

Problematika zamenljivosti kurilnih plinov v industriji

DK: 662.75

ASM/SLA: RM-m

I. del: OSNOVNE ZAKONITOSTI TER RAČUNSKA IN GRAFIČNA INTERPRETACIJA
KARAKTERISTIČNIH PARAMETROV PLINSKIH MEŠANIC

Bogdan Sicherl, Dušan Vodeb

Pri zamenjevanju kurilnih plinov, ki vsebujejo ogljikovodike (zemeljski plin in plinska faza tekočega naftnega plina), so obdelani pri osnovnih pogojih in konstantni toplotni obremenitvi in konstantnem tlaku v plinovodu pred zamenjavo in po njej pogoji zamenjevanja in prikazani odnosi karakterističnih vrednosti ter zgorevalnih karakteristik računsko in z grafično interpretacijo.

Svoje potrebe po toplotni energiji pokrivajo podjetja slovenske ekstraktivne in predelovalne industrije z eksploatacijo trdnih, tekočih in plinastih goriv. Med tem ko trdna in težka tekoča goriva uporabljamo predvsem v kotlovnica in ter zlasti mazut pri večjih talilnih in ogrevalnih agregatih, se uplinjanje trdnih goriv v generatorjih zaradi neracionalnosti opušta. Povečevanje kapacitet petrokemijske industrije in s tem vedno večje količine mazuta in tekočega naftnega plina (TNP) so zaradi atraktivne cene na enoto toplotne energije narekovala že pred več kot dvema desetletjema povečevanje porabe mazuta. Ker za nekatere tehnološke postopke, n. pr. žarjenje, ogrevanje i. p. zaradi visoke vsebnosti gorljivega žvepla v mazutu le-ta ni najprimernejše gorivo, je šla usmeritev na porabo plinastih goriv, predvsem TNP kot lastne energetske baze.

Ta preorientacija se je po ugotovitvi, ki je postala očitna v letih 1965 do 1967, da je projekt EKK Velenje definitivno propadel, še pospešila. Porabniki, ki so bili zaradi specifičnosti in kvalitete

proizvodnje primorani uporabljati plinski medij z minimalno vsebnostjo žvepla ob ekonomsko interesantni ceni, so posegli po TNP. Odločitev je bila za metalurškega energetika, ki je v lastnem podjetju že prej razpolagal z interno mrežo plinovodov za klasični generatorski plin, upoštevajoč takrat zadostne količine, možnost mešanja z zrakom ter dobavo v železniških ali avtomobilskih cisternah, sorazmerno lahka odločitev.

Iz trenda splošne porabe je bilo kmalu razvidno ne le v republiškem, temveč tudi v zveznem merilu, da količina tovrstne energije, tudi z delnim uvozom TNP, že v bližnji bodočnosti ne bo zadoščala. Ker so lastne zaloge zemeljskega plina minimalne je bil kot edina solucija sprejet sklep o uvozu zemeljskega plina. S tem pa se pojavi vprašanje zamenljivosti kurilnih plinskih medijev.

1.0 PLINSKI SISTEMI IN PORABA V PASU

Porabnik na katerem koli mestu bo pogodbeno vezan za odvoz v naprej planirane količine zemeljskega plina. Pri taki »porabi v pasu«, ki predstavlja v vsakodnevni industrijski praksi le idealni primer, je potrebno predvideti za kritje konic uporabo drugega plinskega medija, pri čemer morajo biti gorilniki in plinski sistem vnaprej prilagojeni na to zamenjavo. In dalje — v primeru prenehanja oskrbe z zemeljskim plinom iz katerega koli razloga — moramo imeti jamstvo, da lahko takoj uporabimo TNP, ki sicer lahko predstavlja, in kar je v določenem obsegu smotno, lastno energetsko rezervo.

Obstoječe sisteme s tekočim naftnim plinom (TNP) se z uvajanjem zemeljskega plina ne misli ukiniti zaradi:

— velikih vloženih sredstev v sistem, ki obratuje s tekočim naftnim plinom

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

Dušan Vodeb dipl. ing. strojništva je strokovni sodelavec v energetskem gospodarstvu Železarne Ravne

— možnosti neprekinjenega obratovanja porabnikov

— možnosti pokrivanja konic porabe

— iskanja optimalne cene goriva

Distributor zemeljskega plina bo potrošnikom dobavljal časovno konstantno količino zemeljskega plina. Če upoštevamo

— časovno konstantno količino zemeljskega plina

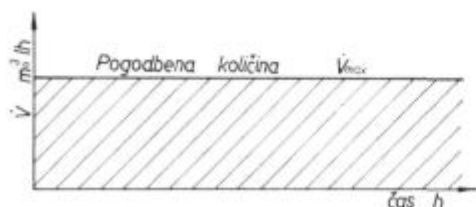
— uporabo obstoječega sistema ob časovno odvisni količini tekočega naftnega plina, bomo imeli naslednje obratovalne možnosti uporabe obeh plinskih sistemov:

— poraba zemeljskega plina v pasu

— pokrivanja koničnih porab s plinsko mešanico PBZ (propan-butan-zrak)

— pokrivanje izpadov zemeljskega plina

Te tri možnosti lahko prikažemo v naslednjih diagramih:



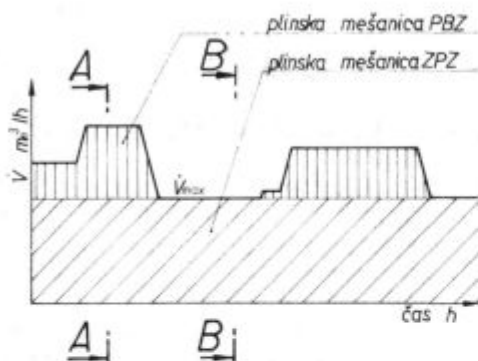
Slika 1

Poraba zemeljskega plina v pasu

Fig. 1

Band-consumption of the natural gas

Ker porabo plinskega medija kot nosilca toplotne energije diktirajo porabniki toplote, oziroma tehnološki postopek, je doseganje porabe v pasu praktično nemogoče.



Slika 2

Pokrivanje koničnih porab s plinsko mešanico PBZ

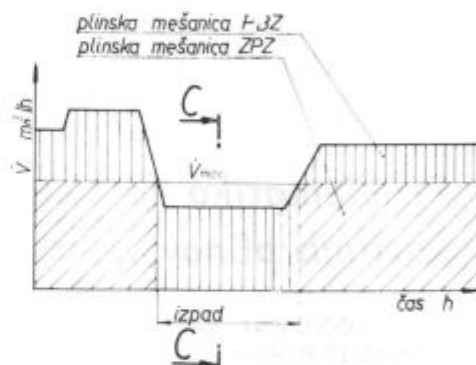
Fig. 2

Covering of peak consumptions by PBZ gas mixture

Pri takem načinu obratovanja imamo naslednje variante uporabe plinskih mešanic:

1) Obratovanje po preseku A-A, kjer konično porabo krijemo s plinsko mešanico PBZ. Porabnik bo oskrbovan s plinsko mešanico zemeljskega plina + plinska mešanica PBZ

2) Obratovanje po preseku B-B, kjer je poraba manjša ali enaka pogodbeni količini zemeljskega plina, porabnik bo oskrbovan le z zemeljskim plinom (ZP)



Slika 3

Pokrivanje izpadov zemeljskega plina

Fig. 3

Covering of the falling off the natural gas

3) V primeru izpada zemeljskega plina bo porabnik oskrbovan samo s plinsko mešanico PBZ, primer — obratovanje po preseku C-C.

1.1 STRUKTURA CENE ZEMELJSKEGA PLINA

Cena zemeljskega plina na pragu potrošnika je odvisna od naslednjih faktorjev:

- cene zemeljskega plina
- carine in dajatev
- oddaljenosti potrošnika
- režima dela

Ceno zemeljskega plina računamo po naslednji enačbi

$$S = 720 \cdot a \cdot \dot{V}_{\max} + c \cdot \dot{V} + b (\dot{V}_{\max} - \dot{V}) \quad (1)$$

Faktor neenakomernosti porabe definiramo s kvocientom:

$$K_1 = \frac{720 \cdot \dot{V}_{\max}}{\dot{V}_{\max}} \quad (2)$$

$K_1 = 1$ za porabo zemeljskega plina v pasu

$K_1 \leq 1$ za dejansko porabo zemeljskega plina

Faktor K_1 upošteva konično obratovanje. Stremeti je potrebno, da se s faktorjem K_1 čimbolj približamo faktorju porabe v pasu ($K_1 = 1$)

Če uvedemo faktor neenakomernosti porabe, pišemo enačbo (1):

$$S = \frac{a}{K_1} \cdot \dot{V}_{\max} + c \cdot \dot{V} + b (\dot{V}_{\max} - \dot{V}) \quad (3)$$

Po deljenju enačbe (3) z dejansko porabo zemeljskega plina ($\dot{V}$) dobimo ceno zemeljskega plina pri porabniku:

$$C = \frac{S}{\dot{V}} = \frac{a}{K_1} \cdot \frac{\dot{V}_{\max}}{\dot{V}} + c + b \left(\frac{\dot{V}_{\max}}{\dot{V}} - 1 \right) \quad (4)$$

Označimo dalje, da je

$$K_2 = \frac{\dot{V}_{\max}}{\dot{V}} \dots \text{faktor dejanske porabe} \quad (5)$$

Sledi enačba (4) v naslednji obliki:

$$C = \frac{a \cdot K_2}{K_1} + c + b (K_2 - 1) \quad (6)$$

$$C = f(K_1, K_2)$$

Cena zemeljskega plina je za neko začetno stanje odvisna samo še od faktorjev K_1 in K_2 , torej faktorja neenakomernosti in faktorja dejanske porabe.

Enačba (6) je grafično interpretirana v diagramu na sliki 4, kjer je tudi vrisan primer vplivov koeficientov K_1 in K_2 na ceno zemeljskega plina.

Primer I

$$\dot{V}_{\max} = 1,65 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$$

$$\dot{V} = 1,65 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$$

$$\dot{V}_{\max} = 2540 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$K_1 = 0,9$$

$$K_2 = 1$$

$$c = 1,00 \text{ din/m}^3$$

$$a = 0,12 \text{ din/m}^3$$

$$b = 0,50 \text{ din/m}^3$$

Primer II

$$\dot{V}_{\max} = 16,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$$

$$\dot{V} = 0,825 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$$

$$\dot{V}_{\max} = 3800 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$K_1 = 0,6$$

$$K_2 = 2$$

Podatki so informativni in temelje na predpostavki o ceni zemeljskega plina.

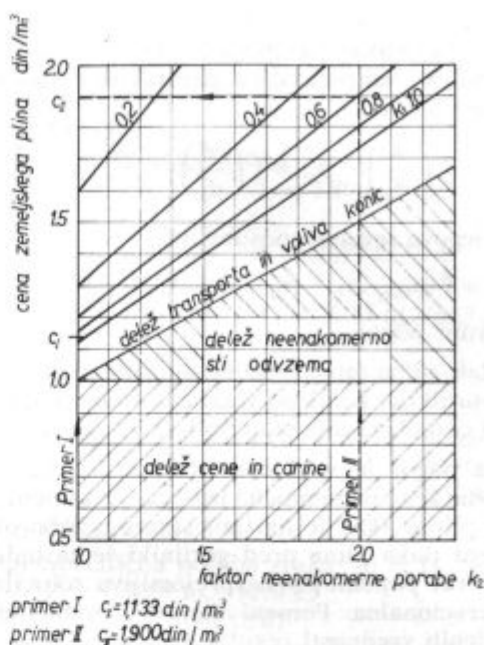
Pri razmišljanju o uvedbi zemeljskega plina moramo upoštevati torej dva faktorja, ki bistveno vplivata na ceno zemeljskega plina:

1) izogibati se moramo neenakomernemu odvzemu zemeljskega plina in čimbolj zmanjšati vpliv konic, oziroma jih pokrivati z drugimi plinskimi mediji. Faktor neenakomerne porabe K_1 naj bi bil čimbliže vrednosti 1;

2) planirati takšno odvzemno količino, da se časovno enakomerno porabi. Faktor dejanske porabe K_2 je potrebno čimbolj približati vrednosti 1. To pomeni planirati tako količino zemeljskega plina, kot jo bomo dejansko porabili.

