

JÓZEF FOLWARCZNY  
Katedra Teorii Maszyn Ciepłych

ZWIĘZŁE RÓWNANIA KONTROLI SPALANIA  
W PIECACH PRZEMYSŁOWYCH

Streszczenie. Związki równania potrzebne w kontroli procesu spalania autor uzyskuje przez wprowadzenie wielkości charakterystycznych  $k_{ei}$  dla materiałów biorących udział w procesie. Dla paliwa wielkość  $k_{ei} = k_{ep}$  oznacza maksymalny udział objętościowy  $CO_2 + SO_2$  w spalinach suchych. Pozostałymi materiałami, do których stosuje się wielkość  $k_{ei}$ , to spaliny i stałe produkty spalania. Praca obejmuje wzory kontrolne procesu wynikające z bilansu materialnego i bilansu cieplnego.

1. WSTĘP

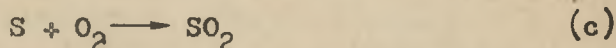
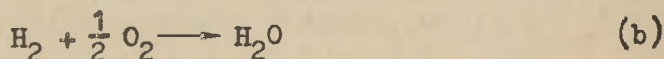
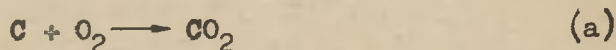
Z punktu widzenia racjonalnej gospodarki energetycznej kontrola procesów spalania jest zagadnieniem bardzo ważnym. Wobec potrzeby oszczędnej gospodarki paliwami kontrola ta winna być szeroko stosowana. Energetycy ciepłni kształceni na wyższych uczelniach specjalizują się między innymi w dziedzinie spalania. Część nabytych w tym zakresie wiadomości zapominają jednak wkrótce po opuszczeniu uczelni. Toteż rzadko spotyka się w przemyśle biegłych specjalistów w dziedzinie kontroli spalania.

Związki ujęcie zagadnień dotyczących zjawiska spalania w opracowaniu autora ma usprawnić nauczanie studentów oraz ułatwić korzystanie z nabytej wiedzy w praktyce.

## 2. PODSTAWOWE REAKCJE CHEMICZNE PROCESU SPALANIA

Każde paliwo przemysłowe stałe, ciekłe lub gazowe może zawierać trzy pierwiastki palne, mianowicie węgiel, wodór i siarkę. Zawartość tych pierwiastków w paliwie określają ich udziały kilogramowe:  $c_p$ ,  $h_p$ ,  $s_p$ . Składniki analizy elementarnej, jak i inne wielkości dotyczące paliwa, w niniejszej pracy zaopatrzone zostały indeksem  $p$ .

Przez podstawowe reakcje chemiczne procesu spalania rozu- mie się reakcje zupełnego utlenienia pierwiastków palnych. Reakcje te przebiegają zgodnie z równaniami stechiometrycz- nymi:



Każde z tych równań jest wypisane dla jednego kmol pier- wiastka palnego. Z równań tych można odczytać ilość kmol tlenu potrzebnego do zupełnego utlenienia danego pierwiast- ka oraz ilość kmol powstałego produktu reakcji.

## 3. WIELKOŚCI POMOCNICZE

### a) Skład elementarny paliwa

Oprócz składników palnych  $c_p$ ,  $h_p$ ,  $s_p$  paliwo może zawie- rać tlen  $o_p$ , azot  $n_p$ , wilgoć  $w_p$  i balast stały  $b_p$ . Podane symbole oznaczają udziały kilogramowe poszczególnych składników w paliwie. Udziały kilogramowe są ułamkami, któ- rych suma jest równa jedności.

