

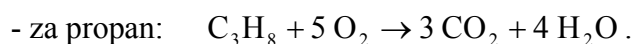
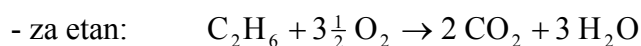
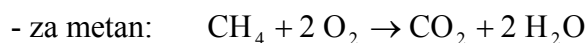
201. Plinsko gorivo volumenskog sastava: 80 % metana, 15 % etana i 5 % propana potpuno izgara s 15 % pretička zraka.
- Kolika bi se temperatura postigla u toplinski izoliranom ložištu, ako gorivo ulazi u ložište s 0 °C, a zrak za izgaranje s 250 °C? (Pretpostaviti 2000 °C!).
  - Ako stijenke ložišta *nisu izolirane*, nego se za vrijeme izgaranja toplinski tok odvodi iz ložišta, koliko topline treba odvesti da bi temperatura dimnih plinova na izlazu iz ložišta bila 1300 °C?
  - Dimni plinovi izlaze s temperaturom 200 °C u okoliš normalnog stanja. Koliki su gubici osjetne topline i koliki je protočni volumen dimnih plinova u dimnjaku, ako je protočna količina goriva 10 kmol/h?

Računati sa srednjim specifičnim (molarnim) toplinskim kapacitetima!

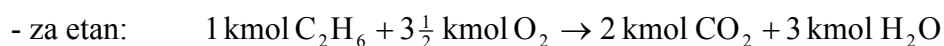
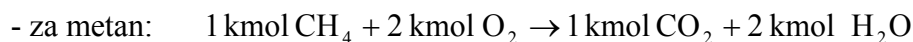
\*\*\* Rješenje:

(Svrha zadatka: Pokazati osnovne stehiometrijske jednadžbe izgaranja i kako se s pomoću njih mogu izračunati sve potrebne veličine. Pokazati računanje temperature u ložištu, kako izoliranom, tako i neizoliranom.)

Gorivo je plinska smjesa metana (CH<sub>4</sub>), etana (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) i propana (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>). Za svaki od ta tri plina, stehiometrijska jednadžba izgaranja glasi (broj atoma na lijevoj i desnoj strani jednadžbe mora biti jednak):



Kako je po definiciji 1 kmol = 6,023·10<sup>26</sup> elementarnih čestica (onakvih, u kakvom se obliku tvar pojavljuje), gornje se jednadžbe mogu pomnožiti s Loschmidtovim (Avogadrovim) brojem (6,023·10<sup>26</sup>), tako da se, umjesto na pojedine čestice, odnose na kilomolove dotičnih sudionika:



a u tom obliku ove jednadžbe opisuju sve stehiometrijske odnose pri izgaranju. Primjerice, prva jednadžba za metan kaže da za izgaranje jednog kilomola metana trebaju dva kilomola kisika, da nastaje jedan kilomol ugljikovog dioksida i dva kilomola vodene pare.

U jednom kilomolu goriva sadržano je 0,8 kmol metana, 0,15 kmol etana i 0,05 kmol propana, pa je minimalna (stehiometrijska, teoretska) količina kisika za izgaranje jednoga kilomola goriva zbroj pojedinačnih potrebnih količina:

$$O_{\min} = 0,8 \cdot 2 + 0,15 \cdot 3,5 + 0,05 \cdot 5 = 2,375 \text{ kmol}_{\text{O}_2} / \text{kmol}_{\text{G}}$$

Ako se kisik za izgaranje dovodi u zraku (koji ga sadrži 21 % - molni), količinski treba oko pet puta više zraka (točnije: 1/0,21):

$$Z_{\min} = \frac{O_{\min}}{0,21} = \frac{2,375}{0,21} = 11,31 \text{ kmol/kmol.}$$

Za svako izgaranje, želimo li da bude potpuno, treba dovesti više zraka od minimalne količine, i to  $\lambda$  - puta ( $\lambda$  je "faktor pretička zraka"):

$$Z_{\text{stv}} = \lambda \cdot Z_{\text{min}} = \lambda \cdot \frac{O_{\text{min}}}{0,21} = 1,15 \cdot \frac{2,375}{0,21} = 13,006 \text{ kmol/kmol}.$$

Količine dimnih plinova koje nastaju izgaranjem odabrane jedinice goriva (1 kmol) također slijede iz stehiometrijskih jednadžbi:

- količina ugljikovog dioksida određena je količinom ugljika u gorivu:

$$n_{\text{CO}_2} = 0,8 \cdot 1 + 0,15 \cdot 2 + 0,05 \cdot 3 = 1,25 \text{ kmol/kmol}$$

gdje je  $n_{\text{CO}_2}$  oznaka za količinu nastalog ugljikovog dioksida po odabranoj jedinici goriva.