2.0 ZAMENLJIVOST

Pojem »zamenljivost« dveh plinov različnih sestav nam označuje dejstvo, da lahko oba plina pokurimo v določeni napravi enako učinkovito, ne



Slika 4
Cena zemeljskega plina kot funkcija K_1 in K_2

Fig. 4
Natural gas price as function K_1 and K_2

da bi bila potrebna kakršna koli sprememba dimenzije gorilnikov ali naprave.

V strokovni literaturi je problem zamenljivosti z ozirom na plinske družine obdelan podrobno, vendar le iz zornega kota injektorskih gorilnikov. Za industrijsko rabo injektorski gorilniki praktično — kljub enostavnosti konstrukcije — ne pridejo v poštev. Glavni vzrok je relativno majhno območje regulacije in nevarnost, da pri nestrokovni strežbi pride do povratnega vžiga, oziroma v primeru odpihovanja plamena, do eksplozije kurilnega agregata, kot zaprtega sistema.

Zato se bomo v nadaljevanju razprave omejevali samo na gorilnike, ki bodisi kot nizko tlačni (tlak plina $p \leq 4905 \text{ N/m}^2$ t. j. $\leq 500 \text{ mm H}_2\text{O}$) ali kot srednje tlačni ($p \geq 4905 \text{ N/m}^2$ t. j. $\geq 500 \text{ mm H}_2\text{O}$) gorilniki obratujejo s paralelnim strujanjem ali pa delnim predmešanjem plina in zraka za zgorevanje.

2.1 POGOJI ZAMENJAVANJA

V vsakem primeru zahtevamo pri zamenjavi plinov v kurilnem agregatu izpolnitev dveh pogojev.

Prvi pogoj:

Ob prehodu na drugo vrsto plina — govorimo o kurilnem plinu in plinu zamenjevalcu — morajo ostati isti gorilniki pri enaki toplotni obremenitvi enako učinkoviti.

To se pravi, da naj bo pri obeh vrstah plina dovod toplote enak, zgorevanje enako učinkovito, t. j. pri oksidacijskem plamenu ob minimalnem

potrebem prebitku zraka popolno, ter ohranjena plamenska slika stabilnega plamena. Sem štejemo dolžino in temperaturno porazdelitev vzdolž osi pretoka plamena

$$L = f\left(\frac{x}{d_u}\right); \quad \partial_{sr} = f\left(\frac{x}{d_u}\right)$$

ter njegove sevalne sposobnosti

$$q = f(p_{CO_2} \cdot s, \quad p_{H_2O} \cdot s) \quad \text{kJ/m}^2\text{h}; \quad (\text{kcal/m}^2\text{h})$$

Drugi pogoj:

Tlak plina pred gorilnikom kot neposrednim pretvornikom kemično vezane v toplotno energijo, mora ostati pri zamenjavi plinov nespremenjen.

Ta pogoj je v sklopu obratov industrijskega objekta zelo pomemben. Doseganje zamenljivosti dveh plinov (kar je možno) s spremembo obratovnega tlaka plina pred gorilniki je za industrijski obrat popolnoma nesprijemljiva solucija, ker je neracionalna. Pomeni namreč spremembo nastavljenih vrednosti regulatorjev tlaka, vodnih zapor, armatur in karakterističnih pogojev regulacijskih sistemov vedno znova, ob sleherni spremembi vrste kurilnega plina, kar bistveno vpliva na varnost obratovanja.

Označimo toplotno obremenitev, ki naj ostane konstantna —

$$\text{— prvi pogoj, s } \dot{Q} = \text{konst.} \quad \text{kJ/h}; \quad (\text{kcal/h}) \quad (7)$$

Enaka je

$$\dot{Q} = H \cdot V \quad \text{kJ/h}; \quad (\text{kcal/h}) \quad (8)$$

Volumski pretok je enak:

$$V = A \cdot w \cdot 3600 \quad \text{m}^3/\text{h} \quad (9)$$

Hitrost w pri iztekanju iz šob (nizki tlaki) po Bernoulliju:

$$w = \alpha \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho_n}} \quad \text{m/s} \quad (10)$$

Iz (9) in (10) sledi, da bo toplotna obremenitev enaka:

$$Q = H \cdot A \cdot \alpha \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho_n}} \cdot 3,6 \cdot 10^3 \quad \text{kJ/h}; \quad (\text{kcal/h}) \quad (11)$$

Označimo nadalje z indeksi še oba plina, ki jih zamenjujemo, in sicer:

- kurilni plin ... indeks 1
- plin zamenjevalec ... indeks 2

Ob izpolnitvi prvega pogoja sledi:

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2$$

Ob uporabi enačbe (11) sledi:

$$H_1 \cdot A_1 \cdot \alpha_1 \sqrt{\frac{2 \cdot p_1}{\rho_{n1}}} \cdot 3600 = H_2 \cdot A_2 \cdot \alpha_2 \sqrt{\frac{2 \cdot p_2}{\rho_{n2}}} \quad (12)$$

Ker morajo ostati karakteristični parametri pri gorilniku isti, torej nobenih sprememb pri konstrukciji (premer šob, premer ustja in pretočnega števila), sledi:

$$A_1 = A_2 = \text{konst.}$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \text{konst.}$$

ter po izenačitvi, krajšanju in preureditvi enačbe (12)

$$\sqrt{p_1} \cdot \frac{H_1}{\sqrt{\rho_{n1}}} = \sqrt{p_2} \cdot \frac{H_2}{\sqrt{\rho_{n2}}} \quad (13)$$

Ko postavimo še drugi pogoj, t. j. $p_1 = p_2 = \text{konst.}$, dobimo izraz

$$\frac{H_1}{\sqrt{\rho_{n1}}} = \frac{H_2}{\sqrt{\rho_{n2}}} \quad (14)$$

ali

$$\frac{H_1^2}{\rho_{n1}} = \frac{H_2^2}{\rho_{n2}} = \text{konst.} \quad (15)$$

V literaturi srečamo izraz $H_{zg}/\sqrt{\rho_n}$, ki je označen kot Wobbejev indeks še v drugi obliki, in sicer $H_{zg}/\sqrt{d}$, t. j. kot kvocient zgorevne vrednosti (ali kot je v rabi zgornje kalorične vrednosti) ter korena iz relativne gostote plina d (podane kot $\rho_n/1,293$, torej z ozirom na zrak $d = 1$). Pri zamenjavi kurilnega plina s plinom zamenjevalcem naj bi ta karakteristična vrednost ostala nespremenjena. Ker mora ostati toplotna obremenitev agregata nespremenjena, sledi iz enačbe (13)

$$\frac{\sqrt{p_1}}{\sqrt{\rho_{n1}}} = \frac{\sqrt{p_2}}{\sqrt{\rho_{n2}}}$$

in

$$\frac{p_1}{\rho_{n1}} = \frac{p_2}{\rho_{n2}} \quad (16)$$

ali z drugimi besedami: statični tlak plina zamenjevalca bi se moral za vrednost ρ_{n1}/ρ_{n2} spremeniti! To pa je za industrijsko uporabo nesprijemljivo. Pri konstantnem tlaku obeh plinskih medijev v plinskem omrežju industrijskega obrata je potrebno doseči s primerno spremembo gostote in kalorične vrednosti plina zamenjevalca (indeks 2) zahtevano enakost pogoja enačbe (15), torej:

$$\frac{H_1^2}{\rho_{n1}} = \frac{H_2^2}{\rho_{n2}} = \text{konst.},$$

kar bomo v nadaljevanju razprave tudi uporabili. Predvsem je potrebno poudariti, da vsi plini, ki vsebujejo CO in H_2 zaradi popolnoma drugačnih karakterističnih lastnosti, kot jih imajo drugi ogljikovodiki, z zemeljskim plinom niso zamenljivi lai pa so zamenljivi le s spremembo parametrov gorilnikov. Iz obravnave torej odpadejo: generatorski, koksarniški in plavžni plin.

2.2 OSNOVE PLINSKE MEŠANICE

Za pregledni prikaz obravnave razdelimo plinske mešanice v dve grupi:

1. plinske mešanice osnovnih plinov z zrakom, grupa A

2. plinske mešanice predhodno mešanih osnovnih plinov z zrakom, grupa B

Vsako posamezno grupo lahko razdelimo v naslednje značilne plinske mešanice

Grupa A

A ₁	TNP + Z	plinska mešanica PBZ
A ₂	ZP + Z	plinska mešanica ZPZ
A ₃	TNP + ZP	plinska mešanica PBZP (teoretična varianta)

Grupa B

B ₁	PBZ + ZP	pri pogoju $\left(\frac{H^2}{\rho_n}\right)_{PBZ} = \left(\frac{H^2}{\rho_n}\right)_{ZP}$
B ₂	PBZ + ZP	zemeljski plin + PBZ, ki je v rabi
B ₃	PBZ + ZPZ	najnižja kalorično uporabljiva in varna mešanica
B ₄	PBZ + ZPZ	poljubno izbrani primer

Za nadaljno obravnavo privzamemo naslednje sestave osnovnih plinov, ki so računanane kot povprečje nekaj let za TNP, ter privzeto sestavo iz podatkov za uvoženi ZP, ki jih podajata tabeli 1 in 2.

Tabela 1: Povprečna sestava plinske faze tekočega naftnega plina (v nadaljevanju propan-butan, označena PB) in karakteristični parametri

I. Kalorična vrednost:

- a) spodnja $H_{sp} = 111\,038 \text{ kJ/m}^3$
(26 521 kcal/m³)
- b) zgornja $H_{zg} = 120\,609 \text{ kJ/m}^3$
(28 807 kcal/m³)

$$H_{zg}/H_{sp} = 1,0862$$

II. Sestava plina v vol. %:

propan	C ₃ H ₈	37,50
butan	C ₄ H ₁₀	61,00
etan	C ₂ H ₆	1,50

III. Gostota: $\rho_n = 2,426 \text{ kg/m}^3$ IV. Relativna gostota: $d = 1,876$ V. Wobbejev indeks: $W_{zg} = 88\,057$ (21 032)
 $W_{sp} = 81\,069$ (19 363)VI. Molekularna masa: $M = 50,2 \text{ kg/k mol}$ VII. Meja eksplozivnosti: $v_{zg}, v_{sp} = 9,86 \dots$
 $\dots 3,5 \text{ vol. \%}$
(suh zrak 20° C)VIII. Temperatura vžiga: $\vartheta_v = 650^\circ \text{ C}$

IX. Lamilarna hitrost

z gorevanja: $u_{max} = 0,4 \text{ m/sek}$

X. Teoretična temperatura

gorenja: $\vartheta_g = 2130^\circ \text{ C}$ (brez upoštevjanja disociacije)

XI. Zgorevanje

a) Teoretično potrebni

kisik $O_t = 5,89 \text{ m}_n^3/\text{m}_n^3$

b) Teoretično potrebni

zrak $Z_t = 28,19 \text{ m}_n^3/\text{m}_n^3$

c) Količina vlažnih

dimnih plinov $D_{vl} = 30,81 \text{ m}_n^3/\text{m}_n^3$

d) Količina suhih

dimnih plinov $D_s = 25,89 \text{ m}_n^3/\text{m}_n^3$

e) Sestava dimnih plinov ($n = 1$) v vol. %:

