ZESZYTY NAUKOWE
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

PRACE HABILITACYJNE
Nr 10

P. 3350/61

ENERGETYKA

Nr 8

GLIWICE 1961

Spis treści

I. Wstęp 4

II. Bilanse masowe pieca cementowniczego 6

1. Maksymalna zawartość CO_2 w spalinach suchych . . . 6
2. Powietrze wnikające do układu przez nieszczelności . . 7
3. Pierwiastek węgla Δn_C wypalany w strumieniu spalin . 8
4. Stosunek wzrostu ilości spalin spowodowany dopływem powietrza szkodliwego 10
5. Udział objętościowy $[CO_2]_S$ dwutlenku węgla w spalinach suchych spowodowany rozkładem węglanów w piecu . . 11
6. Stosunek λ nadmiaru powietrza w procesie spalania . . 16
7. Zużycie paliwa w piecu cementowniczym 19

III. Bilans energetyczny pieca cementowniczego 22

IV. Kontrola procesu piecowego w warunkach eksploatacyjnych . 30

V. Przykłady zastosowania metody kontroli 35

1. Piec szybowy 35
2. Piec obrotowy 36

VI. Wnioski 39

Literatura 41

Symbole 44

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 47

JÓZEF FOLWARCZNY

P. 3350/61

KONTROLA PROCESU WYPALANIA KLINKIERU CEMENTOWEGO

PRACA HABILITACYJNA

Data otwarcia przewodu habilitacyjnego 9. V. 1961 r.

GLIWICE 1961

POLITECHNIKA ... w Gliwicach

REDAKTOR ZESZYTÓW NAUKOWYCH
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Andrzej Grossman

PJ. 369/61

Oddano do wyk. 28. VII. 1961 r. N-12 Nakład 300+30 egz.
Arkuszy druku 3 14/16 Pap. offsetowy kl. V 61×86, 70 g. Zamówienie nr 983

Zakład Produkcji Pomocy Naukowych Politechniki Śląskiej w Gliwicach

ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Nr 47 Energetyka z.8

JÓZEF FOLWARCZNY

Katedra Teorii Maszyn Cieplnych

KONTROLA PROCESU WYPALANIA KLINKIERU CEMENTOWEGO

Streszczenie: W pracy tej autor wprowadza uogólnioną metodę kontroli procesu spalania opartą o analizę średniej próbki spalin. Istota tego uogólnienia polega na wprowadzeniu pojęcia maksymalnej zawartości CO_2 w spalinach suchych - K_{opt} procesu. Znana powszechnie wielkość charakterystyczna paliwa k_{max} (maksymalna zawartość CO_2 w spalinach suchych po spaleniu zupełnym i całkowitym przy stosunku nadmiaru powietrza $\lambda = 1$) jest szczególnym przypadkiem wprowadzonego tu pojęcia ogólnego. K_{opt} procesu może być większe lub mniejsze od k_{max}. Pierwszy przypadek zachodzi, jeżeli procesowi spalania towarzyszy proces rozkładu węglanów (piece cementownicze, wapienniki i inne). Drugi przypadek, to procesy, w których zachodzi spalanie niecałkowite (różne piece przemysłowe, szczególnie koksownie, w których proces odgazowania węgla jest przypadkiem spalania niecałkowitego).

W niektórych przypadkach, a do takich należy piec cementowniczy, wielkość K_{opt} pozwala obliczyć sprawność termiczną pieca. Autor opracował szczegółowo metodę kontroli procesu cementowniczego i przystosował ją do potrzeb eksploatacyjnych. Niniejsza metoda pozwala prowadzić kontrolę ruchową procesu cementowniczego na podstawie składu objętościowego spalin suchych, k_{max} paliwa i udziału kilogramowego g dwutlenku węgla w surowcu bezwodnym.

I. WSTĘP

Półproduktem w wytwarzaniu cementu jest klinkier wypalany w piecach cementowniczych z surowca mineralnego doprowadzonego do pieca w postaci mączki. Głównym składnikiem surowca są węglany. W piecu takim zachodzi szereg reakcji chemicznych, a wśród nich reakcja rozkładu węglanów. Proces chemiczny wytwarzania klinkieru jest procesem endotermicznym. Potrzebne ciepło doprowadza się przez spalanie w piecu paliwa. W procesie piecowym bezwodnik kwasu węglowego pochodzący z suroca miesza się z gazowymi produktami spalania. Zawartość CO_2 w spalinach charakteryzuje więc w rozważanym przypadku nie tylko spalanie paliwa, lecz także przebieg procesu technologicznego.

Ekonomiczna eksploatacja pieca cementowniczego nie jest możliwa bez kontrolowania procesu piecowego. Opracowanie odpowiedniej metody badawczej jest celem tej pracy. Metoda ta opiera się na analizach średnich próbek suchych produktów gazowych, na składzie elementarnym paliwa i na składzie chemicznym surowca. Do ruchowej kontroli procesu piecowego wystarczy znać skład spalin suchych, rodzaj używanego paliwa i udział kilogramowy CO_2 w surowcu bezwodnym.

Istnieje szereg publikacji poświęconych badaniom cieplnym pieców cementowniczych. W ostatnich latach pojawiło się kilka artykułów dotyczących wykorzystania analizy spalin do obliczenia jednostkowego zużycia ciepła. Brachthäuser K.[2] wyprowadził wzór na jednostkowe zużycie ciepła w piecu opalanym pyłem węglowym. Wzór ten nie uwzględnia spalania lotnego koksiku, który może występować w strumieniu spalin. W przypadku spalania całkowitego i zupełnego[1] wzór ten pozwala obliczyć chwilową wartość jednostkowego zużycia paliwa pod warunkiem, że układ pieca cementowniczego działa w stanie równowagi termicznej i masowej oraz pod warunkiem, że pobrana

1) Spalanie całkowite jest wtedy, gdy nie ma palnych części stałych w produktach spalania. W przypadku spalania zupełnego nie ma palnych gazów w produktach spalania.

próbka spalin określa średni w danej chwili skład spalin w kanale dymowym. Odpowiednikiem tego wzoru w niniejszej pracy jest równanie (20b) po założeniu, że popiół zawarty w paliwie nie powiększa masy wytwarzanego klinkieru. Eigen H. [3] , Linnhoff F. [7] wykorzystują skład spalin do wyznaczenia zużycia ciepła w szybowych piecach cementowniczych opalanych koksem.

Niniejsza metoda kontroli procesu spalania niezupełnego i niecałkowitego wykorzystuje średnią w czasie próbkę spalin i może być użyta tak do badań pieców obrotowych jak i szybowych przy użyciu jakiegokolwiek paliwa. Wyjątek stanowią piece cementownicze [9] stosujące wapno palone do wypalania klinkieru. Pobieranie próbki spalin w czasie kilku godzin pozwala na stosowanie tej metody w warunkach ruchowych, gdzie stan równowagi termicznej i masowej w ścisłym znaczeniu tych słów rzadko występuje.