- količina vodene pare određena je količinom vodika u gorivu (i vlage, kad bi je u gorivu bilo):

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = 0,8 \cdot 2 + 0,15 \cdot 3 + 0,05 \cdot 4 = 2,25 \text{ kmol/kmol}.$$

- količina slobodnoga kisika je zapravo višak dovedenoga kisika, tj. razlika između dovedenog kisika ( $O_{\text{stv}} = \lambda O_{\text{min}}$ ) i onoga ( $O_{\text{min}}$ ) koji se uopće može potrošiti, dakle, koji se ima s čime spojiti:

$$n_{\text{O}_2} = (\lambda - 1) O_{\text{min}} = (1,15 - 1) \cdot 2,375 = 0,3563 \text{ kmol/kmol}$$

- pojavljuje se još i dušik, jer se dovodi sa zrakom (koji ga sadrži 79 % - molnih):

$$n_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot Z_{\text{stv}} = 0,79 \cdot 13,006 = 10,2747 \text{ kmol/kmol}.$$

Svi oni zajedno čine "vlažne dimne plinove", tj. to su stvarni dimni plinovi koji nastaju izgaranjem:

$$n_{\text{vl}} = n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} = 14,131 \text{ kmol/kmol},$$

a bez vodene pare to bi bili tzv. "suhi dimni plinovi", koji nisu stvarni. No, za potrebe mjerenja sastava dimnih plinova, uzorak bi se ohladio na okolišnu temperaturu, pri čemu bi vlaga kondenzirala (ili se uklonila apsorpcijom), tako da se mjerenjem obično dobije "sastav suhih dimnih plinova", primjerice Orsatovim-aparatom. Osim kad se u račun ulazi s mjerenim sastavom suhih dimnih plinova, ili se računa njihov sastav, u ostalim se situacijama redovito računa sa stvarnim, dakle, vlažnim dimnim plinovima!

Temperatura izgaranja (ili temperatura dimnih plinova na izlazu iz ložišta), bez obzira na to je li izgaranje potpuno ili nije, te je li ložište izolirano ili nije, određena je energijskom bilancom (Prvim glavnim stavkom) i može se računati s pomoću jednadžbe:

$$q_{\text{izg}} = \frac{\Delta h_d + h_G + Z_{\text{stv}} H_{\text{m,z}} - |q_{\text{odv}}|}{\sum n_i [C_{\text{mp},i}]_0^{q_{\text{izg}}}}, \quad \text{ili:} \quad q_{\text{izg}} = \frac{\Delta H_{\text{m,d}} + H_{\text{m,G}} + Z_{\text{stv}} H_{\text{m,z}} - |q_{\text{odv}}|}{\sum n_i [C_{\text{mp},i}]_0^{q_{\text{izg}}}},$$

u kojoj je  $\Delta h_d$  (J/kg<sub>G</sub>), dotično  $\Delta H_{\text{m,d}}$  (J/kmol) donja ogrjevna vrijednost goriva po odabranoj jedinici goriva (onoj, s kojom se računa cijeli zadatak) i odnosi se na potpuno izgaranje. Ovdje se računa s donjom ogrjevnom vrijednošću, jer je temperatura u ložištu vrlo visoka, pa se dio energije troši za prevođenje vlage (bilo nastale izgaranjem vodika, bilo ishlapljivanjem već postojeće vlage u gorivu), a ne dobije se natrag, jer hlađenja dimnih plinova nema.

Član  $h_G$  (J/kg), dotično  $H_{\text{m,G}}$  (J/kmol) je entalpija goriva koju ono unosi u ložište, ako ulazi s temperaturom većom od 0 °C.

