

Matematičen model plinskega gorilnika

UDK: 662.75:662.76:662.9

ASM/SLA: RM-m

Dušan Vodeb, B. Gašperšič, B. Sicherl

UVOD

Pri iskanju optimalne rešitve za uvedbo zemeljskega plina smo prišli do zaključka, da moramo poleg glavnih fizikalnih parametrov osnovnih plinskih mešanic upoštevati tudi spremembe na plamenu. S spreminjanjem sestave plinske mešanice, ki jo vodimo na plinski gorilnik, se nam spreminjata dolžina plamena in temperaturni profil, s tem pa prenos toplote v prostor, ki ga ogrevamo. Karakteristiko plamena lahko določimo na osnovi ustreznih meritev v plamenskem kanalu ali analitično.

Ker so meritve povezane z večjimi stroški, smo se odločili, da najprej postavimo matematični model za difuzijski plamen, ki ga dobimo na industrijskih gorilnikih brez predhodnega mešanja plina in zraka. Model smo potem potrdili z meritvami nekaterih karakterističnih točk plamena. S takšnim matematičnim modelom smo nato simulirali vsa možna stanja, ki lahko nastopijo pri kombiniranem kurjenju z zemeljskim plinom (ZP), in zamenljivo plinsko mešanico propan-butan-zrak (PBZ).

Dobljene rezultate smo uporabili za določevanje posameznih variant zamenjevanja ZP s PBZ in postavitev izhodišč za regulacijo peči pri kombiniranem kurjenju.

1.0 Osnovni tipi plinskih gorilnikov

Osnovna razdelitev plinskih gorilnikov je izdelana glede na izvedbo mešanja zraka in kurilnega plina. Plinske gorilnike delimo v dve osnovni skupini:¹

— plinske gorilnike s predmešanjem zraka in kurilnega plina (injektorski, vrtinčni, križni)

— plinske gorilnike brez predmešanja zraka in kurilnega plina (gorilniki s paralelnim pretokom).

Posamezne karakteristične vrste plinskih gorilnikov iz obeh osnovnih skupin so vidne v sli-

ki 1; omejili smo se na obliko plamena in osni temperaturni profil. Podatki so zbrani iz objavljenih rezultatov meritev.^{1, 2, 3, 4}

2.0 Izhodiščne enačbe matematičnega modela difuzijskega plamena

Zgorevanje plinastih goriv v kuriščih in zgovalnih komorah poteka v conah mešanja zaprtih turbulentnih curkov. Plameni v industrijskih agregatih so v glavnem difuzijskega tipa, zrak in kurilni plin prideta v dotik v polju mešanja zaradi laminarne in turbulentne difuzije. Pri predpostavki, da potekajo kemične reakcije zgorevanja v ozki coni, lahko zanemarimo vpliv kinetike zgorevanja in se difuzijsko zgorevanje omeji samo na razširjanje mase, toplote in impulza v prostem turbulentnem curku. Zgorevanje opišemo z Navier-Stokesovo enačbo, kontinuitetno enačbo in splošnimi enačbama za prenos toplote ter difuzijsko enačbo. Dobljeni sistem parcialnih diferencialnih enačb je analitično nerešljiv. Ta sistem poenostavimo in upoštevamo turbulenco prostega curka z Reichardtovo podobnostno teorijo razširjanja impulza in toplote. Enačbe prevedemo v sistem poenostavljenih parcialnih diferencialnih enačb, ki so analitično rešljive.

Na sliki 2 vidimo prosti turbulentni curek s karakterističnimi območji:

— cona jedra plamena s karakterističnim pre rezom I-I, ki se ohranja do dolžine $a \cong 4 d_0$

— prehodno območje s karakterističnim pre rezom II-II, ki se ohranja do dolžine $b \cong 8 d_0$

— območje podobnosti s karakterističnim prere zom III-III, ki se ohranja do dolžine $c \cong (100 - 200) d_0$

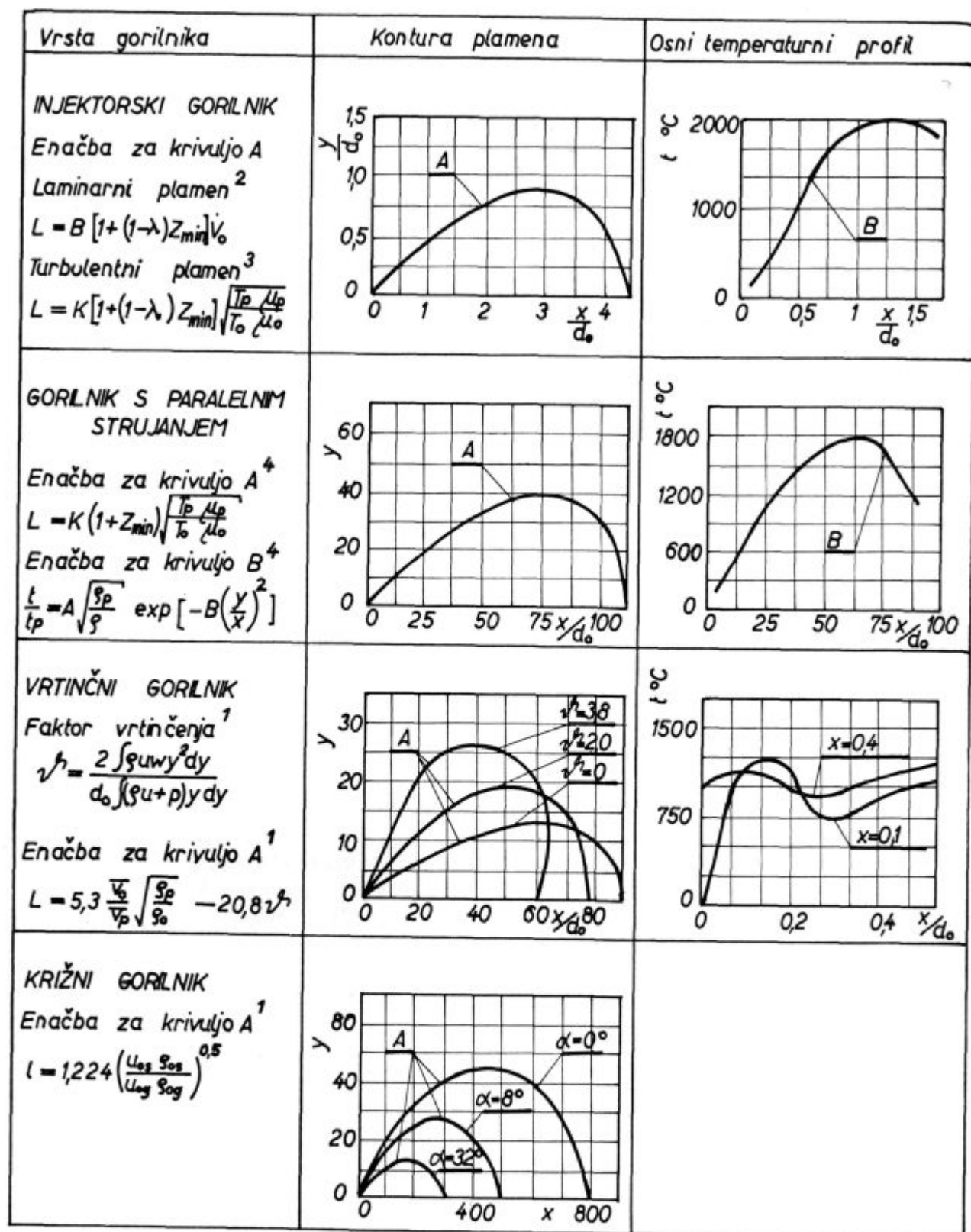
Za kurilno tehniko je najvažnejše območje podobnosti. V tem območju so si prečni profili za hitrost, koncentracijo in temperaturo med seboj podobni in se dajo opisati z Gaussovo funkcijo. Difuzijski plamen je okoli glavne osi osnosimetričen in obravnavamo enačbe za difuzijski plamen v cilindričnih koordinatah.

