

Józef FOLWARCZNY

Instytut Techniki Ciepłej

BILANSOWANIE PIERWIĄSTKÓW GŁÓWNYCH PROCESU SPALANIA  
ORAZ INNYCH PROCESÓW CHEMICZNYCH

**Streszczenie.** Praca nawiązuje do wcześniejszej publikacji autora [3], w której podano ogólne powiązanie układu równań bilansu pierwiastków głównych. Obecnie autor wprowadza uściślenia w rozwiązywaniu układu równań przez uwzględnienie obecności  $\text{CO}_2$  w powietrzu otoczenia. Podany przykład liczbowy wskazuje też na potrzebę uwzględniania odstępstw właściwości dwutlenku węgla od właściwości gazu doskonałego<sup>x</sup>).

### 1. Wstęp

W jednej z wcześniejszych prac autor analizował wpływ zawartości dwutlenku węgla w powietrzu na wyniki bilansowania procesu spalania. Wpływ ten rośnie z rosnącym nadmiarem powietrza [2]. W dobie ogólnej dostępności elektronicznej techniki obliczeniowej łatwo w badaniach procesów chemicznych, w których uczestniczy powietrze, wyeliminować błędy powodowane pomijaniem obecności  $\text{CO}_2$  w powietrzu. Dlatego autor jeszcze raz dokonuje powiązania równań bilansu, podobnie jak to czynił w pracach [3], [4], unikając tym razem założeń upraszczających.

### 2. Wielkości pomocnicze

Każdy czynnik uczestniczący w procesie chemicznym scharakteryzowany został przez udziały gramowe pierwiastków głównych (węgiel c, wodór h, siarka s, azot n, tlen o, wilgoć w, popiół p). Przy czynnikach gazowych dogodnie jest posługiwać się w razie potrzeby udziałami objętościowymi  $r_i$  lub molowymi  $z_i$  gazu suchego oraz molowym stopniem zawilżenia  $X_2$  czynnika. Dla gazowych produktów procesu w miejsce podanego wyżej symbolu udziału ob-

<sup>x</sup>) Potrzebę uwzględniania rzeczywistych objętości molowych składników spalin suchych porusza prof. W. Wiśniowski w swej pracy doktorskiej "Wykresy spalania i ich osobliwości". Prace Naukowe Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Pol. Wrocławskiej Nr 10, Seria: Monografie Nr 2, Wrocław 1973.

jętościowego używa się też umieszczonego w klamrze znaku chemicznego danego składnika, np.  $[CO_2]$ . Udziały objętościowe składników suchego paliwa gazowego oznacza się za pomocą odpowiednich znaków chemicznych, np.  $CO = 0,13$ ,  $N_2 = 0,04$ . Wielkości dotyczące powietrza mogą być zaopatrywane indeksem  $a$ . Również inne indeksy mogą być używane ( $p$  - dla paliwa,  $se$  - dla spalin suchych,  $s$  - dla spalin wilgotnych,  $e$  - dla wielkości zastępczych).

Im bardziej złożony proces chemiczny, tym więcej strumieni substratów i produktów procesu wymaga uwzględnienia. Można powiedzieć, że liczba tych strumieni wynosi  $n$ . Skład elementarny  $i$ -tego czynnika odróżnia się od składu elementarnego innych czynników tym, że podane wyżej symbole udziałów gramowych zaopatruje się tym samym indeksem  $i$ .

Każdy z czynników uczestniczących w procesie charakteryzuje się wielkością

$$k_i = \frac{1}{AG_i + v_i + 1} \quad (1)$$

gdzie  $A = (z_{N_2}/z_{O_2})_a$  jest stosunkiem udziału molowego azotu do udziału molowego tlenu w powietrzu. Wielkość  $k_i$ , gdy chodzi o paliwa, oznacza maksymalną wartość udziału molowego sumy  $CO_2 + SO_2$  w spalinach suchych. Oprócz omówionej już wielkości  $A$  w równaniu (1) występują liczby Molliera  $G_i$  i  $v_i$ . Pierwsza z tych liczb jest stosunkiem

$$G_i = \frac{\frac{c_{e1}}{12} + \frac{h_i}{4} - \frac{o_i}{32}}{\frac{c_{e1}}{12}} \quad (2)$$