Balast stały  $b_p$  podany w analizie elementarnej paliwa nie zawiera węglanów i związków siarki, które w palenisku uległyby rozkładowi. Jeżeli tak jest, to ilość balastu sta- łego przy przejściu przez palenisko nie ulega zmianie. Przez balast stały należy więc rozumieć minerały, które zachowują się obojętnie w procesie spalania, w tym tlenki nie ulega- jące redukcji. Dlatego udział kilogramowy  $b_p$  balastu sta- łego w paliwie winien być wyznaczany przez topienie popio-

ku uzyskanego przez żarzenie próbki paliwa w temperaturze  $800^{\circ}\text{C}$ . Natomiast lotne składniki wydzielające się przy topieniu popiołu mieszczą się w udziałach  $c_p, s_p, o_p$ .

Odróżnianie balastu stałego od popiołu jest konieczne przy badaniach dokładnych. Dla ścisłości, w rozważaniach niniejszych autor posługuje się wyżej omówioną analizą elementarną paliwa, która między innymi podaje wielkość balastu stałego  $b_p$ .

### b) Jednostkowe zapotrzebowanie tlenu i powietrza

Minimalne zapotrzebowanie tlenu przypadające na 1 kg paliwa oblicza się za pomocą równania

$$n_{\text{S min p}} = \frac{c_p}{12} + \frac{s_p}{32} + \frac{h_p}{4} - \frac{o_p}{32} \quad \frac{\text{kmol O}_2}{\text{kg pal.}} \quad (1)$$

W paliwach przemysłowych węgiel i wodór są głównymi pierwiastkami palnymi, natomiast siarka występuje w małych ilościach. W związku z tym w spalinach występują znikome ilości dwutlenku siarki. Przy użyciu aparatu ORSATA do określenia składu objętościowego spalin suchych dwutlenek siarki jest oznaczany łącznie z dwutlenkiem węgla. Z tego względu dla ścisłości dalszego toku rozważań jest celowe wprowadzić pojęcie zastępczego (ekwiwalentnego) udziału kilogramowego węgla w paliwie

$$c_{ep} = c_p + \frac{12}{32} s_p \quad (d)$$

Indeks e będzie używany również przy innych wielkościach zastępczych.

Po skojarzeniu równań (1) i (d) otrzymuje się wzór na minimalne zapotrzebowanie tlenu w postaci

$$n_{\text{S min p}} = \frac{c_{ep}}{12} + \frac{h_p}{4} - \frac{o_p}{32} \quad (1a)$$

W większości przypadków tlen potrzebny do spalania dostarczany jest z powietrzem. Minimalne zapotrzebowanie powietrza w tym przypadku wyraża wzór

$$n_{L \text{ min p}} = \frac{n_{S \text{ min p}}}{0,21} \quad \frac{\text{kmol pow.}}{\text{kg paliwa}} \quad (2)$$

W procesach spalania powietrze stosowane jest w nadmiarze określonym stosunkiem

$$\lambda = \frac{n'_L}{n_{L \text{ min p}}} \quad (3)$$

W równaniu tym  $n'_L$  oznacza rzeczywistą ilość kmol powietrza przypadającą na każdy kg spalanej paliwa.

Równania (1), (1a), (2) dotyczą tak paliw stałych jak i paliw ciekłych. Natomiast dla paliw gazowych odpowiednie wielkości oblicza się za pomocą odrębnych równań [1].

### c) Stosunki Molliera

Stosunek minimalnego zapotrzebowania tlenu do ilości kmol węgla w paliwie oznacza się wg Molliera literą  $\sigma$ . Symbol ten zaopatrzony indeksem ep oznaczać będzie stosunek  $n_{S \text{ min p}}$  do ekwiwalentnej ilości kmol węgla w paliwie

$$\sigma_{ep} = \frac{n_{S \text{ min p}}}{\frac{c_{ep}}{12}} \quad (4)$$

Odpowiednikiem drugiej znanej wielkości wprowadzonej przez Molliera, oznaczającej stosunek ilości kmol azotu w paliwie do ilości kmol węgla w paliwie jest ekwiwalentna wielkość