CO ₂	11,66
H ₂ O	15,96
N ₂	72,38

f) CO_{2max} = 13,88 %g) Specifična poraba zraka: ($n = 1$)

$Z_t = 0,2539 \text{ m}_n^3/1000 \text{ kJ}$

(1,063 m_n³/1000 kcal)

h) Dinamična viskoznost: $10^6 \cdot \eta_n =$

$= 7,117 \text{ Ns/m}^2 = 7,117 \text{ kg/ms}$

(računano po enačbi Herning-Zipperer)

Tabela 2: Sestava zemeljskega plina (v nadaljevanju ZP) in karakteristični parametri

I. Kalorična vrednost:

- a) spodnja $H_{sp} = 36\,939 \text{ kJ/m}_n^3$
(8 823 kcal/m_n³)
- b) zgornja $H_{zg} = 40\,796,5 \text{ kJ/m}_n^3$
(9 805 kcal/m_n³)

$$H_{zg}/H_{sp} = 1,1113$$

II. Sestava plina v vol. %:

Predvidena sestava:		Za račun izbrana sestava:
metan CH ₄	min 92 %	93,30 %
etan C ₂ H ₆	max 6 %	3,30 %
propan C ₃ H ₈	max 2 %	0,70 %
butan C ₄ H ₁₀	< 1 %	0,62 %
dušik N ₂	max 2 %	2,08 %
ogljikov		
dioksid CO ₂	max 1,5 %	0,00 %

III. Gostota: $\rho_n = 0,7708 \text{ kg/m}_n^3$ IV. Relativna gostota: $d = 0,5961$ V. Wobbejev indeks: $W_{sp} = 47\,844$
(11 427)
 $W_{zg} = 52\,840$
(12 699)VI. Molekularna masa: $M = 17,403 \text{ kg/k mol}$ VII. Meja eksplozivnosti: $v_{zg}, v_{sp} = 13,2 \dots$
 $5,1 \text{ vol. \%}$
(suhi zrak 20° C, 1013 mbar)VIII. Temperatura vžiga: $\vartheta_v = 635^\circ \text{ C}$

IX. Laminarna hitrost
zgorevanja:

$$u_{\max} = 0,43 \text{ m/s}$$

X. Teoretična
temperatura gorenja:

$$\vartheta_g = 1880^\circ \text{C}$$

(brez upoštevanja
disociacije)

XI. Zgorevanje

a) Teoretično
potrebni kisik

$$Q_i = 2,05 \text{ m}^3_n/\text{m}^3_n$$

b) Teoretično
potrebni zrak

$$Z_i = 9,875 \text{ m}^3_n/\text{m}^3_n$$

c) Količina vlažnih
dimn. plinov

$$D_{v,i} = 10,85 \text{ m}^3_n/\text{m}^3_n$$

d) Količina suhih
dimnih plinov

$$D_s = 8,83 \text{ m}^3_n/\text{m}^3_n$$

e) Sestava
dimnih plinov ($n = 1$) v vol. %:

$$\text{CO}_2 \quad 9,63 \%$$

$$\text{H}_2\text{O} \quad 18,65 \%$$

$$\text{N}_2 \quad 71,72 \%$$

f) $\text{CO}_{2\max} = 11,83 \%$ g) Specifična poraba zraka ($n = 1$):

$$Z_i = 0,2667 \text{ m}^3_n/1000 \text{ kJ}$$

$$(1,116 \text{ m}^3_n/1000 \text{ kcal})$$

h) Dinamična viskoznost:

(računano po enačbi
Herning-Zipperer) $10^6 \cdot \eta_n = 10,15 \text{ Ns/m}^2$
 $= 10,15 \text{ kg/ms}$

i) Kritični tlak: $p_k = 46,9 \text{ bar}$ j) Kritična temperatura: $T_k = 198 \text{ K}$ k) Eksponent izentropie: $\alpha = \frac{c_p}{c_v} = 1,304$

Bistvene osnovne lastnosti in zgorevne karakteristike komponent obeh osnovnih plinov, t. j. plinske faze tekočega naftnega plina in zemeljskega plina so navedene v tabeli 3.

Oba osnovna plina sta sestavljena torej iz:

$$\text{PB} - \text{C}_3\text{H}_8, \text{C}_4\text{H}_{10}, \text{C}_2\text{H}_6 \text{ v vol. \%}$$

$$\text{ZP} - \text{C}_3\text{H}_8, \text{C}_4\text{H}_{10}, \text{C}_2\text{H}_6, \text{CO}_2, \text{N}_2 \text{ v vol. \%}$$

Pri mešanicah z zrakom pa:

$$\text{PBZ} - \text{C}_3\text{H}_8, \text{C}_4\text{H}_{10}, \text{C}_2\text{H}_6, \text{N}_2, \text{O}_2 \text{ v vol. \%}$$

$$\text{ZPZ} - \text{C}_3\text{H}_8, \text{C}_4\text{H}_{10}, \text{C}_2\text{H}_6, \text{CO}_2, \text{N}_2 \text{ in } \text{O}_2 \text{ v vol. \%};$$

$$\text{N}_2 = (\text{N}_2 \text{ iz plina} + \text{N}_2 \text{ iz zraka})$$

Ker je kalorična vrednost aditivna lastnost, pišemo splošno:

$$H = \sum_{i=1}^n H_i \frac{\text{vol. \% } V_i}{100} \quad \text{kJ/m}^3_n; \quad (\text{kcal/m}^3_n) \quad (17)$$

Tudi gostota je aditivna lastnost, torej velja za osnovne pline:

$$\rho_n = \sum_{i=1}^n \rho_{ni} \frac{\text{vol. \% } V_i}{100} \quad \text{kg/m}^3_n \quad (18)$$

Pri mešanicah osnovnih kurilnih plinov z zrakom, torej pri PBZ in ZPZ plinu slede naslednji volumski deleži kurilnega plina in zraka:

$$V_{\text{PBZ}} = V_{\text{PB}} + V_{\text{Z}} \quad \text{m}^3_n \quad (19)$$

$$V_{\text{ZPZ}} = V_{\text{ZP}} + V_{\text{Z}} \quad \text{m}^3_n \quad (20)$$

Tabela 3: Snovne lastnosti in zgorevne karakteristike komponent plinov

Plin	H_{zg}	H_{sp}	ρ_n	d	W_{zg}	W_{sp}	O_i	Z_i	$D_{v,i}$	D_s	$\frac{\rho_n}{(D_{v,i})}$	$\text{CO}_{2\max}$	$10^6 \eta_n$
C_2H_6	70422 (16820)	64351 (15370)	1,360	1,049	68758 (16422)	62830 (15007)	3,5	16,7	18,2	15,2	1,257	13,6	8,60
C_3H_8	101823 (24320)	93575 (22350)	2,019	1,562	81524 (19459)	74920 (17883)	5,0	23,9	25,8	21,8	1,266	13,76	7,50
C_4H_{10} (n : i = 67:33)	133391 (31860)	122924 (29360)	2,703	2,09	92268 (22038)	85028 (20309)	6,5	30,94	33,4	28,4	1,271	14,06	6,90
CH_4	39858 (9520)	35797 (8550)	0,717	0,55	53745 (12837)	48269 (11529)	2	9,57	10,56	8,56	1,235	11,68	10,20
N_2 (zrak)	—	—	1,2567	0,97	—	—	—	—	—	—	—	—	16,58
N_2	—	—	1,2505	0,967	—	—	—	—	—	—	—	—	16,58
O_2	—	—	1,4289	1,10	—	—	—	—	—	—	—	—	19,23
CO_2	—	—	1,9768	1,53	—	—	—	—	—	—	—	—	13,83

vse številčne vrednosti v oklepaju v kcal/m^3_n

pri tem se ravna delež kurilnega plina v plinski mešanici po zahtevani kalorični vrednosti mešanega plina in je enak:

$$\text{pri PBZ plinu: } V_{PB} = \frac{H_{PBZ}}{H_{PB}} m^3_n / m^3_n \quad (21)$$

$$\text{pri ZPZ plinu: } V_{ZP} = \frac{H_{ZPZ}}{H_{ZP}} m^3_n / m^3_n \quad (22)$$

Delež zraka v plinski mešanici bo:

$$\text{pri PBZ plinu: } V_Z = 1 - V_{PB} = 1 - \frac{H_{PBZ}}{H_{PB}} m^3_n / m^3_n \quad (23)$$

$$\text{pri ZPZ plinu: } V_Z = 1 - V_{ZP} = 1 - \frac{H_{ZPZ}}{H_{ZP}} m^3_n / m^3_n \quad (24)$$

Za eksaktni račun gostote plinske mešanice uporabimo enačbo (18), mnogo hitreje pa za orientacijski izračun pridemo do rezultatov, če uporabimo enačbe:

$$\rho_{nPBZ} = \rho_{nPB} \cdot V_{PB} + \rho_{nZ} \cdot V_Z \quad \text{kg/m}^3_n \quad (25)$$

$$\rho_{nZPZ} = \rho_{nZP} \cdot V_{ZP} + \rho_{nZ} \cdot V_Z \quad \text{kg/m}^3_n \quad (26)$$

pri čemer so osnova gostote osnovnih kurilnih plinov, t. j. PB in ZP ter zraka pri normnih pogojih.

Zamenljivost kurilnih plinov obravnavamo lahko na dva načina:

- a) računsko
- b) grafično

Kot bomo videli, je sočasna uporaba zemeljskega plina in tekočega naftnega plina možna edino v naslednjih mešanicah:

1. zemeljski plin $\rightleftharpoons$ plinska faza tekočega naftnega plina PB, mešana z zrakom

ali okrajšano: ZP $\rightleftharpoons$ PBZ

2. zemeljski plin mešan $\rightleftharpoons$ plinska faza tekočega naftnega plina PB, mešana z zrakom

ali okrajšano: ZPZ $\rightleftharpoons$ PBZ

ne glede na to, kateri od obeh plinov je kurilni plin ali plin zamenjevalec.

Iz diagramov porabe na sl. 2 in 3 je razvidno, da bo porabnik lahko oskrbovan z

1) zemeljskim plinom ali plinsko mešanico zemeljski plin + zrak (ZP ali ZPZ)

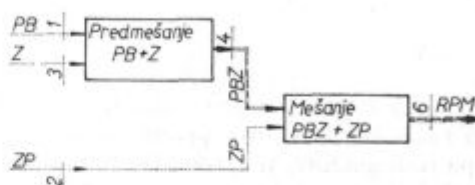
2) plinsko mešanico tekoči naftni plin + zrak (PBZ)

3) rezultirajočo plinsko mešanico obeh osnovnih plinskih mešanic ZP + PBZ ali ZPZ + PBZ za pokrivanje konične porabe, oz. približek vrednosti porabe v pasu.

Obratovalna shema mešalne postaje je odvisna od načina uporabe zemeljskega plina, ki ga lahko uporabljamo direktno ali pa kot plinsko mešanico z zrakom. Plinsko fazo tekočega naftnega plina v obeh primerih predhodno mešamo z zrakom. Z ozirom na to ločimo, kot je prikazano na sl. 5 in 6:

a) mešalno postajo za mešanje PBZ z ZP (sl. 5)

b) mešalno postajo za mešanje PBZ z ZPZ (sl. 6)

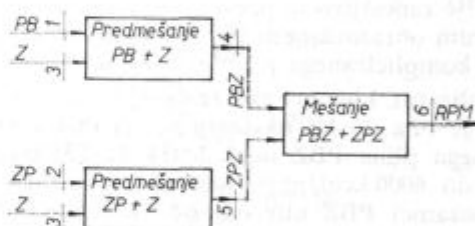


Slika 5

Mešalna postaja za mešanje zemeljskega plina s PBZ plinom (oznake 1/...6/ se nanašajo na obravnavo grafičnih metod zamenjevanja!)