Licznik prawej strony tego równania przedstawia minimalne zapotrzebowanie tlenu  $n_{O \text{ min } i}$ , wyrażone w kilomolach na kilogram czynnika. Wielkość tę można też obliczać dla innej jednostki ilości czynnika (np. kmol). Wtedy również ilość węgla ekwiwalentnego (łącznie ilość kmol węgla pierwiastkowego i siarki), widoczna w mianowniku równania (2), dotyczy tej jednostki. Minimalne zapotrzebowanie tlenu można więc wyrazić wzorem

$$n_{O \text{ min } i} = \frac{c_{e1}}{12} + \frac{h_i}{4} - \frac{o_i}{32} = (n_{Ce})_i + (n_{H_2})_i/2 - (n_{O_2})_i \quad (3)$$

w którym wielkości  $n$  mogą być wyrażane w kmol/kg lub w kmol/kmol.

Druga z liczb Molliera, występujących w równaniu (1), oznaczona symbolem  $v_i$ , jest stosunkiem molowym ilości azotu do ilości węgla ekwiwalentnego w danym czynniku.

Strumienie czynników biorących udział w procesie oznacza się przez  $\dot{m}_i$ . Bilans pierwiastków dotyczyć ma warunków ustalonych w czasie. W odcinku

czasu  $\Delta\tau$ , w którym przeprowadzany jest bilans, do układu dopływa (z układu odpływa) ilość czynnika  $m_1 = \dot{m}_1 \Delta\tau$ . W przypadku procesu spalania zamiast wskaźników liczbowych i dogodniej stosować wspomniane wcześniej indeksy p, a, se.

### 3. Bilans pierwiastków głównych procesu

Do izobarycznej komory dopływają substraty, z komory zaś odpływają produkty procesu. Ilość strumieni substratów i produktów w różnych procesach bywa różna. Po stronie substratów przez  $m_1$  można rozumieć ilość paliwa doprowadzanego w czasie bilansowania procesu, a przez  $m_2$  - ilość powietrza wilgotnego. Jeżeli nie ma więcej strumieni substratów, to przez  $m_3$  można oznaczyć ilość gazowych produktów procesu. Kolejne liczby będą użyte jako wskaźniki następnych strumieni produktów procesu.

Równania bilansu dogodnie jest zestawiać dla 1 kg obranego czynnika (np. czynnika oznaczonego wskaźnikiem 1). Równania takie uzyskuje się, dzieląc równania bilansu dotyczące czasu  $\Delta\tau$  przez ilość substratu pierwszego lub przez ilość paliwa doprowadzanego w rozważanym odcinku czasu.

Równanie bilansu węgla ekwiwalentnego przyjmuje wtedy postać

$$\frac{c_{e1}}{12} + \frac{m_2}{m_1} \frac{c_{e2}}{12} + \dots = \frac{m_3}{m_1} \frac{c_{e3}}{12} + \frac{m_4}{m_1} \frac{c_{e4}}{12} + \dots \quad (4)$$

Równanie to jak i równania innych pierwiastków głównych mogą być w razie potrzeby uzupełnione dodatkowymi członami tak po stronie substratów jak i po stronie produktów procesu. Dla uproszczenia dalsze rozważania ograniczone zostaną tylko do dwóch substratów i dwóch produktów procesu, co odpowiada procesowi spalania jednego paliwa.

Jeżeli ostatnie równanie podzieli się stronami przez  $c_{e1}/12$ , to otrzyma się bezwymiarową postać równania bilansu węgla ekwiwalentnego. Składnikami tego równania są stosunki  $x_1$  ilości węgla ekwiwalentnego w danym strumieniu do ilości węgla ekwiwalentnego w strumieniu oznaczonym wskaźnikiem 1. Oznaczenie  $x_1$  nie będzie stosowane, gdyż wielkość ta równa jest jedności. Równanie (4) przyjmie więc postać

$$1 + x_2 = x_3 + x_4 \quad (4a)$$

Równanie bilansu wodoru można przedstawić w formie

$$\left(\frac{w}{36} + \frac{h}{4}\right)_1 + \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{w}{36} + \frac{h}{4}\right)_2 = \frac{m_3}{m_1} \left(\frac{w}{36} + \frac{h}{4}\right)_3 + \frac{m_4}{m_1} \left(\frac{w}{36} + \frac{h}{4}\right)_4 \quad (5)$$