W niejednym przypadku jednostkowe zużycie ciepła może być zmniejszone przez ograniczenie zbędnych strat cieplnych. Dlatego autor tej pracy przeprowadził pełną analizę procesu cieplnego pieca cementowniczego. Zamiarem autora było dostarczenie zainteresowanym użytkownikom prostego narzędzia do śledzenia sprawności i poszczególnych strat cieplnych pieców cementowniczych.

II. BILANSE MASOWE PIECA CEMENTOWNICZEGO

II.1. Maksymalna zawartość CO_2 w spalinach suchych

W procesie wypalania klinkieru cementowego dwutlenek węgla występujący w spalinach pochodzi ze spalania paliwa i z rozkładu węglanów występujących w mączce. Ilość paliwa spalanego w piecu oraz ilość mączki doprowadzanej do pieca pozostają do siebie w pewnym stosunku. Dla określonej wielkości tego stosunku można więc mówić o maksymalnej zawartości $[CO_2]$ w spalinach suchych, która wystąpiłaby przy spalaniu zupełnym i całkowitym i przy stosunku nadmiaru powietrza $\lambda = 1$. Charakterystyczna ta wielkość oznaczona w pracy symbolem K_{opt} zależy od wielkości k_{max} paliwa [8][2], zawartości węglanów w mączce i od stosunku ilości paliwa do ilości surowca.

Jeżeli znany jest skład spalin suchych, to maksymalną zawartość dwutlenku węgla (K procesu) oblicza się z równania:

$$K = \frac{[CO_2] + [CO] + [CH_4]}{100 + \frac{79}{21}\left(\frac{1}{2}[CO] + \frac{1}{2}[H_2] + 2[CH_4] - [O_2]\right) - [H_2] - [O_2]} 100 \qquad (1)$$

Zawartość $[CO_2]$ równą K otrzymuje się z rzeczywistej próbki spalin po założeniu, że zostały dopalone palne składniki gazowe i usunięto powietrze nadmiarowe. W szczególnym przypadku, gdy spaliny są produktem spalania całkowitego (nie ma w strumieniu spalin lotnego koksiku ani sadzy) z równania (1) otrzymuje się $K = K_{opt}$. Należy więc odróżnić K procesu od K_{opt} procesu.

2) Część II, str. 249.

II.2. Powietrze wnikające do układu przez nieszczelności

Nieszczelności kanałów dymowych, w których panuje podciśnienie, są przyczyną powiększania się ilości spalin na drodze przepływu. Skutkiem dopływu powietrza szkodliwego rośnie też zawartość tlenu i azotu w spalinach suchych. Po równoczesnym pobraniu średnich próbek spalin w miejscu a i b oraz po dokonaniu analizy tych próbek można na podstawie bilansu tlenu lub azotu wyliczyć ilość powietrza szkodliwego dopływającego do spalin na rozważanym odcinku ich drogi. Zgodnie z oznaczeniami na załączonym schemacie (rys.1) punkt a może być przyjęty w przekroju A lub B, zaś punkt b w przekroju B lub C.

Bilans tlenu przeprowadzony niżej dotyczy 100 kmoli spalin w miejscu a , przy czym spaliny przepływają w kierunku od a do b. Bilans ten dotyczy tych przypadków, gdzie w punkcie b nie ma innych palnych gazów prócz tlenku węgla.

$$[CO_2]_a + [O_2]_a + \frac{1}{2}[CO]_a - \frac{1}{2}[H_2]_a - [CH_4]_a + 0{,}21\,\Delta n_L = \frac{[CO_2]_b + \frac{1}{2}[CO]_b + [O_2]_b}{100}\,(n''_{ss})_b \qquad (2)$$

W równaniu tym $(n''_{ss})_b$ oznacza ilość spalin suchych w miejscu b

$$(n''_{ss})_b = 100 + \Delta n_L - 1{,}5[H_2]_a - 2[CH_4]_a - 0{,}5([CO]_a - \Delta[CO]_a) \qquad (3)$$

Występująca w powyższym równaniu wielkość $\Delta[CO]_a$ jest tą częścią $[CO]_a$, która na drodze a-b nie uległa spaleniu i która w rozrzedzonych spalinach w miejscu b decyduje o wielkości $[CO]_b$

$$[CO]_b = \frac{\Delta[CO]_a}{(n''_{ss})_b}\,100 \qquad (4)$$

Z równań (3) i (4) wyznacza się wielkość $\Delta[CO]_a$

$$\Delta[CO]_a = D[CO]_b + \frac{2[CO]_b \Delta n_L}{200 - [CO]_b} \qquad (5)$$

W równaniu tym występuje wielkość

$$D = \frac{200 - 3[H_2]_a - 4[CH_4]_a - [CO]_a}{200 - [CO]_b} \qquad (6)$$

Wyprowadzeniu symbolu D ułatwia dalsze przekształcenia. Rozwiązanie układu równań (2), (3) i (4) daje wzór

$$\Delta n_L = \frac{100([CO_2]_a + [O_2]_a + \frac{1}{2}[CO]_a - \frac{1}{2}[H_2]_a - [CH_4]_a)}{\frac{200}{200-[CO]_b}([CO_2]_b + [O_2]_b + \frac{1}{2}[CO]_b) - 21} +$$

$$- \frac{100 - 1{,}5[H_2]_a - 2[CH_4]_a - \frac{1}{2}[CO]_a + D\frac{1}{2}[CO]_b)([CO_2]_b + [O_2]_b + \frac{1}{2}[CO]_b)}{\frac{200}{200-[CO]_b}([CO_2]_b + [O_2]_b + \frac{1}{2}[CO]_b) - 21}$$

$$\frac{\text{kmol pow.}}{\text{100 kmol spalin w miejscu a}} \qquad (7)$$

Wielkość Δn_L można też wyznaczyć w sposób analogiczny z bilansu azotu.

$$\Delta n_L = \frac{[N_2]_b(100 - 1{,}5[H_2]_a - 2[CH_4]_a - \frac{1}{2}[CO]_a + D\frac{1}{2}[CO]_b) - 100[N_2]_a}{79 - [N_2]_b \frac{200}{200 - [CO]_b}} \qquad (8)$$

Oba wzory na Δn_L dają identyczne wyniki liczbowe.

II.3. Pierwiastek węgla Δn_C dopalany w strumieniu spalin

Przyjmuje się, że niespalony węgiel stały jest produktem doskonałego odgazowania paliwa w piecu, jest więc czystym pierwiastkiem węgla. W strumieniu spalin może

się też znajdować lotny popiół, co nie ma znaczenia dla prowadzonych rozważań.