Fig. 5

Mixing station for natural gas with PBZ gas (figures 1 to 6 correspond to graphic methods of conversion)



Slika 6

Mešalna postaja s predmešanjem zemeljskega plina (oznake 1/...6/ se nanašajo na obravnavo grafičnih metod zamenjevanja)

Fig. 6

Mixing station with premixing natural gas (figures 1 to 6 correspond to graphic methods of conversion)

Sestava in fizikalne lastnosti rezultirajoče plinske mešanice se bodo v obeh primerih spreminjale. Z mešanjem navedenih osnovnih plinov se spreminjajo lastnosti rezultirajoče plinske mešanice v odvisnosti od deleža posameznih komponent v rezultirajoči plinski mešanici.

Zanima nas, kakšne so spremembe fizikalnih veličin rezultirajoče plinske mešanice in kako te spremembe vplivajo na elemente porabnikov (plinski gorilnik — merilna zaslonka, regulacijska in varnostna oprema).

Spreminjajo se:

1. kurilnost rezultirajoče plinske mešanice,
2. gostota rezultirajoče plinske mešanice,
3. Wobbejev indeks,
4. količina zraka za zgorevanje.

2.3. RAČUNSKA DOLOČITEV KARAKTERISTIČNIH PARAMETROV PLINA ZAMENJEVALCA, OZIROMA REZULTIRAJOČE PLINSKE MEŠANICE

Vrnimo se sedaj nazaj na enačbo (15)

$$\frac{H_1^2}{\rho_{n1}} = \frac{H_2^2}{\rho_{n2}} = \text{konst.} = k,$$

ki v bistvu pomeni izenačenje Wobbejevega indeksa; torej bo kurilni plin s H_1 in n_1 vnaprej diktiral pogoj:

$$\frac{H_2^2}{\rho_{n2}} = k,$$

ki ga bo moral plin zamenjevalec izpolniti. Sprememba kalorične vrednosti pri mešanju z zrakom, s tem pa tudi gostote, je v tehniški praksi izvedljiva v mešalnih postajah, ki pri nas v SR Sloveniji že obratujejo v dveh železarnah ter tovarni kovanega orodja v Zrečah. Osnovni princip delovanja je, da si plinska faza TNP, torej propan-butan, pri razpenjanju iz šobe v Venturijeve cevi sam nasešava z razmerjem prerezov, odvisno od tlaka plina, vnaprej določeno količino zraka, ki se v difuzorju homogenizira in vstopa v kolektor razvodne mreže preko regulatorjev tlaka. Delovanje takih mešalnih postaj je zanesljivo in preverjeno z večletnim kontinuirnim obratovanjem ter omogoča rešitev sicer dokaj kompliciranega problema zamenljivosti.

V obratih, kjer pri nas že delujejo mešalne postaje, je bila doslej nastavljena kurilna vrednost mešanega plina PBZ med 20934 do 25120 kJ/m³ (5000 do 6000 kcal/m³). Ker je meja expl. vžiga pri mešanici PBZ odvisna od % udeležbe med propanom in butanom v TNP pri 13398 do 15073 kJ/m³ (3200 do 3600 kcal/m³), je bilo s tem zagotovljeno varno obratovanje agregatov tudi v primeru eventualnih manjših motenj pri obratovanju mešalnika.

Pri mešanju zemeljskega plina z zrakom take omejitve kalorične vrednosti navzdol ni.

Oglejmo si računski primer zamenjave na konkretnem primeru!

Vzemimo, da želimo zamenjati mešani plin PBZ (znano H_1 , ρ_{n1}), ki ga že uporabljamo sedaj,

z mešanico zemeljskega plina in zraka (neznano H_2 , ρ_{n2}).

Oznake — indeksi, ki jih bomo rabili, označujejo:

PBZ, kurilni plin — 1

ZPZ, plin zamenjevalec — 2

$$\frac{H_1^2}{\rho_{n1}} = k = \frac{H_2^2}{\rho_{n2}} = \frac{H_2^2}{\rho_{nZP} \cdot V_{ZP} + \rho_{nZ} \cdot V_Z}$$

če vstavimo iz enačb (22) in (24) izraze za V_{ZP} in V_Z , sledi:

$$k = \frac{H_2^2}{\rho_{nZP} \frac{H_2}{H_{ZP}} + \rho_{nZ} \left(1 - \frac{H_2}{H_{ZP}}\right)}$$

po rešitvi kvadratne enačbe na realni koren je H_2 :

$$H_2 = \frac{k(\rho_{nZP} - \rho_{nZ})}{2H_{ZP}} + \sqrt{\frac{k^2(\rho_{nZP} - \rho_{nZ})^2}{4H_{ZP}^2} + k \cdot \rho_{nZ}} = H_{ZPZ} \quad \text{kJ/m}^3; \quad (\text{kcal/m}^3) \quad (27)$$

Iz enačbe (22) in (24) pa dalje:

$$V_{ZP} = \frac{H_{ZPZ}}{H_{ZP}} \quad \text{m}^3/\text{m}^3 \quad \text{ali}$$

$V_{ZP} \cdot 100 = \%$ udeležbe zemeljskega plina v mešanici ZPZ

$$V_Z = 1 - \frac{H_{ZPZ}}{H_{ZP}} \quad \text{ali}$$

$V_Z \cdot 100 = \%$ udeležbe zraka v mešanici ZPZ

S pomočjo enačbe (26) izračunamo še gostoto ZPZ plina ρ_{nZPZ}

Do sem računski postopek določitve zamenljivosti ob upoštevanju osnovnih pogojev konstantne toplotne obremenitve in konstantnega tlaka pred porabniki plina — gorilniki.

Za vrednosti sestav osnovnih plinov, navedenih v tabelah 1 in 2, t. j. za plinsko fazo tekočega naftnega plina (PB) in zemeljskega plina (ZP) dobimo, ob upoštevanju dveh osnovnih pogojev $\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2$ ter $p_1 = p_2$, za plinske mešanice grupe A in B, naslednje realne kombinacije zamenljivih plinov:

Tabela 4: Pogoji zamenljivosti pri PBZ $\rightleftharpoons$ ZP

Kurilni plin (1)	Plin zamenjevalec (2)	H kJ/m ³ (kcal/m ³)	ρ_n	Delež v mešanici v m ³ /m ³		Z ₁	D _{v1}	Z ₂	d	Varianta	Opomba
				V _{PB}	V _Z						
PBZ		57719 (13786)	1,8819	0,5198	0,4802	14,2	16,0	0,246 (1,030)	1,455	1	Grupa B ₂
	ZP	36940 (8823)	0,7708	1,0	—	9,875	10,95	0,2673 (1,119)	0,5961		
ZP		36940 (8823)	0,7708	1,0	—	9,875	10,95	0,2673 (1,119)	0,5961	2	Grupa B ₂
	PBZ	57719 (13786)	1,812	0,5198	0,4802	14,2	16,0	0,246 (1,03)	1,401		

Tabela 5: Pogoji zamenljivosti pri PBZ ↔ ZPZ za območje kurilnih vrednosti PBZ, ki pride v upoštevanje v industriji

Kurilni plin (1)	Plin zamenjevalec (2)	H kJ/m ³ _n (kcal/m ³ _n)	ρ _n	Delež v mešanici v m ³ _n /m ³ _n			Z _i	D _{ei}	Z _i	d	Varianta	Opomba
				V _{PBZ}	V _{ZPZ}	V _Z						
PBZ		18840 (4500)	1,485	0,1697	0,8303		3,94	5,21	0,2091 (0,8755)	1,1487	3	Grupa B ₃
	ZPZ	15973 (3815)	1,067	0,4324	0,5676		3,7	4,7	0,2316 (0,9698)	0,8254		
PBZ		23074 (5500)	1,528	0,2074	0,7926		5,05	6,37	0,2188 (0,9182)	1,1817	4	Grupa B ₄
	ZPZ	18870 (4507)	1,026	0,5108	0,4892		4,55	5,58	0,2411 (1,009)	0,7939		
PBZ		27214 (6500)	1,5706	0,2451	0,7549		6,15	7,54	0,2259 (0,9461)	1,2147	5	Grupa B ₄
	ZPZ	21583 (5155)	0,9878	0,5843	0,4157		5,35	6,38	0,2479 (1,0378)	0,7639		
PBZ		31401 (7500)	1,6134	0,2828	0,7172		7,26	8,70	(0,968) 0,2312	1,2478	6	Grupa B ₄
	ZPZ	24120 (5761)	0,9521	0,6529	0,3471		6,1	7,14	0,2529 (1,0588)	0,7363		
PBZ		33494 (8000)	1,6347	0,3016	0,6984		7,81	9,28	0,2332 (0,976)	1,2643	7	Grupa B ₄
	ZPZ	25330 (6050)	0,9349	0,6857	0,3143		6,45	7,49	0,2546 (1,066)	0,7230		

Tabela 4 poudarja dejstvo, da direktna zamenjava plinske faze tekočega naftnega plina in zemeljskega plina ni mogoča! V mešalni postaji je potrebno proizvesti mešani plin PBZ — grupa A₁, nakar je zamenjevanje z zemeljskim plinom možno.

Iz tabele 5 je razvidno, kakšno je pričakovano območje kaloričnih vrednosti v industrijski praksi. Neradi mešamo TNP + Z = PBZ s kalorično vrednostjo < 18840 kJ/m³ (< 4500 kcal/m³) zaradi varnosti obratovanja plinskega sistema (expl. vžig!). Vendar tudi vrednosti > 33494 kJ/m³ (> 8000 kcal/m³) ne bomo uporabljali (razen eventualno pri novih napravah), ker je pri prevelikem dvigu kalorične vrednosti mešanega plina PBZ potrebno dovajati za ca 55 % več zraka za zgorevanje, česar pa že instalirani ventilatorji, če niso predimenzionirani, ne bi prenesli.

Po definitivnem prehodu na odjem ZP bo najbolj razširjena kombinacija (B₄) dodajanja PBZ za kritje konične porabe ZPZ. Dispečer bo pri »porabi v pasu« ob prekoračitvi največjega dopustnega odjema zahteval redukcijo porabe ZP. To pomeni, da bo potrebno v plinski sistem obrata iz lastne mešalne postaje pričeti dodajati PBZ plin

v taki količini, da bo porabnikom dovedena potrebna in nezmanjšana količina toplotne energije $\dot{Q}$ kJ/h (kcal/h). Pri premajhnem odjemu, ki ne bi dosegel pogodbenega, bo obratovanje mešalne postaje prekinjeno.

Tabele 6, 7, 8 podajajo volumne RPM na potrebno toplotno obremenitev zaradi lažje razumljivosti. Kasneje bo za potrebe prakse, to je dispečerja v obratu, potrebno tabele z ozirom na redukcijo kurilnega plina obdelati še volumsko.