$$\gamma_{ep} = \frac{n_p/28}{c_{ep}/12} \quad (5)$$

d) Maksymalna zawartość dwutlenku węgla w spalinach suchych

W przypadku, gdy palne pierwiastki paliwa zostaną bez reszty utlenione według równań (a), (b), (c) przy stosowaniu minimalnej ilości powietrza, spaliny suche będą zawierały tylko dwutlenek węgla, dwutlenek siarki i azot. Ten ostatni składnik spalin suchych pochodzi przede wszystkim z użytego przy spalaniu powietrza oraz z paliwa, jeżeli paliwo zawierało azot. Procentowy udział dwutlenku węgla w spalinach suchych w omawianym przypadku dla danego paliwa osiąga wartość maksymalną i bywa oznaczany symbolem  $k_{\max}$ . W pracy niniejszej w miejsce wielkości  $k_{\max}$  wprowadza się wielkość  $k_{ep}$ , która jest większa od  $k_{\max}$  o procentowy udział dwutlenku siarki w minimalnej ilości spalin suchych.

Omówiona wyżej maksymalna, ekwiwalentna zawartość dwutlenku węgla w spalinach suchych wyraża się wzorem

$$k_{ep} = \frac{100}{\frac{79}{21} \sigma_{ep} + \gamma_{ep} + 1} \% \quad (6)$$

Wielkość  $k_{ep}$  można też obliczyć na podstawie składu objętościowego spalin suchych, będących produktem spalania całkowitego. W tym celu gazowe produkty spalania traktuje się tak jak paliwo gazowe i oblicza się dla nich omówione wyżej stosunki Molliera. Jeżeli w stałych produktach spalania znajduje się węgiel pierwiastkowy (spalanie niecałkowite) to maksymalna zawartość dwutlenku węgla w spalinach suchych obliczona na podstawie składu objętościowego spalin będzie mniejsza od  $k_{ep}$  paliwa. Maksymalna zawartość dwutlenku węgla (i dwutlenku siarki) w spalinach suchych będzie oznaczana symbolem  $k_{ss}$  i obliczana ze wzoru

$$k_{ss} = \frac{100}{\frac{79}{21} \sigma_{ss} + \gamma_{ss} + 1} \% \quad (7)$$

Stosunki Molliera w tym wzorze zaopatrzone indeksem ss, gdyż dotyczą one spalin suchych. Wobec nie wykrywania w spalinach dwutlenku siarki stosunków Molliera w ostatnim równaniu nie zaopatrzone indeksem e. Niemniej należy pamiętać, że są to w rzeczywistości wielkości ekwiwalentne.

## 4. BILANS MATERIALNY

a) Równania bilansu

Prawo zachowania ilości materii biorącej udział w procesie spalania można wyrazić za pomocą równań bilansu głównych pierwiastków i balastu stałego występujących w strumieniach substratów i produktów spalania. Na każdy kilogram spalanej paliwa przypada  $n_L''$  kmol powietrza,  $n_{ss}''$  kmol spalin suchych,  $n_{H_2O}''$  kmol wilgoci w spalinach i z kg produktów stałych. Równania bilansu podane niżej dotyczą ustalonego stanu paleniska i wypisane są dla 1 kg paliwa. Bilans węgla ekwiwalentnego

$$\frac{c_{ep}}{12} = \frac{n_{Ce}''}{100} n_{ss}'' + z \frac{c_e}{12} \quad (8)$$

Bilans wodoru

$$\frac{w_p}{18} + \frac{h_p}{2} + X n_L' = \frac{n_{H_2}''}{100} n_{ss}'' + z \left( \frac{w}{18} + \frac{h}{2} \right) + \frac{\Delta n_{H_2O}''}{100} n_{ss}'' \quad (9)$$

