

Izračun adiabske temperature zgorovanja in dolžine plamena plinske mešanice

UDK: 662.75:662.76:662.9

ASM/SLA: RM-m

Dušan Vodeb, Zvonko Erjavec, Branko Gašperšič

UVOD

Za računalniško vodenje plinskih žarilnih in ogrevnih peči moramo točno poznati posamezne vplive na dogajanje pri zgorovanju plinske mešanice in prenosu toplote v peči. Sestava plinske mešanice, za katero analiziramo vpliv disociacije na adiabsko temperaturo zgorovanja, se časovno spreminja. Iz dobljenih rezultatov, ki so osnova za nadaljno obdelavo prenosa toplote v peči in optimizacijo ogrevanja vložka, vodenje kurjenja in kontrolo atmosfere v peči s pomočjo kisikove sode, določimo vpliv disociacije dimnih plinov na adiabsko temperaturo zgorovanja in dolžino plamena. Parametri, potrebni za izračun adiabske temperature zgorovanja, so določeni v temperaturnem območju zgorovanja plinskih mešanic zemeljski plin — zrak in propan-butan — zrak.

V prvem delu izvedemo matematične algoritme za izračun adiabskih temperatur zgorovanja

- brez upoštevanja disociacije dimnih plinov
- delno upoštevanje disociacije dimnih plinov
- popolno upoštevanje disociacije dimnih plinov.

Adiabsko temperaturo zgorovanja izračunamo iz toplotne bilance plamena brez upoštevanja predgretja zraka in goriva. Upošteevamo samo kalorično energijo goriva in temperaturno odvisnost srednje specifične molne toplote, ki jo izrazimo v obliki interpolacijskega polinoma tretje stopnje. Temperaturno odvisnost ravnotežnih konstant računamo samo za model zgorovanja z delnim upoštevanjem disociacije in za model s popolnim upoštevanjem disociacije. Odvisnost ravnotežnih konstant od temperature izrazimo v obliki eksponentne interpolacije. Za navedene tri modele zgorovanja izračunamo adiabsko temperaturo zgorovanja in reducirano dolžino plamena za spremenljivo sestavo plinske mešanice zemeljski plin — zrak in propan-butan — zrak parametrov, ki bodo praktično nastopili v železarni Ravne po uvedbi zemeljskega plina.

Matematična izvajanja, vrednosti za specifično molno toploto in vstavljanje vstopnih parametrov za izračun adiabske temperature zgorovanja so prilagojeni za primer zgorovanja rezultirajoče plinske mešanice v železarni Ravne.

Zato smo napravili določene poenostavitve; ne upoštevamo predgretja plina in zraka, vrednosti interpolacijskega polinoma veljajo v temperaturnem intervalu od 1200 °C do 2100 °C in vrednosti eksponentnega polinoma ravnotežnih konstant veljajo v temperaturnem intervalu od 1200 °C do 2500 °C. Z navedenimi poenostavitvami smo zmanjšali univerzalnost obdelanih modelov zgorovanja, vendar je naš osnovni namen, ki ga obdelamo, določitev vpliva disociacije na adiabsko temperaturo zgorovanja plinskih mešanic.

1.0 IZRACUN ADIABATSKE TEMPERATURE ZGOREVANJA

Adiabsko temperaturo zgorovanja izračunamo iz toplotne bilance plamena, ki jo zapišemo

$$H + c_g \cdot t_g + \lambda \cdot Z_{\min} \cdot t_z = c_d \cdot t_a \quad (1)$$

Temperaturo zgorovanja izrazimo v obliki temperaturne difference

$$t_a = T_a - T_o \quad (2)$$

kjer vzamemo za temperaturo okolice 0 °C. Za primer, da zrak in gorivo ne predgrevamo, $T_g = T_o$ in $T_z = T_o$, se nam enačba (1) poenostavi v

$$H = c_d \cdot t_a \quad (3)$$

in iz enačbe (3) je adiabska temperatura

$$t_a = \frac{H}{c_d} \quad (4)$$

ki jo računamo za spremenljivo vstopno sestavo plinske mešanice, določeno s stopnjo mešanja x pri različnih razmernikih zraka λ .

$$t_a = f(x, \lambda) \quad (5)$$

Za izračun adiabske temperature predpostavimo tri osnovne modele zgorovanja: 1, 2, 3, 4

— zgorovanje plinske mešanice brez disociacije dimnih plinov

— zgorovanje plinske mešanice pri delni disociaciji dimnih plinov

Mag. Dušan Vodeb, dipl. ing. strojništva, je projektni inženir v TOZD raziskave in razvoj v železarni Ravne.

Zvonko Erjavec, ing. strojništva, je toplotni tehnik v službi energetskega gospodarstva v železarni Ravne.

doc. dr. Branko Gašperšič, dipl. ing. strojništva, je predstojnik katedre za toplotno in procesno tehniko na fakulteti za strojništvo v Ljubljani.

— zgorevanje plinske mešanice pri popolni disociaciji dimnih plinov.

V nadaljevanju za vsako od teh vrst zgorevanja izvedemo algoritem, ki definira potrebne podatke za enačbo (4) za določena vstopna stanja po enačbi (5).

1.1 ZGOREVANJE PLINSKE MEŠANICE BREZ UPOŠTEVANJA DISOCIACIJE DIMNIH PLINOV

Izračun adiabske temperature za model zgorevanja, kjer ne upoštevamo disociacije, delimo na dva dela:

- izračun adiabske temperature za $\lambda \geq 1$
- izračun adiabske temperature za $\lambda < 1$, za katera poiščemo algoritem.

Zgorevanje plinske mešanice za $\lambda \geq 1$

Pri popolnem zgorevanju plinske mešanice s presežkom zraka so dimni plini sestavljeni iz CO₂, H₂O, O₂ in N₂.

Hitrost zgorevanja plinske mešanice v plinskem gorilniku je veliko večja od hitrosti iztekanja plina in zraka, zato zanemarimo prirastek tlaka zaradi vpliva zgorevanja. Predpostavimo, da je vsota tlakov vseh komponent dimnih plinov enaka atmosferskemu tlaku.⁵

$$\sum p = 1 \tag{6}$$

Za obravnavani model zgorevanja je vsota parcialnih tlakov

$$p_{CO_2} + p_{H_2O} + p_{O_2} + p_{N_2} = \sum p \tag{7}$$

Zaradi nizkih tlakov in relativno visokih temperatur smatramo nastale dimne pline kot idealen plin; velja splošna plinska enačba

$$p_i \cdot V = m_i \cdot R \mu \cdot T \tag{8}$$

Podobno enačbo zapišemo tudi za »atomski tlak«, oziroma ustrezno vsoto atomov

$$P_j \cdot V = \sum_j Z_j \cdot R \mu \cdot T, \tag{9}$$

kjer je definiran »atomski tlak«

$$P_j = \sum_{i=1}^k A_{ji} \cdot p_i \tag{10}$$

in vsota atomov pred zgorevanjem

$$\sum_j Z_j = \sum_{i=1}^4 i \cdot \bar{v}_{pi} \tag{11}$$

Za obravnavani primer zgorevanja zapišemo naslednje enačbe: »atomski tlak« za ogljik

$$P_C = p_{CO_2} + p_{CO} \tag{12}$$

in za ostale elemente

$$\begin{aligned} P_H &= 2 \cdot p_{H_2O} + 2 \cdot p_{H_2} \\ P_O &= 2 \cdot p^{CO_2} + p_{CO} + p_{H_2O} \end{aligned} \tag{13}$$

$$P_N = 2 \cdot p_{N_2} .$$

Vsota atomov pred zgorevanjem

$$\begin{aligned} \Sigma H &= \sum_{i=1}^4 (2i + 2) \bar{v}_{pi} \\ \Sigma C &= \sum_{i=1}^4 i \cdot \bar{v}_{pi} \\ \Sigma O &= 2 \cdot v_5 + 2 \cdot \lambda \cdot O_{2min} \\ \Sigma N &= 2 \cdot v_6 + 2 \cdot 3,76 \cdot \lambda \cdot O_{2min} \end{aligned} \tag{14}$$

v enačbi (14) smo zanemarili vpliv vlage, ki je v zraku.