Zrak, ako ulazi s temperaturom većom od 0 °C, unosi u ložište svoju entalpiju svedenu na jedinicu goriva:  $Z_{\text{stv}} H_{\text{m,z}}$  (J/jed.<sub>G</sub>), pri čemu je uvijek  $H_{\text{m,z}}$  u džulima po kilomolu zraka, a  $Z_{\text{stv}}$  ima mjernu jedinicu kilomola zraka po jedinici goriva.

Zadnji član u brojniku  $|q_{\text{odv}}|$  je toplina (J po jedinici goriva) odvođena iz ložišta. Ona može biti jednaka nuli ako je ložište izolirano ("adijabatsko"), a ako je ložište neizolirano, uvijek je odvođena, zbog visoke temperature u ložištu.

Suma u nazivniku je toplinski kapacitet dimnih plinova, a pomnožena s temperaturom  $\mathcal{Q}_{\text{izg}}$  postaje entalpija koju iznose dimni plinovi iz ložišta. Suma se sastoji od umnožaka količina pojedinih dimnih plinova ( $n_i$ ) (kmol/jed.G) nastalih izgaranjem, s njihovim srednjim molnim toplinskim kapacitetom između temperatura  $0\text{ }^\circ\text{C}$  i temperature izgaranja  $\mathcal{Q}_{\text{izg}}$ :  $[C_p]_0^{\mathcal{Q}_{\text{izg}}}$ . Gornja je jednadžba općenita, pa se pojedini članovi u gornjoj jednadžbi prilagođavaju promatranoj situaciji.

Ogrjevna je vrijednost goriva njegovo svojstvo i odnosi se na potpuno izgaranje. Određuje se mjerenjem na uzorku, a u nedostatku pouzdanih mjerenih podataka kao i u ovakvim "školskim" primjerima može se koristiti i približna formula, koja za smjesu gorivih plinova glasi:

$$\Delta H_{m,d} = \sum y_i \Delta H_{m,d,i}$$

što, prevedeno u oznake ovog zadatka, daje:

$$\begin{aligned} \Delta H_d &= y_{\text{CH}_4} \Delta H_{m,d,\text{CH}_4} + y_{\text{C}_2\text{H}_6} \Delta H_{m,d,\text{C}_2\text{H}_6} + y_{\text{C}_3\text{H}_8} \Delta H_{m,d,\text{C}_3\text{H}_8} = \\ &= 0,8 \cdot 802,3 + 0,15 \cdot 1427,9 + 0,05 \cdot 2044 = 958,2 \text{ MJ/kmol} = 958\,200 \text{ kJ/kmol} \end{aligned}$$

- a) Temperatura koja se postiže pri potpunom izgaranju u izoliranom ložištu naziva se i "teorijska temperatura izgaranja". Poteškoća pri njenom računanju je ta, da se mora računati iteracijom, jer traženi rezultat utječe na nazivnik kao ulazna veličina pri određivanju srednjeg molnog toplinskog kapaciteta. U ovom zadatku, da bi se izbjegla iteracija, sugerirana je vrijednost  $2000\text{ }^\circ\text{C}$  za računanje (tako se obično i na ispitu zadaje) koja je već dovoljno blizu točne vrijednosti, pa se od prvog pokušaja dobije točan rezultat. Inače, kod nasumičnog pogađanja konvergencija je prilično brza i vrijedi približno pravilo da se pogreška u svakom koraku smanji za oko 10 puta (8 do 12 puta) i to na suprotnu stranu. Primjerice, ako pri prvom pokušaju pogriješimo za  $+200\text{ }^\circ\text{C}$ , rezultat će ispasti za oko  $20\text{ }^\circ\text{C}$  manji od točnoga. Ako s tim novim rezultatom (pogreška  $-20\text{ }^\circ\text{C}$ ) ponovimo račun, sljedeća pogreška će biti oko  $+2\text{ }^\circ\text{C}$  itd.

