_f V H_d \tag{21}$$

Sa druge strane, prema Prvom zakonu postavljenom za oredgrajač (PG), imamo relaciju:

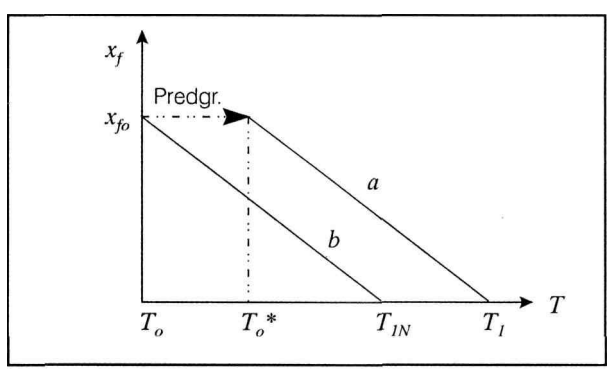
$$\dot{m}c\left(T^* - T_0\right) = \Delta\dot{m}\left(T - T_0\right),$$

odnosno:

$$\frac{\Delta\dot{m}}{\dot{m}} = \frac{T_0^* - T_0}{T - T_0} \tag{22}$$

Uporedimo porast temperature u SR kada radi sa TFB i bez nje. Neka u oba slučaja smješa ulazi u sistem sa istim sastavom. Ulazna temperatura u SR u pomenutim slučajevima je različita: kada nema TFB, tada je ulazna temperatura T_0, odnosno kada je prisutan, ona je T_0*. Promjena koncentracije goriva u zavisnosti od dostignute temperature produkata sagorijevanja za ova dva slučaja predstavljena je na slici pravim linijama a i to (sl. 10). Prava (a) koja se odnosi na slučaj sa TFB, transplantorno je pomjerena u odnosu na odgovarajuću promjenu bez TFB (prava linija b). Pri tome su maksimalno moguće temperature procesa označene sa T, za slučaj sa TFB, odnosno T_{1N} za slučaj bez TFB. Na slici 10 je očigledno:

$$T - T_0^* = \left(T - T_0\right) - \left(T_0^* - T_0\right) = \\ = \left(T - T_0\right)\left(1 - \frac{T_0^* - T_0}{T - T_0}\right) \tag{23}$$



Slika 10. Promjena koncentracije goriva sa promjenom temperature

S obzirom na (22), (23) postaje:

$$T - T_0^* = \left(T - T_0\right)\left(1 - \frac{\Delta\dot{m}}{\dot{m}}\right) \tag{24}$$

Zamjenom (24), (21) se može napisati kao:

$$\dot{m}c\left(T - T_0^*\right) = S_f V H_d \tag{25}$$

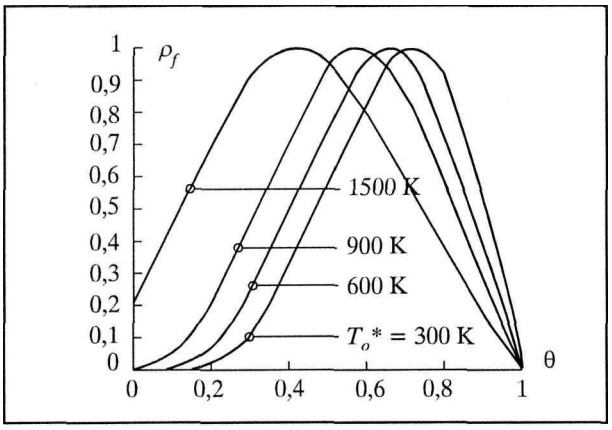
Kako je $T - T_0^* = T_N - T_0$, odnosno 7"! - $T_0^* = T_{1N} - T_Q - AT_M$, može se uvesti smjena u obliku bezdimenzionih veličina za procese sa TFB i bez nje:

$$= \frac{T_N - T_0}{T_{1N} - T_0} = \frac{T - T_0^*}{T_1 - T_0^*} = \theta_N ,$$

$$\tilde{S} = \frac{S_f}{S_M}, \qquad \tilde{S}_N = \left(\frac{S_f}{S_M}\right)_N ,$$

$$G = \frac{\dot{m}\Delta T_M}{S_M V H_d}, \qquad G_N = \frac{\dot{m}\Delta T_M}{S_{MN} V H_d} \tag{26}$$

SM\S maksimalna vrijednost brzine hemijske reakcije u interval od ulazne do maksimalne moguće temperature u reakciji. Bezdimenziona veličina G po svojoj definiciji istovremeno odražava i efikasnost procesa sagorijevanja: ova veličina je jednaka 1 u slučaju kada je sva količina goriva hemijski reagovala, odnosno 0 kada se proces sagorijevanja nije odigrao.