Tvorimo razmerja atomskih tlakov, definiranih po enačbah (12) in (13) ter z upoštevanjem enačb (8) in (9) za določen element in pogoja, da sta temperatura in volumen konstantna, dobimo naslednjo zvezo

$$\begin{aligned} \frac{P_C}{P_O} &= \frac{p_{CO_2} + p_{CO}}{2p_{CO_2} + p_{CO} + p_{H_2O}} = \\ &= \frac{m_{CO_2} + m_{CO}}{2m_{CO_2} + m_{CO} + m_{H_2O}} = \frac{\Sigma C}{\Sigma O} \end{aligned} \tag{15}$$

Podobno tvorimo razmerja za ostale osnovne elemente.

$$\frac{P_C}{P_H}, \frac{P_C}{P_N}, \frac{P_C}{\Sigma p_i}, \dots = \frac{\Sigma C}{\Sigma H}, \frac{\Sigma C}{\Sigma N}, \frac{m_i}{\Sigma m_i}, \dots \tag{16}$$

Za obravnavani primer zgorevanja imamo poleg osnovne enačbe za vsoto parcialnih tlakov (7) še naslednje enačbe

$$\begin{aligned} \frac{\Sigma C}{\Sigma H} &= \frac{p_{CO_2}}{2p_{H_2O}} \\ \frac{\Sigma C}{\Sigma O} &= \frac{p_{CO_2}}{2p_{CO_2} + p_{H_2O} + 2p_{O_2}} \\ \frac{\Sigma C}{\Sigma N} &= \frac{p_{CO_2}}{2p_{N_2}} \end{aligned} \tag{17}$$

Za postavljeni model zgorevanja so »atomski tlaki«

$$\begin{aligned} P_C &= p_{CO_2} \\ P_H &= 2p_{H_2O} \\ P_O &= 2p_{CO_2} + p_{H_2O} + 2p_{O_2} \\ P_N &= 2p_{N_2} \end{aligned} \tag{18}$$

Enačbe (7), (17) in (18) tvorijo sistem štirih enačb s štirimi neznanimi parcialnimi tlaki p_{CO₂},

p_{O₂}, p_{N₂} in p_{H₂O}. Rešitev sistema je

$$\begin{aligned} p_{CO_2} &= 2 \cdot \Sigma p \cdot \Sigma C . \\ p_{H_2O} &= \Sigma p \cdot \Sigma H \cdot A \\ p_{O_2} &= \Sigma p \cdot \left(\Sigma O - 2 \Sigma C - \frac{1}{2} \Sigma H \right) \cdot A \\ p_{N_2} &= \Sigma p \cdot \Sigma N \cdot A, \end{aligned} \tag{19}$$

kjer pomeni A

$$A = 1 / \left(\frac{1}{2} \Sigma H + \Sigma O + \Sigma N \right). \quad (20)$$

Sistem je enostavno rešljiv za podane vstopne pogoje. Iz znanih vrednosti parcialnih tlakov izračunamo molske mase predpostavljenih komponent dimnih plinov za obdelani model zgorevanja. Z upoštevanjem enačbe (8) in razmerij (16) dobimo naslednja razmerja

$$\frac{m_i}{p_i} = \frac{\Sigma m_i}{\Sigma p_i} = \frac{\Sigma C}{P_C} = \frac{\Sigma H}{P_H} = \frac{\Sigma O}{P_O} = \frac{\Sigma N}{P_N}, \quad (21)$$

iz katerih je molska masa posameznih komponent dimnih plinov

$$m_i = p_i \frac{\Sigma C}{P_C} \quad (22)$$

Za obravnavani primer zgorevanja je

$$m_{CO_2} = p_{CO_2} \cdot \frac{\Sigma C}{P_C} = p_{CO_2} \cdot \frac{\Sigma C}{P_{CO_2}} = \Sigma C$$

$$m_{H_2O} = \frac{\Sigma H}{2}$$

$$m_{O_2} = \frac{1}{4} (2\Sigma O - 4\Sigma C - \Sigma H) \quad (23)$$

$$m_{N_2} = \frac{\Sigma N}{2}$$

S spoznavanjem vrednosti molskih mas posameznih komponent dimnih plinov izračunamo molsko specifično toploto po enačbi (48) in po enačbi (4) adiabatno temperaturo zgorevanja.

Zgorevanje plinske mešanice za $\lambda < 1$

Pri tem modelu zgorevanja pride do nepopolnega zgorevanja in v dimnih plinih imamo poleg CO_2 , H_2O in N_2 še nezgorele produkte CO in H_2 .

Za ta primer veljajo iste predpostavke in izpeljave kot prej. Vsota parcialnih tlakov komponent v dimnih plinih je

$$p_{CO_2} + p_{CO} + p_{H_2O} + p_{H_2} + p_{N_2} = \Sigma p \quad (24)$$

Zveza med vsoto elementov pred zgorevanjem in parcialnimi tlaki po zgorevanju je po enačbah (12), (13) in (16)

$$\frac{\Sigma C}{\Sigma H} = \frac{p_{CO_2} + p_{CO}}{2p_{H_2O} + 2p_{H_2}} \quad (25)$$

$$\frac{\Sigma C}{\Sigma O} = \frac{p_{CO_2} + p_{CO}}{2p_{CO_2} + p_{CO} + p_{H_2O}}$$

$$\frac{\Sigma C}{\Sigma N} = \frac{p_{CO_2} + p_{CO}}{2p_{N_2}}$$

Sistem štirih enačb (24) in (25) je nedoločen, ker je število neznank večje od števila enačb. Uvedemo dodatno enačbo, ki povezuje medsebojno ravnotežno stanje nezgorelih komponent CO in H_2 ,

$$K_W = \frac{K_{CO}}{K_{H_2}} = \frac{p_{CO_2}}{p_{H_2}} = \frac{p_{CO} \cdot p_{H_2O}}{p_{CO_2} \cdot p_{H_2}} \quad (26)$$

ki je za ta primer neodvisna od temperature zgorevanja.

Sistem je sedaj rešljiv in ga rešujemo po naslednji matematični shemi, ki jo izvedemo iz sistema enačb (24), (25) in (26)

$$p_{CO_2} = \frac{B}{1 + \left(\frac{p_{CO}}{p_{CO_2}} \right)}$$

$$p_{CO} = B - p_{CO_2}$$

$$p_{H_2O} = B \frac{\Sigma O}{\Sigma C} - 2 \cdot p_{CO_2} - p_{CO} \quad (27)$$

$$p_{H_2} = D - p_{H_2O}$$

kjer je

$$B = p_{CO_2} + p_{CO}$$

$$D = p_{H_2O} + p_{H_2} \quad (28)$$

in manjkajoči parcialni tlak za dušik je

$$p_{N_2} = \Sigma p \frac{\Sigma N}{2\Sigma C + \Sigma H + \Sigma N} \quad (29)$$

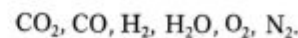
Pri podani shemi izračuna sta neznanki razmerja parcialnih tlakov p_{CO} in p_{CO_2} ; vmesne rešitve testiramo z enačbo (26) tako dolgo, da je izpolnjen pogoj $K_W = 1$.

Molske mase komponent dimnih plinov določimo po enačbi (21). Kurilnost plinske mešanice, ki jo potrebujemo za rešitev enačbe (4), moramo za ta model zmanjšati za vrednost nezgorelega v dimnih plinih

$$H_d = H - \sum_i m_i \cdot H_i \quad (30)$$

1.2 ZGOREVANJE PLINSKE MEŠANICE Z UPOŠTEVANJEM DELNE DISOCIACIJE DIMNIH PLINOV

Za model zgorevanja z upoštevanjem delne disociacije dimnih plinov predpostavimo, da imamo v dimnih plinih naslednje komponente:



Upoštevamo disociacijo samo ogljikovega dioksida CO_2 in vodne pare H_2O . Nastavimo osnovne enačbe:

$$p_{CO_2} + p_{CO} + p_{H_2O} + p_{H_2} + p_{O_2} + p_{N_2} = \Sigma p \quad (31)$$

$$\frac{\Sigma C}{\Sigma H} = \frac{p_{CO_2} + p_{CO}}{2p_{H_2O} + 2p_{H_2}}$$

$$\frac{\Sigma C}{\Sigma O} = \frac{p_{CO_2} + p_{CO}}{2p_{CO_2} + p_{CO} + p_{H_2O} + 2p_{O_2}} \quad (32)$$

$$\frac{\Sigma C}{\Sigma N} = \frac{p_{CO_2} + p_{CO}}{2p_{N_2}}$$

Sistem je nedoločljiv; imamo šest neznank in samo štiri enačbe; vpeljemo dve ravnotežni enačbi za CO in H₂.