Potrebni podaci za sljedeće formule računaju se s pomoću tablice:

PLIN	$n_i$	$[C_{mp,i}]_0^{2000}$	$n_i [C_{mp,i}]_0^{2000}$	$[C_{mp,i}]_0^{1300}$	$n_i [C_{mp,i}]_0^{1300}$	$[C_{mp,i}]_0^{200}$	$n_i [C_{mp,i}]_0^{200}$
CO <sub>2</sub>	1,250	54,290	67,863	51,322	64,153	40,059	50,074
O <sub>2</sub>	0,3563	35,169	12,531	33,863	12,065	29,931	10,664
N <sub>2</sub>	10,2747	33,373	342,898	32,067	329,479	29,228	300,309
H <sub>2</sub> O	2,25	43,995	98,989	40,407	90,916	34,118	76,766
$\Sigma=$	14,131		522,280		496,612		437,813

Za zadane vrijednosti dobije se teorijska temperatura izgaranja:

$$\mathcal{Q}_{\text{teor}} = \frac{\Delta H_{m,d} + Z_{\text{stv}} [C_{mp,z}]_0^{\mathcal{Q}_z} \cdot \mathcal{Q}_z}{\sum n_i [C_{mp,i}]_0^{\mathcal{Q}_{\text{izg}}}} = \frac{958\,200 + 13,006 \cdot 29,41 \cdot 250}{522,28} = 2017,8\text{ }^\circ\text{C}$$

i to se može smatrati dovoljno točnim rezultatom, jer bi, prema gornjem približnom pravilu, rezultat sljedećega koraka iteracije bio oko  $2015\text{ }^\circ\text{C}$ !

- b) Odvođena toplina iz hlađenog ložišta može se računati kao toplina koju oslobađaju dimni plinovi pri hlađenju od teoretske do stvarne temperature:

$$|q_{\text{odv}}| = n_{\text{vdp}} [C_{\text{mp,vdp}}]_{g_{\text{stv}}}^{g_{\text{teor}}} (g_{\text{teor}} - g_{\text{stv}})$$

ali je jednostavnije koristiti se već izračunatim podacima iz tablice:

$$|q_{\text{odv}}| = \sum n_i [C_{\text{mp,i}}]_0^{g_{\text{teor}}} \cdot g_{\text{teor}} - \sum n_i [C_{\text{mp,i}}]_0^{g_{\text{stv}}} \cdot g_{\text{stv}}$$

$$|q_{\text{odv}}| = 522,28 \cdot 2017,8 - 496,612 \cdot 1300 = 408\,300 \text{ kJ/kmol}_G,$$

što sa zadanom protočnom količinom goriva (10 kmol/h) daje odvedeni toplinski tok:

$$|\Phi_{\text{odv}}| = q_{\text{N,G}} \cdot |q_{\text{odv}}| = 10 \cdot 408\,300 = 4,083 \cdot 10^6 \text{ kJ/h} = 1134 \text{ kW}.$$

(Pazi! Odvedeni je toplinski tok negativan, ali ovdje se računa njegova apsolutna vrijednost!)

Isto tako mogla bi se koristiti i gornja formula za stvarnu temperaturu izgaranja:

$$g_{\text{stv}} = \frac{\Delta H_{\text{m,d}} + Z_{\text{stv}} h_z - |q_{\text{odv}}|}{\sum n_i [C_{\text{mp,i}}]_0^{1300}} = 1300 \text{ }^\circ\text{C},$$

iz koje bi slijedilo:

$$|q_{\text{odv}}| = \Delta H_{\text{m,d}} + Z_{\text{stv}} [C_{\text{mp,z}}]_0^{250} \cdot 250 - 1300 \cdot \sum n_i [C_{\text{mp,i}}]_0^{1300},$$

$$|q_{\text{odv}}| = 958\,200 + 13,006 \cdot 29,410 \cdot 250 - 1300 \cdot 496,612 = 408\,300 \text{ kJ/kmol}_G.$$

Velika prednost ove potonje formule je ta, da se u njoj ne pojavljuje temperatura adijabatskog izgaranja. U ovom zadatku ta prednost nije izražena, jer je ta temperatura već poznata, ali bi je inače trebalo računati iteracijom!