Wielkość K obliczona z równania (1) maleje w miarę dopalania się stałego pierwiastka węgla w strumieniu spalin. Gdyby dopalania nie było (z powodu braku palnych części stałych w spalinach) wielkość ta byłaby niezmienną i oznaczałaby K_{opt} procesu.

Z definicji K wynika związek między wielkościami K_a i K_b w rozważanych przekrojach kanałów dymowych.

$$K_b = 100 \frac{K_a + \delta n_C}{100 + \delta n_C + \frac{79}{21} \delta n_C} \qquad (a)$$

Z równania tego widać, że graniczna wartość K_b, gdy $\delta n_C \to \infty$ wynosi 21%. Jest to po prostu k_{max} spalania pierwiastka węgla. Pomocnicza wielkość δn_C w równaniu (a) przedstawia ilość kilomoli pierwiastka węgla przypadającą na 100 kilomoli suchych i beztlenowych gazowych produktów spalania zupełnego.

Wielkość Δn_C jest związana z wielkością pomocniczą δn_C następującą zależnością:

$$\frac{\Delta n_C}{(n''_C)_a} = \frac{\delta n_C}{K_a} \qquad (b)$$

gdzie:

$(n''_C)_a = [CO_2]_a + [CO]_a + [CH_4]_a$ kmol C/100 kmoli spalin suchych.

Z równań (a) i (b) wylicza się szukaną wielkość Δn_C.

$$\Delta n_C = \frac{(n''_C)_a}{K_a} 21 \frac{K_a - K_b}{K_b - 21} \frac{\text{kmol niespal. pierw. C}}{\text{100 kmol spal. such. w miejscu a}} \qquad (9)$$

Wielkość tę można również wyznaczyć z bilansu pierwiastka węgla bez korzystania z wielkości K

$$\Delta n_C = \frac{([CO_2]_b + [CO]_b)(100 - 1{,}5[H_2] - 2[CH_4]_a - \frac{1}{2}[CO]_a + D\frac{1}{2}[CO]_b)}{100} +$$

$$+ \frac{2\Delta n_L}{200 - [CO]_b} - (n''_C)_a \qquad (9a)$$

Oba wzory dają identyczne wyniki liczbowe. Dogodniejszy jest jednak wzór (9)

II.4. Stosunek wzrostu ilości spalin spowodowany dopływem powietrza szkodliwego

Ilość spalin w miejscu b jest większa od ilości spalin w miejscu a . Wielkość stosunku

$$\xi_{a-b} = \frac{(n''_{ss})^*_b}{(n''_{ss})^*_a} = \frac{(n''_{ss})^*_b \Delta\tau}{(n''_{ss})^*_a \Delta\tau} \qquad (10)$$

zależy od Δn_L i od kontrakcji spowodowanej dopaleniem palnych części gazowych. W równaniu (10) czas $\Delta\tau$ można tak dobrać, aby w mianowniku ułamka było 100 kilomoli spalin suchych

$$(n''_{ss})^*_a \Delta\tau = 100 \qquad (c)$$

wtedy

$$(n''_{ss})^*_b \Delta\tau = 100 + \Delta n_L - \frac{1}{2}([CO]_a - \Delta[CO]_a) - 2[CH_4] +$$
$$- 1{,}5\,[H_2] \qquad (d)$$

Po zastosowaniu równań (5), (c), (d) w równaniu (10) otrzymuje się ostateczny wzór na stosunek wzorstu ilości spalin suchych

$$\xi_{a-b} = 1 + \frac{\Delta n_L}{100} \frac{200}{200 - [CO_b]} + D\frac{1}{2}[CO]_b + \\ - \frac{3[H_2]_a - 4[CH_4]_a + [CO]_a}{200} \qquad (10a)$$

Na podstawie ilości spalin w miejscu a stosunek ξ pozwala obliczyć ilość spalin w miejscu b

$$(n''_{ss})^{*}_{b} = \xi_{a-b}(n''_{ss})^{*}_{a} \qquad (10b)$$

II.5. Udział objętościowy $[CO_2]_s$ dwutlenku węgla w spalinach suchych spowodowany rozkładem węglanów w piecu

W spalinach suchych występuje $[CO_2]$ % dwutlenku węgla, z czego część pochodzi ze spalania paliwa, a reszta z rozkładu węglanów występujących w surowcu

$$[CO_2] = [CO_2]_p + [CO_2]_s$$

W równaniu tym indeksy p (paliwo) i s (surowiec) wskazują na pochodzenie dwutlenku węgla.

Jeżeli rozważałoby się odrębnie spalanie niecałkowite paliwa, to suche produkty spalania zupełnego charakteryzowałyby się liczbą k . Liczby tej nie należy mylić z liczbą k_{max}, która dotyczy spalania całkowitego i zupełnego ($k < k_{max}$).

Wielkość charakterystyczną K procesu piecowego można wyrazić za pomocą wielkości k w następujący sposób:

$$K = \frac{k + \delta}{100 + \delta} 100$$

Wielkość pomocnicza δ oznacza tę ilość kilomoli dwutlenku węgla pochodzenia surowcowego, którą należałoby dodać do 100 kilomoli suchych i beztlenowych produktów spalania zupełnego i niecałkowitego, aby w powstałej mieszaninie było K % CO_2. Między pomocniczą wielkością S i szukaną wielkością $[CO_2]_s$ zachodzi związek

$$\frac{\delta}{k+\delta} = \frac{[CO_2]_s}{[CO_2]+[CO]+[CH]_4} = \frac{[CO]_s}{n''_C}$$

Po skoajarzeniu ostatnich dwóch równań można wyrazić poszukiwaną wielkość $[CO_2]_s$ bez posługiwania się pomocniczą wielkością δ

$$[CO_2]_s = \frac{100\ (K - k)}{(100 - k)\ K}\ n''_C \qquad (11)$$

Równanie (11) nie może być użyte do obliczenia wielkości $[CO_2]_s$ przed sprecyzowaniem wielkości k, która dotyczy paliwa spalanego niecałkowicie.