$$K_{CO} = \frac{p_{CO}}{p_{CO_2} p_{O_2}^{-1/2}} \quad (33)$$

$$K_{H_2} = \frac{p_{H_2}}{p_{H_2O} p_{O_2}^{-1/2}}$$

Z uvedbo enačb (33) postane sistem rešljiv in matematična shema reševanja poteka po naslednjih pomožnih enačbah, ki jih izvedemo iz enačb (31), (32) in (33)

$$p_{CO_2} = \frac{\Sigma p - p_{O_2}}{1 + K_{CO} p_{O_2}^{-1/2}} \cdot \frac{2\Sigma C}{2\Sigma C + \Sigma H + \Sigma N}$$

$$p_{CO} = p_{CO_2} \cdot K_{CO} p_{O_2}^{-1/2}$$

$$p_{N_2} = (p_{CO_2} + p_{CO}) \frac{\Sigma N}{2\Sigma C}$$

$$p_{H_2O} = \frac{(p_{CO_2} + p_{CO}) \Sigma H}{2 \cdot (1 + K_{H_2} p_{O_2}^{-1/2}) \Sigma C} \quad (34)$$

$$p_{H_2} = p_{H_2O} K_{H_2} \cdot p_{O_2}^{-1/2}$$

Spremenljivka, s katero rešujemo matematično shemo (34), je parcialni tlak p_{O₂}, vmesne rezultate pa testiramo z enačbo (32), ki je nismo upoštevali pri izvajanju enačb (34)

$$\frac{\Sigma C}{\Sigma O} = \frac{p_{CO_2} + p_{CO}}{2 \cdot p_{CO_2} + p_{CO} + p_{H_2O} + 2 \cdot p_{O_2}} \quad (35)$$

Nadaljnji izračun adiabatske temperature poteka enako kot v primeru zgorevanja brez upoštevanja disociacije pri razmerniku λ < 1.

Upošteevamo dejansko kalorično vrednost plina po enačbi (30) in temperaturno odvisnost ravnotežnih enačb (33).

V tem primeru je računski postopek nekoliko zamudnejši, ker poleg reševanja sestave nastalih dimnih plinov upošteevamo tudi temperaturni razpad CO₂ in H₂O.

1.3 ZGOREVANJE PLINSKE MEŠANICE S POPOLNO DISOCIACIJO DIMNIH PLINOV

Pri tem modelu zgorevanja upošteevamo popolno disociacijo dimnih plinov in predpostavimo naslednje komponente v dimnih plinih: CO₂, H₂O, O₂, H₂, CO, N₂, OH, NO, C, H, O, N.

Za ta primer moramo nastaviti 12 enačb, s pomočjo katerih bomo lahko rešili problem. Postavimo naslednje enačbe

$$p_{CO_2} + p_{H_2O} + p_{O_2} + p_{N_2} + p_{CO} + p_{H_2} + p_{OH} + p_{NO} + p_C + p_H + p_O + p_N = \Sigma p$$

$$\frac{\Sigma C}{\Sigma H} = \frac{p_{CO_2} + p_{CO} + p_C}{2 \cdot p_{H_2O} + 2 \cdot p_{H_2} + p_{CH} + p_H}$$

$$\frac{\Sigma H}{\Sigma O} = \frac{2p_{H_2O} + 2p_{H_2} + p_{OH} + p_H}{2p_{CO_2} + p_{CO} + p_{H_2O} + p_{OH} + 2p_{O_2} + p_{NO} + p_O}$$

$$\frac{\Sigma O}{\Sigma N} = \frac{2p_{CO_2} + p_{CO} + p_{H_2O} + p_{OH} + 2p_{O_2} + p_{NO} + p_O}{2p_{N_2} + p_{NO} + p_N}$$

$$p_{CO} = K_{CO} p_{CO_2} p_{O_2}^{-1/2} \quad (36)$$

$$p_{H_2} = K_{H_2} p_{H_2O} p_{O_2}^{-1/2}$$

$$p_{OH} = K_{OH} p_{H_2O}^{1/2} p_{O_2}^{1/4}$$

$$p_{NO} = K_{NO} p_{O_2}^{1/2} p_{N_2}^{1/2}$$

$$p_C = K_C p_{CO_2} p_{O_2}^{-1}$$

$$p_H = K_H p_{H_2O}^{1/2} p_{O_2}^{-1/4}$$

$$p_O = K_O p_{O_2}^{1/2}$$

Matematično reševanje sistema enačb (36) poteka po naslednji matematični shemi.

Izberemo vrednosti za parcialna tlaka p_{O₂} in p_{H₂O} in izračunamo vse parcialne tlake komponent dimnih plinov, v katerih je vodik, p_{OH}, p_H, p_{H₂} po definicijskih enačbah v sistemu (36) ter parcialni tlak disociiranega kisika p_O.

Iz znanih vrednosti parcialnih tlakov dobimo naslednje kvociente

$$\frac{p_{CO}}{p_{CO_2}} = K_{CO} p_{O_2}^{1/2} \quad (37)$$

$$\frac{p_{NO}}{p_{N_2}^{-1/2}} = K_{NO} p_{O_2}^{1/2} \quad (38)$$

$$\frac{p_C}{p_{CO_2}} = K_C p_{O_2}^{-1} \quad (39)$$

in »atomski tlak« vodikovih atomov

$$p_H = 2p_{H_2O} + p_{OH} + 2p_{H_2} + p_H \quad (40)$$

s pomočjo katerega iz splošne enačbe (16) izračunamo

$$p_C = p_H \frac{\Sigma C}{\Sigma H} \quad (41)$$

$$p_N = p_H \frac{\Sigma N}{\Sigma H}$$

Podsistem enačb (37), (38), (39) in (41) nam omogoča določitev parcialnih tlakov komponent dimnih plinov, v katerih je vsebovan ogljik p_{CO₂}, p_{CO} in p_C.

$$p_{CO_2} = \frac{p_C}{1 + \left(\frac{p_{CO}}{p_{CO_2}}\right) + \left(\frac{p_C}{p_{CO_2}}\right)}$$

$$p_{CO} = p_{CO_2} \left(\frac{p_{CO}}{p_{CO_2}}\right) \quad (42)$$

$$p_C = p_{CO_2} \left(\frac{p_C}{p_{CO_2}}\right)$$

Manjka parcialni tlak dušika in vseh komponent dimnih plinov, v katerih je vsebovan dušik. Izračunamo »atomski tlak« dušika.

$$P_N = 2 \cdot p_{N_2} \quad (43)$$

»Atomski tlak« izrazimo

$$P_N = p_{N_2} + 0,5 p_{NO} + 0,5 p_N \quad (44)$$

in iz zvez (36) dobimo kvadratno enačbo, katere rešitev je

$$p_{N_2}^{1/2} = -0,25 (K_N + K_{NO} p_{O_2}^{1/2}) + [0,25 (K_N + K_{NO} p_{O_2}^{1/2})^2 + 0,5 p_N]^{1/2} \quad (45)$$

Iz dobljenih vrednosti enačbe (45) poiščemo manjkajoča parcialna tlaka p_{NO} in p_N

$$p_{NO} = \left(\frac{p_{NO}}{p_{N_2}^{1/2}} \right) p_{N_2}^{1/2} \quad (46)$$

$$p_N = K_N p_{N_2}^{1/2}$$

Delne rezultate testiramo z enačbami iz sistema (36), ki ju še nismo uporabili

$$\sum_i p_i = \Sigma p \quad (47)$$

$$\frac{p_O}{p_H} = \frac{\Sigma O}{\Sigma H}$$

Ko izračunamo parcialne tlake, poteka račun adiabatske temperature enako kot v prejšnjem primeru — z delno disociacijo.

2.0 IZRACUN MOLNE SPECIFIČNE TOPLOTE IN RAVNOTEŽNIH KONSTANT

V poglavju 1.0 smo obdelali posamezne primere zgorevanja. Dobili smo sestavo dimnih pli-

nov za različne modele zgorevanja, za izračun adiabatske temperature po enačbi (4) pa moramo obdelati še postopek določitve srednje molne specifične toplote in temperaturno odvisnost ravnotežnih konstant.

Srednjo molno specifično toploto dimnih plinov izračunamo po enačbi

$$c_d = \sum_{i=1}^n C_{pi} \cdot m_i,$$

kjer molno maso komponent dimnih plinov dobimo po prej opisanem postopku. Temperaturno odvisnost molne specifične toplote komponent dimnih plinov določimo s pomočjo interpolacijskega polinoma

$$c_{pi} = a_i + b_i \vartheta + c_i \vartheta^2 + d_i \vartheta^3 + \dots \quad (49)$$

iz tabelaričnih podatkov tabele 1.