- c) "Gubici osjetne topline" je naziv za onu toplinu koja bi se još dobila, kad bi se dimni plinovi hladili od zadanih 200 °C sve do okolišne temperature

$$\begin{aligned} |q_{\text{osj}}| &= \sum n_i [C_{\text{mp,i}}]_{g_{\text{ok}}}^{g_{\text{izl}}} \cdot (g_{\text{izl}} - g_{\text{ok}}) = \sum n_i [C_{\text{mp,i}}]_0^{200} \cdot (200 - 0) = \\ &= 437,813 \cdot 200 = 87\,560 \text{ kJ/kmol}; \end{aligned}$$

$$|\Phi_{\text{osj}}| = q_{\text{n,G}} \cdot |q_{\text{osj}}| = 10 \cdot 87\,560 = 875\,600 \text{ kJ/h} = 243,2 \text{ kW}.$$

Protočna količina (pravih, tj. vlažnih) dimnih plinova je

$$q_{\text{n,vdp}} = q_{\text{n,G}} \cdot n_{\text{vdp}} = 10 \cdot 14,131 = 141,31 \text{ kmol}_{\text{vdp}} / \text{h},$$

a njihov je protočni volumen (u dimnjaku) određen tlakom (u dimnjaku - približno jednak okolišnom tlaku), izlaznom temperaturom i jednadžbom stanja idealnih plinova:

$$q_{V,\text{vdp}} = \frac{q_{\text{n,vdp}} R_m T_{\text{izl}}}{p} = \frac{141,31 \cdot 8314 \cdot 473,15}{1,013 \cdot 10^5} = 5486 \text{ m}^3 / \text{h} \cdot \odot$$

202. Ložište kotla za centralno grijanje predviđeno je za (potpuno) izgaranje 50 kg/h ugljena masenog sastava:  $c = 0,56$ ;  $h = 0,07$ ;  $w = 0,20$  i  $a = 0,17$  s pretičkom zraka  $\lambda = 1,4$  i to tako, da zrak i ugljen ulaze u ložište s  $0\text{ }^\circ\text{C}$ , a dimni plinovi izlaze iz ložišta u dimnjak s  $300\text{ }^\circ\text{C}$ .

a) Koliki je toplinski tok odveden iz ložišta (učin kotla) i koliko  $\text{m}^3/\text{h}$  zraka ( $0\text{ }^\circ\text{C}$ , 1 bar) treba dovoditi u ložište?

b) Ako bi se u ložište, umjesto rešetke za ugljen, ugradio plamenik za ulje za loženje ( $0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $c = 0,85$ ;  $h = 0,15$ ;  $\lambda = 1,1$ ), koliko bi goriva (kg/h) i zraka ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) trebalo dovoditi u ložište, pa da učin kotla ostane isti, a da i izlazna temperatura tih dimnih plinova bude također  $300\text{ }^\circ\text{C}$ ?

Računati sa srednjim specifičnim (molarnim) toplinskim kapacitetima!

\*\*\* Rješenje:

(Svrha zadatka: Pokazati kako se računaju potrebne veličine za gorivo zadano masenim sastavom.)

Za goriva zadana masenim sastavom kao jedinica goriva odabire se 1 kg goriva, pa se i svi rezultati iskazuju po toj jedinici. Za sve stehiometrijske račune treba zadane masene podatke preračunati u količinske (molne) podatke.

Primjerice, maseni udio ugljika u gorivu,  $c$  ( $\text{kg}_C/\text{kg}_G$ ), iskazuje masu ugljika u jedinici goriva. Njegovim dijeljenjem s molnom masom ugljika ( $M_C = 12\text{ kg}_C/\text{kmol}_C$ ) dobije se količina ugljika u jedinici (kilogramu) goriva:  $c/12\text{ kmol}_C/\text{kg}_G$ . S tom količinom ugljika onda je određena i potrebna količina kisika za izgaranje, i nastala količina ugljikovog dioksida u dimnim plinovima. Slično se postupa i s ostalim sudionicima goriva.

a) Izgaranje ugljena masenog sastava:  $c = 0,56$ ;  $h = 0,07$ ;  $w = 0,20$  i  $a = 0,17$ :