Navier-Stokesova enačba v cilindričnih koordinatah za smer x je⁵

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + w \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{w_\varphi}{y} \frac{\partial u}{\partial \varphi} + u \frac{\partial u}{\partial x} = f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\eta}{\rho} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{1}{y} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{y^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right] \quad (1)$$

mag. Dušan Vodeb, dipl. inž. strojništva je strokovni sodelavec v službi energetskega gospodarstva v Železarni Ravne
doc. dr. Branko Gašperšič dipl. inž. strojništva je predstojnik katedre za toplotno in procesno tehniko na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani

doc. dr. Bogdan Sicherl dipl. inž. metalurgije je predstojnik katedre za toplotno tehniko in energetiko VTO Montanistika, FNT Ljubljana

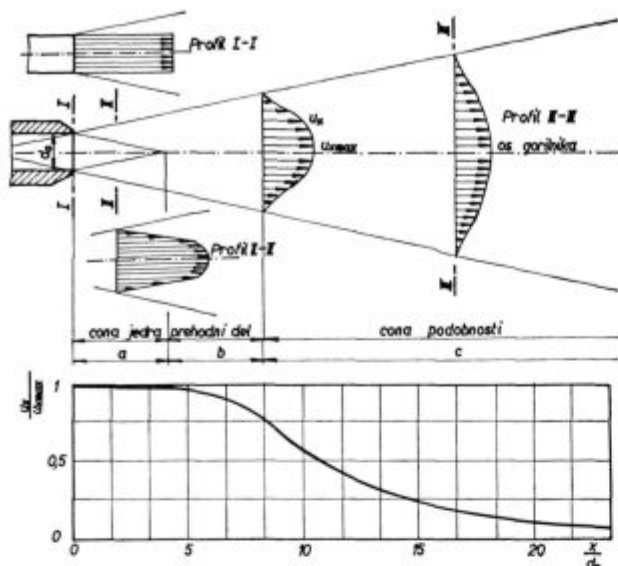


Slika 1

Tabelarni pregled konture plamena in temperaturnega profila za posamezne vrste plinskih gorilnikov

Fig. 1

Tabular review of flame contours and temperature distribution for various gas burners



Slika 2

Prosti turbulentni curek s karakterističnimi območji

Fig. 2

Free turbulent jet with characteristic regions

Kontinuitetna enačba za smer x se glasi

$$\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{w}{y} + \frac{1}{y} \frac{\partial w_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

Da sistem enačb (1), (2) lahko rešimo, uvedemo naslednje poenostavitve:

- zanemarimo težo curka,
- obravnavamo stacionarni proces zgorevanja,
- v industrijskih kuriščih, pečeh, je prerez curka proti prerezu kurilnega prostora majhen, zato predpostavimo, da je v kurilnem prostoru konstanten tlak,
- ne upoštevamo notranjih sil zaradi trenja,
- upoštevamo rotasimetričnost curka.

Na osnovi teh domnev dobimo enačbi (1) in (2) obliko

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} w = 0 \quad (3)$$

in

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{w}{y} = 0 \quad (4)$$

S seštevanjem enačb (3) in (4) dobimo osnovno enačbo razširjanja impulza v smeri gibanja curka

$$\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{1}{y} \frac{\partial(\rho u w y)}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

S podobnimi predpostavkami kot prej poenostavimo komponente osnovnih enačb prenosa toplote in masnega toka ter s seštevanjem s kontinuitetno enačbo dobimo enačbo razširjanja toplotnega toka v smeri gibanja curka

$$\frac{\partial(\rho u c_p t)}{\partial x} + \frac{1}{y} \frac{\partial(\rho w y c_p t)}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

in enačbo razširjanja masnega toka v smeri gibanja curka

$$\frac{\partial(\rho u \xi)}{\partial x} + \frac{1}{y} \frac{\partial(\rho w y \xi)}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

3.0 Rešitev osnovnih enačb

Osnovne enačbe (5), (6) in (7) rešimo analitično z upoštevanjem Reichardtove teorije podobnosti razširjanja impulza in toplote v prostem turbulentnem curku⁶.

Impulz v smeri glavne osi je:

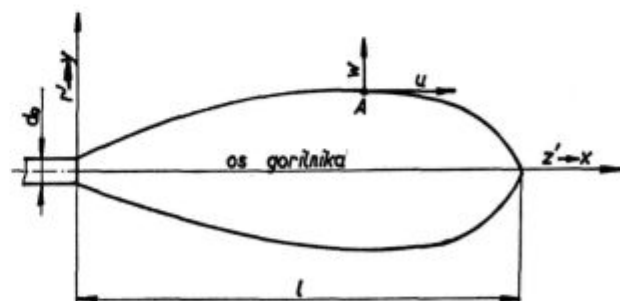
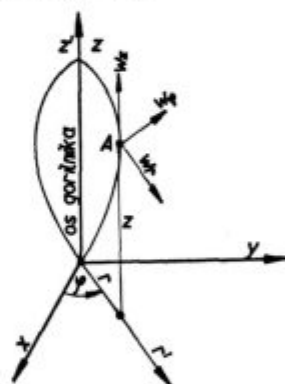
$$\rho u w = -\Lambda_i \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial y} \quad (8)$$

Prenosna funkcija impulza Λ_i je za osnosimetrični curek definirana s prenosnim koeficientom impulza c_i in oddaljenostjo od ustja gorilnika, torej

$$\Lambda_i = \frac{b_i}{2} \frac{db_i}{dx} = \frac{x c_i^2}{2} \quad (9)$$

pri čemer je mešalna širina curka enaka

$$b_i = x c_i = g_{2i} \quad (10)$$



Sprememba oznak za hitrost

$$\begin{aligned} w_x &\rightarrow u \\ w_r &\rightarrow w \\ w_\varphi &\rightarrow w_\varphi \end{aligned}$$

Slika 3

Cilindrični koordinatni sistem difuzijskega plamena

Fig. 3

Cylindrical coordinates for the diffusive flame

Če vstavimo enačbi (9) in (8) v enačbo (5), dobimo

$$\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{x c_i}{2} \frac{1}{y} \frac{\partial^2(\rho u^2)}{\partial y^2} = 0 \quad (11)$$

Pri prvem robnem pogoju moramo poznati začetno porazdelitev impulza g_{li} ; velja namreč

$$\rho u^2(0, y) = g_{li} \quad (12)$$

vpliv mešanja, pa vsebuje drugi robni pogoj

$$\rho u^2(x, 0) = g_{2i} = x c_i \quad (13)$$

Partikularna rešitev diferencialne enačbe (11) je⁷

$$\rho u^2 = \frac{1}{g_{li}} \exp\left[-\left(\frac{y}{g_{2i}}\right)^2\right] \quad (14)$$

Funkcijo začetne porazdelitve impulza določimo iz pogoja, da je impulz v celem polju mešanja konstanten

$$2\pi \int_0^{\infty} \rho u^2 y dy = 2\pi \int_0^{d_o/2} (\rho u^2)_o y dy \quad (15)$$

Z upoštevanjem enačbe (14) in pogoja, da je funkcija g_{2i} samo pozitivna, dobimo⁸

$$\frac{2\pi}{g_{li}} \int_0^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{y}{g_{2i}}\right)^2\right] y dy = \frac{2\pi}{g_{li}} \frac{g_{2i}^2}{2} \quad (16)$$

Iskana funkcija začetne porazdelitve impulza na izstopu iz gorilnika je potem

$$g_{li} = \frac{c_i^2 x^2}{2 \int_0^{d_o/2} (\rho u^2)_o y dy} \quad (17)$$

Enačbo (14) zapišemo v brezdimenzijski obliki tako, da jo delimo z vrednostjo impulznega toka na sredi izstopnega prereza gorilnika in upoštevamo izpeljano vrednost za funkcijo začetne porazdelitve impulza (17). Potem je

$$\frac{\rho u^2}{(\rho u^2)_{os}} = \frac{2}{c_i^2 x^2} \int_0^{d_o/2} (\rho u^2)_o y dy \exp\left[-\frac{1}{c_i^2} \left(\frac{y}{x}\right)^2\right] \quad (18)$$

V enačbi (18) rešimo integral tako, da upoštevamo potenčno teorijo porazdelitve hitrosti v cevi⁹, torej

$$\frac{u}{u_{os}} = \left(\frac{y}{r}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (19)$$

Povprečna hitrost plina na izstopu iz gorilnika je

$$u = \frac{1}{A} \int_A u dA = \frac{1}{A} \int_A u_{os} \left(\frac{y}{r}\right)^{\frac{1}{n}} dA \quad (20)$$

Če zanemarimo spremembo gostote plina v izstopnem prerezu $\rho_{os} = \rho_o = \rho$, zapišemo enačbo (20) glede na enačbo (18) v obliki

$$u_o^2 = \frac{1}{A} \int_A u_{os}^2 \left(\frac{y}{r}\right)^{\frac{2}{n}} dA = u_{so}^2 \frac{2n^2}{(n+2)(2n+2)} = k_2 u_{so}^2 \quad (21)$$

$$A = \pi r^2; dA = 2\pi y dy$$

Označimo še reducirani koordinati

$$X = \frac{x}{d_o} \text{ in } Y = \frac{y}{x} \quad (22)$$

Z vstavljanjem enačb (21) in (22) v enačbo (18) in z rešitvijo integrala v tej enačbi dobimo brezdimenzijsko enačbo za impulzni tok

$$\frac{\rho u^2}{(\rho u^2)_{os}} = \frac{k_2}{4 c_i^2 X^2} \exp\left[-\left(\frac{Y}{c_i}\right)^2\right] = a_2(X) b_2(Y) \quad (23)$$

Za enostavnejši zapis enačbe (23) uvedemo spremenljivki

$$a_2(X) = \frac{k_2}{4 c_i^2 X^2} \quad (24)$$

$$b_2(Y) = \exp\left[-\left(\frac{Y}{c_i}\right)^2\right] \quad (25)$$

ki upoštevata spremembo x -a in y -a.

Na popolnoma enak način izpeljemo iz osnovnih enačb za toplotni tok (6) in masni tok (7) brezdimenzijske enačbe. Pri tem smo vzeli, da je v izstopnem prerezu konstantna masna koncentracija, specifična toplota, temperatura in gostota plina, spreminja se le izstopna hitrost.