Bilans tlenu

$$\frac{w_p}{36} + \frac{o_p}{32} + \frac{X n_L'}{2} + 0,21 n_L' = \frac{n_{O_2}''}{100} n_{ss}'' + z \left( \frac{w}{36} + \frac{o}{32} \right) + \frac{\Delta n_{H_2O}''}{200} n_{ss}'' \quad (10)$$

Bilans azotu

$$\frac{n_p}{28} + 0,79 n_L' = \frac{n_{N_2}''}{100} n_{ss}'' + z \frac{n}{28} \quad (11)$$

## Bilans balastu stałego

$$b_p = z b \quad (12)$$

W równaniach bilansu symbole składu elementarnego nie zaopatrzone indeksem p dotyczą stałych produktów spalania. W równaniach (9) i (10) występuje wielkość  $\Delta n''_{H_2O}$  (kmol/100 kmol spalin suchych) oznaczająca parę wodną w spalinach oraz stopień zawilżenia powietrza X (kmol  $H_2O$ /kmol pow. suchego). W równaniach bilansu wielkości  $n''_{Ce}$ ,  $n''_{H_2}$ ,  $n''_{O_2}$ ,  $n''_{N_2}$  oznaczają ilość kmol danego pierwiastka w 100 kmol spalin suchych

$$(\text{np.: } n''_{O_2} = [O_2] \% + [CO_2] \% + \frac{1}{2} [CO] \%, \quad n''_{N_2} = [N_2] \%).$$

Po skojarzeniu równań (8), (9), (10), (11) i zastosowaniu równań wcześniejszych otrzymuje się wzór

$$c_{ep} \frac{k_{ep} - k_{ss}}{k_{ep}} = z c_e \frac{k_e - k_{ss}}{k_e}, \quad (13)$$

w którym  $k_e$  przedstawia maksymalną ilość  $CO_2$  w spalinach suchych (obliczoną ze wzoru (6)) powstałych ze stałych produktów spalania. Korzystając z równania (6) do obliczenia wielkości  $k_e$  należy w tym równaniu opuścić indeks p.

b) Stopień niecałkowitego spalania

Równanie (13) pozwala obliczyć stopień niecałkowitego spalania x będący stosunkiem ilości węgla pierwiastkowego w stałych produktach spalania do ilości węgla pierwiastkowego w paliwie

$$x = \frac{z c_e}{c_{ep}} = \frac{k_e (k_{ep} - k_{ss})}{k_{ep} (k_e - k_{ss})} \quad (13a)$$

W przypadkach, gdy w stałych produktach spalania oprócz bala-  
lastu stałego znajduje się tylko węgiel pierwiastkowy ( $k_e =$   
 $= 21\%$ ) stopień niecałkowitego spalania można obliczać ze  
wzoru

$$x = \frac{21}{k_{ep}} \frac{k_{ep} - k_{ss}}{21 - k_{ss}} \quad (14)$$

Z równania (13a) po zastosowaniu równania (12) można o-  
kreślić stopień niecałkowitego spalania tylko na podstawie  
składu elementarnego paliwa i stałych produktów spalania

$$x = \frac{b_p}{b} \frac{c_e}{c_{ep}} \quad (13b)$$

Określenie stopnia niecałkowitego spalania  $x$  za pomocą  
wielkości  $k$  jest możliwe przy dużej dokładności pobrania  
próbek i przeprowadzenia analiz składu poszczególnych mate-  
riałów. Natomiast ostatni wzór nadaje się lepiej do obli-  
czania omawianej wielkości.