V interpolacijskem koeficientu je ϑ definiran

$$\vartheta = \frac{T - 273}{1000}$$

Temperaturno odvisnost molske srednje specifične toplote komponent dimnih plinov O, H, C in N zanemarimo in za izračun vzamemo

$$c_{pO} = 21,35 \quad \text{kJ/kmol K}$$

$$c_{pH} = 20,93 \quad \text{kJ/kmol K}$$

$$c_{pC} = 20,93 \quad \text{kJ/kmol K}$$

$$c_{pN} = 20,93 \quad \text{kJ/kmol K}$$

Koeficiente interpolacijskega polinoma izračunamo za temperaturni interval od 1473 K do 2373 K. Temperaturna omejitev nam poveča natančnost izračunanih vrednosti. V tabeli 2 so podane vrednosti posameznih koeficientov interpolacijskega polinoma za nekatere pline po tabeli 1.

Tabela 1

Srednja molna specifična toplota $[C_{pi}]_0^T$ plinov med 273 K in 3273 K pri nizkih tlakih

Temper.		Srednja molna specifična toplota							
°C	K	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	CO	H ₂	OH	NO
0	273	36,09	33,49	29,27	29,14	29,14	28,64	29,98	29,98
300	573	41,95	34,58	30,44	29,39	29,52	29,06	29,64	30,23
600	873	45,97	36,22	31,78	30,15	30,48	29,31	29,68	31,23
900	1 173	48,78	38,02	32,87	31,07	31,40	29,64	30,06	32,24
1200	1 473	51,00	39,82	33,66	31,86	32,24	30,10	30,56	33,03
1500	1 773	52,63	41,49	34,29	32,53	32,91	30,65	31,15	33,62
1800	2 073	53,93	43,04	34,88	33,08	33,45	31,23	31,74	34,12
2100	2 373	54,89	44,38	35,34	33,54	33,87	31,74	32,28	34,58
2400	2 673	55,52	45,51	35,76	33,91	34,25	32,24	32,74	34,92
2700	2 973	56,40	46,64	36,22	34,33	34,58	32,74	33,16	35,17
3000	3 273	57,32	47,65	36,59	34,58	34,83	33,16	33,58	35,38

Tabela 2: Vrednost koeficientov a_i, b_i, c_i, d_i interpolacijskega polinoma za izračun c_{p_i} komponent dimnih plinov $CO_2, H_2O, O_2, N_2, CO, H_2, OH, NO$ v temperaturnem območju od 1473 K do 2373 K.

PLIN	Koeficient interpolacijskega polinoma			
	a_i	b_i	c_i	d_i
CO ₂	10,1159	1,9129	-0,0753	-0,0746
H ₂ O	8,0059	0,9694	0,3832	-0,1222
O ₂	6,7579	1,7765	-0,7252	0,1241
N ₂	6,2679	1,8098	-0,7252	0,1241
CO	6,7600	0,9833	-0,1667	—
H ₂	7,3739	-0,9581	0,8944	-0,1864
OH	6,7361	0,4689	0,0016	-0,0012
NO	6,9228	1,1918	-0,3979	0,0636

Na enak način določimo temperaturno odvisnost ravnotežnih konstant, ki jih potrebujemo pri izračunu adiabske temperature z delno in popolno disociacijo.

Interpolacijsko enačbo za ravnotežne konstante poiščemo v obliki

$$K_p = a_j \cdot \theta(b_j + c_j + d_j + \dots) \quad (51)$$

Tabelarnični podatki za ravnotežne konstante v odvisnosti od temperature so v tabeli 3, iz katerih smo določili koeficient interpolacijske enačbe (51), ki so prikazani v tabeli 4.

Tabela 4 — Vrednosti koeficientov a_j, b_j, c_j, d_j interpolacijske enačbe (51) za izračun ravnotežnih konstant v temperaturnem območju od 1500 K do 2800 K.

Ravnotežna konstanta	Koeficient			
	a_j	b_j	c_j	d_j
K _{CO}	4,2600.10 ⁻⁸	34,5918	-13,0837	2,3542
K _{H₂}	3,0900.10 ⁻⁸	29,8501	-11,1020	2,0314
K _{OH}	2,1270.10 ⁻⁵	28,6255	-14,4325	2,8598
K _{NO}	8,3816.10 ⁻⁴	7,8203	-1,4132	0,1273
K _C	2,0403.10 ⁻¹⁸	80,1731	-44,6290	9,3653
K _H	6,5380.10 ⁻¹⁰	13,6717	7,3595	-2,3007
K _O	8,3780.10 ⁻⁹	44,9225	-20,7106	3,8838
K _N	5,2000.10 ⁻¹²	20,1963	3,5577	-1,5443

Tabela 3 — Vrednosti za ravnotežne konstante za temperaturno območje od 1500 K do 3273 K

Temperatur.		Ravnotežna konstanta za posamezne komponente dimnih plinov							
°C	K	K _{CO}	K _{H₂}	K _{OH}	K _{NO}	K _C	K _H	K _O	K _N
1227	1500	5,15.10 ⁻⁶	1,92.10 ⁻⁶	8,00.10 ⁻⁴	3,15.10 ⁻³	1,59.10 ⁻¹⁴	2,40.10 ⁻⁸	4,69.10 ⁻⁶	4,50.10 ⁻¹⁰
1500	1773	1,58.10 ⁻⁴	4,17.10 ⁻⁵	4,90.10 ⁻³	9,50.10 ⁻³	2,25.10 ⁻¹²	2,25.10 ⁻⁶	8,00.10 ⁻⁵	4,00.10 ⁻⁸
1727	2000	1,39.10 ⁻³	2,90.10 ⁻⁴	1,70.10 ⁻²	1,95.10 ⁻²	4,73.10 ⁻¹¹	2,80.10 ⁻⁵	7,00.10 ⁻⁴	7,50.10 ⁻⁷
2000	2273	1,00.10 ⁻²	1,73.10 ⁻³	5,00.10 ⁻²	3,80.10 ⁻²	7,10.10 ⁻¹⁰	3,90.10 ⁻⁴	4,50.10 ⁻³	1,20.10 ⁻⁵
2227	2500	3,86.10 ⁻²	5,98.10 ⁻³	1,09.10 ⁻¹	5,86.10 ⁻²	6,02.10 ⁻⁹	2,00.10 ⁻³	1,60.10 ⁻²	6,80.10 ⁻⁵
2500	2773	1,33.10 ⁻¹	1,87.10 ⁻²	2,20.10 ⁻¹	8,80.10 ⁻²	4,00.10 ⁻⁸	1,02.10 ⁻²	5,10.10 ⁻²	3,90.10 ⁻⁴
2727	3000	3,25.10 ⁻¹	4,42.10 ⁻²	3,70.10 ⁻¹	1,21.10 ⁻¹	1,43.10 ⁻⁷	3,32.10 ⁻²	1,27.10 ⁻¹	1,37.10 ⁻³
3000	3273	8,00.10 ⁻¹	1,04.10 ⁻¹	6,30.10 ⁻¹	1,61.10 ⁻¹	5,50.10 ⁻⁷	1,08.10 ⁻¹	2,85.10 ⁻¹	4,80.10 ⁻³

3.0 IZRACUN ADIABATSKIH TEMPERATUR ZA PLINSKO MEŠANICO

V železarni Ravne smo izdelali računske programe za izračun adiabske temperature zgorevanja po opisanih treh modelih zgorevanja.⁶ Pri tem smo upoštevali za določitev srednje molne specifične toplote in temperaturne odvisnosti ravnotežnih konstant izračunane vrednosti koeficientov za oba interpolacijska polinoma. Za izračun smo upoštevali rezultirajočo plinsko mešanico, sestavljeno iz dveh osnovnih plinskih mešanic, zemeljski plin — zrak in propan-butan — zrak, ki se bo dejansko uporabljala v železarni. Podatki za sestavo rezultirajoče plinske mešanice so v tabeli 5, kjer je sestava osnovnih plinskih mešanic zemeljski plin — zrak in propan-butan — zrak prikazana od 0 do 100 % stopnje emšanja PBZ.