Dzieląc to równanie stronami przez  $(c_{e1}/12)$ , otrzymuje się bezwymiarową postać równania bilansu wodoru

$$\frac{\left(\frac{w}{36} + \frac{h}{4}\right)_1}{\frac{c_{e1}}{12}} + x_2 \frac{\left(\frac{w}{36} + \frac{h}{4}\right)_2}{\frac{c_{e2}}{12}} = x_3 \frac{\left(\frac{w}{36} + \frac{h}{4}\right)_3}{\frac{c_{e3}}{12}} + x_4 \frac{\left(\frac{w}{36} + \frac{h}{4}\right)_4}{\frac{c_{e4}}{12}} \quad (5a)$$

Postępując analogicznie, otrzymuje się równanie bilansu tlenu w postaci

$$\frac{\left(\frac{o}{32} + \frac{w}{36}\right)_1}{\frac{c_{e1}}{12}} + x_2 \frac{\left(\frac{o}{32} + \frac{w}{36}\right)_2}{\frac{c_{e2}}{12}} = x_3 \frac{\left(\frac{o}{32} + \frac{w}{36}\right)_3}{\frac{c_{e3}}{12}} + x_4 \frac{\left(\frac{o}{32} + \frac{w}{36}\right)_4}{\frac{c_{e4}}{12}} \quad (6)$$

oraz równanie bilansu azotu

$$\frac{\frac{n_1}{28}}{\frac{c_{e1}}{12}} + x_2 \frac{\frac{n_2}{28}}{\frac{c_{e2}}{12}} = x_3 \frac{\frac{n_3}{28}}{\frac{c_{e3}}{12}} + x_4 \frac{\frac{n_4}{28}}{\frac{c_{e4}}{12}} \quad (7)$$

W ostatnim równaniu występują liczby Molliera  $\nu_1$ , co daje możliwość uproszczenia zapisu równania bilansu azotu

$$\nu_1 + x_2 \nu_2 = x_3 \nu_3 + x_4 \nu_4 \quad (7a)$$

W powyższym układzie czterech równań bilansu niewiadomymi są stosunki węgla  $x_2, x_3, x_4$  oraz zawartość wilgoci w spalinach uwzględniona w równaniach (5) i (6) w postaci udziału gramowego  $w_3$ . Ostatnia z wymienionych niewiadomych może być wyrugowana przez odjęcie stronami równania (6) od równania (5a). Otrzymuje się w ten sposób tzw. równanie bilansu wolnego tlenu

$$\frac{\left(\frac{h}{4} - \frac{o}{32}\right)_1}{\frac{c_{e1}}{12}} + x_2 \frac{\left(\frac{h}{4} - \frac{o}{32}\right)_2}{\frac{c_{e2}}{12}} = x_3 \frac{\left(\frac{h}{4} - \frac{o}{32}\right)_3}{\frac{c_{e3}}{12}} + x_4 \frac{\left(\frac{h}{4} - \frac{o}{32}\right)_4}{\frac{c_{e4}}{12}} \quad (8)$$

które z równaniami (4a) i (7a) tworzy układ trzech równań o trzech niewiadomych. Tak jest w przypadku procesu spalania. W przypadkach bardziej skomplikowanych procesów układ równań należy poszerzyć o zależności dodatkowe, właściwe dla danego procesu.

Gdy uwzględnimy równanie (2), to równanie wolnego tlenu po pomnożeniu stronami przez stosunek  $A$  można przepisać w postaci

$$A\bar{G}_1 - A + x_2 A\bar{G}_2 - Ax_2 = Ax_3 \bar{G}_3 - Ax_3 + Ax_4 \bar{G}_4 - Ax_4. \quad (8a)$$

Po obu stronach ostatniego równania występują elementy równania (4a) pomnożone przez stosunek  $A$ . Dodając stronami równanie (4a) pomnożone przez wspomniany mnożnik do równania (8a) możemy uzyskać prostszą formę ostatniego równania. Zamiast tego do równania (8a) dodajemy stronami równanie (4a), pomnożone stronami przez mnożnik  $(A - 1/K)$ . W mnożniku tym występuje parametr  $K$ , mogący przyjmować wartość dowolną. Dodając nadto równanie (7a) do równania (8a) otrzymujemy się zależność

$$\begin{aligned} (A\bar{G}_1 + \nu_1 + 1) - \frac{1}{K} + x_2(A\bar{G}_2 + \nu_2 + 1) - x_2 \frac{1}{K} = \\ = x_3(A\bar{G}_3 + \nu_3 + 1) - x_3 \frac{1}{K} + x_4(A\bar{G}_4 + \nu_4 + 1) - x_4 \frac{1}{K}. \end{aligned} \quad (8b)$$