Kot je nakazano na sl. 3, bomo v primeru redukcije ali delnega, oz. celotnega izpada zemeljskega plina iz katerega koli razloga takoj dovedli PBZ plin in kurili z rezultirajočo plinsko mešanico RPM, ki bo sestavljena iz mešanice ZPZ + PBZ. Torej bomo imeli:

kurilni plin ZPZ — indeks 1

plin zamenjevalec PBZ — indeks 2

pri izpolnitvi pogoja:

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2$$

ali

$$\dot{Q}_1 = V_1 \cdot H_1 = \dot{Q}_2 \cdot H_2 \quad \text{kJ/h; (kcal/h)}$$

Tabela 6: Podatki o rezultirajoči plinski mešanici ob upoštevanju stopenj redukcije kurilnega plina (ZP)

Primer za varianto 2: ZP $\leftrightarrow$ PBZ; ZP — 36940 kJ/m³ (8823 kcal/m³)PBZ — 57719 kJ/m³ (13786 kcal/m³) K. P. — kurilni plin; $Z_{t_{ZP}} = 9,875 \text{ m}_n^3/\text{m}_n^3$, $Z_{t_{PBZ}} = 14,2 \text{ m}_n^3/\text{m}_n^3$

Stopnja redukcije R %	Rezultirajoča plinska mešanica RPM				Volumen K. P. ali RPM m_n / 1000 kJ ali (m_n ³ /1000 kcal)	H RPM kJ/ m_n ³ ali (kcal/ m_n ³)	Z_t	Z'_t	% Sestava K.P. ali RPM			ρ_n K. P. ali RPM	d
	V_{ZF}	V_{PBZ}	V_{ZF}	V_{PBZ}					V_{ZF}	V_{PBZ}	V_z		
	m_n ³ /1000 kJ;		%										
0	0,02707 (0,11334)	—	100	0	0,02707 (0,11334)	36940 (8823)	9,875	0,2673 (1,119)	100	0	0	0,7708	0,596
10	0,02435 (0,102)	0,00174 (0,00726)	93,36	6,64	0,02609 (0,10926)	38319,8 (9152,5)	10,13	0,2643 (1,107)	93,36	3,45	3,19	0,8446	0,653
20	0,02165 (0,09067)	0,00346 (0,01451)	86,21	13,79	0,02512 (0,10518)	39805 (9507)	10,47	0,263 (1,101)	86,20	7,17	6,63	0,924	0,715
30	0,01895 (0,07934)	0,00519 (0,02176)	78,48	21,52	0,02414 (0,1011)	41413 (9891)	10,81	0,261 (1,092)	78,48	11,18	10,34	1,009	0,781
40	0,01624 (0,068)	0,00693 (0,029)	70,09	29,91	0,02317 (0,0970)	43153 (10307)	11,17	0,2588 (1,083)	70,10	15,57	14,33	1,103	0,853
50	0,01353 (0,05667)	0,00866 (0,03627)	60,97	39,03	0,02219 (0,09294)	45050 (10760)	11,56	0,2566 (1,074)	60,97	20,28	18,75	1,204	0,9315

Tabela 7: Podatki o rezultirajoči plinski mešanici ob upoštevanju stopenj redukcije kurilnega plina (ZPZ)

Primer za varianto 3: ZPZ $\leftrightarrow$ PBZ; ZPZ — 15973 kJ/m³ (3815 kcal/m³)PBZ — 18840 kJ/m³ (4500 kcal/m³) K. P. — kurilni plin; $Z_{t_{ZPZ}} = 3,7 \text{ m}_n^3/\text{m}_n^3$, $Z_{t_{PBZ}} = 3,94 \text{ m}_n^3/\text{m}_n^3$

Stopnja redukcije R %	Rezultirajoča plinska mešanica RPM				Volumen K. P. ali RPM m _n ³ / 1000 kJ ali (m _n ³ /1000 kcal)	H RPM kJ/m _n ³ ali (kcal/m _n ³)	Z _i	Z' _i	% Sestava K.P. ali RPM			ρ _n K. P. ali RPM	d
	V _{ZPZ}	V _{PBZ}	V _{ZPZ}	V _{PBZ}					V _{ZP}	V _{PB}	V _Z		
	m _n ³ /1000 kJ;		%										
0	0,06261 (0,26212)	—	100	0	0,06261 (0,26212)	15973 (3815)	3,7	0,2316 (0,9698)	43,24	0	56,76	1,067	0,825
10	0,05634 (0,23591)	0,00531 (0,02222)	91,39	8,61	0,06165 (0,25813)	16219,5 (3874)	3,72	0,22935 (0,96025)	39,52	1,46	59,02	1,1032	0,853
20	0,05009 (0,20969)	0,01062 (0,04445)	82,51	17,49	0,06071 (0,25414)	16475 (3935)	3,74	0,22713 (0,9509)	35,68	2,97	61,35	1,1404	0,882
30	0,04382 (0,18348)	0,01592 (0,06667)	73,35	26,65	0,05974 (0,25015)	16737 (3997,5)	3,76	0,22465 (0,9406)	31,72	4,52	63,76	1,1786	0,911
40	0,03756 (0,15727)	0,02123 (0,08889)	63,89	36,11	0,05879 (0,24616)	17008 (4062)	3,78	0,22264 (0,9321)	27,63	6,13	66,24	1,2182	0,942
50	0,03130 (0,13106)	0,02654 (0,11111)	54,12	45,88	0,05784 (0,24217)	17288 (4129)	3,81	0,22038 (0,9227)	23,40	7,79	68,81	1,2591	0,974

Ob redukciji bo na razpolago reducirana količina ZP_R oz. ZPZ_R, torej bo potrebno dodati PBZ, kot sledi:

$$V_{IR} \cdot H_1 + V_2 \cdot H_2 = \dot{Q} \quad \text{kJ/h} \quad (28)$$

Količina plina zamenjevalca (PBZ) bo enaka:

$$V_2 = \frac{\dot{Q} - V_{IR} \cdot H_1}{H_2} \quad \text{m}_n^3 \quad (29)$$

Volumen rezultirajoče plinske mešanice bo enak:

$$V_{RPM} = V_{IR} + V_2 \quad \text{m}_n^3 \quad (30)$$

Tabela 8: Podatki o rezultirajoči plinski mešanici ob upoštevanju stopenj redukcije kurilnega plina (ZPZ)

Primer za varianto 7: ZPZ $\leftrightarrow$ PBZ; ZPZ — 25330 kJ/m³ (6050 kcal/m³)PBZ — 33494 kJ/m³ (8000 kcal/m³) K. P. — kurilni plin; $Z_{t_{ZPZ}} = 6,45 \text{ m}_n^3/\text{m}_n^3$, $Z_{t_{PBZ}} = 7,81 \text{ m}_n^3/\text{m}_n^3$

Stopnja redukcije R %	Rezultirajoča plinska mešanica RPM				Volumen K. P. ali RPM $m_n^3/$ 1000 kJ ali ($m_n^3/1000$ kcal)	H RPM kJ/ m_n^3 ali (kcal/ m_n^3)	Z_t	Z'_t	% Sestava K.P. ali RPM			ρ_n K. P. ali RPM	d
	V_{ZPZ}	V_{PBZ}	V_{ZPZ}	V_{ZP}					V_{PB}	V_Z			
	$m_n^3/1000$ kJ;		%										
0	0,03948 (0,16529)	—	100	0	0,03948 (0,16529)	25330 (6050)	6,45	0,2546 (1,066)	68,57	—	31,43	0,9349	0,723
10	0,03553 (0,14876)	0,002985 (0,0125)	92,26	7,74	0,03851 (0,16126)	25962 (6201)	6,55	0,25229 (1,056)	63,26	2,34	34,40	0,9892	0,765
20	0,03158 (0,13223)	0,00597 (0,025)	84,10	15,90	0,03755 (0,15723)	26628 (6360)	6,67	0,25034 (1,048)	57,67	4,79	37,54	1,046	0,809
30	0,02764 (0,1157)	0,00896 (0,0375)	75,52	24,48	0,0366 (0,1532)	27329 (6527)	6,78	0,24819 (1,039)	51,78	7,39	40,83	1,1063	0,855
40	0,02368 (0,09917)	0,01194 (0,050)	66,48	33,52	0,03562 (0,1492)	28066,8 (6704)	6,91	0,2462 (1,0307)	45,58	10,12	44,30	1,1696	0,9045
50	0,01974 (0,08265)	0,01493 (0,06249)	56,95	43,05	0,03467 (0,14514)	28845 (6889,5)	7,03	0,2439 (1,0212)	39,05	12,98	47,97	1,236	0,956

Teoretično potrebni zrak za zgorevanje (n=1):
(H_{PBZ} oz. H_{ZPZ} v kcal/m_n³).

$$Z_{t_{RPM}} = \frac{\text{vol \% PBZ}}{100} \left(1,1043 \frac{H_{PBZ}}{1000} - 1,02394 \right) + \frac{\text{vol \% ZPZ}}{100} \left(1,233 \frac{H_{ZPZ}}{1000} - 1,00415 \right) \quad (31)$$

$\text{m}_n^3/\text{m}_n^3$

V tabelah 6, 7 in 8 so za povprečne sestave osnovnih plinov iz tabel 1 in 2 za variante zamenjevanja:

ZP $\leftrightarrow$ PBZ (varianta 2) — tabela 4ZPZ $\leftrightarrow$ PBZ (varianta 3 in 7) — tabela 5

kot primer izračunani podatki o rezultirajoči plinski mešanici ob upoštevanju stopenj redukcije kurilnega plina (ZP) od 0 do 50 %. Ker je primerjava bolj pregledna, so vsi podatki, razen sestav, podani kot specifični, t.j. na 1000 kJ, oz. 1000 kcal.

Tabele 9, 10 in 11 podajajo primerjave specifične porabe zraka, primerjave pretočnega volumna RPM ter specifične količine vlažnih dimnih plinov za variante 2, 3 in 7.

Primerjava specifične porabe zraka (tabela 9) kaže, da sledi pri uvajanju večje količine PBZ v RPM, t.j. pri redukciji ZP, oz. ZPZ, zmanjšanje teoretične potrebne porabe zraka za zgorevanje. Z drugimi besedami — pri uvajanju RPM sledi pri nespremenjeni osnovni količini zraka za zgorevanje kurjenje z malenkostnim zračnim prebitkom (od ca 1 % do ca 5 % pri 50 % redukciji kurilnega plina).

Tabela 9: Primerjava specifične porabe zraka za zgorevanje pri redukciji kurilnega plina in zamenjavi razlike s plinom zamenjevalcem (ZP; ZPZ $\rightarrow$ $\rightarrow$ PBZ) pri pogoju $\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2$ in $p_1 = p_2$

Varianta	Stopnja redukcije R %	Z _t '		Razlika v %
		m _n ³ /1000 kJ	m _n ³ /1000 kcal	
2	0	0,2673	1,119	0
	10	0,2643	1,107	— 1,1
	20	0,263	1,101	— 1,6
	30	0,261	1,092	— 2,4
	40	0,2588	1,083	— 3,2
	50	0,2566	1,074	— 4,0
3	0	0,2316	0,9698	—
	10	0,22935	0,96025	— 0,98
	20	0,22713	0,9509	— 1,94
	30	0,22465	0,9406	— 3,0
	40	0,22264	0,9321	— 3,9
	50	0,22038	0,9227	— 4,8
7	0	0,2546	1,066	—
	10	0,25229	1,056	— 0,92
	20	0,25034	1,048	— 1,68
	30	0,24819	1,039	— 2,52
	40	0,2462	1,0307	— 3,30
	50	0,2439	1,0212	— 4,2

Tabela 10: Primerjava pretočnega volumna kurilnega plina, oziroma RPM pri redukciji kurilnega plina (ZP; ZPZ → PBZ) pri pogoju $\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2$ in $p_1 = p_2$.