Tabela 5 — Podatki o sestavi rezultirajoče plinske mešanice v odvisnosti od medsebojne stopnje mešanja, za katero izračunamo adiabsko temperaturo zgorevanja

Stopnja mešanja x	Sestava rezultirajoče plinske mešanice v _i v vol %					
	\bar{v}_1	\bar{v}_2	\bar{v}_3	\bar{v}_4	\bar{v}_5	\bar{v}_6
% PBZ	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	O ₂	N ₂
0	51,028	1,805	0,384	0,339	9,514	36,930
10	45,943	1,642	1,125	1,737	10,191	39,363
20	40,857	1,479	1,866	3,135	10,868	41,796
30	35,772	1,315	2,607	4,533	11,545	44,228
40	30,686	1,152	3,348	5,931	12,222	46,661
50	25,601	0,989	4,089	7,329	12,899	49,094
60	20,516	0,826	4,829	8,726	13,576	51,527
70	15,430	0,663	5,570	10,124	14,253	53,960
80	10,345	0,499	6,311	11,522	14,930	56,392
90	5,259	0,336	7,052	12,920	15,607	58,825
100	0,174	0,173	7,793	14,318	16,284	61,258

Sestava zemeljskega plina in tekočega naftnega plina, ki smo jo vzeli za izračun rezultirajoče plinske mešanice, in postopek izračuna je bil obdelan.⁷

Rezultirajoča planska mešanica sestave, podana v tabeli 5, ima naslednje fizikalne lastnosti, ka-

tere potrebujemo za izračun adiabatске temperature zgorovanja.

Tabela 6 — Osnovni fizikalni podatki rezultirajoče plinske mešanice

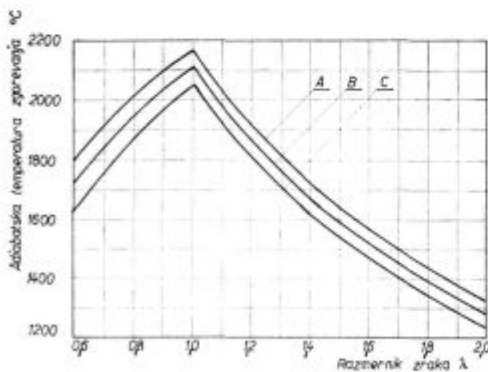
Stopnja mešanja x	Molek. masa M_{PRPM}	Plinska konstanta R_{PRPM}	Kurilnost H_{PRPM}	Gostota ρ_{PRPM}	d = $\frac{\rho_{PRPM}}{\rho_{ZR}}$	Relativna gostota	Dinamična viskoznost $\eta \cdot 10^6$
% PBZ	kg/kmol	kJ/kgK	kJ/kmol	kg/m ³	—	—	kg/ms
0	22,486	369	453 530	1,0071	0,7793		13,460
10	23,657	351	464 447	1,0621	0,8216		13,423
20	24,831	335	475 364	1,1168	0,8637		13,386
30	26,004	320	482 281	1,1714	0,9061		13,350
40	27,176	306	497 198	1,2260	0,9483		13,313
50	28,349	293	508 115	1,2807	0,9906		13,276
60	29,522	282	519 032	1,3353	1,0329		13,239
70	30,694	271	529 949	1,3900	1,0752		13,202
80	31,867	261	540 866	1,4445	1,1173		13,166
90	33,039	252	551 783	1,4992	1,1597		13,129
100	34,212	243	562 700	1,5538	1,2019		13,092

Rezultate izračunov prikažemo grafično v obliki diagramov za posamezne modele zgorovanja v odvisnosti od stopnje mešanja in razmernika zraka, kjer upoštevamo naslednja območja za

— stopnjo mešanja x v mejah od 0 % do 100 % PBZ

— razmernik zraka λ v mejah od 0,6 do 2

Na sliki 1 prikažemo odvisnost adiabatске temperature zgorovanja od razmernika zraka za določene stopnje mešanja. Postopek izračuna za ta model zgorovanja je razdeljen na dva dela, na zgorovanje pri razmerniku zraka $\lambda < 1$ in zgorovanje



- A stopnja mešanja x = 100 % PBZ
B stopnja mešanja x = 50 % PBZ
C stopnja mešanja x = 0 % PBZ

Slika 1

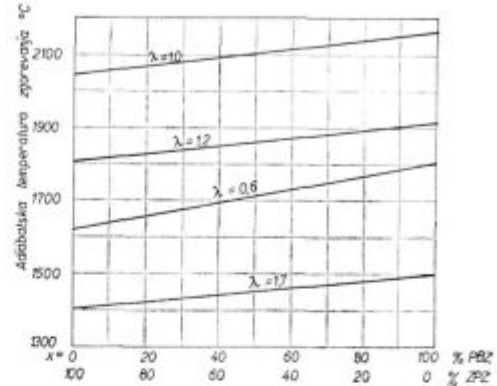
Adiabatška temperatura zgorovanja za model zgorovanja brez upoštevanja disociacije dimnih plinov

Fig. 1

Adiabatic combustion temperature for the model which does not take into account the dissociation of flue gases

pri razmerniku $\lambda \geq 1$, zato je funkcija za adiabatško temperaturo v točki pri $\lambda = 1$ lomljena in ni zvezna.

Iz slike 1 je razvidno, da se nam adiabatška temperatura zgorovanja spreminja tako v odvisnosti od razmernika zraka kot od sestave rezultirajoče plinske mešanice, kar prikažemo na sliki 2.

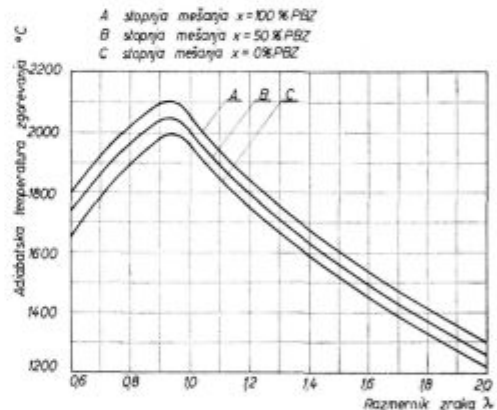


Slika 2

Sprememba adiabatске temperature zgorovanja v odvisnosti od stopnje mešanja za določene razmernike zraka

Fig. 2

Variation of the adiabatic combustion temperature with the degree of mixing for single air ratios



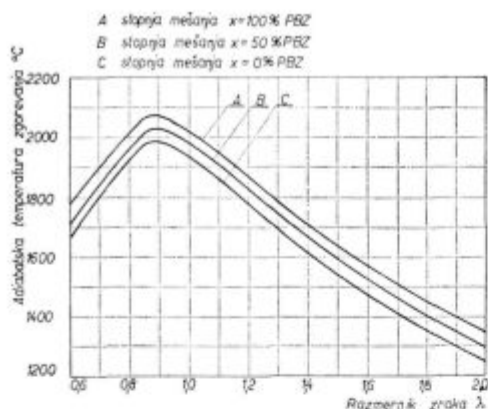
Slika 3

Adiabatška temperatura zgorovanja za model zgorovanja z delnim upoštevanjem disociacije dimnih plinov

Fig. 3

Adiabatic combustion temperature for the model where the dissociation of flue gases is partially taken into account

Na sliki 3 prikažemo adiabatško temperaturo zgorovanja z delnim upoštevanjem disociacije dimnih plinov in na sliki 4 adiabatško temperaturo zgorovanja z upoštevanjem popolne disociacije dimnih plinov. V obeh primerih prehaja krivulja adiabatске temperature zvezno iz območja zgorovanja s primanjkljajem zraka v območje zgorovanja s presežkom zraka. Temperaturni maksimum se zniža in pomakne v območje zgorovanja pri razmerniku zraka $0,9 < \lambda < 1$. Večja kot je stopnja upoštevanja disociacije, bolj se zniža adiabatška temperatura zgorovanja in odmik temperaturnega maksimuma od razmernika $\lambda = 1$, kar prikažemo na sliki 5.

