

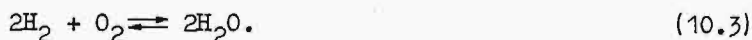
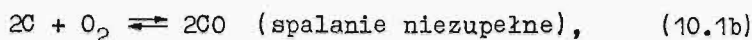
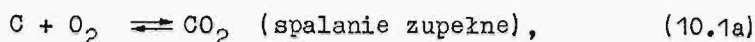
10 SPALANIE

10.1. PODSTAWY TEORETYCZNE

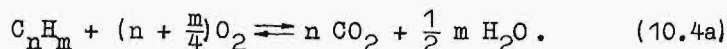
Zamiana energii chemicznej paliwa na energię cieplną w wyniku egzotermicznego gwałtownego utleniania, któremu towarzyszy oprócz wydzielania się ciepła zjawisko świetlne, nazywa się procesem spalania.

Podstawą obliczania zapotrzebowania tlenu oraz ilości produktów spalania (spalin) są równania stechiometryczne.

10.1.1. Podstawowe równania stechiometryczne

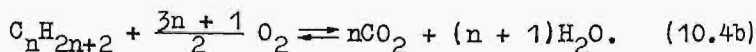


Węglowodory o budowie C_nH_m jak: C_2H_2 (acetylen), C_2H_4 (etylen)



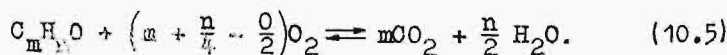
Węglowodory o budowie $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ jak:

CH_4 (metan), C_2H_6 (etan), C_3H_8 (propan), C_4H_{10} (butan)

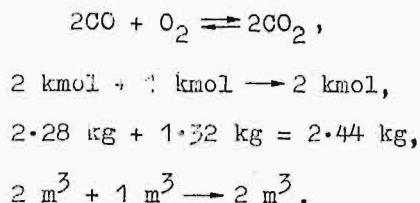


Związki węgla, wodoru i tlenu o budowie $\text{C}_m\text{H}_n\text{O}_o$ jak:

$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ (alkohol etylowy), CH_4O (alkohol metylowy)



Przy ilościowym określaniu przebiegu spalania należy oprzeć się na prawie Daltona o stałych stosunkach masowych oraz Gay-Lussaca o stałych stosunkach objętościowych gazów wchodzących ze sobą w związek, treść ich ilustruje przykład:



10.1.2. Ciepło spalania Q_c i wartość opałowa Q_u paliwa

Pod pojęciem ciepła spalania rozumie się ilość ciepła uzyskanego ze spalania całkowitego i zupełnego jednostki paliwa (kmol, kg, m³) pod warunkiem, że temperatura uzyskanych spalin zostanie obniżona do temperatury składników wchodzących ze sobą w reakcję (skroplenię ulegnie para wodna wytworzona w procesie spalania).

Pojęcie wartości opałowej paliwa określa równanie:

$$Q_u = Q_c - 2512(9h + w) \text{ kJ/kg} \quad (10.6)$$

gdzie: h, w - udziały masowe wodoru i wilgoci w paliwie.
Wartości Q_c i Q_w podano w tabl.13.

Wartość opałową węgla kamiennego w sposób przybliżony określa się ze wzoru Dulonga:

$$Q_u = 33913 \cdot c + 121417(h - \frac{O}{8}) + 10467s - 2512w \text{ kJ/kg}, \quad (10.6a)$$

gdzie: c, h, o, s, w - udziały masowe węgla, wodoru, siarki, wilgoci w paliwie.

Wartość opałową paliw gazowych będących mieszaniną o znanym składzie objętościowym określa się ze wzoru:

$$Q_u = \sum u_i \cdot Q_{u_i}. \quad (10.6b)$$

Podobnie oblicza się Q_c .

10.1.3. Zapotrzebowanie tlenu i powietrza dla spalania

Teoretyczne (minimalne) zapotrzebowanie tlenu do spalania poszczególnych składników paliwa określa się na podstawie równań stechiometrycznych.

Dla paliw będących mieszaniną zapotrzebowanie tlenu określa się ze wzorów:

a) paliwa stałe i ciekłe

$$(O_m)_t = \sum m_i (O_m)_t i; \quad (10.7a)$$

b) paliwa gazowe

$$(O_v)_t = \sum u_i (O_v)_t i, \quad (10.7b)$$

m_i, u_i - udziały masowe, objętościowe poszczególnych składników paliwa,

$(O_v)_t$ - minimalne zapotrzebowanie tlenu na jednostkę paliwa w nm^3/kg lub nm^3/nm^3 1),

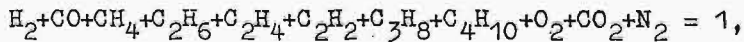
$(O_m)_t$ - minimalne zapotrzebowanie tlenu na jednostkę paliwa w kg/kg lub kg/nm^3 .

~~Wzory szczegółowe do obliczania zapotrzebowania tlenu~~
Paliwa stałe i ciekłe

$$(O_m)_t = \frac{8}{3} c + 8 h + s - o \text{ kg/kg}, \quad (10.7c)$$

$$(O_v)_t = \frac{22,7}{32} \cdot (O_m)_t \text{ nm}^3/\text{kg}; \quad (10.7d)$$

Paliwa gazowe o składzie objętościowym



$$(O_v)_t = 0,5(\text{H}_2 + \text{CO}) + 2\text{CH}_4 + 3,5\text{C}_2\text{H}_6 + 3\text{C}_2\text{H}_4 + 2,5\text{C}_2\text{H}_2 + 5\text{C}_3\text{H}_8 + \\ + 6,5\text{C}_4\text{H}_{10} - \text{O}_2 \text{ nm}^3/\text{nm}^3; \quad (10.7e)$$

Obliczenie zapotrzebowania powietrza

$$(L_m)_t = \frac{1}{0,23} (O_m)_t, \quad (10.8a)$$

$$(L_v)_t = \frac{1}{0,21} (O_v)_t. \quad 10.8b)$$

1) Zapis nm^3 określa objętość odniesioną do warunków normalnych barycznych ($p = 1 \text{ bar}; t = 0^\circ\text{C}$), dla których objętość kilomola $\bar{v} = 22,7 \text{ nm}^3/\text{kmol}$.