Varianta	Stopnja redukcije R %	Volumen kurilnega plina ali RPM		Faktor zmanjšanja	
		$m_n^3/1000 \text{ kJ}$	$m_n^3/1000 \text{ kcal}$	Num.	%
2	0	0,02707	0,11334	—	—
	10	0,02609	0,10926	— 3,6	— 0,964
	20	0,02512	0,10518	— 7,2	— 0,928
	30	0,02414	0,1011	— 10,8	— 0,892
	40	0,02317	0,0970	— 14,4	— 0,856
	50	0,02219	0,09294	— 18,0	— 0,82
3	0	0,06261	0,26212	—	—
	10	0,06165	0,25813	— 1,52	— 0,9848
	20	0,06071	0,25414	— 3,04	— 0,9696
	30	0,05974	0,25015	— 4,57	— 0,9543
	40	0,05879	0,24616	— 6,10	— 0,939
	50	0,05784	0,24217	— 7,60	0,924
7	0	0,03948	0,16529	—	—
	10	0,03851	0,16126	— 2,44	— 0,9756
	20	0,03755	0,15723	— 4,88	— 0,9512
	30	0,0366	0,1532	— 7,3	— 0,927
	40	0,03562	0,1492	— 9,7	— 0,903
	50	0,03467	0,14514	— 12,2	— 0,878

Tabela 11: Primerjava volumna vlažnih dimnih plinov pri redukciji kurilnega plina in zamenjavi razlike s plinom zamenjevalcem (ZP; ZPZ → PBZ) pri pogoju $\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2$ in $p_1 = p_2$.

Varianta	Stopnja redukcije R %	Volumen vlažnih dimnih plinov		Faktor	
		$m_n^3/1000 \text{ kJ}$	$m_n^3/1000 \text{ kcal}$	%	Num.
2	0	0,2964	1,241	—	—
	10	0,2945	1,233	— 0,64	— 0,9936
	20	0,2923	1,224	— 1,38	— 0,9862
	30	0,2907	1,217	— 1,93	— 0,9807
	40	0,2888	1,209	— 2,56	— 0,9744
	50	0,2868	1,201	— 3,23	— 0,9677
3	0	0,2953	1,236	—	—
	10	0,2933	1,228	— 0,64	— 0,9936
	20	0,2917	1,221	— 1,21	— 0,9879
	30	0,2897	1,213	— 1,86	— 0,9814
	40	0,2878	1,205	— 2,5	— 0,9750
	50	0,2859	1,197	— 3,17	— 0,9683
7	0	0,30882	1,239	—	—
	10	0,29282	1,226	— 1,05	— 0,9895
	20	0,29211	1,223	— 1,29	— 0,9871
	30	0,29019	1,215	— 1,94	— 0,9806
	40	0,28805	1,206	— 2,66	— 0,9734
	50	0,28637	1,199	— 3,23	— 0,9677

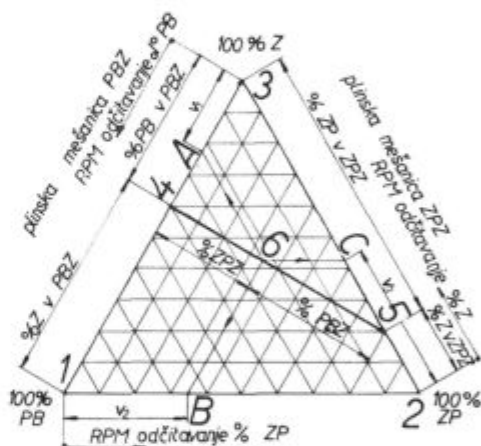
Ker se kalorična vrednost RPM ob dodajanju PBZ k ZPZ plinu povečuje, se specifični pretočni volumen RPM, kot kaže tabela 10, zmanjšuje (za —3,6 do —18 % pri varianti 2 ter —1,52 do —12,2 % pri varianti 3 oz. 7).

Podobno stanje je, kot kaže tabela 11, pri specifični količini vlažnih dimnih plinov. Pri večji stopnji kurilnega plina (ZP ali ZPZ) se ob dodajanju PBZ v RPM količina vlažnih dimnih plinov neznatno zmanjšuje.

2.4 GRAFIČNA OBRAVNAVA ZAMENLJIVOSTI

Vsa možna stanja mešanja osnovnih treh plinov — plinska faza PB — zemeljski plin ZP — zrak

v rezultirajočo plinsko mešanico RPM, kot je shematsko prikazano na sl. 5 in sl. 6, lahko grafično interpretiramo, kot kaže diagram na sl. 7.



Slika 7

Mešanje treh osnovnih plinov in primer rezultirajoče plinske mešanice PBZ + ZPZ (točka 6)

Fig. 7

Mixing three basic gases and an example of the obtained PBZ + ZPZ (point 6) gas mixture

Ogljišča enakokrakega trikotnika, ki tvorijo osnovo diagrama mešanja, določajo trije osnovni plini:

- plinska faza PB ogljišče 1
- zemeljski plin ZP ogljišče 2
- zrak Z ogljišče 3

s svojimi snovnimi lastnostmi.

Mešanje v diagramu mešanja predstavlja mešalna premica. Tudi stranice enakostraničnega trikotnika so mešalne premice, in sicer:

- stranica 13 predstavlja mešalno premico mešanja plinske faze PB + zraka (plinsko mešanico PBZ)
- stranica 23 predstavlja mešalno premico mešanja zemeljskega plina ZP + zraka (plinska mešanica ZPZ)

— stranica 12 predstavlja mešalno premico mešanja plinske faze PB + zemeljskega plina (teoretična varianta)

Točka 4 na stranici enakostraničnega trikotnika 13 predstavlja plinsko mešanico PBZ sestave
% plinske faze PB razdalja 34
% zraka Z razdalja 14

Točka 5 na stranici enakostraničnega trikotnika 23 predstavlja plinsko mešanico ZPZ sestave
% zemeljskega plina ZP razdalja 35
% zraka Z razdalja 25

Mešanje plinske mešanice PBZ + plinska mešanica ZPZ ali čisti ZP, primeri konic in izpadov, kot je prikazano na diagramu na sl. 2 in sl. 3, nam v diagramu mešanja ponazarja mešalna premica 45.

Točka 6 na mešalni premici 45 predstavlja rezultirajočo plinsko mešanico RPM naslednje sestave

% plinske mešanice PBZ razdalja 56
% plinske mešanice ZPZ razdalja 46

Rezultirajoča plinska mešanica RPM je sestavljena iz plinske faze PB, zemeljskega plina ZP in zraka Z. V diagramu mešanja lahko tudi direktno

odčitamo sestavo rezultirajoče plinske mešanice RPM, sestavljeno iz osnovnih plinov, in sicer pomeni:

— razdalja $\overline{A3} = V_1$, % PB v rezultirajoči plinski mešanici RPM

— razdalja $\overline{B1} = V_2$, % ZP v rezultirajoči plinski mešanici RPM

— razdalja $\overline{C2} = V_3$, % Z v rezultirajoči plinski mešanici RPM

Če v diagram mešanja vrišemo linije konstantnih

- gostot,
- teoretično potrebnega zraka za zgorevanje,
- kurilnosti,
- Wobbejevega indeksa,

lahko direktno grafično zasledujemo spreminjanje posameznih snovnih lastnosti rezultirajoče plinske mešanice RPM v odvisnosti od stopnje redukcije.

2.4.1 GRAFIČNA INTERPRETACIJA GOSTOTE REZULTIRAOČE PLINSKE MEŠANICE

Gostota za poljubno stanje v diagramu mešanja je definirana z vsoto posameznih osnovnih komponent

Osnova za izdelavo diagrama

Gostota PB $\rho_{PB} = 2,426 \text{ kg/m}^3$

Gostota ZP $\rho_{ZP} = 0,7708 \text{ kg/m}^3$

Gostota Z $\rho_Z = 1,293 \text{ kg/m}^3$

Z.....zrak

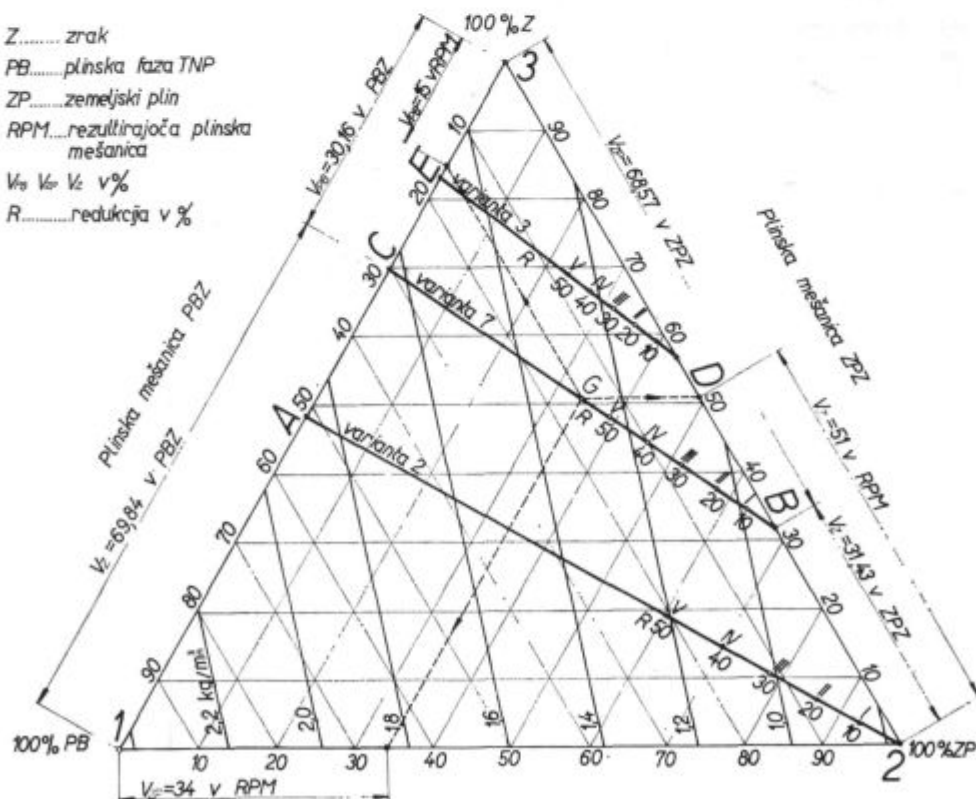
PB.....plinska faza TNP

ZP.....zemeljski plin

RPM.....rezultirajoča plinska mešanica

V_1, V_2, V_3 v %

R.....redukcija v %



Slika 8

Linije konstantnih gostot v diagramu mešanja PB-ZP-Z

Fig. 8

Isodensity lines in the diagram of PBZ-ZP-Z mixing

$$\rho_{RPM} = \sum_{i=1}^3 v_i \cdot \rho_i \quad \text{kg/m}^3_n \quad (32)$$

Za podane vrednosti osnovnih plinov so v diagramu mešanja na sl. 8 prikazane linije konstantnih gostot pri pogoju, da je

$$\sum_{i=1}^3 v_i = 1 \quad (33)$$

Linije konstantnih gostot so premice, ki so med sabo vzporedne in potekajo od najnižje gostote, gostota zemeljskega plina $\rho_z = 0,7708 \text{ kg/m}^3_n$, do najnižje gostote, gostota za plinsko fazo PB $\rho_1 = 2,426 \text{ kg/m}^3_n$.