Wielkość k_{max} paliwa można wyliczyć na podstawie składu elementarnego paliwa lub też na podstawie składu objętościowego gazowych produktów spalania całkowitego. W tym drugim przypadku otrzyma się wielkość k_{max} większą niż w przypadku pierwszym, jeżeli w skład paliwa wchodzi siarka. Dwutlenek siarki występujący w produktach spalania zostaje bowiem zaabsorbowany w aparacie Orsata razem z dwutlenkiem węgla. Obie drogi obliczania k_{max} można uzgodnić przez wprowadzenie ekwiwalentnego udziału kilogramowego pierwiastka węgla w paliwie

$$c_e = c + \frac{12}{32} s$$

Charakterystyczną wielkość k % oblicza się analogicznie jak k_{max} [8][3] z tym, że uwzględnia się niecałkowite spalanie pierwiastka węgla (indeks nc). Przyjmuje się, że pierwiastek siarki spala się całkowicie.

$$k = \frac{(1-x)(n'_C)_e}{\frac{79}{21}(n_{s\ min})_{nc} + n'_{N_2} + (1-x)(n'_C)_e} \cdot 100 \qquad (12)$$

W równaniu tym oznaczają:

$(n'_C)_e \cdot (1-x) = (n'_C)_{e\ nc} = \frac{c_e}{12}(1-x)$ kmol/kg - ekwiwalentną ilość kilomoli spalonego pierwiastka węgla,

$x = \frac{(n'_C)_e - (n'_C)_{e\ nc}}{(n'_C)_e}$ stopień niecałkowitego spalania,

$(n_{s\ min})_{nc}$ kmol/kg - minimalne zapotrzebowanie tlenu do spalania niecałkowitego,

$n'_{N_2} = \frac{n}{28}$ kmol/kg - azot doprowadzany z paliwem

$$(n_{s\ min})_{nc} = (1-x)\frac{c_e}{12} + \frac{h}{4} - \frac{o}{32} \quad \frac{\text{kmol } O_2}{\text{kg}}$$

Składniki elementarne paliw stałych i ciekłych zwykło się oznaczać literami: c, h, s, o, n, p, w (pierwiastek węgla, wodór, siarka, tlen, azot, popiół, wilgoć). Oznaczenia te zostały również użyte w niniejszej pracy.

Po uwzględnieniu wyżej podanych wielkości w równaniu (12) wielkość k można wyrazić wzorem

$$k = \frac{100}{\frac{100}{21} + \frac{E}{1-x}} \qquad (12a)$$

[3] Cz.II, str. 249.

w którym zastosowano skrót

$$E = \frac{79\,(8h - o) + 24\,n}{56\,c_e} \tag{13}$$

Po podstawieniu $x = 0$ w równaniu (12a) otrzymuje się k_{max} %

$$k_{max} = \frac{100}{\frac{100}{21} + E} \tag{12b}$$

stąd

$$E = \frac{100}{k_{max}} - \frac{100}{21} \tag{13a}$$

Stosunek x niecałkowitego spalania można też otrzymać dzieląc ilość kilomoli pierwiastka węgla, który nie uległ spaleniu przez całkowitą ilość kilomoli pierwiastka węgla doprowadzanego w paliwie do pieca. Stosunek ten określa równanie

$$x = \frac{\Delta n_C}{n''_C - [CO_2]_s + \Delta n_C} \tag{14}$$

Po wprowadzeniu równań (12a) i (14) do równania (11) otrzymuje się zależność

$$[CO_2]_s\, K\, (\frac{79}{21} + E)(n''_C - [CO_2]_s) = K\, E\, \Delta n_C\, (n''_C - [CO_2]_s) +$$

$$+ n''_C \left\{ K\, (\frac{100}{21} + E) - 100 \right\} (n''_C - [CO_2]_s)$$

która wiąże szukaną wielkość $[CO_2]_s$ z wielkościami wyznaczonymi już poprzednio. Równanie powyższe jest równaniem kwadratowym, ma zatem dwa rozwiązania. Jednym z rozwiązań jest $[CO_2]_s = n''_C$. W piecu opalanym paliwem, w którego skład wchodzi pierwiastek węgla, równość taka zaistnieć nie może. Szukać należy więc drugiego rozwiązania. Jeżeli zatem $[CO_2]_s \neq n''_C$ powyższe równanie upraszcza się i pozwala wyznaczyć poszukiwany udział objętościowy dwutlenku węgla pochodzenia surowcowego

$$[CO_2]_s = \frac{\left[\left(\frac{100}{21} + E\right) K - 100\right] n''_C + K E \Delta n_C}{\left(\frac{79}{21} + E\right) K} \qquad (15)$$

Równanie to daje wyniki za małe, jeżeli dopalanie lotnego koksiku nie zostało zakończone w odcinku drogi spalin, na którym wyznaczono Δn_C. Po uwzględnieniu zależności (13a) równanie (15) przyjmuje postać

$$[CO_2]_s = \frac{21\, n''_C\, (K - k_{max}) + \Delta n_C\, K\, (21 - k_{max})}{21\, K\, (100 - k_{max})} \cdot 100 \qquad (15a)$$

Równanie (15a) może być też wykorzystane w badaniach procesu spalania w piecach przemysłowych, w których $[CO_2]_s = 0$. Wówczas w przypadkach spalania niecałkowitego $K = k$ i za pomocą równania (15a) można wyliczyć ilość kilomoli pierwiastka węgla unoszonego w strumieniu spalin w lotnym koksiku

$$\Delta n_C = \frac{21\, n''_C\, (k_{max} - k)}{k\, (21 - k_{max})} \qquad (A)$$

Wielkość k oblicza się z równania (1) na podstawie analizy średniej próbki spalin w badanym miejscu kanałów dymowych.

Ostatni wzór może być też użyty przy badaniach procesu koksowniczego, gdyż proces ten można uważać za szczególny przypadek spalania niezupełnego i niecałkowitego.

II.6. Stosunek λ nadmiaru powietrza w procesie spalania

Z każdego kilograma paliwa doprowadzanego do pieca powstaje $(n''_{ss})_p$ kilomoli spalin suchych

$$(n''_{ss})_p = \frac{100\,(1 - x)\,\frac{c_e}{12}}{\{CO_2\}_p + \{CO\}_p + \{CH_4\}_p} \qquad (16)$$

Wielkości $\{i\}_p$ oznaczają ilości kilomoli danego składnika w 100 kilomolach spalin suchych powstałych przy niecałkowitym spalaniu samego paliwa. Liczbowe wartości tych wielkości są równe udziałom objętościowym składników wyrażonym w procentach. Nawiasy podwójne zostały użyte dla odróżnienia udziałów objętościowych w suchych spalinach powstałych z paliwa od udziałów objętościowych stwierdzonych aparatem Orsata.

W suchych produktach gazowych niecałkowitego spalania paliwa udział dwutlenku węgla wynosi

$$\{CO_2\}_p = \frac{[CO_2] - [CO_2]_s}{100 - [CO_2]_s} \qquad (e)$$

Pozostałe udziały objętościowe oblicza się ze wzoru

$$\{i\}_p = \frac{[i]}{100 - [CO_2]_s} \qquad (f)$$

wstawiając w miejsce i odpowiednie składniki spalin suchych.