Ker je hitrost v enačbah (6) in (7) v linearnem razmerju, izračunamo faktor razmerja hitrosti v izstopnem prerezu po enačbah (19) in (20) in dobimo

$$u_o = u_{os} \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} = k_1 u_{os} \quad (26)$$

Brezdimenzijska enačba za masni tok se potem glasi

$$\frac{\rho u \xi}{(\rho u \xi)_{os}} = \frac{k_1}{4 c_\xi^2 X^2} \exp\left[-\left(\frac{Y}{c_\xi}\right)^2\right] = a_1(X) b_1(Y), \quad (27)$$

in za toplotni tok je

$$\frac{\rho u c_p t}{(\rho u c_p t)_{os}} = \frac{k_1}{4 c_t^2 X^2} \exp\left[-\left(\frac{Y}{c_t}\right)^2\right] = a_1(X) b_1(Y) \quad (28)$$

V enačbah (27) in (28) smo upoštevali z

$$a_1(X) = \frac{k_1}{4 c_\xi^2 X^2} = \frac{k_1}{4 c_t^2 X^2} \quad (29)$$

in

$$b_1(Y) = \exp\left[-\left(\frac{Y}{c_\xi}\right)^2\right] = \exp\left[-\left(\frac{Y}{c_t}\right)^2\right] \quad (30)$$

spremembo x -a in y -a.

V enačbah (23), (27) in (28) nastopajo prenosni koeficienti za impulz c_i , maso c_ξ in toploto c_t , ki jih določimo eksperimentalno.

Prenosni koeficienti so odvisni od razmerja gostot med nosilnim plinom in plinom okolice. Za območje razmerja gostot⁴

$$0,069 \leq \frac{\rho}{\rho_{ok}} \leq 3,3 \quad (31)$$

je prenosni koeficient impulza

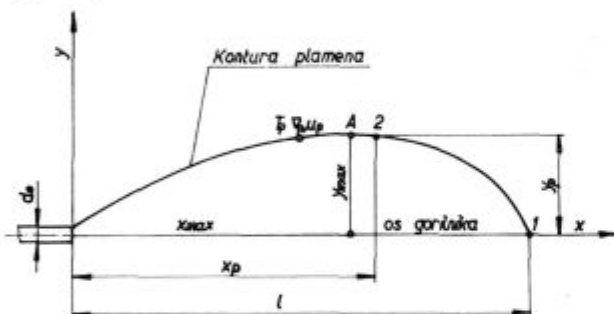
$$c_i = 0,070 - 0,0103 \ln\left(\frac{\rho}{\rho_{ok}}\right) - 0,00184 \ln^2\left(\frac{\rho}{\rho_{ok}}\right) \quad (32)$$

Prenosni koeficient mase je enak prenosnemu koeficientu toplote, oba pa potekata enako kot prenosni koeficient impulza, samo da sta po vrednosti večja. Med njimi je zveza⁴

$$c_\xi = c_t = 1,16 c_i \quad (33)$$

4.0 Izračun konture in dolžine plamena

Na sliki 4 vidimo obliko difuzijskega plamena z vsemi oznakami, ki jih bomo v nadaljevanju uporabljali.



Slika 4
Kontura plamena z oznakami

Fig. 4
Flame contour with symbols

Za izračun konture in dolžine plamena upoštevamo še naslednji dve predpostavki:

— hitrost kemičnih reakcij zgorevanja je veliko večja od hitrosti mešanja plina in zraka, zgorevanje poteka v ozkem sklenjenem pasu, ki določa konturo plamena⁵;

— reakcijska cona zgorevanja ima povsod temperaturo T_p ⁴.

Splošna zveza med masnim in volumskim razmerjem je

$$\frac{\xi}{\xi_0} = \frac{\bar{v}}{\bar{v}_0} \frac{\mu_0}{\mu} = \frac{\bar{v}}{\bar{v}_0} \frac{\mu_{dp}}{\mu_0} \frac{\mu_0}{\mu} = \frac{\bar{v}}{\bar{v}_0} \beta \frac{\mu_{dp}}{\mu} \quad (34)$$

V enačbi (34) smo uvedli faktor β , to je koeficient razmerja molekularne mase plina pred zgorevanjem proti molekularni masi nastalih dimnih plinov po zgorevanju in je za posamezne pline konstanten.

Masno razmerje je določeno tudi z brezdimenzijsko enačbo (27) in (23) ter je

$$\frac{\xi}{\xi_0} = \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} \frac{a_1(X) b_1(Y)}{\sqrt{a_2(X) b_2(Y)}} \quad (35)$$

Z izenačitvijo enačb (34) in (35) in z upoštevanjem zveze med gostoto in temperaturo po plinski enačbi dobimo volumsko razmerje

$$\frac{\bar{v}}{\bar{v}_0} = \sqrt{\frac{1}{\beta} \frac{\mu}{\mu_{dp}} \frac{T}{T_0}} \frac{a_1(X) b_1(Y)}{\sqrt{a_2(X) b_2(Y)}} \quad (36)$$

Po sliki 4 označimo veličine, ki leže na konturi plamena z indeksom p in če zapišemo enačbo (36) za točko 1, dobimo

$$\frac{\bar{v}}{\bar{v}_0} = \sqrt{\frac{1}{\beta} \frac{\mu_p}{\mu_{dp}} \frac{T_p}{T_0}} \frac{a_1(L) b_1(O)}{\sqrt{a_2(L) b_2(O)}} \quad (37)$$

V enačbi (37) je člen, ki upošteva spremembo x in y , določen po enačbah (24), (25), (29) in (30), iz katerih sledi

$$\frac{a_1(L) b_1(O)}{\sqrt{a_2(L) b_2(O)}} = \frac{1}{2} \frac{k_1}{\sqrt{k_2}} \frac{c_i}{c_\xi^2} \frac{1}{L} \quad (38)$$

Če upoštevamo enačbo (37), je v enačbi (38) edina neznanica reducirana dolžina plamena L , ki jo lahko izrazimo

$$L = \frac{1}{2} \frac{k_1}{\sqrt{k_2}} \frac{c_i}{c_\xi^2} \frac{\bar{v}_0}{\bar{v}_p} \sqrt{\frac{1}{\beta} \frac{\mu_p}{\mu_{dp}} \frac{T_p}{T_0}} \quad (39)$$

Vpliv izstopne porazdelitve hitrosti na dolžino plamena je vsebovan v koeficientih k_1 in k_2 , oziroma v eksponentu. Z večanjem n se razmerje $k_1/\sqrt{k_2}$ približuje 1 in s tem se zmanjšuje vpliv na dolžino plamena.

Vpliv difuzije je vsebovan v prenosnem koeficientu c_i , ki je odvisen od razmerja gostot med nosilnim plinom in plinom okolice.

Z večanjem prenosnega koeficienta impulza c_i se plamen krajša, ker je c_i obratno sorazmeren z dolžino plamena. Z naraščanjem razmerja gostot med nosilnim plinom in plinom okolice se prenosni koeficient manjša, zato se poveča dolžina plamena. To si lahko razlagamo tako, da lažji okoliški zrak, ki je obenem oksidator, teže prodira v notranjost curka težjega kurilnega plina. Imamo počasno mešanje in zato daljši plamen.

Volumsko razmerje ima linearen vpliv na dolžino plamena. Večje kot je razmerje volumske koncentracije gorljivega na izstopu iz gorilnika $\bar{v}_0$ proti volumski koncentraciji v coni reakcije $\bar{v}_p$, daljši je plamen, ker plin potrebuje več časa, da se razredči z zrakom v zahtevano razmerje $\bar{v}_p$. Iz tega sledi, da bodo plameni s čistimi plini daljši kot njihove mešanice z zrakom, ki že vsebujejo pri izstopu iz ustja gorilnika določeno količino zraka. Temperatura zgorevanja vpliva premosorazmerno na dolžino plamena

Višja je temperatura zgorevanja, daljši je plamen. Temperatura plina na izstopu iz gorilnika pa je obratno sorazmerna z dolžino plamena. S pregrevanjem plina krajšamo plamen.

Enačbo konture plamena dobimo z izenačitvijo enačb (37) in (36), ki ju zapišemo za točko 2 na poljubnem mestu na konturi, slika 4. S krajšanjem in z upoštevanjem zvez po enačbah (24), (25), (29) in (30) dobimo

$$Y_p = \frac{y_p}{x_p} = \sqrt{\frac{2c_1^2 - c_\xi^2}{2c_1^2 c_\xi^2}} \sqrt{\frac{L}{\ln X}} \quad (40)$$

Iz enačbe (38) dobimo z odvajanjem po x maksimalno debelino plamena $y_{\max}$ in dolžino $x_{\max}$, torej

$$\frac{dy_p}{dx} = \frac{d}{dx} \left(x_p \sqrt{\frac{2c_1^2 - c_\xi^2}{2c_1^2 c_\xi^2}} \sqrt{\ln \frac{1}{X}} \right) = 0 \quad (41)$$

oziroma

$$y_{p\max} = l \sqrt{\frac{2c_1^2 c_\xi^2}{2c_1^2 - c_\xi^2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\right) \quad (42)$$

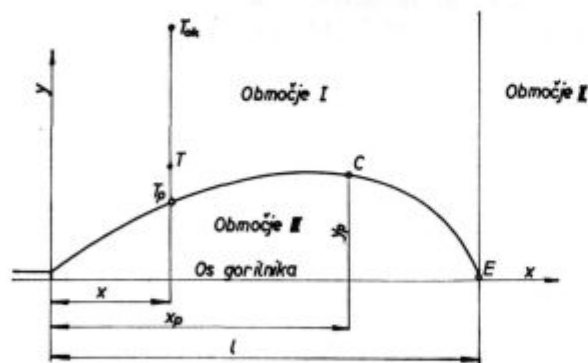
in

$$x_{p\max} = l \exp\left(-\frac{1}{2}\right) \quad (43)$$

5.0 Izračun temperaturnega profila difuzijskega plamena

Temperaturno polje razdelimo na tri območja, kot je prikazano na sliki 5. Za vsako območje posebej izpeljemo enačbo za popis temperaturnega profila.