Po uwzględnieniu równania (1) oraz po prostych przekształceniach równanie (8b) przyjmuje postać końcową

$$\frac{k_1 - K}{k_1} + x_2 \frac{k_2 - K}{k_2} = x_3 \frac{k_3 - K}{k_3} + x_4 \frac{k_4 - K}{k_4}. \quad (9)$$

Równanie to, łącznie z równaniami (4a) i (7a) - w przypadku procesu spalania - stanowi układ trzech równań o trzech niewiadomych ( $x_2, x_3, x_4$ ). Warto zauważyć, że podstawienie w równaniu (9)  $K = 0$  przekształca to równanie do postaci (4a). Inna skrajna wielkość,  $K = \infty$ , prowadzi do równania bilansu wolnego tlenu (8a).

Te same stosunki węgla  $x_1$  uzyskuje się niezależnie od tego, jakimi udziałami opisano skład danego czynnika oraz czynnika odniesienia. Można więc napisać

$$x_1 = \frac{\dot{m}_1 c_{e1}}{\dot{m}_1 c_{e1}} = \frac{\dot{n}_1 z_{C_{e1}}}{\dot{m}_1 c_{e1}/12} = \frac{\dot{n}_1 z_{C_{e1}}}{\dot{n}_1 z_{C_{e1}}} \quad (10)$$

W równaniu tym posłużono się udziałami molowymi węgla zastępczego, przez co rozumieć należy sumę ilości kilomoli węgla pierwiastkowego i siarki w jednym kilomolu danego czynnika gazowego (suchego). Na przykład, dla paliwa gazowego będzie to suma



która uwzględnia wszystkie składniki zawierające węgiel lub siarkę.



W równaniu (10) występuje ilość czynnika gazowego, przypadająca na jednostkę ilości czynnika odniesienia

$$n_1 = \frac{\dot{h}_1}{\dot{m}_1} = \frac{\dot{h}_1}{\dot{n}_1} \quad (11)$$

W przypadku, gdy czynnik odniesienia wyrażany jest w kg, wymiar jednostkowej ilości i-tego czynnika gazowego jest kmol/kg. Gdy czynnik odniesienia jest również gazem, to wielkość jednostkowa  $n_1$  wyrażana jest w kmol/kmol, co wynika - jak i wymiar poprzedni - z wyrażenia (11).

Jeżeli czynnik (substrat lub produkt procesu) oznaczony wskaźnikiem  $i \geq 2$  jest gazem, to istnieje możliwość posłużenia się w równaniu (5a) molowym stopniem zawilżenia

$$x_{z\ i} = \frac{n_1 \text{ H}_2\text{O}}{n_1} \quad (12)$$

gdzie:

$n_1 \text{ H}_2\text{O}$  kmol/kg, kmol/kmol - ilość wilgoci strumienia  $i$  przypadająca na jednostkę ilości czynnika odniesienia,

$n_1$  kmol/kg, kmol/kmol - ilość suchego czynnika gazowego przypadająca na jednostkę ilości czynnika odniesienia.

We wszystkich strumieniach czynnika założono obecność pierwiastka wodoru. W przypadkach suchego czynnika gazowego odpowiednikiem udziału gramowego  $h_i$  będzie udział molowy wodoru  $z_{\text{H}_2\ i}$ . Istnieje równość

$$x_1 \frac{\left(\frac{w}{36} + \frac{h}{4}\right)_i}{\frac{c_{ei}}{12}} = x_1 \frac{1}{2} \frac{z_{\text{H}_2\ i} + x_{z\ i}}{z_{C\ ei}} \quad (13)$$

która może służyć do obliczenia stopnia zawilżenia  $x_{z\ i}$ , jeżeli jest to jedyna niewiadoma w tym równaniu.