10.1.4. Współczynnik nadmiaru tlenu (powietrza) λ

Warunki technicznego spalania paliw wymagają stosowania większej ilości tlenu niż to wynika z równań stechiometrycznych. Zwiększone zapotrzebowanie tlenu określa współczynnik nadmiaru λ :

$$\lambda = \frac{O_m}{(O_m)_t}, \quad \lambda = \frac{O_v}{(O_v)_t}; \quad (10.9a)$$

$$\lambda = \frac{L_v}{(L_v)_t}, \quad \lambda = \frac{L_m}{(L_m)_t}; \quad (10.9b)$$

przy czym: O_m, O_v - rzeczywiste zapotrzebowanie tlenu,
 L_m, L_v - rzeczywiste zapotrzebowanie powietrza.

Współczynnik nadmiaru powietrza można określić również opierając się na składzie objętościowym spalin suchych (CO_2, O_2, CO, N_2) wyrażonych w procentach (oznaczonych za pomocą analizatora spalin)

$$\lambda = \frac{21}{21 - 79 \frac{O_2 - 0,5 CO}{N_2}}. \quad (10.9c)$$

10.1.5. Ilość spalin otrzymanych ze spalania jednostki paliwa przy spalaniu zupełnym i całkowitym

Objętość spalin (v_s) uzyskanych ze spalania jednostki paliwa określa się z równań stechiometrycznych. Będzie ona sumą objętości produktów spalania (v_i) poszczególnych składników paliwa

$$v_s = v_{CO_2} + v_{SO_2} + v_{H_2O} + v_{N_2} + v_{O_2} \frac{nm^3}{kg}. \quad (10.10a)$$

Objętość spalin suchych pozbawionych pary wodnej określa się wg wzoru

$$v_{ss} = v_{CO_2} + v_{SO_2} + v_{N_2} + v_{O_2} \frac{nm^3}{kg}. \quad (10.10b)$$

Poszczególne składowe v_i określa się dla:

- paliw stałych

$$v_{\text{CO}_2} = 1,89 c \text{ nm}^3/\text{kg}; \quad v_{\text{H}_2\text{O}} = 1,26(9h+w) \text{ nm}^3/\text{kg};$$

$$v_{\text{SO}_2} = 0,71 s \text{ nm}^3/\text{kg}; \quad v_{\text{N}_2} = 0,81n + 0,79 (L_v)_t;$$

$$v_{\text{O}_2} = 0,21(\lambda - 1)(L_v)_t \text{ nm}^3/\text{kg};$$

przy czym: n - udział azotu w paliwie:

- paliw gazowych

przyjmując skład objętościowy jak w przypadku wzoru (10.7e)

$$v_{\text{CO}_2} = \text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4 + 2(\text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_2\text{H}_2 + 1,5\text{C}_3\text{H}_8 + 2\text{C}_4\text{H}_{10}) \text{ nm}^3/\text{nm}^3,$$

$$v_{\text{H}_2\text{O}} = \text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_2 + 2(\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_6 + 2\text{C}_3\text{H}_8 + 2,5\text{C}_4\text{H}_{10}) \text{ nm}^3/\text{nm}^3,$$

$$v_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot \lambda \cdot (L_v)_t - (O_v)_t \text{ nm}^3/\text{nm}^3,$$

$$v_{\text{N}_2} = \text{N}_2 + 0,79 \cdot \lambda \cdot (L_v)_t \text{ nm}^3/\text{nm}^3.$$

Ilość spalin v_s można określać opierając się na składzie objętościowym spalin suchych w procentach wg wzoru:

$$v_s = 1,89 \cdot c \cdot \frac{100}{\text{CO}_2 + \text{CO}} + 1,26(9h + w) \text{ nm}^3/\text{kg}. \quad (10.10c)$$

10.1.6. Temperatura spalania

Pod pojęciem temperatura spalania rozumie się temperaturę jaką osiągną spaliny nagrzewając się ciepłem otrzymanym ze spalania paliwa. Obliczenie temperatury spalania dokonuje się wg wzorów:

- teoretyczna temperatura spalania

$$t'_k = \frac{Q_d}{[1 - A + \lambda(L_m)_t]c_p} + t_o \quad (10.11a)$$

lub

$$t'_k = \frac{Q_u}{v_s C_p} + t_o. \quad (10.11b)$$

- rzeczywista temperatura spalania

$$t_k = \frac{(1 - \delta)\eta_p Q_u}{[1 - A + \lambda(L_m)_t]c} \Big|_{t_o}^{t_k} + t_o \quad (10.11c)$$

lub

$$t_k = \frac{(1 - \delta)\eta_p Q_u}{v_s C_p} \Big|_{t_o}^{t_k} + t_o, \quad (10.11d)$$

gdzie: t_o - temperatura powietrza biorącego udział w spalaniu;

δ - współczynnik określający ilość ciepła oddanego w palenisku kotła przez promieniowanie,

η_p - sprawność paleniska,

A - udział popiołu w paliwie.

10.1.7. Straty ciepła w procesie spalania

Straty ciepła określa się w jednostkach ciepła (kJ) w odniesieniu do jednostki paliwa (kg, nm³) i oznacza przez S z odpowiednim indeksem lub w procentach określających udziały strat s

$$s_i = \frac{S_i}{Q_u} \cdot 100\%. \quad (10.12)$$

gdzie: S_i - poszczególne straty ciepła.