### c) Jednostkowa ilość materii spalin suchych

Z równania (8) po zastosowaniu równania (12) oblicza się  
jednostkową ilość spalin suchych

$$n''_{ss} = \frac{100}{n''_{Ce}} \frac{1}{12} \left( c_{ep} - \frac{b_p}{b} c_e \right) \frac{\text{kmol}}{\text{kg pal.}} \quad (15)$$

Po zastosowaniu równania (13b) ostatnie równanie przyjmie  
postać

$$n''_{ss} = \frac{100}{n''_{Ce}} \frac{c_{ep}}{12} (1 - x) \frac{\text{kmol}}{\text{kg pal.}} \quad (15a)$$



Wielkość  $x$  można wyrugować z ostatniego równania za pomocą równania (13a). Wtedy otrzymuje się wzór

$$n''_{ss} = \frac{100}{n''_{Ce}} \frac{c_{ep}}{12} \frac{k_{ss}}{k_{ep}} \frac{k_e - k_{ep}}{k_e - k_{ss}} \frac{\text{kmol}}{\text{kg pal.}} \quad (15b)$$

w którym występują charakterystyczne wielkości  $k$ .

#### d) Jednostkowa ilość materii powietrza suchego

Wielkość tę oblicza się z równania (10) po zastosowaniu równań (9), (12), (13b) oraz wzorów omówionych w rozdziale 3.

$$n''_L = \frac{100}{79} \frac{c_{ep}}{12} \left\{ (v_{ss} - v_{ep}) - x (v_{ss} - v_e) \right\} \quad (16)$$

#### e) Jednostkowa ilość materii pary wodnej w spalinach

Wielkość ta na wstępie niniejszego rozdziału została oznaczona symbolem  $n''_{H_2O}$ . Pozostaje ona z wielkością  $\Delta n''_{H_2O}$  w następującym związku

$$n''_{H_2O} = \frac{\Delta n''_{H_2O}}{100} n''_{ss} \quad (e)$$

Po zastosowaniu w ostatniej zależności równań (9), (15a) i (16) otrzymuje się wzór

$$n''_{H_2O} = \left( \frac{w}{18} + \frac{h}{2} \right) + x \frac{100}{79} \frac{c_{ep}}{12} \left\{ (v_{ss} - v_{ep}) - x (v_{ss} - v_e) \right\} +$$

$$- \frac{n''_{H_2}}{n''_{Ce}} \frac{c_{ep}}{12} (1 - x) - x \frac{c_{ep}}{c_e} \left( \frac{w}{18} + \frac{h}{2} \right) \quad (17)$$

Stożenie zawilżenia  $X$  powietrza występujący w ostatnim równaniu oblicza się ze wzoru

$$X = \frac{\varphi p_s}{p - \varphi p_s} \quad (f)$$

gdzie:  $\varphi$  - wilgotność powietrza (w postaci ułamkowej),  $p_s$  - ciśnienie nasycenia pary wodnej wzięte dla temperatury powietrza,  $p$  - ciśnienie bezwzględne powietrza.

#### f) Stosunek powietrza

Po wstawieniu równań (2), (4), (6), (13a), (16) do równania (3) otrzymuje się następujący wzór na stosunek (nadmiaru) powietrza

$$\lambda = \frac{\nu_{ss} k_{ss} \frac{k_e - k_{ep}}{k_e - k_{ss}} + \nu_e k_e \frac{k_{ep} - k_{ss}}{k_e - k_{ss}} - \nu_{ep} k_{ep}}{100 - (1 + \nu_{ep}) k_{ep}} \quad (18)$$

Wzór ten dotyczy najogólniejszego przypadku. W większości praktycznych zastosowań  $\nu_e = 0$ . Najprostrzy wzór na stosunek nadmiaru powietrza otrzymuje się dla przypadku spalania całkowitego. Wtedy  $k_{ss} = k_{ep}$ , a stosunek nadmiaru powietrza wyraża się wzorem

$$\lambda = k_{ss} \frac{\nu_{ss} - \nu_{ep}}{100 - (1 + \nu_{ep}) k_{ss}} \quad (g)$$

Przy obliczaniu stosunku  $\lambda$  dla paliw stałych i ciekłych wielkość  $\nu_{ep}$  jest przeważnie bardzo mała w porównaniu z wielkością  $\nu_{ss}$  i może być pominięta bez istotnego wpływu na dokładność obliczeń.