Minimalna količina kisika i stvarno dovedena količina zraka za izgaranje:

$$O_{\min} = 1 \cdot \frac{c}{12} + \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2} + 1 \cdot \frac{s}{\underbrace{32}_{=0}} - \frac{o}{\underbrace{32}_{=0}} = \frac{0,56}{12} + \frac{0,07}{4} = 0,06417\text{ kmol}_{\text{O}_2}/\text{kg}_G$$

Broj "1" uz član  $c/12$  potječe iz stehiometrijske jednadžbe



i govori koliko treba kisika za izgaranje jednoga kilomola ugljika, dakle, ima mjernu jedinicu "kilomola kisika po kilomolu ugljika",  $\text{kmol}_{\text{O}_2}/\text{kmol}_C$ . Dakle,  $1\text{ kmol}_{\text{O}_2}/\text{kmol}_C$ , pomnožen sa:  $c/12\text{ kmol}_C/\text{kg}_G$  daje količinu kisika potrebnog za izgaranje ugljika sadržanog u jedinici goriva.

Slično i "1/2" uz član  $h/2$  slijedi iz stehiometrijske jednadžbe za izgaranje vodika:



pa je i drugi član ( $h/4$ )  $\text{kmol}_{\text{O}_2}/\text{kg}_G$  ona količina kisika koja je potrebna za izgaranje vodika sadržanog u jednom kilogramu goriva.

Ima li u gorivu sumpora, i za njegovo izgaranje treba dovesti kisik:  $s/32\text{ kmol}_{\text{O}_2}/\text{kg}_G$ .

Minimalna se količina kisika kojeg treba izvana dovesti umanjuje za onoliko, koliko ga već ima u samome gorivu:  $o/32\text{ kmol}_{\text{O}_2}/\text{kg}_G$ .

Stvarna se potrebna količina zraka opet računa po istoj formuli:

$$Z_{\text{stv}} = \lambda \frac{O_{\text{min}}}{0,21} = 1,4 \cdot \frac{0,06417}{0,21} = 0,42778 \text{ kmol}_z / \text{kg}_G.$$

Izgaranjem nastaju:

$$n_{\text{CO}_2} = 1 \cdot \frac{c}{12} = \frac{0,56}{12} = 0,04667 \text{ kmol}_{\text{CO}_2} / \text{kg}_G,$$

Broj "1" u ovoj jednadžbi također potječe iz stehiometrijske jednadžbe i on kaže da iz jednoga kilomola ugljika potpunim izgaranjem nastaje jedan kilomol ugljikovog dioksida.

Kao slobodan kisik ostaje ono što je u suvišku i dovedeno i što se uopće nema s čime spojiti:

$$n_{\text{O}_2} = (\lambda - 1) O_{\text{min}} = (1,4 - 1) \cdot 0,06417 = 0,02567 \text{ kmol}_{\text{O}_2} / \text{kg}_G,$$

Dušika ima molnih 79 % u dovedenom zraku (u gorivu ga ovdje nema) i on bez promjena izlazi kao dušik (u stvarnosti pri visokim temperaturama došlo bi do djelomične disocijacije i spajanja s kisikom u dušične okside, ali to mi uvijek zanemarujemo):

$$n_{\text{N}_2} = 0,79 Z_{\text{stv}} = 0,79 \cdot 0,42778 = 0,33794 \text{ kmol}_{\text{N}_2} / \text{kg}_G,$$

Vodena para nastaje izgaranjem vodika, ali se u dimu nađe i sva ona vlaga koja je kao vlaga u gorivu i ušla u ložište:

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{h}{2} + \frac{w}{18} = \frac{0,07}{2} + \frac{0,20}{18} = 0,04611 \text{ kmol}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{kg}_G.$$

Ogrjevna vrijednost se za goriva zadana masenim sastavom (dakle, nepoznate kemijske strukture) pouzdano može odrediti samo mjerenjem. U nedostatku mjerenih vrijednosti, ili za ovakve školske primjere, možemo se poslužiti približnom formulom:

$$\Delta h_d = 33910 c + 117000 \cdot \left( h - \frac{o}{8} \right) + 10500 s - 2500 w$$

$$\Delta h_d = 33910 \cdot 0,56 + 117000 \cdot 0,07 - 2500 \cdot 0,20 = 26674 \text{ kJ/kg}$$

Toplinski tok odveden iz ložišta može se izračunati na više načina (svi se zasnivaju na prvom glavnom stavku). Primjerice, mogli bismo izračunati teorijsku temperaturu izgaranja (kao da je ložište izolirano) i onda toplinski tok predan pri hlađenju od te temperature do izlazne temperature 300 °C. Ovaj način ima manu da se teorijska temperatura izgaranja mora tražiti iteracijom.