Równanie (13) może mieć zastosowanie dla gazowych produktów procesu lub dla powietrza. W równaniu (5a) oraz w równaniu (13) występują stosunki molowe (ilorazy) wodoru i węgla zastępczego. Natomiast w równaniu (6) występują analogiczne stosunki molowe tlenu i węgla zastępczego. W przypadku czynników gazowych można posługiwać się równością

$$x_1 \frac{\left(\frac{o}{32} + \frac{w}{36}\right)_i}{\frac{c_{ei}}{12}} = x_1 \frac{z_{\text{O}_2\ i} + \frac{x_{z\ i}}{2}}{z_{C\ ei}} \quad (14)$$

Występujące w tym równaniu, podobnie jak i w równaniu (13), udziały molarowe  $z_1$  dotyczą gazu suchego.

Przy zestawianiu równań bilansu pierwiastków głównych posługiwano się wyłącznie składami gramowymi czynników, dzięki czemu członów poszczególnych równań bilansu różnią się tylko wielkością wskaźnika "i".

#### 4. Wyznaczanie niewiadomych układu równań bilansu pierwiastków

Równania bilansu przedstawione w rozdziale poprzednim mogą dotyczyć zwykłego procesu spalania. W tym przypadku indeksy 1, 2, 3, 4 odnozą się do: paliwa, powietrza, gazowych produktów spalania, stałych produktów spalania.

Stosunek  $x_2$  jest wielkością małą. Dla powietrza nie zawierającego  $\text{CO}_2$  stosunek ten byłby równy zeru, a równanie (9) przyjęłoby wtedy postać prostszą, zawierającą dwie tylko niewiadome  $x_3, x_4$ . Po podstawieniu w tak uproszczonym równaniu (9)  $K = k_4$  wyliczyć można niewiadomą  $x_3$ . Dokonując natomiast podstawienia  $K = k_3$  uzyskuje się możliwość wyliczenia stosunku  $x_4$ .

W powietrzu otoczenia udział molowy  $z_{\text{CO}_2}$  jest większy od zera. Dlatego również  $x_2 > 0$  i omówione wyżej uproszczenie równania (9) w tych rozważaniach nie wchodzi w rachubę. Wielkość  $x_2$  można określić - na podstawie równań (4a) i (7a) - zależnością

$$x_2 = \frac{\sqrt{4} - \sqrt{3}}{\sqrt{2} - \sqrt{1}} + x_3 \frac{\sqrt{3} - \sqrt{4}}{\sqrt{2} - \sqrt{3}}, \quad (15)$$

lub zależnością

$$x_2 = \frac{\sqrt{3} - \sqrt{1}}{\sqrt{2} - \sqrt{3}} - x_4 \frac{\sqrt{3} - \sqrt{4}}{\sqrt{2} - \sqrt{3}}. \quad (15a)$$

Równanie (15) może być podstawione do równania (9). Po tym zabiegu należy w równaniu (9) dokonać dodatkowo podstawienia  $K = k_4$ , co umożliwi wyznaczenie niewiadomej  $x_3$ .

$$x_3 = \frac{\frac{k_1 - k_4}{k_1} + \frac{k_2 - k_4}{k_2} \frac{\sqrt{4} - \sqrt{1}}{\sqrt{2} - \sqrt{4}}}{\frac{k_3 - k_4}{k_3} - \frac{k_2 - k_4}{k_2} \frac{\sqrt{3} - \sqrt{4}}{\sqrt{2} - \sqrt{4}}}. \quad (16)$$

Po podstawieniu  $K = k_3$  w równaniu (9) oraz po zastosowaniu tam równania (15a) otrzymuje się wzór do obliczenia stosunku węgla

$$x_4 = \frac{\frac{k_1 - k_3}{k_1} + \frac{k_2 - k_3}{k_2} \frac{v_3 - v_1}{v_2 - v_3}}{\frac{k_4 - k_3}{k_4} + \frac{k_2 - k_3}{k_2} \frac{v_3 - v_4}{v_2 - v_3}} \quad (16a)$$

Przy wyznaczaniu niewiadomych  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$  należy najpierw obliczyć stosunek węgla  $x_3$  z równania (16), a następnie  $x_2$  z równania (15). W trzeciej kolejności wyznacza się z równania (4a) stosunek węgla  $x_2$ . Te same wyniki można uzyskać posługując się najpierw równaniem (16a), następnie równaniem (15a), w końcu równaniem (4a).

W przypadku procesu spalania stosunek węgla  $x_4$  jest znany jako stopień spalania niecałkowitego. Natomiast stosunki węgla  $x_2$ ,  $x_3$  służą do wyznaczenia jednostkowych ilości powietrza oraz spalin suchych.