Stosunek λ nadmiaru powietrza otrzymuje się dzieląc ilość doprowadzanego powietrza n'_L przez minimalne zapotrzebowanie powietrza $n'_{L\,min}$. Ilość powietrza doprowadzanego wyznaczyć można z bilansu pierwiastka azotu

$$\frac{n}{28} + 0{,}79\, n'_L = \frac{1}{100} \left\{N_2\right\}_p (n''_{ss})_p$$

stąd

$$n'_L = \frac{\left\{N_2\right\}_p (n''_{ss})_p - \frac{100}{28} n}{79} \qquad (17)$$

Mininalne zapotrzebowanie powietrza oblicza się na podstawie równań stechiometrycznych palnych pierwiastków i składu elementarnego paliwa.

$$n'_{L\,min} = \frac{1}{0{,}21} \left(\frac{c_e}{12} + \frac{h}{4} - \frac{o}{32}\right) \qquad (18)$$

Dzieląc stronami równanie (17) przez (18) otrzymuje się szukany stosunek nadmiaru powietrza

$$\lambda = \frac{\frac{1}{100}\left\{N_2\right\}_p (n''_{ss})_p - \frac{n}{28}}{\frac{79}{21}\left(\frac{ce}{12} + \frac{h}{4} - \frac{o}{32}\right)} \qquad (19)$$

W równaniu tym występuje ilość $(n''_{ss})_p$ spalin suchych powstała po niecałkowitym spaleniu jednego kilograma paliwa. Z równania (16) wynika, że wielkość $(n''_{ss})_p$ jest funkcją stosunku niecałkowitego spalania x. Widać stąd, że chcąc określić stosunek λ w miejscu a trzeba pobrać średnie próbki spalin w miejscach a i b dla wyznaczenia stosunku niecałkowitego spalania x za pomocą równań (9), (14), (15). Miejsce poboru b próbki spalin powinno być obrane tam, gdzie już nie ma palnych części stałych w spalinach. Jeżeli do równania (19) wprowadzi się równania (9), (13), (13a), (14), (15),

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

(16), (e) i (f) oraz oznaczenie pomocnicze $\nu = (\frac{n}{28} \cdot \frac{12}{c_e})$, to wzór na stosunek λ przyjmie następującą postać

$$\lambda_a = \frac{\frac{[N_2]_a K_a(K_b - 21)(100 - k_{max})}{n''_{Ca}(K_a - 21)(100 - K_b)} - \nu}{100 - (1 + \nu) k_{max}} \tag{19a}$$

Wielkość ν oznacza stosunek ilości kilomoli azotu zawartego w paliwie do ekwiwalentnej ilości kilomoli pierwiastka węgla. Przy zawartości azotu w paliwie rzędu $n = 0{,}01$ wielkość ν można skreślić w równaniu (19a), gdyż ma ona znikomy wpływ na stosunek nadmiaru powietrza λ. W takim przypadku ostani wzór upraszcza się do postaci

$$\lambda_a = \frac{[N_2]_a K_a(K_b - 21)}{n''_{Ca}(K_a - 21)(100 - K_b)} \tag{19b}$$

Z pełną ścisłością wzór ten jest słuszny dla $\nu = 0$.

Jeżeli przez przekrój a przepływają produkty spalania całkowitego, to $K_a = K_b = K_{opt}$. Wtedy stosunek nadmiaru powietrza określa się po ustaleniu składu spalin tylko w badanym przekroju kanałów dymowych. Stosunek nadmiaru powietrza dla przypadku spalania całkowitego oblicza się więc za pomocą równania

$$\lambda = \frac{[N_2] K_{opt}}{n''_C (100 - K_{opt})} \tag{19c}$$

Najmniejsza wartość stosunku λ występuje w piecu samym, a następnie stosunek ten rośnie w miarę dopływu powietrza szkodliwego.

II.7. Zużycie paliwa w piecu cementowniczym

Zużycie paliwa w piecu można scharakteryzować wskaźnikiem z, który jest ilorazem ilości paliwa m_p^* kg/h i ilości produkowanego klinkieru m_{kl}^* kg/h

$$z = \frac{m_p^*}{m_{kl}^*} \tag{20}$$

Obliczenie tego wskaźnika opiera się na wynikach pomiarowych. Przyjmuje się przy tym, że powstały klinkier jest produktem wyprażania pewnej ilości m^* surowca (mączki bezwodnej) i części popiołu doprowadzanego z paliwem. Przyjmuje się, że $y(m_p^* p)$ popiołu zawartego w paliwie wchodzi do klinkieru, a $(1 - y)(m_p^* p)$ uchodzi w strumieniu spalin wraz z lotnym koksikiem. Przy tym założeniu

$$m_{kl}^* = m_{klm}^* + y\, p\, m_p^*$$

Klinkier oznaczony indeksem m powstał po wyprażeniu m_m^* kg/h suroca bezwodnego

$$m_{klm}^* = m_m^* (1 - g)$$

Symbolem g oznaczono udział kilogramowy CO_2 w mączce bezwodnej. Z powyższego równania można określić ilość mączki, która uległa wyprażeniu:

$$m_m^* = \frac{m_{klm}^*}{1 - g}$$

Ilość kilomoli CO_2, jaka powstaje skutkiem prażenia surowca otrzymuje się po podzieleniu ilości kilogramów tego związku przez jego masę drobinową

$$(n_{CO_2})^{*}_{s} = (m^{*}_{kl} - y\,p\,m^{*}_{p})\,\frac{g}{(1-g)}\,\frac{1}{44} \qquad (21)$$

W równaniu (21) uwzględniono poprzednio podane zależności.

Ilość kilomoli dwutlenku węgla pochodzenia surowcowego można też określić za pomocą ilości spalin suchych opuszczających układ pieca

$$(n_{CO_2})^{*}_{s} = (n''_{ss})^{*}\,\frac{[CO_2]_s}{100} \qquad (g)$$

Ilość spalin suchych występującą w tym równaniu można określić z bilansu pierwiastka węgla

$$(n''_{ss})^{*} = \frac{(n_{CO_2})^{*}_{s} + \frac{c_e}{12}\,m^{*}_{p}}{n''_C + \Delta n_C}\,100 \qquad (h)$$

Porównując prawe strony równań (21) i (g) otrzymuje się inny wzór do obliczenia ilości spalin suchych

$$(n''_{ss})^{*} = (n^{*}_{kl} - y\,p\,m^{*}_{p})\,\frac{g}{(1-g)}\,\frac{100}{44\,[CO_2]_s} \qquad (22)$$

Równanie (20) po zastosowaniu równań (21), (g) i (h) sprowadza się do postaci

$$z = \frac{1}{y\,p + \frac{c_e}{12}\,44\,\frac{1-g}{g}\,\frac{[CO_2]_s}{n''_C + \Delta n_C - [CO_2]_s}} \qquad (20a)$$

Równanie to pozwala wyliczyć wielkość wskaźnika z zużycia paliwa na kilogram klinkieru. Po wprowadzeniu do powyższej zależności równań (9) i (15) oraz uwzględnieniu, że $K_p = K_{opt}$ otrzymuje się inną postać wyrażenia na wskaźnik zużycia paliwa

$$z = \frac{1}{y\,p + \frac{11}{3}\,c_e\,\frac{1-g}{g}\,\frac{(K_{opt} - k_{max})100}{(100 - K_{opt})\,k_{max}}} \qquad (20b)$$

Z równania powyższego można korzystać wtedy, gdy pobrana średnia próbka spalin dotyczy spalania całkowitego.