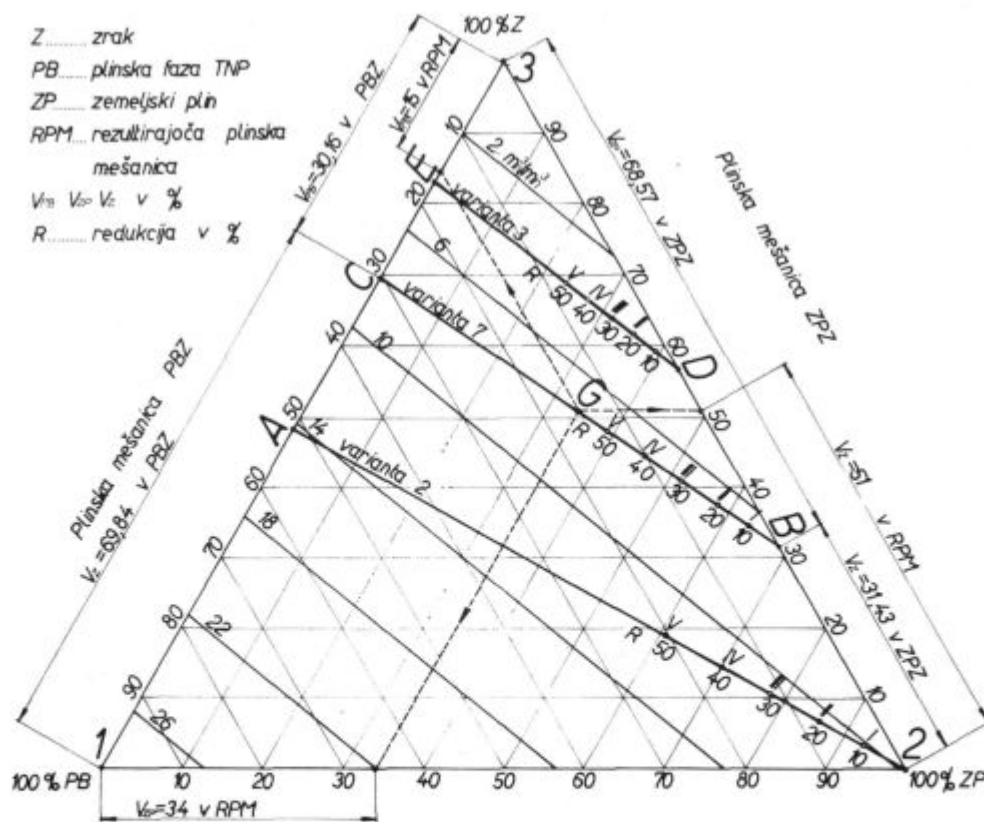
Istočasno je v diagramu vrisan še primer grafičnega zasledovanja redukcije kurilnega plina, ki ga nadomešča plin zamenjevalec. Vrisane so tri variante, ki so obdelane že računsko, in sicer varianta 2, varianta 3 in varianta 7 (tabela 4).

Osnova za izdelavo diagrama

Zgorevalni zrak $Z_n = 28,19 \text{ m}^3/\text{m}^3$

Zgorevalni zrak $Z_n = 3,875 \text{ m}^3/\text{m}^3$

Z..... zrak
PB..... plinska faza TNP
ZP..... zemeljski plin
RPM..... rezultirajoča plinska mešanica
 V_n, V_o, V_z v %
R..... redukcija v %



Slika 9

Linije konstantnih količin zraka za zgorevanje ($n = 1$) v diagramu mešanja PB-ZP-Z

Fig. 9

Lines of the constant amounts of air for combustion ($n = 1$) in the diagram of PB-ZP-Z mixing

V diagram mešanja, v katerem so vrisane linije konstantnih gostot, vrišemo mešalne premice za posamezne variante.

Varianta 2 je vrisana z mešalno premico $\overline{2A}$

Varianta 7 je vrisana z mešalno premico $\overline{BC}$

Varianta 3 je vrisana z mešalno premico $\overline{DE}$

Detajlneje opišemo samo varianto 7, ki jo ponazarja mešalna premica $\overline{BC}$. Začetni točki mešalne premice sta določeni s točkami B in C. Točka B določa plinsko mešanico ZPZ, sestave $V_{ZP} = 68,57\%$ in $V_Z = 31,43\%$. Gostota plinske mešanice leži med linijama konstantnih gostot 0,9 in $1,0 \text{ kg/m}^3_n$ in znaša $\rho_B = 0,93 \text{ kg/m}^3_n$. Točka C določa plinsko mešanico BPZ, sestave $V_{PB} = 30,16\%$ in $V_Z = 69,84\%$, gostota plinske mešanice leži med linijama konstantnih gostot 1,6 in $1,7 \text{ kg/m}^3_n$ in znaša $\rho_C = 1,63 \text{ kg/m}^3_n$. Če vzamemo točko na mešalni premici $\overline{BC}$, točka G, lahko iz diagrama za to točko odčitamo sestavo n gostoto za izbrano točko. Rezultirajoča plinska mešanica, ki je predstavljena s točko G na mešalni premici, ima naslednjo sestavo:

$V_{PBZ} = 50 \%$ (delež plinske mešanice PBZ
sestave $V_{PB} = 30,16 \%$
in $V_Z = 69,84 \%$)

$V_{ZPZ} = 50 \%$ (delež plinske mešanice ZPZ
sestave $V_{ZP} = 68,57 \%$
in $V_Z = 31,43 \%$)

Istočasno lahko za izbrano rezultirajočo plinsko mešanico odčitamo tudi sestavo iz osnovnih plinov.

Rezultirajoča plinska mešanica je sestavljena iz
 $V_{PB} = 15,0 \%$ (delež PB v RPM točka G)
 $V_{ZP} = 34,0 \%$ (delež ZP v RPM točka G)
 $V_Z = 51,0 \%$ (delež Z v RPM točka G)

Gostota rezultirajoče plinske mešanice leži med linijama konstantnih gostot 1,2 in 1,3 kg/m³_n in znaša 1,28 kg/m³_n.

Točke, ki so na mešalni premici označene z I, II, III, IV in V, pomenijo % delež dodajanja plina zamenjevalca PBZ kurilnemu plinu ZPZ, oziroma ponazarjajo stopnjo redukcije po tabeli 8 pri pogoj, da dovedena toplota z rezultirajočo plinsko mešanico ostane konstantna.

2.4.2 SPREMEMBA KOLIČINE ZRAKA ZA ZGOREVANJE

Za oba osnovna plina ter zemeljski plin in plinsko fazo PB — mešana z zrakom, določimo teoretično količino zraka za zgorevanje po naslednjih enačbah, ki so bile izračunane iz podatkov osnovnih plinov.

a) Zemeljski plin in mešanica zemeljski plin + zrak (ZP in ZPZ)

$$Z_t = 1,233 \cdot \frac{H_{sp}}{4187} - 1,00415 \text{ m}^3_n/\text{m}^3_n$$

$$(H_{sp} - \text{kJ}/\text{m}^3_n)$$

$$Z_t = 1,233 \cdot \frac{H_{sp}}{1000} - 1,00415 \text{ m}^3_n/\text{m}^3_n$$

$$(H_{sp} - \text{kcal}/\text{m}^3_n)$$

b) Plinska faza PB in mešanica plinske faze PB + zrak (PB in PBZ)

$$Z_t = 1,1043 \cdot \frac{H_{sp}}{4187} - 1,02394 \text{ m}^3_n/\text{m}^3_n$$

$$(H_{sp} - \text{kJ}/\text{m}^3_n)$$

$$Z_t = 1,1043 \cdot \frac{H_s}{1000} - 1,02394 \text{ m}^3_n/\text{m}^3_n$$

$$(H_{sp} - \text{kcal}/\text{m}^3_n)$$

Za obravnavane vrednosti obravnavanih plinov, oziroma plinskih mešanic so v diagramu mešanja na sl. 9 vrisane linije konstantnih količin zraka ($n = 1$).

V diagramu na sl. 9 so ponovno vrisane že predhodno obravnavane variante, varianta 2, varianta 3 in varianta 7. S pomočjo diagrama direktno odči-

tujemo za posamezne točke rezultirajoče plinske mešanice potrebno količino zraka za zgorevanje. Ponovno podrobneje obravnavamo varianto 7. Potrebna količina zraka za zgorevanje za plinsko mešanico ZPZ, točka B, znaša 6,45 m³_n/m³_n. Potrebna količina zraka za zgorevanje plinske mešanice PBZ, točka C, znaša 7,81 m³_n/m³_n. Za izbrano točko G znaša potrebna količina zraka 7,18 m³_n/m³_n.

2.4.3 INTERPRETACIJA KURILNOSTI REZULTIRAJOČE PLINSKE MEŠANICE V DIAGRAMU MEŠANJA

Kurilnost rezultirajoče plinske mešanice je definirana z vsoto

$$H_{RPM} = \sum_{i=1}^3 v_i \cdot H_i \quad \text{kJ}/\text{m}^3_n; (\text{kcal}/\text{m}^3_n) \quad (38)$$

$H_3 = 0$ kurilnost zraka

Pri tem mora biti izpolnjen pogoj, da je

$$\sum_{i=1}^3 v_i = 1 \quad (39)$$

V diagramu mešanja na sl. 10 so vrisane premice konstantnih kurilnih vrednosti.

Grafično obravnavamo varianto 2, varianto 3 in varianto 7. Podrobneje je obdelana samo varianta 7. Kurilni plin je določen s sestavo v točki B na premici 23 in njegova kurilnost znaša 25 330 kJ/m³_n. Plin zamenjevalec je določen s točko C na premici 13 in njegova kurilnost znaša 33 494 kJ/m³_n. Točka G na mešalni premici CB ima sestavo 15 % PB, 34 % ZP in 51 % Z. Za navedeno sestavo se iz diagrama odčita kurilnost rezultirajoče plinske mešanice G, ki znaša 29 400 kJ/m³_n.

Grafična interpretacija razmer ob zamenjevanju plinov, oziroma mešanju v RPM, je nazorna in zlasti primerna za privajanje dispečerskih delavcev na problematiko zamenjevanja v času, ko tovrstne delavce šele izobražujemo.

Ker je z dosedaj navedenim šele nakazano, kakšne razmere bodo nastale v plinskem sistemu, je potrebna nadaljna podrobna obravnava sprememb pretočnih količin plina, zraka za zgorevanje in dimnih plinov v zvezi z meritvami in regulacijami, ki jih uporabljamo v obratih. Priključevanje na magistralni vod, oz. razvodno primarno mrežo je ob upoštevanju vseh variant in specifičnosti porabnikov posebno zanimivo. Vsa navedena tematika pa bo obdelana v drugem delu članka, ki sledi.