Osnovno enačbo za popis temperaturnega polja dobimo iz enačbe (28). Zanimarimo spre-



Območje I $y_p < y < \infty$ $0 < x < l$

Območje II $0 < y < \infty$ $l < x < \infty$

Območje III $0 < y < y_p$ $0 < x < l$

Slika 5

Razdelitev temperaturnega polja plamena na posamezna območja

Fig. 5

Division of the flame temperature field on single regions

membo specifične toplote, temperature in gostote na izstopnem prerezu: $c_{pos} = c_{po} = c_p$, $t_{os} = t_o$ in $\rho_{os} = \rho_o$. Potem je razmerje temperatur

$$\frac{t}{t_o} = \sqrt{\frac{\rho_o}{\rho}} \frac{a_1(X) b_1(Y)}{\sqrt{a_2(X) b_2(Y)}} \quad (44)$$

Temperaturno polje za območje I je definirano z mejami

$$y_p \leq y \leq \infty \quad 0 \leq x \leq l$$

V oddaljenosti x od ustja gorilnika zapišemo osnovno enačbo za popis temperaturnega polja za točko na konturi plamena, ki ima temperaturo T_p in poljubno točko s temperaturo T

$$\frac{t}{t_p} = \frac{T - T_{ok}}{T_p - T_{ok}} = \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho}} \frac{a_1(X) b_1(Y_p)}{\sqrt{a_2(X) b_2(Y_p)}} \quad (45)$$

V enačbi (45) imamo dve neznanki, temperaturo in gostoto. Zvezo med temperaturo in gostoto dobimo po plinski enačbi, ker je

$$\frac{\rho_p}{\rho} = \frac{T}{T_p} \quad (46)$$

Če rešimo postavljeni sistem dveh enačb (45) in (46) z dvema neznankama, dobimo kvadratno enačbo

$$\frac{\rho_p}{\rho} - \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho}} \frac{a_1(X) b_1(Y_p)}{\sqrt{a_2(X) b_2(Y_p)}} \left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_{ok}}\right) - \frac{\rho_p}{\rho_{ok}} = 0 \quad (47)$$

Z upoštevanjem enačb (24), (25), (29) in (30) je rešitev kvadratne enačbe za iskano razmerje gostot

$$\frac{\rho_p}{\rho} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_{ok}}\right) V(Y) \cdot \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4 \frac{\rho_p}{\rho_{ok}}}{\left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_{ok}}\right)^2} V^2(Y)}\right] \quad (48)$$

Če vstavimo enačbo (48) v osnovno enačbo za popis temperaturnega polja (45), dobimo:

$$\frac{T - T_{ok}}{T_p - T_{ok}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_{ok}}\right) V^2(Y) \cdot \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4 \frac{\rho_p}{\rho_{ok}}}{\left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_{ok}}\right)^2} V^2(Y)}\right] \quad (49)$$

V zgornjih enačbah smo označili z V izraz

$$V = \exp\left(\frac{1}{c_\xi^2} - \frac{1}{2c_1^2}\right) (Y_p^2 - Y^2) \quad (50)$$

Na enak način določimo enačbe za popis temperaturnega polja v območju II in območju III. Navedemo samo končne rezultate.

Enačba za popis temperaturnega polja II je

$$\frac{T - T_{ok}}{T_p - T_{ok}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_{ok}} \right) H^2(X) V^2(Y) \cdot \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4 \frac{\rho_p}{\rho_{ok}}}{\left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_{ok}} \right)^2 H^2(X) V^2(Y)}} \right] \quad (51)$$

Pri tem je

$$H(X) V(Y) = \frac{L}{X} \exp \left[- \left(\frac{1}{c_\xi^2} - \frac{1}{2 c_i^2} \right) Y^2 \right] \quad (52)$$

Zanima nas potek temperature v osi gorilnika od točke E dalje, slika 5. V tem primeru se nam spremeni samo izraz (52), $y = 0$ in imamo

$$\left[\frac{T - T_{ok}}{T_p - T_{ok}} \right]_s = \frac{1}{2} \left(\frac{L}{X} \right)^2 \left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_{ok}} \right) \cdot \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4 \frac{\rho_p}{\rho_{ok}}}{\left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_{ok}} \right)^2 \left(\frac{L}{X} \right)^2}} \right] \quad (53)$$

Za izračun enačbe za popis temperaturnega polja III moramo upoštevati nasesavanje okoljskega plina v curek. Osnovna enačba za ta primer je

$$\frac{T - T_o}{T_p - T_o} = \frac{1 - \sqrt{\frac{\rho_o}{\rho} H(X) V(Y)}}{1 - \sqrt{\frac{\rho_o}{\rho_p} H(X) V(Y)}} \quad (54)$$

Postopek rešitve je enak kot za območje I, navedemo samo rezultat

$$\frac{T - T_o}{T_p - T_o} = \frac{2 \left[1 - H(L) \frac{\rho_o}{\rho_p} \right] - \left(1 - \frac{\rho_o}{\rho_p} \right) H^2(X) V^2(Y) U}{2 \left[1 - H(L) \frac{\rho_o}{\rho_p} \right]^2} \quad (55)$$

Pri tem smo označili

$$U = 1 + \sqrt{1 + \frac{4 \left[1 - H(L) \frac{\rho_o}{\rho_p} \right] \left[\frac{\rho_o}{\rho_p} - H(L) \frac{\rho_o}{\rho_p} \right]}{\left(\frac{\rho_o}{\rho_p} - 1 \right)^2 H^2(X) V^2(Y)}} \quad (56)$$

$$H(L) = \frac{1}{2} \frac{k_1}{\sqrt{k_2}} \frac{c_1}{c_\xi^2} \frac{1}{L} \quad (57)$$

$$H(X) V(Y) = \frac{1}{2} \frac{k_1}{\sqrt{k_2}} \frac{c_1}{c_\xi^2} \frac{1}{X} \exp \left[- \left(\frac{1}{c_\xi^2} - \frac{1}{2 c_i^2} \right) Y^2 \right]$$

58

6.0 Zgradba matematičnega modela

V osnovi smo matematičen model zgradili iz dveh delov:

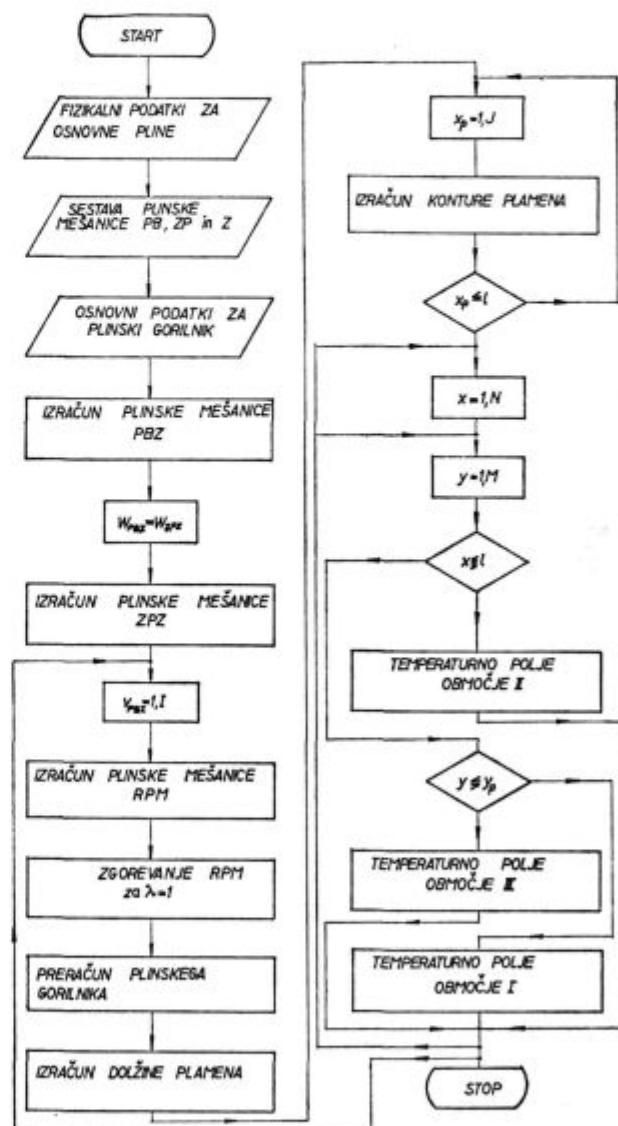
- izračun plinskih mešanic
- izračun difuzijskega plamena

Na sliki 6 je viden potek računanja z računalnikom.