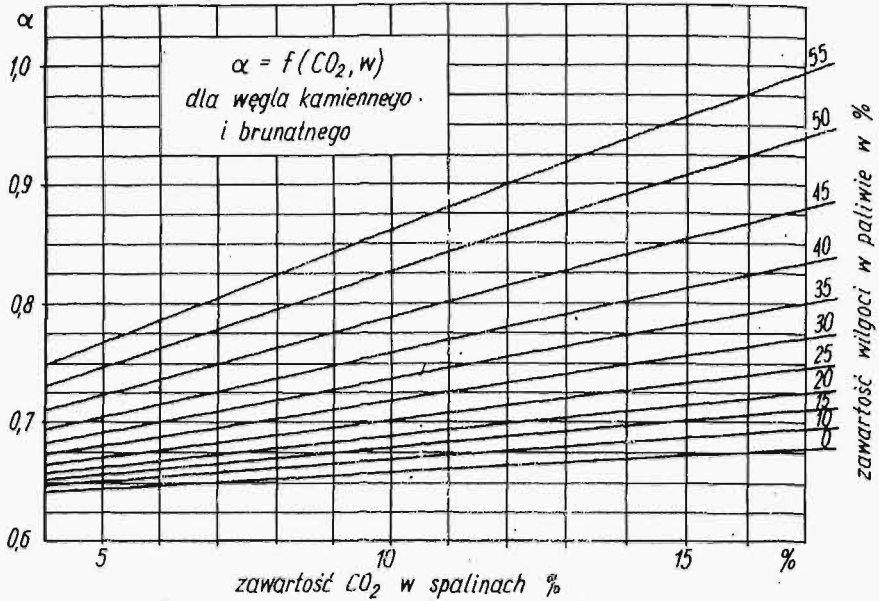
Strata odlotowa (kominowa) S_k

$$S_k = \left[1,89 \cdot c \cdot \frac{100}{CO_2 + CO} \cdot c_p \Big|_{t_o}^{t_s} + 1,926(9h + w) \right] (t_s - t_o) \quad (10.13a)$$

Stratę s_k poza wzorem (10.12) określa się wg empirycznego wzoru Siegerta:

$$s_k = \alpha \frac{t_s - t_o}{CO_2 + CO} \% , \quad (10.13b)$$

gdzie: t_s - temperatura spalin opuszczających kocioł,
 CO_2, CO - udział procentowy składników w spalinach,
 α - współczynnik określony z wykresu rys.10.1.



Rys.10.1

Strata wskutek niezupełnego spalania

$$S_{nz} = 1,89 \cdot c \cdot \frac{100}{CO_2 + CO} [12\ 644 \cdot CO' + 35\ 325 \cdot CH_4' + 10\ 618 \cdot H_2'] , \quad (10.14)$$

gdzie: CO' - udział objętościowy CO w spalinach,
 CH_4' - udział objętościowy CH_4 w spalinach,
 H_2' - udział objętościowy H_2 w spalinach.

W obliczeniach technicznych można pominąć udziały CH_4' i H_2' .

Strata niecałkowitego spalania

$$S_{nc} = 33\ 831 \cdot \frac{Z}{B} \cdot b_z \quad (10.15a)$$

lub

$$S_{nc} = 33\ 831 \cdot A \cdot \frac{b_z}{1 - b_z}, \quad (10.15b)$$

gdzie: \dot{Z} - masa żużla, popiołu, koksiku lotnego powstała w wyniku spalania B kg paliwa,

b_z - udział części palnych w masie \dot{Z} ,

A - udział popiołu w paliwie.

Strata ciepła unoszonego z paleniska w gorącym żużlu

$$S_z = \frac{\dot{Z}}{B} (t_z - t_0) \cdot c, \quad (10.16)$$

gdzie: $c = 0,835$ kJ/(kg·deg),

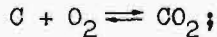
t_z - temperatura żużla.

10.2. Zadania

10.2.1. Obliczyć teoretyczne zapotrzebowanie powietrza $(m_L)_t$ do spalania całkowitego i zupełnego $B = 5$ kg pierwiastka węgla (C).

Rozwiązanie

Teoretyczną ilość tlenu określa się ze wzoru (10.1a) stosując prawo Daltona



$$12 \text{ kg} + 32 \text{ kg} = 44 \text{ kg},$$

$$1 \text{ kg} + \frac{32}{12} \text{ kg} = \frac{44}{12} \text{ kg}.$$

Z powyższej reakcji wynika, że na 1 kg węgla (C) potrzeba $(m_m)_t = \frac{32}{12}$ kg tlenu, stąd na spalanie $B = 5$ kg potrzeba:

$$(m_O)_t = 5 \cdot \frac{32}{12} \text{ kg},$$

$$(m_O)_t = 13,33 \text{ kg}$$

Uwzględniając udział masowy tlenu w powietrzu

$$(m_L)_t = \frac{13,33}{0,23},$$

$$(m_L)_t = 58 \text{ kg}.$$

10.2.2. Obliczyć teoretyczne zapotrzebowanie powietrza $(V_L)_t$ (nm^3) do spalania 15 nm^3 tlenku węgla (CO).

$$\text{Odp. } (V_L)_t = 35,7 \text{ nm}^3.$$

10.2.3. Obliczyć zapotrzebowanie powietrza V_L o temperaturze $t = 20^\circ\text{C}$ przy ciśnieniu $p = 1 \text{ bar}$ do spalania $B = 100 \text{ kg}$ węgla kamiennego o następującym składzie masowym: $c = 0,63$, $h = 0,04$, $s = 0,01$, $o = 0,09$, $w = 0,10$, $A = 0,13$ (popiół), jeśli spalanie zachodzi ze współczynnikiem nadmiaru powietrza $\lambda = 1,4$.