Uporabljene oznake:

$\dot{V}_{\max}$ — maksimalni odvajem na uro m³_n/h
h — čas v urah
S — cena zemeljskega plina din/mes

Osnova za izdelavo diagrama

Kurilnost PB $H_{\text{PB}} = 111,038 \text{ MJ/m}^3$

Kurilnost ZP $H_{\text{ZP}} = 36,939 \text{ MJ/m}^3$

Kurilnost Z $H_{\text{Z}} = 0$

Z.....zrak

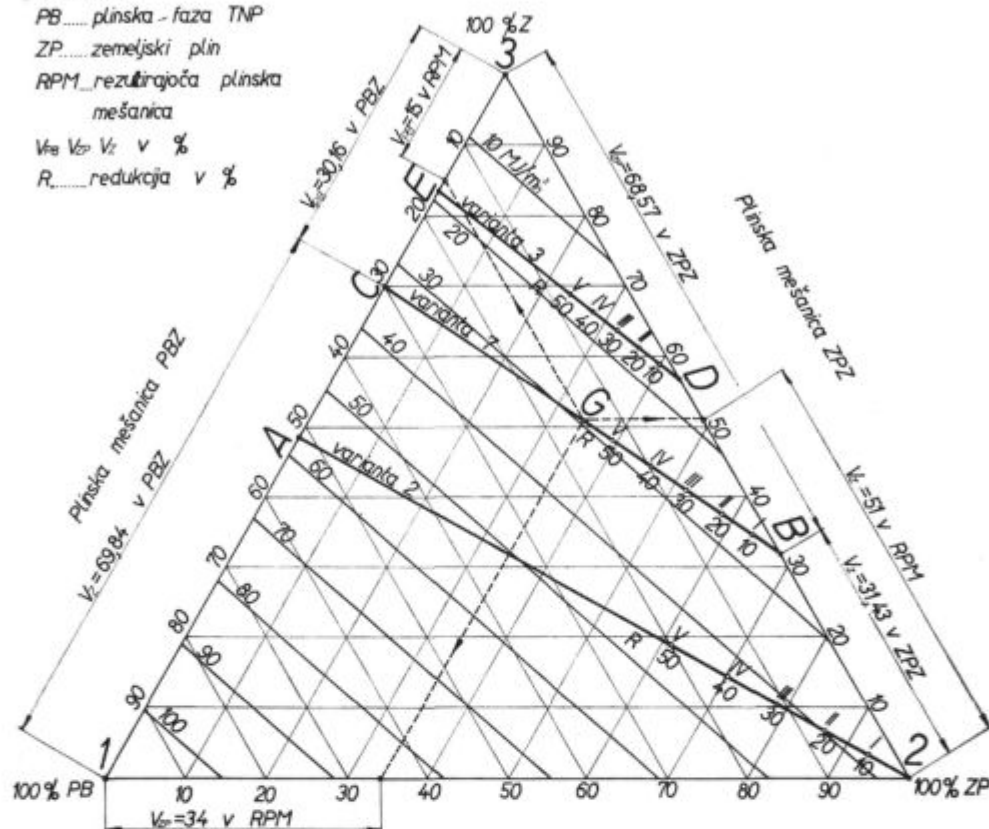
PB.....plinska - faza TNP

ZP.....zemeljski plin

RPM.....rezultirajoča plinska
mešanica

V_{PB} V_{ZP} V_{Z} v %

R.....redukcija v %



Slika 10

Linije konstantnih kurilnih vrednosti v diagramu mešanja PB-ZP-Z

Fig. 10

Lines of constant calorific values in the diagram of PB-ZP-Z mixing

a	— faktor transportnih stroškov $\text{din/m}^3_{\text{n}}$	$\dot{q}$	— prenos toplote s sevanjem plina $\text{kJ/m}^2, \text{h}$
b	— faktor enakomernosti odjema $\text{din/m}^3_{\text{n}}$	p_{CO_2}	— parcialni tlak CO_2 v dimnih plinih
c	— cena plina + carina (cena zemeljskega plina na meji) $\text{din/m}^3_{\text{n}}$	$p_{\text{H}_2\text{O}}$	— parcialni tlak H_2O v dimnih plinih
$\dot{V}$	— dejanska porabljena količina zemeljskega plina na mesec po števcu $\text{m}^3_{\text{n}}/\text{mes}$	s	— debelina plasti plina, ki seva m
$\dot{V}_{\text{max}}$	— maksimalna planirana količina zemeljskega plina na mesec $\text{m}^3_{\text{n}}/\text{mes}$	$\dot{Q}$	— toplotna obremenitev kJ/h (kcal/h)
K_1	— faktor neenakomernosti porabe plina	H	— kalorična ali kurilna vrednost kJ/m^3_{n} ($\text{kcal/m}^3_{\text{n}}$)
K_2	— faktor dejanske porabe	H_{zg}	— zgorevna ali zgornja kalorična vrednost
C	— cena zemeljskega plina pri porabniku $\text{din/m}^3_{\text{n}}$	$\dot{V}$	— volumski pretok $\text{m}^3_{\text{n}}/\text{h}$
p	— tlak plina N/m^2	w	— hitrost pretoka m/s
L	— dolžina plamena, m	α	— pretočni koeficient šobe
x/d_u	— razmerje merjene veličine in premera ustja gorilnika	ρ_{n}	— gostota plina kg/m^3_{n}
ϑ_{sr}	— srednja temperatura plamena v oddaljenosti od ustja gorilnika	A	— prerez m^2
		n	— indeks n označuje normne pogoje (0°C , 1013 mbar)
		d	— relativna gostota (zrak d = 1)

W_{zg}, W_{sp}	— Wobbejev indeks v odnosu na zgornjo oz. spodnjo kalorično vrednost	Z_t	— specifična poraba zraka $m^3_n/1000 \text{ kJ}$ ($m^3_n/1000 \text{ kcal}$)
ϑ	— temperatura $^{\circ}\text{C}$	V_{PB}	— volumski delež PB v $m^3_n/m^3_n \text{ PBZ}$
η	— dinamična viskoznost kg/ms	V_{ZP}	— volumski delež ZP v $m^3_n/m^3_n \text{ ZPZ}$
O_t	— teoretično potrebna količina kisika m^3_n/m^3_n	V_Z	— volumski delež zraka v plinski mešanici v m^3_n/m^3_n
Z_t	— teoretično potrebna količina zraka m^3_n/m^3_n	ρ_{RPM}	— gostota rezultirajoče plinske mešanice kg/m^3_n
D_{vl}, D_s	— teoretična količina vlažnih, suhih dimnih plinov m^3_n/m^3_n	RPM	— rezultirajoča plinska mešanica
		H_{RPM}	— kurilnost rezultirajoče plinske mešanice kJ/m^3_n (kcal/m^3_n)

ZUSAMMENFASSUNG

Bei der Substitution des Heizgases mit einem gleichwertigen substituierenden Gas muss auch die kontraktmässig bedingte Abnahme berücksichtigt werden, wobei die Grundbedingungen — eine konstante Wärmebeanspruchung der Anlagen und ein konstanter Druck im Gassystem — beibehalten werden müssen. Diese Abhängigkeiten sind rechnermässig bearbeitet. Durch eine graphische Darstellung sind die Änderungen in der Zusammensetzung der resultierenden Gasmischung und daraus ausgehenden Änderungen der Verbrennungscharakteristik gezeigt. Als Grundlage für die rechnerischen Ausführungen ist der Ausgleich des modifizierten Ausdruckes für den Wobbe Index genommen. Die Substitution bedingt die Änderungen der Dichte der Gasmischung, bzw. bei der Reduktion der Heizgasmenge der resultierenden Gasmischung aus dem Heizgas und dem substituierenden Gas.

Der Ausgangspunkt für die Behandlung der Substitution ist der gegenwärtige Stand in der Eisenhütten bzw. Verarbeitungsindustrie, wo zu dieser Zeit der Heizgas aus der Gasphase des flüssigen Erdölgases gemischt mit Luft, besteht. Später nach dem Anschluss an die Erdgasleitung wird die Situation umgekehrt. Der flüssige Erdöl wird als Gasmischung Propan-Butan-Luft den substituierenden Gas darstellen und Erdgas wird Heizgas. Die Substitution

der Heizgase verbunden mit der Änderung der Dichte der Gasmischung, bedingt durch das Zumischen der Luft und damit auch durch die Änderung des Heizwertes des Heizgases, stellt bei uns schon eine eingebürgerte Technologie der Gaserzeugung dar.

Der Vergleich an spezifischem Luftverbrauch für die Verbrennung zeigt, dass bei der wachsenden Reduktion des Erdgases als Heizgases und einem entsprechenden Zusatz des Substitutionsgases (Propan-Butan-Luft) eine Verminderung des Luftverbrauches für die Verbrennung (für cca 9.5 % bei 100 % Reduktion, dass heisst, bei voller Substitution des Heizgases EG mit PBL) die Folge ist.

Da der kalorische Wert der resultierenden Gasmischung bei der Reduktion des Erdgases wegen des Zusatzes von PBL grösser wird, wird der spezifische Durchflussvolumen kleiner (für cca 15 % bei 100 % Reduktion).

In den Tabellen werden die Änderungen bei der Reduktion bis zu 50 % gezeigt.

In der graphischen Darstellung mit Mischdreiecken werden die Änderungen der Zusammensetzung der Dichte und des Heizwertes bei der vollkommenen oder teilweisen Substitution des Heizgases und substituierenden Gases dargestellt.

SUMMARY

In substitution of fuel gas by a converting gas as an equivalent gas also contract band — consumption must be taken into account beside the preservation of basic characteristics: constant thermal load of set-ups, and constant pressure in the gas system. It essentially influences the price of the delivered gas. Variations in the composition of the obtained gas mixture together with the resulting variations of combustion characteristics are calculated and graphically presented in the paper. Basis for the mathematical deduction was the equalization of the modified expression for Wobbe's index. The conversion determines the variations of the density of the gas mixture, and the resulting gas mixtures of the fuel and the converting gas when the fuel gas is reduced.

Starting point for treating the conversion is the present state in ferrous metallurgy and in working industry where fuel gas at the moment is the gas phase of liquid oil gas mixed with air while the connection to the natural gas pipe line will change the whole situation. Liquid gas will be the converting gas as a propane-butane-air mixture

while natural gas will become the fuel gas. Conversion with a variation of the gas mixture density which is determined by the added air and thus also the variation of the calorific value of gas can be achieved by mixing stations which is already a well known technology of gas production with us.

Analysis of the specific consumption of the combustion air shows that the reduced amount of natural gas as fuel gas and addition of corresponding amount of the converting gas (PBZ) demands a reduction of the combustion air (about 9.5 % at the total reduction i. e. when fuel gas ZP is substituted by PBZ).

Since the calorific value of the obtained gas mixture increases with the reduced amount of natural gas and addition of PBZ, the specific flow rate is also reduced (for about 15 % at the total reduction). Tables show variations for reductions up to 50 % while triangles of mixing present variations of composition, density, and calorific value at the total of partial conversion of fuel gas by a converting gas.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При замены горючих разов с эквивалентным газом-заменителем, при сохранении основных условий, т. е. постоянный тепловой нагрузки агрегатов и постоянного давления газа в газовой системе, надо учесть также договорный район приемки. Это имеет существенное значение на цену поставленного газа. В статье рассмотрена расчетная и графическая интерпретация изменения в составе равнодействующей газовой смеси и вытекающие из этого изменения характеристик сгорания. Как основание для расчетного исполнения взято уравнение модифицированного выражения индекса по Wobb-y. Замена обусловлена от изменения густоты газовой смеси, относ. от редукции горючего газа, от равнодействующей газовой смеси горючего газа и газа-заменителя.

Исходной пункт для рассмотрения замены представляет настоящее положение в металлургических заводах и в промышленности переработки где пока еще как горючий газ газовая фаза жидкого нефтяного газа с воздухом, позже, после приключения на приемку природного газа, положение измениться. Роль газа-заменителя возмет на себя газовая смесь пропан-бутан-воздух, а горючего-природный газ. Замена, при изменении густоты смеси газа,

условленная добавлением воздуха и, в связи с этим, изменение теплового эффекта, выполняется в смесительных установках, которые уже широко применяются в нашей промышленности при производстве газа.

При рассмотрении о удельном расходе воздуха установлено, что при повышении редукции природного газа как горючего, с добавлением соответствующего количества газа-заменителя, расход необходимого для сгорания, уменьшается (на 9,5 % при 100 % редукции, т. е. полная замена природного газа с газовой смесью пропан-бутан-воздух).

Так как при редукции природного газа при добавки смеси пропан-бутан-воздух теплота сгорания увеличивается, то уменьшается удельный объем пропускания (прибл. на 15 % при 100 % редукции). В виде примера поданы при помощи таблиц изменения до 50 %. Рассмотрены также графические конструкции смесительных треугольников, которые указывают на состояние состава, на густоту и на тепловой эффект при полной или частичной замены горючего газа или газа-заменителя.