Drugi bi (i bolji) način bio da se poslužimo jednadžbom:

$$g_{\text{stv}} = \frac{\Delta h_d - |q_{\text{odv}}|}{\sum n_i [C_{\text{mp},i}]_0^{300}} = 300 \text{ °C},$$

koja je pojednostavljena s  $g_G = g_z = 0 \text{ °C}$ , a da za temperaturu izgaranja u neizoliranom ložištu uvrstimo zadanih 300 °C. Iz nje onda slijedi toplina odvedena iz ložišta:

$$|q_{\text{odv}}| = \Delta h_d - 300 \cdot \sum n_i [C_{\text{mp},i}]_0^{300}.$$

PLIN	$n_i$	$[C_{mp,i}]_0^{300}$	$n_i [C_{mp,i}]_0^{300}$
CO <sub>2</sub>	0,04667	41,755	1,949
O <sub>2</sub>	0,02567	30,400	0,7803
N <sub>2</sub>	0,33794	29,383	9,930
H <sub>2</sub> O	0,04611	34,575	1,594
Σ=			14,253

Drugi član na desnoj strani je entalpija izlaznih dimnih plinova, ali se, ako je temperatura okoliša u koji se oni izbacuju 0°C, može protumačiti i kao "gubitak osjetne topline"

$$|q_{osj}| = \sum n_i [C_{mp,i}]_{g_{ok}}^{g_{izl}} \cdot (g_{izl} - g_{ok}) = \sum n_i [C_{mp,i}]_0^{300} \cdot (300 - 0) = \\ = 14,253 \cdot 300 = 4276 \text{ kJ/kg,}$$

pa se tražena toplina odvedena iz ložišta može pisati i ovako:

$$|q_{odv}| = \Delta h_d - |q_{osj}|$$

i protumačiti na sljedeći način: u ložište kao energija ulazi samo ogrjevna vrijednost goriva (kemijska energija sadržana u gorivu), dok su (osjetne) entalpije i goriva i zraka jednake nuli (zbog  $g_G = g_z = 0^\circ\text{C}$ ). Iz ložišta kao energija izlazi samo odvedena toplina  $q_{odv}$  i entalpija dimnih plinova (gubitak osjetne topline). Da je izgaranje bilo nepotpuno, iz ložišta bi izlazio još i dio kemijske energije u iznosu  $|q_{neizg}|$ , ali toga ovdje nema.

Uvrštavanjem brojeva dobije se odvedena toplina po kilogramu goriva:

$$|q_{odv}| = \Delta h_d - |q_{osj}| = 26\,674 - 4276 = 22\,398 \text{ kJ/kg}_G,$$

a onda i odvedeni toplinski tok (to je ustvari korisni učinak kotla):

$$|\Phi_{odv}| = q_{m,G} \cdot |q_{odv}| = 50 \cdot 22\,398 = 1,120 \cdot 10^6 \text{ kJ/h} = 311 \text{ kW}.$$

Za izgaranje treba u ložište dovesti zrak u količini:

$$q_{n,z} = q_{m,G} \cdot Z_{stv} = 50 \cdot 0,42778 = 21,39 \text{ kmol}_z / \text{h} = 0,00594 \text{ kmol}_z / \text{s},$$

a ta protočna količina ima pri stanju 0 °C i 1 bar protočni volumen:

$$q_{V,z} = \frac{q_{n,z} R_m T_z}{p_z} = \frac{21,39 \cdot 8314 \cdot 273,15}{1 \cdot 10^5} = 485,7 \text{ m}^3 / \text{h} = 0,1349 \text{ m}^3 / \text{s}.$$

b) Izgaranje ulja za loženje masenog sastava  $c = 0,85$ ;  $h = 0,15$ :