Rozwiązanie

Obliczenie zapotrzebowania powietrza wyrażonego w nm^3 dokonuje się wg wzoru:

$$V'_L = B \lambda (L_V)_t.$$

Wartość $(L_V)_t$ określa się ze wzoru (10.8b) po uprzednim obliczeniu wartości $(O_V)_t$ ze wzoru (10.7d):

$$(O_V)_t = \frac{22,7}{32} \left(\frac{8}{3} \cdot 0,63 + 8 \cdot 0,04 + 0,01 - 0,09 \right)$$

$$(O_V)_t = 1,36 \text{ nm}^3/\text{kg},$$

$$(L_V)_t = \frac{1,344}{0,21}; \quad (L_V)_t = 6,48 \text{ nm}^3/\text{kg},$$

$$V'_L = 100 \cdot 1,4 \cdot 6,48; \quad V'_L = 907 \text{ nm}^3.$$

Przeliczenia zapotrzebowania powietrza wyrażonego w nm^3 na warunki przy $t = 20^\circ\text{C}$ i $p = 1 \text{ bar}$ dokonuje się na podstawie równania stanu gazu

$$V_L = 907 \frac{1}{1} \cdot \frac{273 + 20}{273}$$

$$V_L = 975 \text{ m}^3$$

10.2.4. Obliczyć teoretyczne zapotrzebowanie powietrza $(L_V)_t$ dla spalania 1 kg benzyny o udziałach masowych: $c = 0,855$ i $h = 0,145$.

$$\text{Odp. } (L_V)_t = 11,5 \text{ nm}^3/\text{kg}.$$

10.2.5. Obliczyć zapotrzebowanie powietrza V'_L w nm^3 przy $\lambda = 1,2$ dla spalania $B' = 15 \text{ nm}^3$ gazu miejskiego o składzie objętościowym: $\text{H}_2 = 0,56$, $\text{CO} = 0,14$, $\text{CH}_4 = 0,24$, $\text{CO}_2 = 0,02$, $\text{O}_2 = 0,02$, $\text{N}_2 = 0,02$, jeśli zachodziło spalanie zupełne.

Odp. $V'_L = 69,5 \text{ nm}^3$.

10.2.6. Obliczyć objętość (nm^3) dwutlenku węgla (V'_{CO_2}) i pary wodnej ($V'_{\text{H}_2\text{O}}$) uzyskanej ze spalania $V'_{\text{CH}_4} = 10 \text{ nm}^3$ metanu przy założeniu, że $\lambda = 1$. Ponadto określić masę pary wodnej.

Rozwiązanie

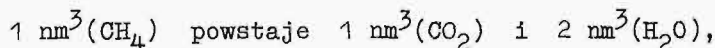
Opierając się na równaniu stechiometrycznym reakcji określa się ilość produktów spalania:



Zgodnie z prawem Gay-Lussaca można dokonać ilościowego zapisu ww. równań w nm^3 :



Z równania tego wynika, że ze spalania



a więc

$$V'_{\text{CO}_2} = V'_{\text{CH}_4} \cdot 1 \text{ nm}^3, \quad V'_{\text{CO}_2} = 10 \text{ nm}^3;$$

$$V'_{\text{H}_2\text{O}} = V'_{\text{CH}_4} \cdot 2 \text{ nm}^3, \quad V'_{\text{H}_2\text{O}} = 20 \text{ nm}^3.$$

Masę pary wodnej można określić dwoma sposobami:

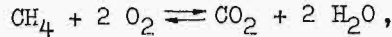
1) znając $V'_{\text{H}_2\text{O}}$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = V'_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \rho'_{\text{H}_2\text{O}} \text{ przy czym } \rho' = \frac{\mu}{22,7} \text{ kg/nm}^3,$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 20 \cdot \frac{18}{22,7},$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 15,85 \text{ kg};$$

2) posługując się równaniem stechiometrycznym reakcji i stosując zapis ilościowy wg prawa Daltona



$$22,7 \text{ nm}^3 (\text{CH}_4) + 72 \text{ kg} (\text{O}_2) \rightleftharpoons 44 \text{ kg} (\text{CO}_2) + 36 \text{ kg} (\text{H}_2\text{O}).$$

Z równania wynika, że z $1 \text{ nm}^3 \text{ CH}_4$ powstaje $\frac{36}{22,7} \text{ kg H}_2\text{O}$ (pary wodnej) a więc ze spalania $V_{\text{CH}_4} = 10 \text{ nm}^3$ otrzymuje się:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 10 \cdot \frac{36}{22,7},$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 15,85 \text{ kg}.$$

10.2.7. W pomieszczeniu o objętości $V_0 = 5000 \text{ m}^3$ zainstalowano palniki gazowe, w których w ciągu godziny spala się $B = 25 \text{ nm}^3/\text{h}$ gazu o składzie objętościowym:

$$\text{CH}_4 = 53\%, \quad \text{H}_2 = 27\%, \quad \text{CO} = 8\%, \quad \text{O}_2 = 3\%, \quad \text{CO}_2 = 9\%.$$

Określić:

- o ile wzrośnie w pomieszczeniu po upływie 1 godziny zawartość wilgoci powietrza Δx , jeśli przed rozpoczęciem spalania temperatura powietrza w pomieszczeniu była $t_1 = 20^\circ\text{C}$ i wilgotność względna $\varphi_1 = 60\%$. W obliczeniach przyjmując, że temperatura w pomieszczeniu po upływie 1 godziny była $t_2 = t_1$ przy ciśnieniu $p_0 = 1 \text{ bar}$,

- czy nastąpi rosznienie szyb, jeśli temperatura powierzchni szyb od strony pomieszczenia $t_w = 17^\circ\text{C}$ i jaka wilgotność względna powietrza ustali się w pomieszczeniu φ_2 .

Odp. $\Delta x = 0,00458 \text{ kg/kg}$; będzie zachodziło rosznienie szyb $\varphi_2 = 94\%$.