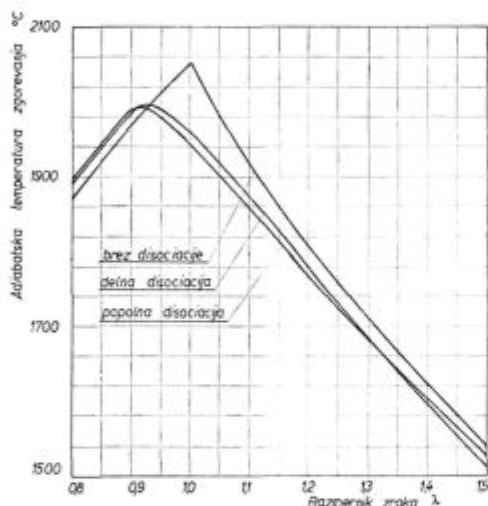


Slika 4

Adiabska temperatura zgorevanja za model zgorevanja s popolno disociacijo dimnih plinov

Fig. 4

Adiabatic combustion temperature for the model where the dissociation of flue gases is taken in account



Slika 5

Adiabska temperatura zgorevanja v odvisnosti od stopnje upoštevanja disociacije dimnih plinov za območje razmernika zraka od 0,8 do 1,5 pri 0% stopnji mešanja PBZ

Fig. 5

Adiabatic combustion temperature related to the degree of consideration of the dissociation of flue gases for air ratios 0.8 to 1.5. Without mixing of PBA.

4.0 ODVISNOST DOLŽINE PLAMENA OD ADIABATSKE TEMPERATURE ZGOREVANJA

Reducirano dolžino plamena za plinski gorilnik brez predmešanaj plina in zraka izračunamo po enačbi⁸

$$L = \frac{1}{2} \cdot \frac{K_1}{K_2} \cdot \frac{C_i}{C_{\xi}^2} \cdot \frac{\bar{v}_o}{v_o} \sqrt{\frac{1}{\beta} \cdot \frac{\mu_p}{\mu_{dp}} \cdot \frac{T_p}{T_o}} \quad (52)$$

Reducirana dolžina plamena se spreminja od vstopne sestave plina in razmernika zraka. V nadaljevanju razčlenimo enačbo (52) na dva dela; t.j. na del, ki upošteva določeno spremembo vstop-

ne sestave rezultirajoče plinske mešanice za podatke iz tabele 6 in del, ki upošteva razmernik zraka. Tako razčlenjeno enačbo (52) analiziramo za predhodno obravnavane modele zgorevanja.

Enačbo (52) razbijemo v

$$L = U(x) \cdot V(\lambda), \quad (53)$$

kjer je definirana odvisnost od vstopne sestave

$$U(x) = \frac{1}{2} \frac{K_1}{K_2} \cdot \frac{C_i}{C_{\xi}^2} \cdot \frac{\bar{v}_o}{v_o} \sqrt{\frac{1}{\beta}} \quad (54)$$

in odvisnost reducirane dolžine od razmernika zraka

$$V(\lambda) = \frac{1}{v_p} \sqrt{\frac{\mu_p}{\mu_{dp}} \cdot \frac{T_p}{T_o}} \quad (55)$$

Odvisnost spremembe vstopne sestave rezultirajoče plinske mešanice na reducirano dolžino plamena moramo analizirati posebej za vsak parameter iz enačb (54).

Koeficienta K_1 in K_2 , ki upoštevata porazdelitev izstopne hitrosti na ustju gorilnika, sta definirana

$$K_1 = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \quad (56)$$

in

$$K_2 = \frac{2n^2}{(n+2)(2n+2)} \quad (57)$$

kjer je eksponent parabolične porazdelitve n funkcija Reynoldsovega števila

$$n = 2,1 \log Re - 1,9 \quad (58)$$

Pri pogoju izmenljivosti izhajamo iz zahteve, da se na plinskem gorilniku s spremembo sestave plinske mešanice ne sme spremeniti toplotna obremenitev gorilnika, če je ostal tlak plinske mešanice na gorilniku konstanten. Iz te zahteve dobimo zvezo med sestavo rezultirajoče plinske mešanice in koeficientoma K_1 in K_2 , tako da Reynoldsovo število izrazimo s toplotno obremenitvijo

$$Re = \frac{4 \cdot Q}{d \cdot \pi} \cdot \frac{\rho_p}{H_p \cdot \eta_p} \quad (59)$$

Za določene vrednosti Q in d in spremembo rezultirajoče sestave plinske mešanice po tabeli 6 izračunamo za posamezne stopnje mešanja koeficienta K_1 in K_2 , ki ju podamo v tabeli 7. Prenosna koeficienta impulza in mase sta v medsebojni povezavi in sta odvisna samo od gostote, tako da imamo naslednjo zvezo

$$\frac{C_i}{C_{\xi}^2} = \frac{C_i}{1,16^2 \cdot C_i^2} = \frac{0,7432}{C_i}, \quad (60)$$

ki jo v odvisnosti od stopnje mešanja prikažemo v tabeli 7.

Faktor β je definiran z razmerjem molekularne mase plina pred zgorevanjem proti molekular-

ni masi nastalih dimnih plinov po zgorevanju brez upoštevanja disociacije

$$\beta = \frac{\rho_{RPM}}{\rho_{dp}} \quad (61)$$

in je prav tako podan v tabeli 7.

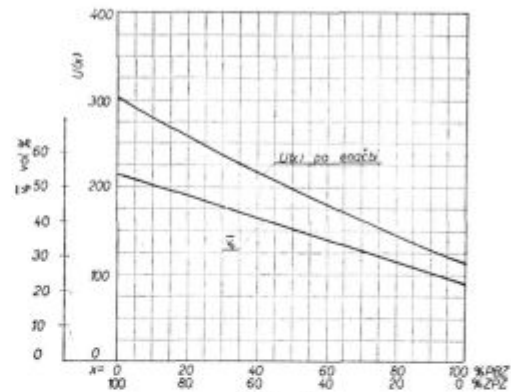
Odvisnost reducirane dolžine plamena od razmernika zraka podana z enačbo (55) je prikazana v tabeli 8 za razne modele zgorevanja.

Na sliki 6 in 7 prikažemo grafično vpliv sestave in razmernika zraka na reducirano dolžino plamena.

Na slikah 8 in 9 prikažemo odvisnost reducirane dolžine plamena za različna modela zgorevanja in določeno sestavo rezultirajoče plinske mešanice.

Na sliki 10 prikažemo za določeno rezultirajočo plinsko mešanico vpliv upoštevanja stopnje disociacije na reducirano dolžino plamena.

Iz slike 6 je razviden vpliv sestave rezultirajoče plinske mešanice na dolžino plamena in faktorja, ki upoštevatata porazdelitev hitrostnega profila. Ta nam nekoliko ukrivi premico vpliva sestave in



Slika 6
Vpliv spremembe sestave na reducirano dolžino plamena po enačbi (54)

Fig. 6
Influence of the changed composition on the reduced flame length according to equation (54)

za tehnične izračune lahko ta vpliv zanemarimo. Vpliv razmernika zraka se izraža preko adiabat-ske temperature zgorevanja, ki nam popači krivuljo sorazmerno s potekom krivulje za adiabat-sko

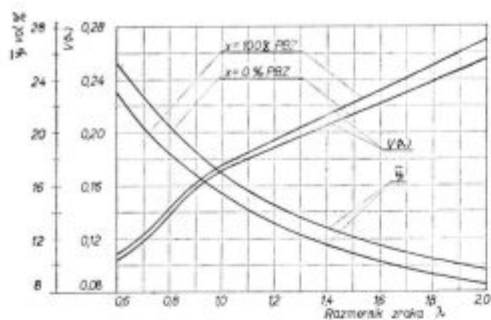
Tabela 7 — Vpliv spremembe sestave rezultirajoče plinske mešanice na reducirano dolžino plamena, definiran s faktorjem $U(x)$.