## 5. BILANS ENERGETYCZNY PIECA PRZEMYSŁOWEGO

a) Sprawność termiczna pieca

Do paleniska doprowadza się paliwo, którego energię chemiczną określa jego wartość opałowa  $(w_d)_p$ . Część ciepła wydzielającego się przy spalaniu paliwą zostaje wykorzystana użytecznie, a reszta pokrywa straty ciepłne pieca oraz ewentualny przyrost energii układu. Piec przemysłowy działający w warunkach ustalonych nie wykazuje zmian energii wewnętrznej. Wtedy równanie pierwszej zasady termodynamiki wypisane dla 1 kg paliwa ma postać

$$(w_d)_p = q_u + q_{ww} + q_{wu} + q_{nc} + q_{ot} \quad (19)$$

gdzie:

- $q_u$  - ciepło użyteczne,
- $q_{ww}$  - strata wylotowa wyraźna,
- $q_{wu}$  - strata wylotowa utajona,
- $q_{nc}$  - strata utajona w stałych produktach spalania,
- $q_{ot}$  - strata na rzecz otoczenia

Prawa strona równania (19) przedstawia sumę jednostkowych wartości ciepła użytecznego i poszczególnych strat. Równanie to stronami podzielone przez wartość opałową i pomnożone przez 100 przyjmuje postać

$$100 = \frac{q_u}{(w_d)_p} 100 + \frac{q_{ww}}{(w_d)_p} 100 + \frac{q_{wu}}{(w_d)_p} 100 + \frac{q_{nc}}{(w_d)_p} 100 + \frac{q_{ot}}{(w_d)_p} 100 \quad (19a)$$

Prawa strona ostatniego równania przedstawia sumę sprawności termicznej i względnych strat ciepłych pieca. Tak sprawność termiczna  $\eta_t$ , jak i straty względne  $\epsilon$  są wyrażone w procentach. Można więc napisać

$$100 = \eta_t + \epsilon_{ww} + \epsilon_{wu} + \epsilon_{nc} + \epsilon_{ot} \quad (19b)$$

Sprawność termiczną pieca przemysłowego można obliczyć przez bezpośrednie pomiary ciepła użytecznego i wartości opałowej lub też odejmując od 100 sumę względnych strat ciepłych wyrażonych w procentach. W tym drugim przypadku sprawność termiczna określa wzór.

$$\eta_t = 100 - \epsilon_{ww} - \epsilon_{wu} - \epsilon_{nc} - \epsilon_{ot} \quad (19c)$$

#### b) Wartość opałowa paliwa

Wiele pieców przemysłowych opala się węglem kamiennym. W tych przypadkach wartość opałową można określić za pomocą formuły Dulonga

$$(w_d)_p = 33900 c_p + 121400 \left( h_p - \frac{o_p}{8} \right) + 10470 s_p - 2500 w_p \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Wzór ten po zastosowaniu równań (d) i (6) przyjmuje postać

$$(w_d)_p = c_{ep} \frac{1075700 - 17324 k_p}{k_p} - [2242 s_p + 4610 n_p + 2500 w_p]$$

W ostatnim równaniu suma umieszczona w klamrze jest rzędu 0,5% wartości opałowej. Dlatego wartość opałową paliwa w przybliżeniu można określić wzorem

$$(w_d)_p = c_{ep} \frac{1075700 - 17324 k_p}{k_p} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (20)$$

W piecach zasilanych węglem kamiennym lub paliwem, którego wartość opałową można przedstawić w formie reprezentatywnej równaniem (20), badanie głównych strat ciepłych znacznie się upraszcza

### c) Strata wylotowa wyraźna

Strata wylotowa wyraźna jest równa nadwyżce entalpii spalin nad entalpią spalin przy temperaturze otoczenia

$$q_{ww} = n''_{ss} (Mc_p)_{ss} (t_s - t_{ot}) + n''_{H_2O} (Mc_p)_{H_2O} (t_s - t_{ot}) \quad (21)$$