Po wprowadzeniu zależności (11) do równania (10) jednostkową ilość suchego czynnika gazowego wyraża zależność

$$n_i = x_i \frac{c_{e1}}{12} \frac{1}{z_{C_{e1}}} \quad (17)$$

Z równania tego można wyliczyć jednostkową ilość powietrza suchego, wtedy  $n_1 = n_2 = n_a$  lub jednostkową ilość spalin suchych, wtedy  $n_1 = n_3 = n_{ss}$ .

Równania (10), (11), (13) zastosowane w równaniu bilansu wodoru pozwalają obliczyć stopień zawilżenia spalin

$$x_{z\ s} = \frac{z_{Ce3}}{x_3} \left[ n_a \frac{12}{c_{e1}} \cdot x_{z\ a} + \frac{12}{c_{e1}} \left( \frac{w}{18} + \frac{h}{2} \right)_1 + \right. \\ \left. - x_4 \frac{12}{c_{e4}} \left( \frac{w}{18} + \frac{h}{2} \right)_4 \right] - (z_{H_2O}) \quad (18)$$

W równaniu tym wzięto pod uwagę, że powietrze otoczenia nie zawiera wodoru. Występujący w równaniu (18) stopień zawilżenia powietrza  $x_{z\ a}$  jest wielkością ustaloną na drodze pomiarów.

### 5. Udziały molowe spalin suchych

Techniczna analiza spalin dostarcza informacji o udziałach objętościowych poszczególnych składników. Wśród nich jest dwutlenek węgla, który należy traktować jak gaz rzeczywisty. Wskazuje na to wartość objętości molarnej ( $Mv$ ) tego gazu w warunkach umownych. Przy  $p_u = 1$  atm,  $t_u = 0^\circ C$ .  $(Mv)_{CO_2} = 22,26$  m<sup>3</sup>/kmol [1], podczas gdy pozostałe składniki spalin



(tlen, azot, tlenek węgla, wodór) posiadają w tych warunkach termicznych objętość molową gazu doskonałego.

Przeliczenie udziałów objętościowych spalin suchych na udziały molowe jest rzeczą prostą, jeżeli zna się wartości  $(Mv)_j$  objętości molowych w warunkach termicznych  $p, t$ , przy których wyznaczono udziały objętościowe spalin.

Udział molowy  $z_j$  składnika spalin suchych wynosi

$$z_j = \frac{\frac{r_j}{(Mv)_j}}{\frac{r_{CO_2}}{(Mv)_{CO_2}} + \frac{1 - r_{CO_2}}{(Mv)_d}} \quad (19)$$

W równaniu tym wskaźnik  $j$  dotyczy dowolnego składnika spalin, natomiast wskaźnik  $d$  dotyczy gazu doskonałego. W związku z tym wielkość  $(Mv)_d$  może być wyliczana z równania Clapeyrona dla danych parametrów termicznych.

W nie publikowanej dotychczas pracy autor wyznaczył objętości molowe  $(Mv)$  szeregu gazów rzeczywistych dla kilku temperatur i kilku ciśnień zbliżonych do ciśnienia otoczenia. Wzięte stamtąd wartości objętości molowych dla 1 atm i 20°C ( $(Mv)_{CO_2} = 23,9064$ ,  $(Mv)_d = 24,0549$ ) będą użyte w niżej zamieszczonym przykładzie. Objętość molowa dwutlenku węgla przy ciśnieniu 1 atm i 0°C wynosi (wg obliczeń autora) 22,07 m<sup>3</sup>/kmol, co jest mniej o 0,86% od wartości spotykanej w literaturze. Można więc sądzić, że podana wyżej objętość molowa dwutlenku węgla przy 20°C i 1 atm została określona z podobną dokładnością.

Dla założenia, że znany jest skład objętościowy spalin suchych, którego dotyczą parametry termiczne  $p = 1$  atm,  $t = 20^\circ\text{C}$ , podano niżej wyliczone wartości udziałów molowych, a także wartości  $k_{ss,r}$  (obliczoną dla składu objętościowego) oraz  $k_{ss,z}$  (obliczoną dla składu molowego spalin suchych)

Składnik spalin suchych	Udziały objętościowe $r_i$	Udziały molowe $z_i$
CO <sub>2</sub>	0,122	0,122665
O <sub>2</sub>	0,075	0,074943
N <sub>2</sub>	0,803	0,802392
	$k_{ss,r} = 0,189778$	$k_{ss,z} = 0,190732$

W obliczeniu wielkości  $k$  przyjęto, że stosunek udziałów molowych azotu do tlenu w powietrzu wynosi  $A = 79/21$ .