Vstopne podatke, ki jih potrebujemo za izračun, razdelimo v tri skupine:

- Fizikalne vrednosti posameznih plinov (CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} , N_2 , O_2 , CO_2 , H_2O)
- Karakteristična sestava osnovnih plinov (zemeljski plin, propan-butan, zrak)
- Karakteristični podatki za plinski gorilnik

V prvem delu programa izračunamo lastnosti zahtevane plinske mešanice, s katero želimo ku-



Slika 6

Potek računanja v računalniku

Fig. 6

Way of calculation by the computer

riti na plinskem gorilniku s pogoji, ki smo jih dali v program kot karakteristične podatke za plinski gorilnik. Najprej določimo plinsko mešanico PBZ in k tej ustrezno plinsko mešanico ZPZ po kriteriju enakih Wobbejevih indeksov. Ko sta poznani obe osnovni plinski mešanici PBZ in ZPZ, določimo rezultirajočo plinsko mešanico RPM odvisno od stopnje medsebojnega mešanja, ki jo nato vodimo na plinski gorilnik. V tem delu poteka program po enačbah za izračun plinskih mešanic in za zgorevanje plinastih goriv. Edina posebnost je kriterij določitve najprimernejše plinske mešanice ZPZ plinski mešanici PBZ, kar pa je bilo že obdelano¹⁰.

Iz podatkov plinskega gorilnika in zahtevane toplotne obremenitve izračunamo tlak rezultirajoče plinske mešanice na gorilniku.

EkspONENT n , s katerim sta definirana koeficienta k_1 in k_2 , izračunamo po enačbi¹¹

$$n = 2,1 \log Re - 1,9 \quad (59)$$

V nadaljevanju izračunamo vse potrebne parametre za izračun dolžine plamena in temperaturnega profila.

Po izračunani dolžini plamena določimo konturo plamena tako, da teče x od nič do izračunane dolžine 1, kjer za vsak x določimo ordinato konture plamena y .

V končni fazi program izračuna temperaturno polje, kjer teče abscisa x od nič do neke zahtevane dolžine, ordinata y pa pri vsakokratni vrednosti x teče od 0 do željene vrednosti. Program za nastavljene koordinate določi območje, v katerem se nahaja podana točka in izračuna temperaturo v nastavljeni točki.

Program smo razvili v računskem centru železarne Ravne na računskem stroju IBM 375/135

Računski rezultati so vrisani v diagrame, ki so prikazani v zadnjem poglavju.

7.0 Meritve plinskega gorilnika

Za potrditev formulacije matematičnega modela difuzijskega plamena smo izvedli meritve na plamenskem kanalu v železarni Štore z dosegljivo plinsko mešanico PBZ. Za obstoječe kalorično in tlačno stanje plinske mešanice PBZ (kurilnost $33\,488 \text{ kJ/m}_n^3$, $p = 2943 \text{ N/m}^2$) smo merili karakteristične točke difuzijskega plamena, t.j.:

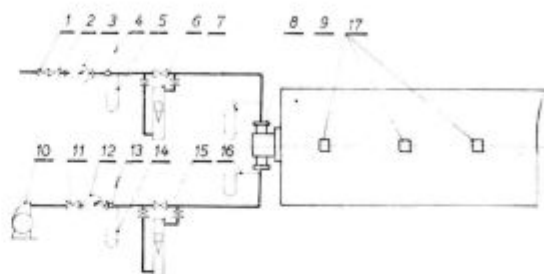
- dolžino
- konturo
- temperaturo plamena v osi gorilnika.

Z meritvami določene vrednosti smo primerjali z izračunanimi po matematičnem modelu za enako tlačno in kalorično stanje, ki smo ga imeli pri meritvah.

Na sliki 7 je prikazana shema plamenskega kanala z varnostno in merilno opremo. Kanal je

oskrbovan s plinsko mešanico PBZ, ki se uporablja v plinskem sistemu železarne.

V dovodnem cevovodu za plin sta vgrajena varnostni in reducirni ventil, ki je nastavljen. Varnostni ventil varuje preizkuševališče pred izpadi električne energije in okvarami pri dovodu plina. Z nastavljivim reducirnim ventilom nastavimo željeni tlak plinske mešanice PBZ, ki ga zahtevamo na plinskem gorilniku. Količine plinske mešanice (PBZ) in zraka so bile merjene



- | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 Zaporni ventil za plin | 9 Plamenski kanal |
| 2 Varnostni ventil za plin | 10 Ventilator za zrak |
| 3 Števec za merjenje pretoka plina | 11 Zaporni ventil za zrak |
| 4 Temperatura plina | 12 Števec za merjenje pretoka zraka |
| 5 Tlak plina | 13 Temperatura zraka |
| 6 Rotameter | 14 Tlak zraka |
| 7 Tlak plina na gorilniku | 15 Rotameter |
| 8 Plinski gorilnik | 16 Tlak zraka na gorilniku |
| | 17 Opazovalne odprtine |

Slika 7
Shema merilnega kanala

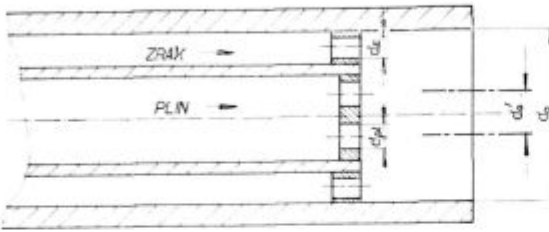
Fig. 7
Scheme of the measuring channel

s turbinskima merilnikoma pretoka (3, 12), ki sta vezana na registrator. Količino plina in zraka, posebno manjše pretoke, smo merili z rotametro (6, 15), ki sta vgrajena vzporedno na dovod plina in zraka. Tlake zraka in plinske mešanice smo merili s tekočinskimi U-cevnimi manometri.

Zrak za zgorevanje daje ventilator (10). Del zraka se pretaka skozi šobo v dimnik za ustvarjanje umetnega vleka v plamenskem kanalu. Plamenski kanal je iz pločevine in obzidan z opeko. Vzdušni osi gorilnika so na obeh straneh opazovalne odprtine (17), skozi katere opazujemo plamen in opravljamo meritve plamena. Kanal je priključen na dimnik. Izdelan je iz segmentov in po dolžini sestavljen, da lahko prilagajamo volumen kurišča, t.j. zgorevalnega prostora, kapaciteti merjenega gorilnika. V kanal sta v čelni strani vgrajena dva gorilnika, s pomočjo katerih lahko pred preizkušanjem ogrejemo kanal na željeno temperaturo obratovanja.

Temperatura plamena je merjena s fiksnimi in gibljivimi aspiracijskim termoelementom Pt-PtRH 18. Za hlajenje termoelementov je na zgornji strani napravljen razvod hladilne vode in komprimiranega zraka. Fiksni aspiracijski termoelementi so vgrajeni tako, da z njimi merimo temperaturo plamena po dolžini v fiksnih točkah v osi gorilnika.

Z gibljivim termoelementom lahko merimo temperature rotacijsko simetričnega plamena v osi gorilnika med posameznima fiksnima točkama in izmerimo temperaturni maksimum v osi plamena.



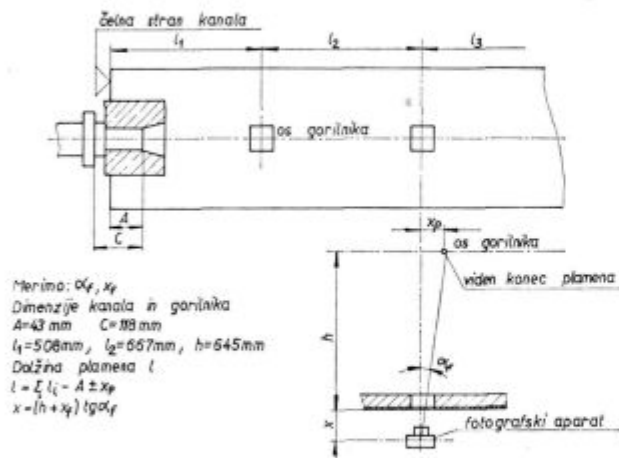
$d_{\text{pl}} = 8 \times 35 \text{ mm}$ $d_{\text{zr}} = 16 \times 50 \text{ mm}$ $d' = 10 \text{ mm}$
 $A_{\text{pl}} = 0,00007693 \text{ m}^2$ $A_{\text{zr}} = 0,0004071 \text{ m}^2$
 $\alpha_{\text{pl}} = 0,8814$ $\dot{Q} = 83721 \text{ W}$ pri $p_{\text{pl}} = 1980 \text{ N/m}^2$, $H = 25120 \text{ kJ/m}^3$

Slika 8
Ustje plinskega gorilnika
Fig. 8
Gas burner nozzle

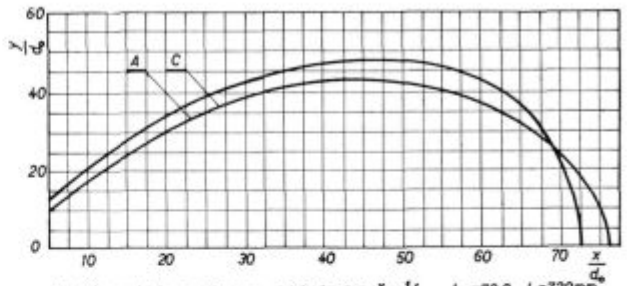
Merili smo plinski gorilnik, ki je prikazan na sliki 8. Po nastavitvi določene toplotne obremenitve gorilnika in razmernika zraka smo po vzpostavitvi stacionarnega stanja v kanalu začeli z meritvami karakterističnih vrednosti plamena.