$\dot{Q} = 83\,721\text{ W}$, $d = 0,01\text{ m}$ parametri gorilnika

Stopnja mešanja	R_c	n	K_1	K_2	c_1	\bar{v}_0	β	$U(x)$
% PBZ								
0	39 392	7,750	0,832	0,704	0,072	53,556	0,812	304,14
10	40 682	7,780	0,833	0,705	0,072	50,447	0,852	279,83
20	41 907	7,807	0,833	0,706	0,071	47,336	0,890	260,35
30	43 087	7,832	0,834	0,706	0,071	44,227	0,927	238,65
40	44 223	7,856	0,834	0,707	0,071	41,117	0,969	216,85
50	45 325	7,878	0,834	0,708	0,070	38,007	1,010	199,00
60	46 405	7,900	0,835	0,708	0,070	34,897	1,050	179,41
70	47 438	7,920	0,835	0,709	0,069	31,787	1,088	162,75
80	48 437	7,939	0,836	0,709	0,069	28,678	1,126	144,45
90	49 411	7,957	0,836	0,710	0,068	25,568	1,166	128,38
100	50 363	7,974	0,836	0,710	0,068	22,458	1,204	110,96

Tabela 8 — Vrednost enačbe (55) za različne razmernike zraka in stopnjo disociacije dimnih plinov

Razmer-nik λ	Brez disociacije			Delna disociacija			Popolna disociacija		
	$x = 0$	$x = 0$	$x = 0$	$x = 50$	$x = 50$	$x = 50$	$x = 100$	$x = 100$	$x = 100$
0,6	0,1039	0,1066	0,1088	0,1045	0,1069	0,1088	0,1048	0,1063	0,1085
0,8	0,1379	0,1405	0,1425	0,1386	0,1407	0,1425	0,1388	0,1402	0,1423
1,0	0,1722	0,1746	0,1706	0,1688	0,1702	0,1718	0,1681	0,1698	0,1712
1,2	0,1901	0,1928	0,1952	0,1887	0,1913	0,1925	0,1883	0,1910	0,1930
1,4	0,2071	0,2101	0,2128	0,2056	0,2086	0,2111	0,2062	0,2092	0,2116
1,6	0,2233	0,2267	0,2296	0,2227	0,2256	0,2283	0,2224	0,2258	0,2284
1,8	0,2389	0,2426	0,2457	0,2376	0,2418	0,2448	0,2380	0,2417	0,2445
2,0	0,2541	0,2580	0,2613	0,2528	0,2567	0,2600	0,2532	0,2571	0,2601

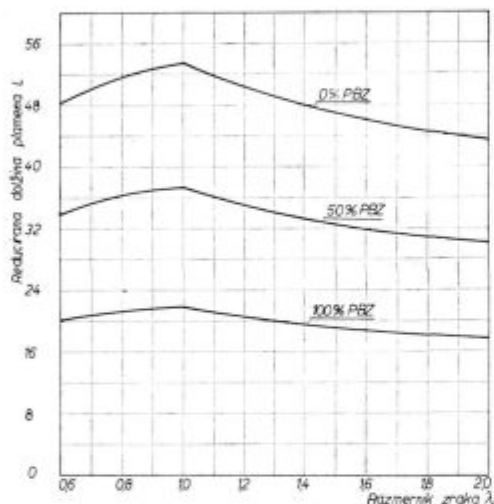


Slika 7

Vpliv razmernika zraka na reducirano dolžino plamena po enačbi (55) za konstantno sestavo rezultirajoče plinske mešanice

Fig. 7

Influence of the air ratio on the reduced flame length by equation (55) for the constant composition of the resulting gas mixture

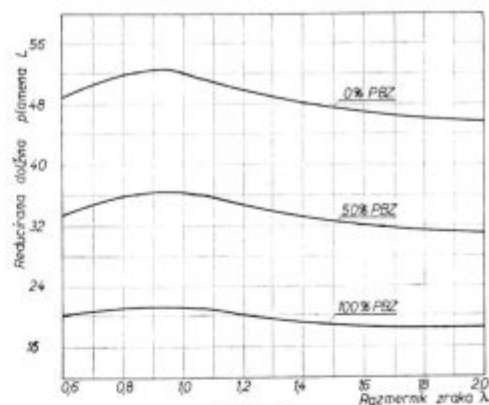


Slika 8

Reducirana dolžina plamena za model zgorevanja brez upoštevanja disociacije za različne stopnje mešanja rezultirajoče plinske mešanice

Fig. 8

Reduced flame length for the combustion model without taking in account the dissociation at various degrees of mixing the resulting gas mixture

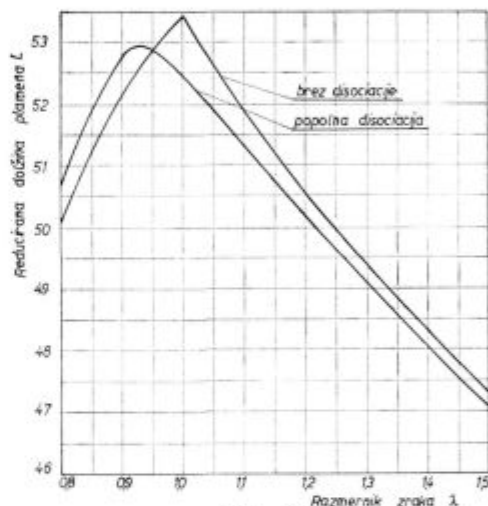


Slika 9

Reducirana dolžina plamena za model zgorevanja z upoštevanjem popolne disociacije dimnih plinov za različne stopnje mešanja rezultirajoče plinske mešanice

Fig. 9

Reduced flame length for the combustion model taking in account the complete dissociation of flue gases at various degrees of mixing the resulting gas mixture



Slika 10

Sprememba reducirane dolžine plamena v odvisnosti od stopnje upoštevanja disociacije za rezultirajočo plinsko mešanico zemeljski plin - zrak

Fig. 10

Change of reduced flame length depending on the degree of consideration of dissociation for the resulting natural gas - air mixture

temperaturo zgorevanja, kot je tudi razvidno iz slik 8 in 9. Krivulje reducirane dolžine plamena potekajo podobno kot krivulje adiabatne temperature zgorevanja, samo da je vpliv razmernika zraka in stopnja upoštevanja disociacije manjša, kar je razvidno iz slike 10.

Literatura

- Schmidt E.: Einführung in die Technische Thermodynamik, 10. Auf., (Berlin/Göttingen/Heidelberg), Springer-Verlag 1963.
- Grumbt A.: Gleichgewichtsgase der Verbrennung und Vergasung, 1. Auf., (Berlin/Göttingen/Heidelberg), Springer-Verlag 1958.

- Schuster F.: Energetische Grundlagen der Gastechnik, 2. Auf., (Halle), Verlag von Wilhelm Knapp 1950.
- Kremer H., Becker A., Skunca J.: »Vergleich exakter und vereinfachter verfahren zur Berechnung der Gleichgewichtszusammensetzung und der adiabaten Flammtemperaturen« GWI, Bd. 26 (1977), Nr. 5, str. 232-238.
- Landau L., Lifšič M.: Mehanika neprekidnih sredina, 2. izdanje, (Beograd) Građevinska knjiga 1965.
- Vidav I., Bohte Z.: Višja matematika III, 5. izdaja, (Ljubljana), Državna založba Slovenije 1976.
- Sicherl B., Vodeb D.: »Problematika zamenljivosti kurilnih plinov v industriji, I. del«, Zelezarski zbornik, 10 (1976), šte. 4, str. 16-22
- Vodeb D., Gašperšič B., Sicherl B.: »Matematični model plinskega gorilnika«, Zelezarski zbornik, 11 (1977), šte. 4, str. 183-195.

UPORABLJENE OZNAKE

A_{ij} — število atomov elementa j v komponenti i
 A — konstanta enačbe
 a_i — koeficient interpolacijskega polinoma
 a_j — koeficient interpolacijske enačbe
 B — konstanta enačbe
 b_i — koeficient interpolacijskega polinoma
 b_j — koeficient interpolacijske enačbe
 c_d — dejanska srednja molna specifična toplota kJ/kmol K
 c_{pi} — srednja molna specifična toplota komponent dimnih plinov kJ/kmol K
 c_i — koeficient interpolacijskega polinoma; prenosni koeficient impulza
 c_j — koeficient interpolacijske enačbe
 C_i — prenosni koeficient mase
 D — konstanta enačbe
 d — premer plinske šobe m
 d_i — koeficient interpolacijskega polinoma
 d_j — koeficient interpolacijske enačbe
 f — oznaka funkcije
 H — kurilnost plinske mešanice kJ/kmol
 H_d — kurilnost plinske mešanice zmanjšana za vrednost neizgorelih komponent v dimnih plinih kJ/kmol
 H_i — kurilnost neizgorelih komponent v dimnih plinih kJ/kmol
 i, k — števec sumiranja
 K_c — ravnotežna konstanta atomarnega ogljika (amorfn oblika)
 K_{CO} — ravnotežna konstanta ogljikovega monoksida
 K_H — ravnotežna konstanta atomarnega vodika
 K_{H_2} — ravnotežna konstanta vodika
 K_N — ravnotežna konstanta atomarnega dušika
 K_{NO} — ravnotežna konstanta dušikovega oksida
 K_O — ravnotežna konstanta atomarnega kisika
 K_{OH} — ravnotežna konstanta OH skupine
 K_w — ravnotežna konstanta CO in H_2O
 K_1 — koeficient porazdelitve hitrosti na izstopu iz gorilnika
 K_2 — koeficient porazdelitve impulza na izstopu iz gorilnika
 l — število gorljivih komponent v plinski mešanici
 L — reducirana dolžina plamena
 m_i — molekularna masa komponent dimnih plinov kmol
 m_{CO} — molekularna masa ogljikovega monoksida kmol
 m_{CO_2} — molekularna masa ogljikovega dioksida kmol
 m_{H_2O} — molekularna masa vodne pare kmol
 m_{N_2} — molekularna masa dušika kmol
 m_{O_2} — molekularna masa kisika kmol
 n — število komponent dimnih plinov, eksponent parabolične porazdelitve hitrosti
 P_c — atomski tlak ogljikovih atomov P_α
 P_H — atomski tlak vodikovih atomov P_α
 P_N — atomski tlak dušikovih atomov P_α
 P_O — atomski tlak kisikovih atomov P_α
 p_c — parcialni tlak atomarnega ogljika P_α
 p_{CO} — parcialni tlak ogljikovega monoksida P_α
 p_{CO_2} — parcialni tlak ogljikovega dioksida P_α