Jeżeli znana jest ilość produkowanego klinkieru m^{x}_{kl} kg/h to po ustaleniu wskaźnika z łatwo można określić ilość zużywanego paliwa

$$m^{x}_{p} = z\ m^{x}_{kl} \qquad (20c)$$

Ustalenie ilości klinkieru m^{x}_{kl} metodą ważenia nie nastręcza większych trudności w przypadku ustalonych warunków działania pieca cementowniczego. W czasie eksploatacji warunki te ulegają pewnym wahaniom, które mogą zostać zniwelowane przez odpowiednie wydłużenie czasu trwania pomiaru.

III. BILANS ENERGETYCZNY PIECA CEMENTOWNICZEGO

Rysunek 2 przedstawia schemat bilansowy układu pieca cementowniczego z zaznaczeniem poszczególnych ilości energii przypadających na 1 kg paliwa. Energię chemiczną paliwa wyrażono za pomocą wartości opałowej W_d kcal/kg. Nadwyżkę entalpii bezwzględnej 1 kilograma klinkieru i innych produktów rozkładu surowca suchego (wody krystalizacyjnej i CO_2) nad entalpią bezwzględną tej ilości mączki suchej, jaka jest potrzebna do uzyskania 1 kg klinkieru, oznaczono symbolem $q_{ch\ kl}$. Przez mączkę suchą rozumieć należy surowiec nie pozbawiony wody krystalizacyjnej. Tak wartość opałowa W_d jak i ciepło reakcji chemicznej $q_{ch\ kl}$ dotyczą temperatury normalnej (około 20°C) i ciśnienia normalnego. W obu przypadkach woda występująca w produktach reakcji znajduje się w fazie gazowej.

Wartość opałowa W_d wyznaczana kalorymetrycznie jest związana ze składem elementarnym paliwa. Jeżeli wartość opałową wyrazi się za pomocą formuły Dulong a, to można dojść do związku między wartością opałową i charakterystyczną wielkością paliwa k_{max}

$$W_d = 8100\ c + 29000\ (h - \frac{o}{8}) + 2500\ s - 600\ w$$

Po wprowadzeniu do tego równania ekwiwalentnego udziału kilogramowego węgla w paliwie $c_e = c + \frac{12}{32} s$ i po zastosowaniu równań (13) i (13a), wartość opałową można określić wzorem:

$$W_d = c_e \frac{257000 - 4140\ k_{max}}{k_{max}} - [537\ s + 918\ n + 600\ w] \tag{23}$$

Wielkość w nawiasie dla paliw używanych w cementownictwie stanowi około 0,5% wartości opałowej. Nie popełni się zatem dużego błędu jeżeli, przy określaniu wartości opałowej za pomocą k_{max} i c_e, pominie się wpływ siarki azotu i wilgoci.

$$W_d = c_e \frac{257000 - 4140\, k_{max}}{k_{max}} \qquad (23a)$$

W konkretnym przypadku, gdy znana jest analiza elementarna paliwa i wartość opałowa, wzór (23a) można skorygować tak, aby podawał ścisłą wielkość wartości opałowej. Zabieg taki jest konieczny przy paliwach ciekłych, gdzie użyta wyżej formuła Dulong'a niezbyt dokładnie określa wartość opałową.

Nadwyżka energii chemicznej klinkieru nad energią chemiczną mączki suchej wymaga również bliższego omówienia.

H. zur Strassen [10] podaje wzór, który pozwala obliczyć tę wielkość w oparciu o dokładne analizy chemiczne substratów i produktów procesu cementowniczego. Stosowanie tego wzoru w niniejszej metodzie kontroli procesu spalania nie jest dogodne. Badania zur Strassen'a będą tu wykorzystane do przybliżonego określenia wielkości $q_{ch\,kl}$.

Podstawową reakcją endotermiczną w procesie cementowniczym jest reakcja dysocjacji węglanu wapnia. Ciepło dysocjacji węglanu wapnia (wzięte z pracy [10]) wynosi 422 kcal/kg $CaCO_3$. W piecu wapienniczym odpowiednikiem $q_{ch\,kl}$ jest ciepło $q_{ch\,wp}$ kcal/ kg wapna palonego. Wielkość ta zależy od składu surowca doprowadzanego do wapiennika. Po założeniu, że surowiec ten jest mieszaniną mechaniczną chemicznie czystego węglanu wapnia i chemicznie obojętnych minerałów, wielkość $q_{ch\,wp}$ określa wzór:

$$q_{ch\,wp} = \frac{422}{0{,}44} \cdot \frac{g}{1-g} = 959\,\frac{g}{1-g}\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg wapna pal.}} \qquad (24)$$

Wielkość g, jak i poprzednio, oznacza udział kilogramowy CO_2 w surowcu bezwodnym. Teoretycznie udział ten może się zmieniać w granicach od zera, gdy nie ma węglanu wapnia w surowcu do 0,44, gdy surowcem jest chemicznie czysty węglan wapnia.