Meritev dolžine plamena je shematično prikazana na sliki 9. S pomočjo zrcalno refleksne optike fotografskega aparata smo merili dolžino plamena, s tem da smo jo izračunali iz geometrije kanala in gorilnika in izmerjenega kota zasuka fotografskega aparata.

Konturo plamena smo dobili s fotografiranjem plamena. Merilo smo določili tako, da smo za plamen postavili ploščo, ki je imela vrisano merilno skalo. Na sliki 10 je prikazana kontura in dolžina plamena za izmerjene in izračunane vrednosti za enake pogoje plina in zraka na gorilniku, kot je bila napravljena meritev podana v brezdimenzijskih koordinatah.



Slika 9
Shema meritve dolžine plamena
Fig. 9
Scheme of measurement of the flame length

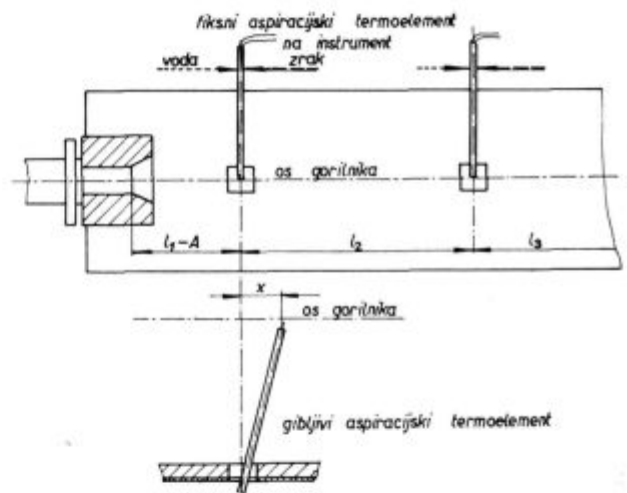


A Slikana kontura plamena, zaslonka 5,6, čas $1/2$, $L_s = 72,0$, $L_p = 720 \text{ mm}$
 C Izračunana kontura plamena, $L_p = 75,04$, $L_s = 750,4 \text{ mm}$
 Razlika med izmerjeno in izračunano dolžino plamena Δl
 $\Delta l = \frac{l_p - l_s}{l_p} \cdot 100 = 4,05 \%$

Slika 10
Primerjava med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi za dolžino in konturo plamena

Fig. 10
Comparison between the measured and calculated values of the flame length and the flame contour

Temperaturni profil v osi gorilnika smo posneli s pomočjo fiksnih in gibljivega aspiracijskega termoelementa. Slika 11 prikazuje shematično način meritve temperaturnega profila.



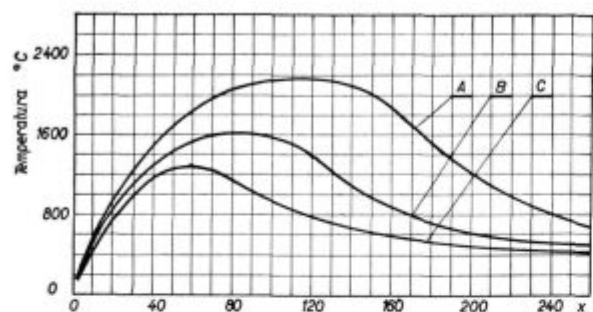
Slika 11
Shema meritve temperaturnega profila

Fig. 11
Scheme of the measurement of the temperature distribution

Na sliki 12 je prikazan temperaturni profil v osi gorilnika za izmerjene in izračunane vrednosti.

Točnost izmerjene dolžine plamena je določena z merjenjem kota zasuka fotografskega aparata in ocenitve konca plamena. Stojalo za fotografski aparat je imelo nonij za merjenje kota, tako da je točnost izmerjenega kota $\pm 0,25^\circ$, kar pomeni pri naših dimenzijah kanala odstopanje dolžine plamena $l_1 = \pm 5 \text{ mm}$ ali $\Delta l_1 = 0,58 \%$.

Večji vir netočnosti pri merjenju dolžine plamena je bila ocena konca plamena. Plamen se je na koncu cepil v posamezne pramene. Ker smo bili vklopljeni na tovarniško omrežje, je bil vpliv



A Temperaturni profil po modelu za teoretično temperaturo plamena 2120 °C
B Temperaturni profil po modelu za računsko temperaturo plamena 1600 °C
C Izmerjeni temperaturni profil

Slika 12

Primerjava temperaturnega profila za izmerjene in izračunane vrednosti s profilom pri teoretični temperaturi gorenja

Fig. 12

Comparison of the temperature distribution for measured and calculated values and of the temperature distribution at the theoretical temperature of combustion

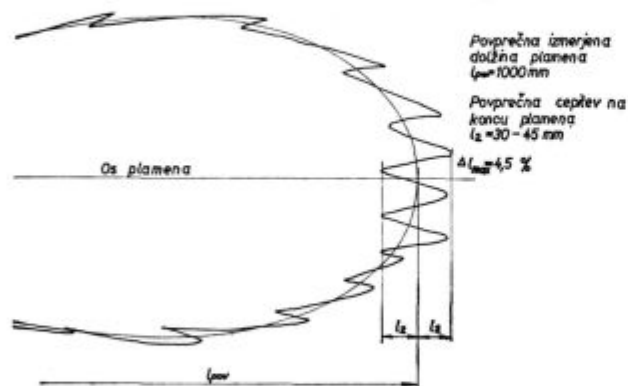
nihanja plinskega sistema in nihanje električne napetosti odločujoč za velikost in cepitev plamena. Na osnovi daljšega opazovanja smo ocenili povprečni konec plamena, kar je shematično prikazano na sliki 13. Napaka, ki jo definiramo z dolžino zubljev, oziroma zaradi cepitve plamena, je ocenjena na $\max. \Delta l_2 = 4,5 \%$.

Z upoštevanjem navedenih dveh napak Δl_1 in Δl_2 dobimo napako izmerjene vrednosti dolžine plamena $\Delta l_{12} = \pm 5 \%$.

Iz slike 10 je razvidno, da je razlika med izračunano in izmerjeno dolžino plamena $\pm 4,0 \%$.

Izračunana kontura plamena sledi izmerjeni konturi (slika 10). Ker smo izračunali dolžino plamena z natančnostjo enakega reda velikosti $\pm 5 \%$, lahko zaključimo, da smo potrdili matematičen model difuzijskega plamena. Če bi hoteli poboljšati natančnost matematičnega modela, bi morali za določitev dolžine plamena uporabiti zahtevnejše merilne metode.

Osnovni namen preizkusov ni bil dobiti čim eksaktnější matematičen model, ampak model,



Slika 13

Ocenitev dolžine plamena

Fig. 13

Estimation of the flame length

ki bo ekvivalentno točen kot meritev plamena v kanalu.

Pri merjenju in računanju temperaturnega profila plamena v osi gorilnika smo imeli večje težave. Temperaturo smo merili z aspiracijskimi termoelementi Pt-PtRh 18 preko kompenzacijske doze. Netočnost izmerjene temperature je bila $\pm 1,7 \%$ (napaka termoelementa v merilnem območju in napaka merilnega instrumenta za merjenje termonapetosti).

Za izračun temperaturnega profila smo izhajali iz teoretične temperature gorenja. Vpliva disociacije nismo upoštevali, ker znaša vpliv disociacije za plamen plinske mešanice PBZ pri nižjih temperaturah, ki nastopajo v kuriščih, le 1–2 %.

Iz slike 12 je razvidno, da temperaturni profil odstopa od izračunane profile. Z znižanjem temperature zgorevanja se razlika zmanjšuje. Temperature, ki smo jih dosegli pri kurjenju v kanalu z gorilnikom, ki smo ga preizkušali, so bile za uporabljeno plinsko mešanico nekoliko prenizke. Vzrok je bil v tem, da je za uporabljeni gorilnik dimenzijsko nekoliko prevelikem zgorevalnem prostoru kanala. To je imelo za posledico, da je odvod toplote s plamena prevelik. Zaradi tega je temperatura v plamenu padla pod mejo, ki smo jo pričakovali. Da bi v matematičnem modelu zajeli vpliv odvoda toplote vzdolž plamena na okolico, bi morali za posamezne prereze v plamenu izdelati toplotno bilanco in nato izračunati dejansko temperaturo plamena, kar pa presega okvir raziskave.

Meritve so pokazale, da izračunani temperaturni profil sledi izmerjenemu. Zato smo se odločili, da posplošimo vrednost rezultatov ob upoštevanju dejanske izmerjene temperature plamena. Izračunamo temperaturni profil za teoretično temperaturo gorenja, ki ga odvisno od obravnavane peči korigiramo s pirometričnim koeficientom.