Strata określona równaniem (21) podzielona przez wartość opałową paliwa i pomnożona przez 100 daje względną stratę wylotową wyraźną

$$\epsilon_{ww} = \left[ 1 + \frac{n''_{H_2O}}{n''_{ss}} \frac{(Mc_p)_{H_2O}}{(Mc_p)_{ss}} \right] \frac{10^4}{12} \frac{c_{ep}}{(w_d)_p} (Mc_p)_{ss} (1-x) \frac{t_s - t_{ot}}{n''_{Ce}} \% \quad (22)$$

W równaniu tym został zastosowany wzór (15a). W ostatnich dwóch równaniach dla uproszczenia średnie ciepła właściwe w zakresie od temperatury otoczenia  $t_{ot}$  do temperatury spalin  $t_s$  oznaczono symbolami  $(Mc_p)_{ss}$  i  $(Mc_p)_{H_2O}$ .

Jeżeli znana jest charakterystyczna wielkość  $k_p$  i gdy ma zastosowanie wzór (20), to równanie (22) sprowadzić można do postaci przypominającej wzór Siegerta

$$\epsilon_{ww} = a (1 - x) \frac{t_s - t_{ot}}{n''_{Ce}} \quad (22a)$$

Równanie (22a) staje się identyczne ze wzorem Siegerta w przypadku spalania zupełnego i całkowitego ( $x = 0$ ,  $n''_{Ce} = [CO_2] \%$ ).

d) Strata wylotowa utajona

Przyczyną straty wylotowej utajonej są palne gazy w produktach spalania. Najczęściej spotykanym składnikiem palnym w spalinach jest tlenek węgla. Niemniej mogą też występować inne składniki palne. W przypadku, gdy w spalinach są obecne: CO, CH<sub>4</sub> i H<sub>2</sub>, bezwzględną stratę wylotową utajoną określa wzór

$$q_{wu} = n''_{ss} \left\{ \frac{[CO]}{100} (Mw_d)_{CO} + \frac{[CH_4]}{100} (Mw_d)_{CH_4} + \frac{[H_2]}{100} (Mw_d)_{H_2} \right\} \quad (23)$$

Po zastosowaniu równania (15a) oraz po podstawieniu wartości opałowych poszczególnych palnych składników względną procentową stratę utajoną oblicza się z równania

$$\epsilon_{wu} = \frac{c_{ep}}{12} \frac{1-x}{n''_{Ce} (w_d)_p} 10^4 \left\{ 2835 [CO] + 8026 [CH_4] + 2412 [H_2] \right\} \% \quad (24)$$

W równaniu tym wartość opałową  $(w_d)_p$  należy podstawiać w kJ/kg.

W przypadkach, gdy ma zastosowanie wzór (20), równanie (24) można przedstawić w formie prostszej. Na przykład dla węgla kamiennego o wielkości charakterystycznej  $k_p = 19\%$  względną stratę wylotową utajoną oblicza się ze wzoru

$$\epsilon_{wu} = \frac{1-x}{n''_{Ce}} \left\{ 60,2 [CO] + 170,2 [CH_4] + 51,2 [H_2] \right\} \% \quad (24a)$$

W ostatnim równaniu, jak i w innych równaniach tej pracy, składniki objętościowe spalin suchych podstawia się w procentach.

c) Strata w stałych produktach spalania

Jest to strata utajona w stałych produktach spalania. Bezwzględną wartość tej straty wyraża wzór

$$q_{nc} = z W_d \quad \text{kJ/kg paliwa,} \quad (25)$$

w którym  $W_d$  kJ/kg oznacza wartość opałową stałych produktów spalania.