### 6. Przykład wyznaczania stosunków $x_1$

W przykładzie tym skorzystamy ze składu spalin przytoczonego w rozdziale 5. Przyjęto następujący skład molowy powietrza:  $z_{\text{CO}_2 a} = 0,0003$ ,  $z_{\text{O}_2 a} = 0,9997 \cdot 0,21$ ,  $z_{\text{N}_2 a} = A z_{\text{O}_2 a} = 0,9997 \cdot 0,79$ . Z danych dla powietrza wynika wartość  $k_a = 1,0$ , oraz  $\check{v}_a = \frac{0,9997}{0,0003} = 0,79$ . Dla uproszczenia przyjmuje się, że  $\check{v}_1 = 0$ ,  $\check{v}_4 = 0$ . Stosunki Molliera  $\check{v}_{ss,r}$  i  $\check{v}_{ss,z}$  wynikają z podanych poprzednio składów:

$$\check{v}_{ss,r} = \frac{0,803}{0,122}, \quad \check{v}_{ss,z} = 6,541334.$$

Założmy teraz, że  $k_{ss,z} = k_1$ ,  $k_{ss,r} = k_3$ ,  $k_4 = 0,21$ . Dla powyższych danych i założeń uzyskuje się podane w tabeli wartości stosunków węgla.

Stosunki węgla	$\check{v}_a = \infty$	$\check{v}_a = 0,79 \frac{9997}{3}$
$x_2$	0,0	0,002313
$x_3$	0,948058	0,930909
$x_4$	0,051942	0,071404

Pierwsza kolumna wyników została wyliczona dla założenia, że powietrze nie zawiera  $\text{CO}_2$ . Różnice wartości stosunków  $x$  w obu kolumnach powodowane są obecnością  $\text{CO}_2$  w powietrzu. Stopień spalania niecałkowitego  $x_4$  wyliczony dla  $\check{v}_a = \infty$  świadczy w tym przykładzie o potrzebie uwzględnienia różnic między składem objętościowym i składem molowym spalin suchych. Gdyby tych różnic nie było, nie byłoby też różnic w tym przykładzie między  $k_1$  i  $k_3$ , a wyliczona wartość stosunku węgla  $x_4$  w kolumnie pierwszej byłaby równa zeru.

### LITERATURA

- [1] Ochęduszek S.: Termodynamika stosowana, WNT, Warszawa 1970.  
 [2] Folwarczny J.: Wpływ zawartości  $\text{CO}_2$  w powietrzu na wyniki bilansowania procesu spalania. PAN Wydż. IV - Sympozjum Krajowe, Zawoja, 15-17 X.1967, Skrótł referatów.

- [3] Folwarczny J.: Kontrola złożonych procesów spalania. Archiwum Budowy Maszyn, Tom XI, 1964, zeszyt 1.
- [4] Folwarczny J.: Związki wzory kontroli spalania w piecach przemysłowych. Zeszyty Naukowe Pol. Sl. Nr 117, Energetyka z. 16, 1964.

СОСТАВЛЕНИЕ БАЛАНСА ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ,  
А ТАКЖЕ ДРУГИХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Р е з ю м е

Статья развивает и расширяет предыдущую публикацию автора [3], в которой представлена общая связь системы уравнений баланса основных химических элементов. В настоящей статье автор вводит уточнения в решении системы уравнений, учитывая содержание  $\text{CO}_2$  в воздухе среды. Представленный численный пример указывает на необходимость учёта отклонений свойств углекислого газа от свойств идеального газа.

BALANCE SHEET OF MAIN ELEMENTS OF COMBUSTION AND  
OTHER CHEMICAL PROCESSES

S u m m a r y

The paper refers to earlier publication [3] in which general solution of the equation set of the main elements balance sheet has been given. Now, the solutions of the equation set are made more precise by taking into consideration the presence of  $\text{CO}_2$  in ambient air. The numerical example given points out to the necessity of taking into account the departure of  $\text{CO}_2$  properties from those of ideal gas.