8. REZULTATI MATEMATIČNE OBDELAVE

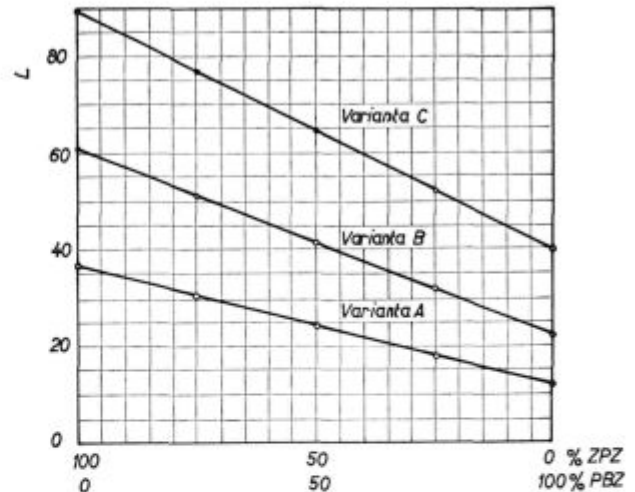
Za različne sestave rezultirajoče plinske mešanice propan-butan PB, zemeljski plin ZP in zrak Z izračunamo reducirano dolžino plamena pri razmerniku zraka $\lambda = 1$. Osnovne podatke za glavne pline smo že obdelali, zato so v tabeli I prikazani samo karakteristični podatki za plinske mešanice variant A, B in C.¹⁰

Na sliki 14 je v diagramu mešanja vidno spreminjanje reducirane dolžine plamena v odvisnosti od sestave rezultirajoče plinske mešanice. Dolžina plamena se veča z manjšanjem koncentracije zraka v plinski mešanici.

Za izbrane variante A, B in C narišemo na sliki 15 reducirane dolžine plamena v odvisnosti od medsebojne stopnje mešanja plinskih mešanic ZPZ in PBZ. Iz diagrama je vidno, da bo pla-

Tabela 1: Osnovni podatki plinskih mešanic variant A, B in C, določenih na osnovi enakih Wobbejevih indeksov.

Varianta	Plinska mešanica	Kurilnost	Gostota	Volumska sestava	
		kJ/m^3	kg/m^3	plin	zrak
A	PBZ	18 840	1,4850	0,1697	0,8303
	ZPZ	15 973	1,0670	0,4324	0,5676
B	PBZ	27 214	1,5706	0,2451	0,7549
	ZPZ	21 583	0,9878	0,5843	0,4157
C	PBZ	33 494	1,6347	0,3016	0,6984
	ZPZ	25 330	0,9349	0,6857	0,3143

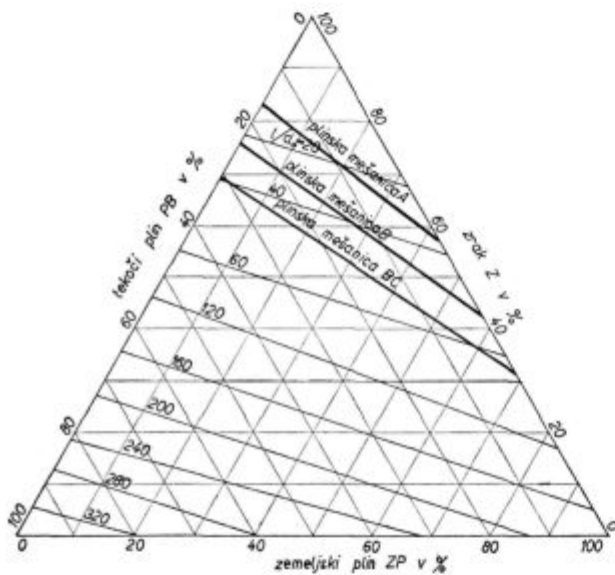


Slika 15

Spreminjanje reducirane dolžine plamena za izbrane variante plinskih mešanic A, B in C

Fig. 15

Variation of the reduced flame length for chosen A, B, and C combinations of gas mixtures



Slika 14

Reducirana dolžina plamena v diagramu mešanja

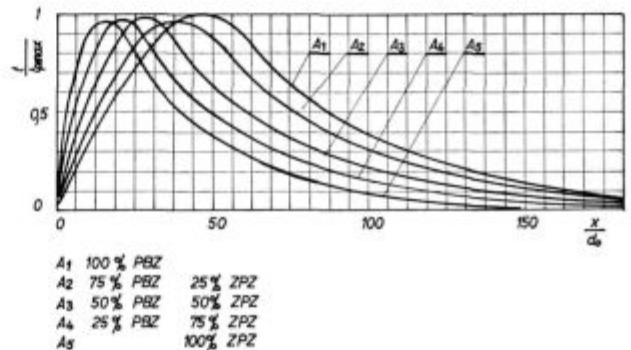
Fig. 14

The reduced flame length in the diagram of mixing

men, ki ga dobimo s kurjenjem PBZ, krajši od plamena plinske mešanice ZPZ. Ti podatki so važni za izračun prenosa toplote s sevanjem v prostor peči, ker se nam spreminja debelina in dolžina plamena poleg spremembe sestave dimnih plinov, posebno ogljikovega dioksida in vodne pare.

Temperaturni profili v osi gorilnika za posamezne variante A, B in C so prikazane na slikah 16, 17 in 18.

Temperaturni maksimumi se s sestavo rezultirajoče plinske mešanice spreminjajo tako po svoji absolutni vrednosti kot po oddaljenosti od ustja gorilnika. Temperaturni profili so izračunani na osnovi teoretične temperature gorenja določene plinske mešanice A, B ali C.

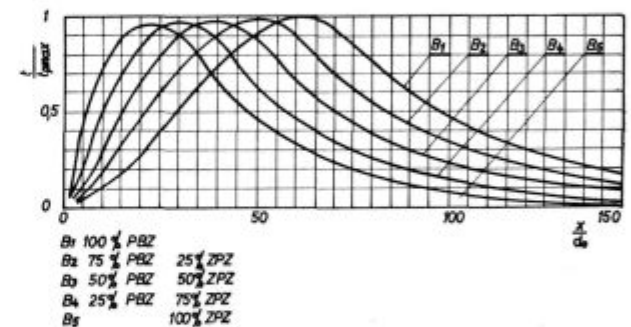


Slika 16

Temperaturni profil v osi gorilnika za varianto A

Fig. 16

Temperature distribution in the burner axis for the A combination

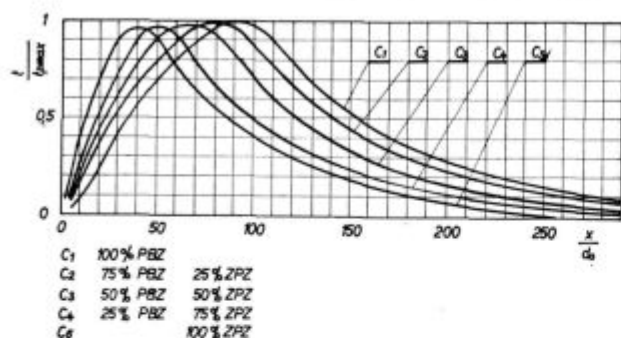


Slika 17

Temperaturni profil v osi gorilnika za varianto B

Fig. 17

Temperature distribution in the burner axis for the B combination



Slika 18

Temperaturni profil v osi gorilnika za variantu C

Fig. 18

Temperature distribution in the burner axis for the C combination

Uporabljene oznake

- A . . . prerez, konstanta enačbe
 a(X) . . . funkcija, ki upošteva spremembo x-a
 B . . . konstanta enačbe
 b(Y) . . . funkcija, ki upošteva spremembo y-a
 b₁ . . . mešalna širina curka
 c₁ . . . prenosni koeficient impulza
 c₂ . . . prenosni koeficient toplote
 c₃ . . . prenosni koeficient mase
 c_p . . . specifična toplota
 d₀ . . . premer plinske šobe
 f₁ . . . teža curka
 g₂₁ . . . funkcija, ki upošteva vpliv mešanja
 g₁₁ . . . funkcija, ki upošteva začetno porazdelitev impulza na izstopnem prerezu gorilnika
 H, H(X) funkcija lege točke
 K . . . konstanta enačbe
 $L = \frac{1}{d_0}$ reducirana dolžina plamena
 l . . . dolžina plamena
 PB . . . plinska faza propan-butan
 PBZ . . . plinska mešanica propan-butan-zrak
 p . . . tlak
 RPM . rezultirajoča plinska mešanica
 $r = \frac{d_0}{2}$ polmer
 T . . . temperatura
 t . . . temperaturna diferenca
 T₀ . . . temperatura plina na izstopu iz gorilnika
 T_p . . . temperatura v coni zgorevanja
 u . . . hitrost plina v glavni smeri, smer x
 U . . . krajši zapis enačbe (59)
 w . . . hitrost plina pravokotno na glavno smer, smer y
 V, V(Y) funkcija lege točke
 $\dot{V}_0$. . . volumski tok plina
 $\bar{v}_0$. . . volumsko razmerje gorljivega na izstopu iz gorilnika
 $\bar{v}_p$. . . volumsko razmerje gorljivega v coni zgorevanja
 Z . . . zrak
 Z_{min} . . . minimalna potrebna količina zraka
 ZP . . . zemeljski plin