Proces cementowniczy tym się różni od omówionego procesu wytwarzania wapna palonego, że po endotermicznej reakcji rozkładu węglanów następują egzotermiczne reakcje powstawania minerałów klinkieru. Składniki mineralne towarzyszące węglanowi wapnia w surowcu nie są więc chemicznie obojętne.
Dlatego ciepło $q_{ch\ kl}$ jest mniejsze od $q_{ch\ wp}$ przy tej samej zawartości dwutlenku węgla w surowcu bezwodnym Podobnie jak $q_{ch\ wp}$ również nadwyżka energii chemicznej $q_{ch\ kl}$ zależy od udziału kilogramowego g. O zależności tej wiadomo, że w skrajnym przypadku, gdy $g = 0,44$, wielkość $q_{ch\ kl}$ osiągnęłaby wartość największą. Zamiast klinkieru otrzymałoby się w tym przypadku czyte wapno palone CaO, zatem

$$q_{ch\ kl} = 753,5 \quad \text{przy} \quad g = 0,44$$

Średnie wartości wzięte z trzech pomiarów podanych w pracy [10] wynoszą:

$$q_{ch\ kl} = 422 \quad \text{dla} \quad g = 0,342$$

W ten sposób w układzie $q_{ch\ kl}$, g zostały określone dwa punkty, przez które przechodzi poszukiwana zależność $q_{ch\ kl} = f(g)$. Zakłada się, że zależność ta wiąże się z równaniem (24) w następujący sposób:

$$q_{ch\ kl} = 959 \frac{g}{1 - g} (a\,g + b) \qquad (25)$$

Podane wyżej wartości szczególne pozwalają wyznaczyć z równania (25) wielkości pomocnicze

$$a = 1,566$$
$$b = 0,311$$

Po wprowadzeniu tych wielkości do równania (25) otrzymuje się wzór

$$q_{ch\ kl} = 959 \frac{g}{1-g} (1{,}566\ g + 0{,}311) \qquad (25a)$$

określający przybliżoną wartość ciepła reakcji chemicznej powstawania klinkieru z mączki suchej. Wzór ten dotyczy tylko wartości g wziętych z wąskiego przedziału $(0{,}342 - \Delta g) \leqslant g \leqslant (0{,}342 + \Delta g)$. Na rysunku 3 na podstawie równań (24) i (25) przedstawiono graficznie ciepła reakcji chemicznej $q_{ch\ wp}$ i $q_{ch\ kl}$.

Stosując oznaczenie podane na rysunku 2 bilans cieplny pieca znajdującego się w stanie równowagi termicznej wyraża wzór

$$W_d + q_1 = (\frac{1}{z} - yp)\ q_{ch\ kl} + q_r + q_w + g_k + q_o \qquad (26)$$

Substraty dopływają do pieca po przejściu wstępnych procesów technologicznych i posiadają temperaturę wyższą od temperatury otoczenia. Nadwyżka entalpii substratów nad temperaturą otoczenia wynosi q_1 kcal/kg paliwa i łącznie z wartością opałową paliwa stanowi energię doprowadzaną do układu pieca

$$q_1 = c_p\ (t_p - t_o) + n'_L (Mc_p)_L (t_L - t_o) +$$

$$+ \alpha \frac{1 - z\ y\ p}{z\ (1-g_ż)} (c_m + \frac{w_m}{1-w_m})(t_m - t_o) \qquad (i)$$

Wielkość $g_ż$ oznacza tzw. stratę żarzenia. Wielkość ta jest nieco większa od udziału kilogramowego g, gdyż obejmuje wodę krystalizacyjną obecną w mące suchej. Strata żarzenia jest parametrem charakteryzującym jakość surowca i dlatego wyznaczanie $g_ż$ należy do codziennych obowiązków personelu kontrolującego przebieg procesu technologicznego w cementowni.

W równaniu (i) przy ilości surowca zużywanego na 1 kg klinkieru zastosowano mnożnik $\alpha > 1$, który jest stosunkiem nadmiaru mączki uwzględniającym stratę mączki surowej w strumieniu spalin. Zawartość wilgoci w surowcu wynosi w_m kg H_2O na kg mączki wilgotnej.

W równaniu (26) przyjęto, że omówione wyżej zapotrzebowanie ciepła $q_{ch\,kl}$ dotyczy tylko tej części klinkieru, która powstała z surowca. Jednostkowe ciepło $q_{ch\,kl}$ i ilość powstałego klinkieru określają wielkość ciepła wykorzystanego użytecznie w piecu

$$q_u = \left(\frac{1}{z} - y\,p\right) q_{ch\,kl} \qquad (k)$$

Kolejną wielkością po prawej stronie równania bilansu cieplnego jest utajone ciepło parowania wilgoci wnoszonej do układu z surowcem

$$q_r = 586\,\alpha\,\frac{1 - z\,y\,p}{z(1 - g_ż)}\,\frac{w_m}{1-w_m} \qquad (l)$$

Strata ciepła wylotowa jest sumą straty wyraźnej i utajonej.

$$q_w = (n''_s)_p (Mc_p)''_p\,(t''-to) + \frac{1 - zyp}{z\,(1-g_ż)}\left[\alpha\frac{w_m}{1-w_m}\,c_{p_{H_2O}} + g_ż c_{p\,CO_2} + \right.$$

$$\left. +(\alpha - 1)c_m\right](t'' - t_a) + (1-y)pc_ż(t''-to) + \left[(n''_{ss})_p (MW_d)''_p + \right.$$

$$\left. + x\,c\,8100\right] \qquad (m)$$

Ostatni człon równania (m) przedstawia stratę wylotową utajoną spowodowaną obecnością palnych gazów i lotnego koksiku w strumieniu spalin. W równaniu tym stratę wyraźną dwutlenku węgla pochodzenia surowcowego uwzględniono z pewnym nadmiarem mnożąc ciepło właściwe $c_{p\,CO_2}$ przez stratę żarzenia $g_ż$ (należało pomnożyć przez odpowiedni udział kilogramowy dwutlenku węgla w mączce

suchej). Nie uwzględniono natomiast straty wyraźnej związanej z występującą w spalinach parą wody krystalizacyjnej. Można przyjąć, że obie te nieścisłości wzajemnie się kompensują.

Wielkość q_{kl} oznacza ciepło zaakumulowane w klinkierze dzięki temu, że temperatura klinkieru opuszczającego piec cemnetowniczy jest wyższa od temperatury otoczenia

$$q_{kl} = \frac{1}{z} c_{kl}(t_{kl} - t_o) \qquad (n)$$

Ciepło q_o stanowi stratę ciepła na rzecz otoczenia. Wielkość ta może być obliczona, jeżeli znane są pozostałe wielkości w równaniu (26).

Indeksy p, L, m, kl, ż , zostały użyte przy ciepłach właściwych paliwa, powietrza, surowca (mączki), klinkieru i popiołu. Wszystkie ciepła właściwe występujące w powyższych równaniach rozumieć należy jako średnie wartości w danym zakresie temperatur.

Wielkość strat cieplnych można zmniejszyć przez zastosowanie regeneracji ciepła. W takim przypadku ciepło odpadkowe zostaje częściowo wykorzystane do podgrzania substratów (linie przerywane na rysunku 2).