W większości przypadków w stałych produktach spalania substancja palna praktycznie jest czystym węglem pierwiastkowym (brak innych pierwiastków palnych). Wtedy strata bezwzględna w niespalonych stałych produktach spalania wyraża się równaniem

$$q_{nc} = x c_{ep} 33900 \quad \text{kJ/kg} \quad (25a)$$

Względną stratę w niespalonych stałych produktach spalania oblicza się wtedy z równania

$$\varepsilon_{nc} = x c_{ep} \frac{339 \cdot 10^4}{(W_d)_p} \% \quad (26)$$

Dla węgla kamiennego charakteryzującego się wielkością  $k_p = 19\%$  omawiana strata może być obliczana ze wzoru

$$\varepsilon_{nc} = 86,3 x \% \quad (26a)$$

Stopień niecałkowitego spalania  $x$  najdogodniej obliczać ze wzoru (13b).

f) Strata na rzecz otoczenia

W przypadkach, gdy sprawność termiczna pieca przemysłowego jest wyznaczana metodą bezpośrednią, stratę ciepła na rzecz otoczenia oblicza się z równania bilansu energetycznego. Natomiast w przypadkach, gdy do sprawności termicznej dochodzi się od strony strat, trzeba również znać wielkość straty ciepła na rzecz otoczenia.

Stan termiczny obmurza pieca przemysłowego praktycznie nie zależy od obciążenia pieca. Jeżeli tak jest, to przy danej temperaturze otoczenia bezwzględna strata ciepła pieca  $\dot{Q}_{ot}$  w jednostce czasu na rzecz otoczenia jest wielkością stałą. Natomiast wielkość względnej straty ciepła na rzecz otoczenia zależy od ilości spalanej paliwa  $\dot{m}_p$  i jego wartości opałowej, zgodnie z równaniem

$$\epsilon_{ot} = \frac{\dot{Q}_{ot}}{\dot{m}_p (W_d)_p} 100\%$$

Przy jakimś konkretnym obciążeniu pieca (np. obciążeniu nominalnym) za pomocą powyższego równania oblicza się daną wartość względnej straty na rzecz otoczenia

$$\epsilon_{ot 1} = \frac{\dot{Q}_{ot}}{\dot{m}_{p1} (W_d)_p} 100\%$$

Kojarząc ostatnie dwa równania otrzymuje się wzór

$$\epsilon_{ot} = \epsilon_{ot 1} \frac{\dot{m}_{p1}}{\dot{m}_p} \% \quad (27)$$

który może być użyty do określenia względnej straty ciepła na rzecz otoczenia przy danym obciążeniu pieca.

## LITERATURA

- [1] Ochęduszek S.: Teoria Maszyn Ciepłych, cz. 2, wyd. II, PWT warszawa 1960 r.



КРАТКИЕ УРАВНЕНИЯ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ  
В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ

## Р е з ю м е

Краткие уравнения необходимые для контроля процесса сгорания автором получаются путем введения характерных величин  $k_{ei}$  для материалов, принимающих участие в процессе. Для топлива величина  $k_{ei} = k_{ep}$  обозначает максимальную объемную долю  $CO_2 + SO_2$  в сухих продуктах сгорания. Остальные материалы, к которым относится величина  $k_{ei}$ , это газообразные продукты сгорания и твердые продукты сгорания. В работе приведены формулы контроля процесса, следующие из материального и теплового балансов.

BRIEF EQUATIONS OF THE COMBUSTION CONTROL  
IN THE INDUSTRIAL FURNACES

## S u m m a r y

Brief equations, necessary for the combustion process control were obtained by the author by introducing the characteristic quantities  $k_{ei}$  for materials, taking part in this process. The quantity  $k_{ei} = k_{ep}$  for the fuel is determining the maximum volume part of the  $CO_2 + SO_2$  in the dry exhaust gases. The residual materials to which is concerning the quantity  $k_{ei}$  are the exhaust gases and solid combustion products. The work is consisting of the process control equations resulting from the material and heat balance.