- ZPZ . . . plinska mešanica zemeljski plin-zrak
 x . . . koordinata
 $X = \frac{x}{d_0}$ reducirana koordinata
 y . . . koordinata
 $Y = \frac{y}{x}$ reducirana koordinata
 n . . . potenca
 Δl . . . napaka meritve dolžine
 α . . . kot zasuka fotografskega aparata, kot križnega gorilnika
 β . . . razmerje molekularnih mas plina pred zgorevanjem in nastalih dimnih plinov
 η . . . dinamična viskoznost
 ξ . . . masno razmerje
 μ . . . molekularna masa
 ρ . . . gostota
 λ . . . razmernik zraka
 Λ . . . prenosna funkcija impulza
 τ . . . čas
 θ . . . faktor vrtnčenja

Indeksi

- max . . . maksimalna vrednost
 min . . . minimalna vrednost
 o . . . na izstopnem prerezu gorilnika
 ok . . . okolica
 s . . . os gorilnika
 dp . . . dimni plini
 p . . . v coni zgorevanja
 os . . . v osi na izstopnem prerezu gorilnika

Literatura

- Günther R.: Verbrennung und Feuerung, 2. Aufl. (Berlin/Gröttingen/Heidelberg), Springer Verlag 1974
- Janisch F.: »Geschwindigkeits- und Temperaturverteilung in einer ebenen laminaren Flammenfront« Chem. Ing. Tech. 43, (1971), str. 561
- Traustel S.: »Über die Beruchnung von Flamen an Brennern« Technische Mitteilung 62, (1969), H5, stran 177—179
- Kremer H.: »Strömung und Mischung in freibrennenden Diffusionsflammen«, VDI — Berichte 95, 1. Aufl. (Düsseldorf), VDI — Verlag
- Landau L., Lifšič M.: Mehanika neprekidnih sredina, 2 izdanje, (Beograd), Građevinska knjiga 1965
- Reichardt H.: »Gesetzmässigkeiten der freien Turbulenz« VDI — Forschungsheft 414, 2. Aufl. VDI — Verlag (Düsseldorf) 1951
- Mitrinović S., Kečkić D.: Jednačine matematičke fizike, 1. izdanje, (Beograd), Građevinska knjiga 1972
- Bronštejn N., Semendjajev A.: Matematički priručnik, 2. ponatis, (Ljubljana), TZS 1970
- Schlichting H.: Grenzschichttheorie, 5. Aufl. (Karlsruhe), Verlag B. Braun, 1965
- Sicherl B., Vodeb D.: »Problematika zamenljivosti kurilnih plinov v industriji«, Železarski zbornik, 10 (1976), štev. 4, str. 16—22
- Richter H.: Rohrhydraulik, 4. Aufl. (Berlin/Gröttingen/Heidelberg), Springer Verlag 1962

ZUSAMMENFASSUNG

Bei der Suche nach einer optimalen Variante der Verbrennungsparameter einer Gasmischung von Erdgas und einer Gasmischung von Propan-Butan-Luft ist für den Fall einer Ofenheizung ein mathematisches Modell der Diffusionsflamme entwickelt worden.

Das Verbrennen verläuft in einem turbulenten Strahl, welcher mit der Navier-Stokes und der Kontinuitätsgleichung und mit den Gleichungen für das Temperaturfeld und das Konzentrationsfeld des verbrennenden Gases im Abgas beschrieben werden kann. Der erhaltene System der partiellen Differentialgleichungen ist analytisch nicht lösbar. Dieses System wird vereinfacht mit der Voraussetzung, dass es sich um einen stationären in der Achse symmetrischen rotierenden Strahl handelt, wobei noch das Strahlgewicht, die Druckveränderungen und die innere Reibung vernachlässigt werden.

Die Turbulenz des freien Strahles ist durch die Reichardt'sche Ähnlichkeitstheorie der Impuls und Wärmeausbreitung berücksichtigt worden, welche auf Grund der umfangreichen Messungen und mit der Hilfe der Impulsgleichung für die durchschnittlichen Zeitwertgrößen erhalten worden ist. Die erhaltene Gleichung hat einen phänomenologischen Charakter in welchem die übertragbare Größe experimentell bestimmt werden soll.

Mit Hilfe der Reichardt'schen Ähnlichkeitstheorie der

Impuls- und Wärmeausbreitung konnte das System der vereinfachten partiellen Differentialgleichungen analytisch gelöst werden.

Die Lösung des Systems ergibt drei verhältnismässig einfache Exponentialgleichungen, welche für eine parabolische Verteilung der axialen Geschwindigkeit am Brenneraustritt gelten.

Mit dem Rechnungsprogramm für den Rechnersystem werden für die Grunddaten, welche in vier Gruppen verteilt sind: Wärme und Transporteigenschaften der grundlegenden Gase, die Eigenschaften der Brennstoffe, Daten über den Brenner, die gewünschten Daten für welche die Rechnung gemacht wird, die Eigenschaften der Propan-Butan-Luft und Erdgas-Luft Gasmischung, die Länge, die Flammenkontur und der Temperaturprofil der Flamme ausgerechnet.

Die ausgerechneten Ergebnisse der charakteristischen Flammengrößen sind mit den gemessenen Werten verglichen worden, welche auf der bestehenden Versuchsanlage erhalten worden sind.

Mit Hilfe des mathematischen Modells der Diffusionsflamme sind alle möglichen Mischungszustände der drei grundlegenden Gase, Propan-Butan, Erdgas und Luft, bearbeitet worden. Die Ergebnisse der Rechnungen sind in ternären Mischungsdiagrammen dargegeben.

SUMMARY

Looking for an optimal combination of parameters for burning gaseous mixture of natural gas and propane-buthane-air mixture which is used for furnace heating, a mathematical model of diffusional flame was developed.

Burning takes place in a turbulent jet which can be described by the Navier-Stokes equation, the equation of continuity, and the equations of temperature field and concentration field of the burning gas in the flue gas. The obtained system of partial differential equations cannot be solved analytically. The system can be simplified by the supposition that the rotational jet is stationary and axially symmetrical, and that the jet weight, pressure variations and internal friction are neglected.

The turbulence of the free jet was taken in account by the Reichardt similarity theory of momentum and heat transfer which was obtained by extensive measurements and by the momentum equation for the mean-time values of parameters. The obtained equation contains a value which must be determined experimentally.

The Reichardt similarity theory of the momentum and heat transfer enabled that the system of simplified

partial differential equations could be solved analytically. The solution of the system is represented by three relatively simple exponential equations which are valid for parabolic distribution of axial velocities at the burner nozzle.

Properties of propane-buthane-air and natural gas-air mixtures, the length and shape of flame, and the temperature distribution in the flame can be calculated by computer from the basic data which can be classified in four groups: thermal and transfer properties of basic gases, fuel properties, burner data, and the desired parameters for which the calculation is made.

The obtained calculated results of the characteristic parameters of the flame were compared with the measured values which were obtained on the existing experimental set-up.

The mathematical model of the diffusional flame enabled that all the possible conditions of mixing the three basic gases (propane-buthane, natural gas, and air) could be analyzed. The results of calculations are shown in the triangular diagrams of mixing.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследованиях для определения оптимального варианта параметров сгорания газовой смеси природного газа и смеси газа пропан-бутан и воздуха для применения нагрева в печах разработана математическая модель диффузионного пламени.

Сгорание протекает в виде турбулентной струи, которая описана с уравнением Навьер-Стокса, с уравнением непрерывности и с уравнением температурного поля, а также с уравнением поля концентраций горячего и дымового газа. Полученная система парциальных дифференциальных уравнений аналитически нерешима. Эту систему можно упростить при условии, если взять стационарную ротационную струю а пренебречь тяжестью, изменение давления и внутреннее трение струи.

Турбулентность свободной струи учтена в согласии с теорией расширения импульса и теплоты по Райхардту разработана на основании многочисленных измерений и при помощи уравнения импульса для среднего периода времени значения величин. Полученное уравнение исключительного характера, её переносную величину надо определить экспериментальным способом.

При помощи теории сходства расширения импульса и теплоты по Райхардту можно было аналитическим способом определить

систему упрощенных парциальных дифференциальных уравнений. Решение системы представляют собой три соразмерно несложные показательные уравнения, которые действительны для параболического распределения аксиальной скорости при выходе из горелки. Вычислительная программа нам, для основных данных, которые разделены в четыре группы, т. е. тепловые и переносные свойства основных газов, свойства топлив, сведения о горелке и желаемые сведения для которых выполняется вычисление, вычисляет свойства газовых смесей пропан-бутан-воздух и смеси пропан-бутан-воздух, также длину, контур и температурный профиль пламени.

Полученные результаты вычисления характерных величин пламени сравнили с измеренными значениями, полученные в экспериментальной установке, которая была в распоряжении. При помощи математической модели диффузионного пламени авторы работы обработали все возможные состояния смешивания трех основных газов, пропан-бутан, природный газ и воздух.

Результаты вычислений приведены в форме треугольных координат.