10.2.8. W pomieszczeniu o objętości $V_0 = 1000 \text{ m}^3$ pracują palniki gazowe spalające w ciągu godziny $B' = 50 \text{ nm}^3$ o składzie objętościowym, jak w zadaniu 10.2.7.

Określić ilość powietrza niezbędną do wentylacji, jeśli temperatura nawiewnego powietrza przy ciśnieniu $p = 740 \text{ Tr}$

wynosi $t = 10^{\circ}\text{C}$ a dopuszczalne stężenie CO_2 : $a_{\text{CO}_2} = 9 \text{ g/nm}^3$.

$$\text{Odp. } V_w = 8170 \text{ m}^3/\text{h}.$$

10.2.9. W palenisku kotła spala się w ciągu godziny $B = 150 \text{ kg/h}$ węgla kamiennego o składzie masowym: $c = 0,6$, $h = 0,04$, $s = 0,02$, $n = 0,01$, $o = 0,11$, $w = 0,10$, $A = 0,12$. Zakładając, że w palenisku kotła zachodzi spalanie zupełne i całkowite określić:

- ilość spalin $V_s \text{ m}^3/\text{h}$ przy temperaturze $t = 250^{\circ}\text{C}$ i ciśnieniu $p = 750 \text{ Tr}$, jeśli spalanie zachodziło przy współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda = 1,6$,

- udziały objętościowe (w procentach) spalin mokrych i suchych.

Rozwiązanie

Objętość spalin w nm^3 określa się z zależności:

$$V_s = B v_s \text{ nm}^3/\text{h}.$$

Wielkość v_s oblicza się ze wzoru (10.10a) po uprzednim określeniu wartości $(L_v)_t$ ze wzorów (10.8b) i (10.7e).

Po obliczeniu V'_s , posługując się równaniem stanu gazu określa się objętość V_s przy $t = 250^{\circ}\text{C}$ i $p = 750 \text{ Tr}$:

$$(O_v)_t = \frac{22,7}{32} \left(\frac{8}{3} \cdot 0,6 + 8 \cdot 0,04 + 0,02 - 0,11 \right),$$

$$(O_v)_t = 1,295 \text{ nm}^3/\text{kg},$$

$$(L_v)_t = \frac{1,295}{0,21}; \quad (L_v)_t = 6,16 \text{ nm}^3/\text{kg};$$

$$v_s = 1,89 \cdot 0,6 + 0,71 \cdot 0,02 + 1,26(9 \cdot 0,04 + 0,1) + 0,81 \cdot 0,01 + 0,79 \cdot 1,6 \cdot 6,16 + 0,21(1,6 - 1)6,16 \text{ nm}^3/\text{kg},$$

$$v_s = 1,135 + 0,0142 + 0,58 + 0,0081 + 7,8 + 0,775$$

$$v_s = 10,31 \text{ nm}^3/\text{kg};$$

$$V'_s = 150 \cdot 10,31;$$

$$V'_s = 1545 \text{ nm}^3/\text{h};$$

$$V_s = 1545 \frac{750}{740} \cdot \frac{273 + 250}{273},$$

$$V_s = 3000 \text{ m}^3/\text{h}$$

Objętość spalin obliczona wg wzoru (10.10a)

Aby określić udziały objętościowe poszczególnych produktów spalania w spalinach, należy podzielić obliczoną objętość poszczególnych składników spalin przez całkowitą objętość spalin zgodnie ze wzorem:

$$u'_i = \frac{v_i}{v_s} \cdot 100\%.$$

Udziały objętościowe spalin mokrych:

$$u'_{\text{CO}_2} = \frac{1,135}{10,31} \cdot 100\% = 11,10\%,$$

$$u'_{\text{SO}_2} = \frac{0,0142}{10,31} \cdot 100\% = 0,14\%,$$

$$u'_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,58}{10,31} \cdot 100\% = 5,64\%,$$

$$u'_{\text{N}_2} = \frac{7,81}{10,31} \cdot 100\% = 75,60\%,$$

$$u'_{\text{O}_2} = \frac{0,775}{10,31} \cdot 100\% = 7,52\%.$$

Udziały objętościowe spalin suchych

$$u_i = \frac{v_i}{v_{ss}},$$

$$v_{ss} = v_s - v_{\text{H}_2\text{O}},$$

$$v_{ss} = 10,31 - 0,58, \quad v_{ss} = 9,73 \text{ nm}^3/\text{kg};$$

$$u_{\text{CO}_2} = \frac{1,131}{9,73} \cdot 100\% = 11,60\%,$$

$$u_{\text{SO}_2} = \frac{0,0142}{9,73} \cdot 100\% = 0,15\%$$

$$u_{\text{N}_2} = \frac{7,81}{9,73} \cdot 100\% = 80,30\%,$$

$$u_{\text{O}_2} = \frac{0,775}{9,73} \cdot 100\% = 7,95\%.$$

10.2.10. 1 kg gazu o udziałach masowych propanu (C_3H_8)0,4 i butanu (C_4H_{10})0,6 spalono ze współczynnikiem nadmiaru powietrza $\lambda = 1,15$. Określić:

- zapotrzebowanie powietrza V' w nm^3 ,
- masę wody powstałej ze spalania gazu m_{H_2O} ,
- objętość spalin mokrych V_S w odniesieniu do temperatury $t_S = 150^\circ C$ przy ciśnieniu $p = 730$ Tr.

$$\text{Odp. } V' = 14 \text{ nm}^3/\text{kg}; \quad m_{H_2O} = 1,587 \text{ kg/kg}; \quad V_S = 23,9 \text{ m}^3.$$

10.2.11. W kotle centralnego ogrzewania spala się w ciągu godziny $B = 100$ kg/h węgla kamiennego o składzie masowym: $c = 0,65$, $h = 0,04$, $o = 0,11$, $w = 0,08$, $A = 0,12$. Określić:

- ilość spalin V_S w nm^3 , jeśli analiza spalin za kotłem wykazała następujący skład objętościowy: $CO_2 = 10\%$, $CO = 1\%$, $O_2 = 9\%$;

- współczynnik nadmiaru powietrza z jakim zostało spalone paliwo, przy założeniu, że nie następowało zasysanie powietrza przez nieszczelności podczas przepływu spalin przez kocioł.