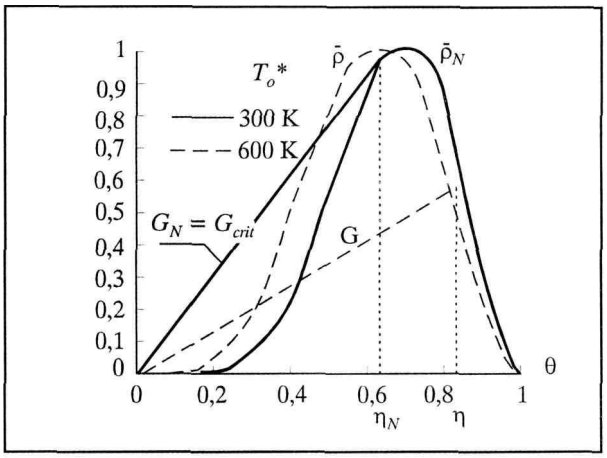
Slika 11. Normalizovane brzine hemijskih reakcija za CH_4

Za slučaj sagorijevanja bez TFB, veličine (26) su označene indeksom *N.* Veličine koje se odnose na slučaj sa TFB i bez nje, ne razlikuju se mnogo medu sobom, osim karakteristike procesa G. Naime $G_N > G$, jer je $S_{MN} < S_M$ zbog toga što se reakcija u slučaju TFB odvija na većoj temperaturi zbog predgrijavanja. Normalizovane vrijednosti brzina hemijskih reakcija su pomjerene, ali se u razumnom opsegu temperatura predgrijavanja (7~0 < 900 K) smeštene blizu jedna drugoj (si. 11). Prema tome jednačina (25) i njoj odgovarajuća, za slučaj reakcije bez TFB, s obzirom na (26), imaju oblik:

$$G\theta = \tilde{S}, \text{ odnosno } \quad G_N\theta = \tilde{S}_N \tag{27}$$

Ovo su nelinearne jednačine čije se rješenje ne može dati u zatvorenom obliku. Pogledajmo grafičku interpretaciju rješenja, jer nam to omogućava da izvedemo neke kvalitativne zaključke o uticaju TFB na sam proces. Na slici 12 prikaza-ni su slučaj sa (tanka linija) i slučaj bez TFB (deblja linija, indeks A/). Prave linije predstavljaju lijeve, a "zvonaste" krive desne strane jednačine (27) u zavisnosti od *8.* Rješenje se dobija kao presjek "lijeve" i "desne" funkcije. Ako nema presjeka, ne može doći do reakcije, tj. procesa sagorijevanja. Iako su moguća formalno 3 presjeka - rješenja, pokazuje se da je "srednje" rješenje nestabilno, tako da ostaju kao mogućnost samo dva: "hladno" - lijevo i "vruće" - desno. Za nas su bitna samo "vruća" rešenja, koja se dobijaju kao "desni" presjeci "lijeve" i "desne" strane jednačine.

Za slučaj bez TFB, uzmimo kritičnu vrijednost veličine $G_N = G_{cr}$,, tj. maksimalno moguću vrijednost G pri kojoj još može doći do reakcije. Na slici je očigledno da je to prava koja dodiruje eksponencijalnu krivu negdje blizu maksimuma (si. 12). U torn slučaju efikasnost procesa je *r;N.* Sada zadržimo sve isto samo neka je u proces uključena i TFB. Odgovarajuća vrijednost veličine G je manja od prethodne, tako da se radna tačka procesa pomjera udesno. Vidimo da je vrijed-



Slika 12. Grafička interpretacija rješenja

nost koeficijenta efikasnosti sagorijevanja veća od prethodne *(rj > IJ_N).* Slična analiza se može obaviti i za druge slučajeve sagorijevanja.

Iz izloženoga se jasno vidi uticaj TFB na proces sagorijevanja: na račun smanjenja količine produkata sagorijevanja koji se odvode iz sistema, povećana je ne samo njihova temperatura, već i efikasnost procesa sagorijevanja. Ne manje važan efekat koji je posljedica primjene TFB je pomjera-nje karakteristike G udesno od kritične vrijednosti $G_{cn(}$. Naime, područje u kome je moguća reakcija ograničeno je kri-tičnom vrijednošću $G = G_{cn}$, sa gornje i apscisom G = 0 sa donje strane. Pomjeranje G ka donjoj granici, kao što se to dešava primjenom TFB, "širi" oblast mogućeg odigravanja hemijske reakcije - sagorijevanja. I ovdje je očigledan proces transformacije "kvantiteta u kvalitet".