Proračun je u osnovi isti kao i pod "a":

$$O_{\min} = \frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \underbrace{\frac{s}{32}}_{=0} - \underbrace{\frac{o}{32}}_{=0} = \frac{0,85}{12} + \frac{0,15}{4} = 0,10833 \text{ kmol}_{\text{O}_2} / \text{kg}_G$$

$$Z_{stv} = \lambda \frac{O_{\min}}{0,21} = 1,1 \cdot \frac{0,10833}{0,21} = 0,56746 \text{ kmol}_z / \text{kg}_G.$$

Količina nastalih dimnih plinova:

$$n_{\text{CO}_2} = \frac{c}{12} = \frac{0,85}{12} = 0,070833 \text{ kmol}_{\text{CO}_2} / \text{kg}_G,$$

$$n_{\text{O}_2} = (\lambda - 1) O_{\text{min}} = (1,1 - 1) \cdot 0,10833 = 0,010833 \text{ kmol}_{\text{O}_2} / \text{kg}_G,$$

$$n_{\text{N}_2} = 0,79 Z_{\text{stv}} = 0,79 \cdot 0,56746 = 0,44829 \text{ kmol}_{\text{N}_2} / \text{kg}_G,$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{h}{2} + \frac{w}{\underset{=0!}{18}} = \frac{0,15}{2} = 0,075 \text{ kmol}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{kg}_G,$$

Donja ogrjevna vrijednost goriva

$$\Delta h_d = 33\,910 c + 117\,000 h = 33\,900 \cdot 0,85 + 117\,000 \cdot 0,15 = 46\,365 \text{ kJ/kg}_G.$$

Gubitak osjetne topline je

$$|q_{\text{osj}}| = \sum n_i [C_{\text{mp},i}]_0^{300} \cdot (300 - 0) = 19,052 \cdot 300 = 5716 \text{ kJ/kg}_G,$$

PLIN	$n_i$	$[C_{\text{mp},i}]_0^{300}$	$n_i [C_{\text{mp},i}]_0^{300}$
CO <sub>2</sub>	0,07083	41,755	2,9576
O <sub>2</sub>	0,01083	30,400	0,3293
N <sub>2</sub>	0,44829	29,383	13,1722
H <sub>2</sub> O	0,075	34,575	2,5931
Σ=	0,60496		19,052

a i odvedena se toplina (po kilogramu goriva) opet računa kao i prije:

$$|q_{\text{odv}}| = \Delta h_d - |q_{\text{osj}}| = 46\,365 - 5716 = 40\,649 \text{ kJ/kg}_G.$$

Kako je odvedeni toplinski tok zadan, potrebna se protočna masa goriva dobije iz izraza:

$$q_{m,G} = \frac{|\Phi_{\text{odv}}|}{|q_{\text{odv}}|} = \frac{1,120 \cdot 10^6}{40\,649} = 27,55 \text{ kg/h} = 0,007654 \text{ kg/s}.$$

a s njom je onda određena i protočna količina zraka za izgaranje:

$$q_{n,z} = q_{m,G} \cdot Z_{\text{stv}} = 27,55 \cdot 0,56746 = 15,635 \text{ kmol}_z / \text{h} = 0,004343 \text{ kmol}_z / \text{s},$$

a ta protočna količina ima pri stanju 0 °C i 1 bar protočni volumen:

$$q_{V,z} = \frac{q_{n,z} R_m T_z}{p_z} = \frac{15,635 \cdot 8314 \cdot 273,15}{1 \cdot 10^5} = 355,1 \text{ m}^3 / \text{h} = 0,09863 \text{ m}^3 / \text{s}.$$

Iz rezultata se vidi da za isti učinak kotla treba manje ulja za loženje nego ugljena. To je i logično, jer ono ima veću ogrjevnu vrijednost od ugljena (zbog manje balasta – vlage i pepela). Treba uočiti da se ne iskoristi cijela ogrjevna vrijednost goriva, nego svakako manje. U ovom slučaju to je smanjenje samo zbog izlazne entalpije dimnih plinova, a kod nepotpunog izgaranja dodatno bi smanjenje bilo zbog gubitaka nepotpunog izgaranja. ☺