Rozwiązanie

$$V'_S = B v_S;$$

v_S oblicza się ze wzoru (10.10c)

$$v_S = 1,89 \cdot 0,65 \frac{100}{10 + 1} + 1,26(9 \cdot 0,04 + 0,08),$$

$$v_S = 11,73 \text{ nm}^3/\text{kg},$$

$$V'_S = 100 \cdot 11,73 \qquad V'_S = 1173 \text{ nm}^3/\text{h}.$$

Współczynnik nadmiaru powietrza λ oblicza się posługując się wzorem (10.9a)

$$N_2 = 100 - (10 + 1 + 9) = 80\%,$$

$$\lambda = \frac{21}{21 - 79 \frac{9 - 0,5 \cdot 1}{80}},$$

$$\lambda = 1,67.$$

10.2.12. Obliczyć zapotrzebowanie powietrza V_L nm^3 do spalania $B = 200$ kg/h węgla kamiennego o składzie masowym: $C = 0,58$, $h = 0,05$, $s = 0,01$, $o = 0,12$, $w = 0,12$, $A = 0,12$, jeśli analiza spalin wykazała następujący skład objętościowy:

$$\text{CO}_2 = 11\%, \quad \text{CO} = 1\%, \quad \text{O}_2 = 7,5\%.$$

Odp. $V_L = 1985$ nm^3/h .

10.2.13. Zapotrzebowanie ciepła dla celów centralnego ogrzewania $Q = 1200$ MJ/h . Kocioł zasilany jest węglem kamiennym o składzie masowym: $c = 0,65$, $h = 0,04$, $s = 0,01$, $o = 0,1$, $w = 0,08$, $A = 0,12$. Obliczyć ilość paliwa B , którą należy spalić w kotle pracującym ze sprawnością $\eta_k = 0,6$ dla pokrycia zapotrzebowania ciepła.

Rozwiązanie

Ze wzoru określającego sprawność kotła

$$\eta_k = \frac{Q}{W_u B}$$

określa się

$$B = \frac{Q}{\eta_k W_u};$$

Q_u oblicza się wg wzoru (10.6a)

$$Q_u = 33\,915 \cdot 0,65 + 121\,417 \left(0,04 - \frac{0,1}{8} \right) + \\ + 10\,467 \cdot 0,01 - 2512 \cdot 0,08,$$

$$Q_u = 25293,7 \text{ kJ/kg};$$

$$B = \frac{1\,200\,000}{0,6 \cdot 25293,7},$$

$$B = 79,2 \text{ kg/h}.$$

10.2.14. W palenisku kotła o wydajności $Q = 5$ GJ/h spala się gaz o składzie objętościowym: $\text{CH}_4 = 73\%$, $\text{C}_2\text{H}_6 = 10\%$, $\text{C}_3\text{H}_8 = 6\%$, $\text{C}_4\text{H}_{10} = 2\%$, $\text{CO}_2 = 1\%$, $\text{N}_2 = 8\%$.

Obliczyć:

- zapotrzebowanie gazu B' , nm^3/h ,
 - zapotrzebowanie powietrza V_L o temperaturze $t = 20^\circ\text{C}$ przy $p = 1$ bar, jeśli spalanie zachodziło ze współczynnikiem nadmiaru powietrza $\lambda = 1,2$,
 - skład objętościowy (w procentach) spalin mokrych.
- Odp. $B' = 124,6 \text{ nm}^3/\text{h}$, $\text{H}_2\text{O} = 16,84\%$, $\text{O}_2 = 3,14\%$,
 $V = 1720 \text{ m}^3/\text{h}$, $\text{CO}_2 = 8,42\%$, $\text{N}_2 = 71,6\%$.

10.2.15. Obliczyć wartość opałową Q_u butanu w kJ/kg , jeśli ciepło spalania wynosi: $Q_c = 132\,265 \text{ kJ}/\text{nm}^3$.

Odp. $Q_u = 47\,850 \text{ kJ}/\text{kg}$.

10.2.16. Kocioł parowy o wydajności $D = 2500 \text{ kg}/\text{h}$ pracujący ze sprawnością $\eta_k = 0,7$ wytwarza parę o $p = 12$ bar i $x = 0,98$. Zakładając temperaturę wody zasilającej kocioł $t_{wz} = 95^\circ\text{C}$ i skład masowy paliwa: $c = 0,65$, $h = 0,03$, $o = 0,07$, $s = 0,02$, $w = 0,10$, $A = 0,13$ określić:

- przekrój poprzeczny kanału F_L , którym doprowadzane jest powietrze do paleniska, jeśli spalanie zachodziło ze współczynnikiem nadmiaru powietrza $\lambda = 1,6$ przy temperaturze $t_o = 25^\circ\text{C}$ i $p = 1$ bar. Do obliczeń przyjąć prędkość powietrza w kanale $w = 20 \text{ m}/\text{s}$;

- masę spalin mokrych M_s opuszczających kocioł przy założeniu, że popiół ze spalanego paliwa w całości pozostaje w palenisku kotła;

- przekrój poprzeczny kanału F_{CZ} , którym doprowadzane są spaliny z kotła do komina, jeśli temperatura spalin opuszczających kocioł $t_s = 200^\circ\text{C}$. Do obliczeń F_{CZ} przyjąć $w = 8 \text{ m}/\text{s}$;

- udział objętościowy CO_2 (w procentach) w spalinach suchych u wylotu z kotła, przy założeniu, że w palenisku zachodziło spalanie zupełne.