3. Razmatranje i zaključak

Primjena termičke povratne sprege (thermal feed-back, TFB) u slučaju zagrijavanja fluida, hlađenja vazduha vlaženjem i sagorijevanja u reaktoru sa intenzivnim miješanjem, generalno ukazuje na pojavu efekta koji se svodi na proces transformacije "kvantiteta u kvalitet".

- U slučaju zagrijavanja fluida konstantnim toplotnim fluksom, povećanje izlazne temperature fluida je izvršeno na račun smanjenja količine zagrijanog fluida koja konačno napušta sistem.
- Pri standardnom procesu hlađenja vazduha adijabatskim vlaženjem, temperatura se može spustiti do "prve" granice hlađenja, odnosno do temperature "vlažnog termometra"; kada se proces izvodi sa TFB, granica hlađenja se pomjera na niže i teorijski je jednaka temperaturi "tačke rose" ulaznog vazduha; dakle, dostiže se "druga" granica hlađenja; to dodatno snižavanje temperature obavlja se na račun smanjenja količine hladnoga vazduha koji napušta sistem.
- Pri sagorijevanju gorive smješe u reaktoru sa intenzivnim miješanjem, postoje određena ograničenja koja uslovljavaju efikasnost procesa sagorijevanja, odnosno da li će uopšte doći do procesa sagorijevanja ili ne; u radu je pokazano da primjena TFB u principu unapređuje proces sagorijevanja u SR: ne samo što je temperatura produkata sagorijevanja veća, već se granice u kojima se može odigrati proces šire, a efikasnost sagorijevanja je veća; naravno, ovaj porast "kvaliteta" procesa se odigrao na račun smanjenja količine toplih produkata sagorijevanja procesa, odnosno na račun "kvantiteta".

Oznake

c_p, c_v [$Jkg^{-1}K^{-1}$] – specifična toplota pri $p = const.$, $v = const.$

E, e	[J, Jkg^{-1}]	- energija, jedinična energija
E	[J/kmol]	- energija aktivacije
G	[–]	- bezdimenziona veličina SR
H_d	[Jkg^{-1}]	- toplotna moć goriva
i, i^*	[Jkg^{-1}]	- entalpija, entalpija vlaž. vazduha na izlazu iz PH
K		- konstanta
$\dot{L}$	[kgs^{-1}]	- maseni protok suvog vazduha
M	[kg]	- masa
$\dot{m}$	[kgs^{-1}]	- maseni protok
$\dot{Q}$	[W]	- toplotni fluks
R	[Jkmol^{-1}K^{-1}]	- univerzalna gasna konstanta id. gasa
S_f, $\tilde{S}$, S_M	[kgs^{-1}m^{-3}]	- brzina hemijske reakcije sagorijevanja, normalizovana, maksimalna
T	[K]	- temperatura
t	[s]	- vrijeme
u	[Jkg^{-1}]	- unutrašnja energija -zapremina
V	[m^3]	- vodeni fluks
$\dot{W}$	[kgs^{-1}]	- koncentracija, apsolutna vlažnost vazduha
x	[kgkg^{-1}]	

Grčka slova

θ	[–]	- bezdim. temp, koordinata
$\chi = c_p/c_v$	[–]	- odnos spec, toplota
φ	[-]	- relativna vlažnost
η	[-]	- efikasnost sagorijevanja
ρ	[kgrrr^3]	- gustina

Indeksi

CV	- kontrolisana zapremina
f, f_0	- gorivo, gorivo na ulazu
M	- maximalan
N	- proces bez povratne sprege
0	- ulazno stanje
r	- tačka rose
vt	- vlažan termometar
w	- voda

Literatura

[1] **Novaković, M., M. Stefanović** i dr.: *Višestruko dizanje i spuštaje temperature povratnom spregom,* ETRAN, Zlatibor, 1996.

[2] **Bošnjaković,** R: *Nauka o toplini,* II dio, Zagreb, 1950.

[3] **Spalding, D. B.:** *Combustion and Mass Transfer,* Pergamon Press, Oxford, 1979.

[4] **Glassman I.:** *Combustion,* Academic Press, 1977.