p_H — parcialni tlak atomarnega vodika P_α
 p_{H_2} — parcialni tlak vodika P_α
 p_{H_2O} — parcialni tlak vodne pare P_α
 p_N — parcialni tlak atomarnega dušika P_α
 p_{NO} — parcialni tlak dušikovega oksida P_α
 p_{N_2} — parcialni tlak dušika P_α
 p_O — parcialni tlak atomarnega kisika P_α
 p_{O_2} — parcialni tlak kisika P_α
 p_{OH} — parcialni tlak OH skupine P_α
 p_i — parcialni tlak komponent dimnih plinov P_α
 Σp — atmosferski tlak P_α
 P_i — atomski tlak
 PBZ — plinska mešanica propan-butan — zrak
 R_e — Reynoldsovo število
 R_{μ} — splošna plinska konstanta kJ/kmol K
 T — temperatura K
 t_s — temperaturna diferenca $^{\circ}C$
 T_a — adiabatna temperatura zgorevanja K
 T_g — temperatura goriva K
 T_o — temperatura okolice K
 T_r — temperatura zraka K
 $U(x)$ — funkcijska odvisnost reducirane dolžine plamena od sestave plina
 $V(x)$ — funkcijska odvisnost reducirane dolžine plamena od razmernika zraka
 v_p — volumensko razmerje gorljivega v coni zgorevanja vol %
 v_i — volumensko razmerje gorljivega na izstopu iz gorilnika vol %
 \bar{v}_{pi} — volumensko razmerje gorljivih komponent plinske mešanice vol %
 v_1 — volumensko razmerje kisika v plinski mešanici vol %
 v_2 — volumensko razmerje dušika v plinski mešanici vol %
 w — hitrost m/s
 Z — zrak za zgorevanje, število atomov
 x — delež PBZ v rezultirajoči plinski mešanici %
 \dot{Q} — topli tok W
 β — razmerje molekularnih mas plina pred zgorevanjem in nastalih dimnih plinov
 θ — oznaka temperature v interpolacijskem polinomu
 λ — razmernik zraka
 Σ — vsota
 μ_p — molekularna masa plina v coni zgorevanja kJ/kmol
 μ_{dp} — molekularna masa dimnih plinov kJ/kmol
 ρ — gostota kg/m³
 η — dinamična viskoznost kg/ms

INDEKSI

min — minimalna vrednost
 o — okolica
 a — adiabatna
 p — plinska mešanica, pri konstantnem tlaku
 dp — dimni plini
 g — gorivo
 Z — zrak
 d — dejanski

ZUSAMMENFASSUNG

Die Einführung der rechnergesteuerten Gasöfen für das Erwärmen und Glühen verlangt ein exaktes Kenntnis der einzelnen Einflussparameter beim Verbrennungsvorgang und Wärmeübergang im Ofen. Für den Fall der Heizung der Gasöfen mit einer Gasmischung deren Zusammensetzung sich zeitweise ändert und wird im Hüttenwerk Ravne praktisch eintreten, ist der Einfluss der Dissoziation auf die adiabatische Verbrennungstemperatur und die Flammenlänge für einen Gasbrenner ohne Gas und Luftvormischung bearbeitet worden. Aus den erhaltenen Ergebnissen, welche den Grund für die weitere Analyse der Wärmeübertragung im Ofen bilden, ist der Einfluss der Dissoziation auf die Genauigkeit der ausgerechneten Werte der adiabatischen Verbrennungstemperatur bestimmt worden. Die rechnerischen Beispiele sind für die Verbrennung der Gasmischung Erdgas — Luft oder Propan-butan — Luft beim Luftverhältnis $\gamma \approx 1$ bearbeitet worden.

Im ersten Teil sind die mathematischen Algorithmen für die Ausrechnung der adiabatischen Verbrennungstemperatur für drei verschiedene Verbrennungsmodelle bestimmt worden.

— ohne Berücksichtigung der Dissoziation der Abgase

— teilweise Berücksichtigung der Dissoziation der Abgase

— vollständige Berücksichtigung der Dissoziation der Abgase

Die Werte für die spezifische Molwärme und die Gleichgewichtskonstanten sind für die rechnerische Anwendung mit der Hilfe des interpolations Polynomes ausgedrückt. Die Koeffiziente der Interpolationspolynomen sind für den Verbrennungstemperaturbereich der Gasmischungen ausgerechnet worden.

Für die veränderliche Zusammensetzung der Gasmischung im Hüttenwerk Ravne ist die adiabatische Verbrennungstemperatur für die aufgebauten Verbrennungsmodelle ausgerechnet worden.

Im letzten Teil ist der Einfluss der adiabatischen Verbrennungstemperatur auf die Länge der Diffusionsflamme dargestellt.

SUMMARY

Introduction of the computer control of heating and annealing furnaces heated by gas demand accurate knowledge of single influences on the phenomena in combustion and in heat transfer in the furnace. When a furnace is heated by a gas mixture which composition varies with a time the influence of dissociation on the adiabatic temperature of combustion and on the flame length in gas burner without premixing of gas and air must be known. Such a case will be in the Ravne Ironworks and the paper presents such a calculation. From the obtained results which are the basis for further analysis of heat transfer in the furnace, the influence of dissociation on the accuracy of calculated values for adiabatic combustion temperatures is determined. Calculations are presented for combustion of natural gas — air or propane-buthane $\gamma \approx 1$ air mixtures with air ratios.

In the first part, mathematical algorithms for calculation of the adiabatic combustion temperature are presented for three different models of combustion:

— without taking in account the dissociation of flue gases

— partially taking in account the dissociation of flue gases

— taking in account the dissociation of flue gases

Values of specific molar heat and equilibrium constants are expressed by interpolation polynoms applicable for the computer treatment. Coefficients of the interpolation polynoms are calculated for the temperature region of combustion of gas mixtures.

Abiatic combustion temperature by the proposed models is calculated also for varying composition of gas mixture in Ravne Ironworks.

The last part of the paper presents the influence of the adiabatic combustion temperature on the length of diffusion flame.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Введение вычислительной системы управления газовых нагревательных и отжигательных печей требует солидное знание отдельных влияний на процесс горения и на выделение теплоты в печи. На примере нагрева газовых печей с газовой смесью, состав которой меняется по времени, что практически наступит в металлургическом заводе Железарна Равне, разработано влияние диссоциации на адиабатическую температуру згорания и на длину пламени газовой горелки без предварительного перемешивания газа и воздуха. Из полученных результатов, которые представляют собой базис для дальнейших исследований передачи теплоты в печи, определены влияние диссоциации на точность вычисленных значений адиабатических температур згорания. Примеры вычисления разработаны для згорания газовой смеси природный газ-воздух или пропан-бутан газ-воздух при отношении воздуха $\gamma \approx 1$. В первой части работы определены математические алгоритмы для вычисления адиабатической температуры згорания для трёх моделях згорания, т. е.:

— без учета диссоциации дымовых газов,

— с частичным учетом диссоциации дымовых газов,

— при полном учете диссоциации дымовых газов.

Значения для удельной молярной теплоёмкости и констант равномерности определены при помощи интерполяционного полинома. Коэффициенты интерполяционных полиномов вычислены для диапазон температур згорания смеси газов. Для переменного состава газовой смеси в металлургическом заводе Железарна Равне выполнено вычисление адиабатической температуры згорания для предложенных моделей згорания.

В конце работы рассмотрено влияние адиабатической температуры на длину диффузионного пламени.