Odp. $F_L = 0,0378 \text{ m}^2$; $M_s = 3420 \text{ kg}/\text{h}$; $F_{CZ} = 0,155 \text{ m}^2$;

$\text{CO}_2 = 12\%$.

10.2.17. Obliczyć temperaturę spalania teoretyczną t'_k i rzeczywistą t_k węgla kamiennego o udziałach masowych jak

w zadaniu 10.2.16 zakładając że: sprawność paleniska $\eta_p = 0,97$, współczynnik $\delta = 0,3$, współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1,5$, temperatura powietrza $t_o = 20^\circ\text{C}$.

Odp. $t'_k = 1640^\circ\text{C}$; $t_k = 1100^\circ\text{C}$.

10.2.18. W palenisku kotła spala się w ciągu godziny $B = 200$ kg/h węgla kamiennego o składzie masowym: $c = 0,55$, $h = 0,04$, $o = 0,10$, $s = 0,01$, $n = 0,02$, $w = 0,12$, $A = 0,16$. Spalanie zachodziło przy $\lambda = 1,4$ i $t_o = 30^\circ\text{C}$. Obliczyć:

- rzeczywistą temperaturę spalania t_k , jeśli dla danego typu paleniska $\delta = 0,2$ a $\eta_p = 0,96$;

- ilość ciepła Q oddanego w kotle przez oziębiające się spaliny, jeśli temperatura spalin przy ujściu z kotła była $t_s = 200^\circ\text{C}$.

Odp. $t_k = 1350^\circ\text{C}$; $Q = 3,13$ GJ/h.

10.2.19. Analiza spalin suchych opuszczających palenisko kotłowe wykazała następujący skład objętościowy: $\text{CO}_2 = 10\%$, $\text{CO} = 2\%$, $\text{O}_2 = 8\%$. Określić:

- skład objętościowy spalin wilgotnych CO_2 , CO , O_2 , H_2O , jeśli w kotle spalono paliwo o składzie masowym: $c = 0,65$, $h = 0,05$, $o = 0,1$, $w = 0,10$, $A = 0,1$;

- ilość ciepła straconą w ciągu godziny w wyniku niezupełnego spalania Q_{nz} , jeśli godzinowe zapotrzebowanie paliwa $B = 500$ kg/h.

Rozwiązanie

Obliczeń dokonuje się na podstawie wzoru (10.10c), w którym liczbę 100 w liczniku zastępuje się sumą udziałów poszczególnych składników w spalinach suchych.

$$\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{O}_2 + \text{N}_2 = 100\%,$$

$$v_s = 1,89 \cdot 0,65 \frac{10 + 2 + 8 + 80}{10 + 2} + 1,26(9 \cdot 0,05 + 0,1).$$

W podanym niżej zapisie każdy ze składników określa objętość poszczególnych składników uzyskanych ze spalania 1 kg paliwa:

$$\begin{aligned}v_s &= 1,89 \cdot 0,65 \frac{10}{10+2} + 1,89 \cdot 0,65 \frac{2}{10+2} + \\ &+ 1,89 \cdot 0,65 \cdot \frac{8}{10+2} + 1,89 \cdot 0,65 \frac{80}{10+2} + 1,26(9 \cdot 0,05 + 0,1), \\ v_s &= 1,022 + 0,2044 + 0,8176 + 8,176 + 0,693, \\ v_s &= 10,91 \text{ nm}^3/\text{kg}.\end{aligned}$$

Dzieląc objętości poszczególnych składników przez obliczoną wartość $V_s = 10,91 \text{ nm}^3/\text{kg}$ otrzymujemy się udziały objętościowe spalin mokrych:

$$\begin{aligned}CO'_2 &= \frac{1,022}{10,91} \cdot 100\% = 9,38\%, \\ CO' &= \frac{0,2044}{10,91} \cdot 100\% = 1,87\%, \\ O'_2 &= \frac{0,8176}{10,91} \cdot 100\% = 7,49\%, \\ N'_2 &= \frac{8,176}{10,91} \cdot 100\% = 74,90\%, \\ H_2O &= \frac{0,693}{10,91} \cdot 100\% = 6,36\% \text{ (para wodna)}.\end{aligned}$$

Obliczeń dokonuje się na podstawie wzoru (10.14)

$$\begin{aligned}Q_{nz} &= B S_{nz}; \\ S_{nz} &= 1,89 \cdot 0,65 \frac{100}{10+12} \cdot 12644 \cdot 0,02, \\ S_{nz} &= 2590 \text{ kJ/kg}; \\ Q_{nz} &= 500 \cdot 2590 \\ Q_{nz} &= 1295 \text{ MJ/h}.\end{aligned}$$

10.2.20. W palenisku kotła spalane jest paliwo o składzie masowym: $c = 0,60$, $h = 0,04$, $o = 0,11$, $s = 0,02$, $n = 0,01$, $w = 0,10$, $A = 0,12$. Określić temperaturę punktu rosy t_r dla spalin, jeśli spalanie było zupełne i zachodziło z $\lambda = 1,6$ przy ciśnieniu $p_B = 1 \text{ bar}$ i zawartości wilgoci w powietrzu $x_o = 0,01 \text{ kg/kg}$.

Rozwiązanie

Do określenia temperatury punktu rosy posługuje się wzorem (9.5a), z którego określa się p_s po uprzednim obliczeniu μ_g , x i podstawieniu wartości $\varphi = 1$.
Znając p_s z tabl.9 odczytuje się temperaturę nasycenia t_s , która jest szukaną temperaturą punktu rosy t_r . Obliczenie zawartości wilgoci x

$$x = \frac{W_1 + W_2}{M_{ss}},$$

gdzie: $W_1 = x_0 \lambda (L_m)_t$ - wilgoć wniesiona z powietrzem do paleniska

$W_2 = (9h + w)$ - wilgoć z paliwa

$$M_{ss} = M_{CO_2} + M_{SO_2} + M_{N_2} + M_{O_2}.$$

Masy poszczególnych składników określa się z równań:

$$M_{CO_2} = \frac{44}{12} \cdot c; \quad M_{N_2} = n \cdot 0,77 \cdot \lambda \cdot (L_m)_t;$$

$$M_{SO_2} = \frac{64}{32} \cdot s; \quad M_{O_2} = 0,23(\lambda - 1)(L_m)_t;$$

$$(L_m)_t = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} \cdot 0,6 + 8 \cdot 0,04 + 0,02 - 0,11 \right) \text{ kg/kg,}$$

$$(L_m)_t = 8,22 \text{ kg/kg;}$$

$$M_{CO_2} = \frac{44}{12} \cdot 0,6, \quad M_{SO_2} = \frac{64}{32} \cdot 0,02,$$

$$M_{CO_2} = 2,2 \text{ kg/kg; } M_{SO_2} = 0,04 \text{ kg/kg;}$$

$$M_{N_2} = 0,01 + 0,77 \cdot 1,6 \cdot 8,22$$

$$M_{N_2} = 10,13 \text{ kg/kg}$$

$$M_{O_2} = 0,23(1,6 - 1)8,22$$

$$M_{O_2} = 1,35 \text{ kg/kg}$$

$$M_{ss} = 13,72 \text{ kg/kg}$$

$$W_1 = 0,01 \cdot 1,6 \cdot 8,22, \quad W_1 = 0,1315 \text{ kg,}$$

$$W_2 = 9 \cdot 0,04 + 0,10, \quad W_2 = 0,4600 \text{ kg,}$$

$$x = \frac{0,1315 + 0,4600}{8,22}, \quad x = 0,072 \text{ kg/kg.}$$

Pozorny (zastępczy) ciężar drobinowy μ_g określa się z zależności

$$\mu_g = \frac{8315}{R_g};$$

$$R_g = \sum \frac{M_i}{M_{ss}} \cdot R_i, \quad R_g = 284 \text{ J/kg};$$

$$\mu_g = \frac{8315}{284}, \quad \mu_g = 29,35 \text{ kg/kmol,}$$

$$p_s = \frac{x \cdot p_B}{\frac{\mu_{H_2}}{\mu_g} + x},$$

$$p_s = \frac{0,072 \cdot 1}{\frac{18}{29,35} + 0,072}, \quad p_s = \frac{0,072}{0,613 + 0,072},$$

$$p_s = 0,105 \text{ bar} \quad \text{temu ciśnieniu odpowiada } t_s = 46,8^\circ\text{C,}$$

$$t_r = 46,8^\circ\text{C.}$$

10.2.21. Obliczyć temperaturę punktu rosy dla spalin powstałych ze spalania gazu o następującym składzie objętościowym: $\text{CH}_4 = 73\%$, $\text{C}_2\text{H}_6 = 10\%$, $\text{C}_3\text{H}_8 = 6\%$, $\text{C}_4\text{H}_{10} = 2\%$, $\text{CO}_2 = 1\%$, $\text{N}_2 = 8\%$. Spalanie gazu zachodziło z $\lambda = 1,2$. Powietrze biorące udział w spalaniu miało $t = 25^\circ\text{C}$ i $\varphi = 60\%$ przy ciśnieniu $p = 1 \text{ bar}$.

$$\text{Odp. } t_r = 57,82^\circ\text{C.}$$

10.2.22. W palenisku kotła spala się w ciągu godziny $B = 500 \text{ kg/h}$ węgla kamiennego o wartości opałowej $Q_{ul} = 25\,540 \text{ kJ/kg}$ i składzie masowym: $c = 0,66$, $h = 0,04$,

$o = 0,1$, $w = 0,08$, $A = 0,12$. Analiza spalin suchych wykazała skład objętościowy: $CO_2 = 10\%$, $CO = 1\%$, $O_2 = 8,5\%$.

Określić:

- ilość ciepła unoszonego w ciągu godziny ze spalinami w wyniku straty odlotowej (kominowej) Q_k , jeśli temperatura spalin opuszczających kocioł $t_s = 200^\circ C$, a temperatura powietrza biorącego udział w spalaniu $t_o = 2^\circ C$;

- udział straty odlotowej obliczonej analitycznie $s_k\%$ i według wzoru empirycznego Siegerta $s'_k\%$.

Odp. $Q_k = 1,6$ GJ/h; $s_k = 12,5\%$; $s'_k = 11,96\%$.

10.2.23. Dla przykładu 10.2.22 określić:

- udział straty niezupełnego spalania $s_{nz}\%$,

- udział straty niecałkowitego spalania $s_{nc}\%$, jeśli masa żużla i popiołu powstała ze spalania paliwa B wynosiła $\dot{Z} = 100$ kg/h (przy zawartości części palnych w żużlu wynosiła $b_z = 40\%$),

- udział straty ciepła unoszonego z paleniska w gorącym żużlu, temperatura żużla $t_z = 1200^\circ C$,

- sprawność kotła η_k przyjmując udział pozostałości strat $s_{ob} = 6\%$.

Odp. $s_{nz} = 5,66\%$; $s_{nc} = 10,62\%$, $s_z = 0,78\%$;
 $\eta_k = 0,6444$.

10.2.24. Celem sprawdzenia szczelności kotła dokonano analizy spalin pobranych z komory paleniskowej i przy ujściu spalin z kotła. Ustalić, czy kocioł był szczelny, jeśli spaliny pobrane z paleniska miały skład objętościowy: $CO_2' = 12\%$, $CO' = 1,5\%$, $O_2' = 6,5\%$, a przy ujściu z kotła $CO_2'' = 11\%$, $CO'' = 1\%$, $O_2'' = 8\%$.

Odp. Kocioł był nieszczelny, ponieważ $\lambda' < \lambda''$.