Dzieląc stronami równanie (26) przez $(W_d + q_1)$ otrzymuje się

$$1 = \eta + \varepsilon_r + \varepsilon_w + \varepsilon_{kl} + \varepsilon_o \qquad (26a)$$

W równaniu tym użyto następujących oznaczeń:

$\eta = \dfrac{(\frac{1}{z} - y\,p)q_{ch\,kl}}{W_d + q_1}$ - sprawność termiczna pieca,

$\varepsilon_r = \dfrac{q_r}{W_d + q_1}$ - względna strata ciepła spowodowana odparowaniem wilgoci towarzyszącej surowcowi suchemu,

$$\varepsilon_w = \frac{q_w}{W_d + q_1}$$ - względna strata wylotowa (wyraźna i utajona),

$$\varepsilon_{kl} = \frac{q_k}{W_d + q_1}$$ - względna strata ciepła spowodowana wyższą od otoczenia temperaturą klinkieru,

$$\varepsilon_o = \frac{q_o}{W_d + q_1}$$ - względna strata ciepła na rzecz otoczenia.

Równanie (26) bilansu energetycznego można przekształcić do postaci

$$z = \frac{1}{y\,p + \dfrac{W_d + q_1 - (q_r + q_w + q_{kl} + q_o)}{q\,ch\,kl}} \qquad (26b)$$

Równanie to ma analogiczną budowę jak równanie (20b), które wyraża tę samą wielkość z . Przez skojarzenie równania (20b) z równaniem (26b) dochodzi się do związku między K_{opt} i wielkościami cieplnymi

$$K_{opt} = \frac{\left[\eta - \frac{11}{3}\,c_e\,\frac{1-g}{g}\cdot\frac{q\,ch\,kl}{W_d}\;\frac{Wd}{W_d + q_1}\right]100}{\eta + \frac{11}{3}\,c_e\,\frac{1-g}{g}\cdot\frac{q\,ch\,kl}{W_d}\;\frac{Wd}{W_d + q_1}\;\frac{100}{k_{max}}} \qquad (27)$$

Z równania tego widać, że K_{opt} jest wielkością charakteryzującą proces piecowy również pod względem cieplnym. Liczbowa wartość K_{opt} zależy wyraźnie od sprawności względnie od sumy strat cieplnych pieca. W najgorszym przypadku, jaki można sobie wyobrazić tj. przy sprawności $\eta = 0$, K_{opt} przyjmie wartość najmniejszą

$$K_{opt\,min} = k_{max}$$

Drugi skrajny przypadek stanowi piec doskonały, którego sprawność jest równa jedności. Przy takim założeniu z równania (27) otrzymuje się największą wartość wielkości K_{opt}

$$K_{opt\ max} = \frac{\left[1 + \frac{11}{3} c_e \frac{1-g}{g} \frac{q_{ch\ kl}}{W_d} \frac{W_d}{W_d + q_1}\right] 100}{1 + \frac{11}{3} c_e \frac{1-g}{g} \frac{q_{ch\ kl}}{W_d} \frac{W_d}{W_d + q_1} \frac{100}{k_{max}}} \qquad (28)$$

Ze wzrostem sprawności pieca rośnie więc optymalna zawartość dwutlenku węgla w spalinach suchych od k_{max} do $K_{opt\ max}$.

Z równania (26b) widać, że wskaźnik zużycia paliwa jest również funkcją sumy strat cieplnych. Mnożąc wskaźnik z przez ciepło $(W_d + q_1)$ doprowadzane do układu pieca otrzymuje się jednostkowe zużycie energii

$$q = z\,(W_d + q_1) \quad \text{kcal/kg klinkieru} \qquad (29)$$

Po skojarzeniu równania (29) z równaniem (29b) zużycie energii można określić wzorem

$$q = \frac{q_{ch\ kl}}{\eta + y\,p\,\frac{q_{ch\ kl}}{W_d + q_1}} \qquad (30)$$

Przy niewielkich zawartościach popiołu w paliwie i przy sprawnościach pieca $\eta \geq 0{,}5$ można zaniedbać wpływ popiołu w obliczeniach zużycia ciepła q.

IV. KONTROLA PROCESU PIECOWEGO W WARUNKACH EKSPLOATACYJNYCH

Wyprowadzone w porzednich rozdziałach wzory są przeznaczone do przeprowadzania badań cieplnych pieców cementowniczych. Wzory te można wykorzystać też dla umożliwienia łatwej kontroli procesu piecowego w warunkach ruchowych.

Przez wprowadzenie równań (23a) i (25a) do równania (27) otrzymuje się wzór

$$K_{opt} = \frac{100\eta + \dfrac{(503{,}5\ g + 100)\ k_{max}}{235 - 3{,}784\ k_{max}} \dfrac{W_d}{W_d + q_1}}{\eta + \dfrac{503{,}5\ g + 100}{235 - 3{,}784\ k_{max}} \dfrac{W_d}{W_d + q_1}} \qquad (31)$$

z którego widać, że przy danym g i stosunku $W_d/(W_d+q_1)$ K_{opt} zależy tylko od sprawności pieca i od rodzaju paliwa, tj. od k_{max}.

Na rysunku 4 przedstawiono zależność K_{opt} od sprawności η pieca, dla określonego rodzaju paliwa i surowca. Krzywe I, II, III, i IV dotyczą tego samego surowca dla którego $g = 0{,}3412$ i czterech różnych paliw od $k_{max} = 21\%$ do $k_{max} = 18\ \%$. Zgodnie z równaniem (25a) dla przyjętej wartości g ciepło reakcji chemicznej $q_{ch\ kl} = 420$ kcal/kg. Krzywa V na rysunku 4 dotyczy zależności jednostkowego zużycia energii q od sprawności (równanie (30)) dla tej samej wartości $q_{ch\ kl} = 420$ kcal/kg.

Linie VI i VII przedstawiają jednostkowe zużycie energii q dla mniejszych wartości ciepła reakcji chemicznej (400 i 380 kcal/kg klinkieru). Przy sporządzaniu rysunku 4 przyjęto, że stosunek $q_1/W_d = 0{,}01$. Przy wyznaczaniu zużycia energii q przyjęto nadto, że $\left(y\ p\ \dfrac{q_{ch\ kl}}{W_d + q_1}\right) \approx 0{,}008$.

Rysunek 4 może być użyty do ruchowej kontroli sprawności i zużycia ciepła tych pieców cementowniczych (opalanych paliwem o k_{max} od 18 do 21 %), w których proces technologiczny wypalania klinkieru charakteryzuje się ciepłem reakcji $q_{ch\ kl} = 420$ kcal/kg i które spełniają również pozostałe założenia podane wyżej. Korzystając z omawianego wykresu dla pieców o innych danych charakterystycznych procesu otrzyma się sprawność pozorną, która różni się od rzeczywistej sprawności η. Odczytaną z wykresu sprawność pozorną można skorygować przez zastosowanie odpowiednich poprawek i uzyskać w ten sposób rzeczywistą sprawność η pieca obarczoną tylko nieuniknionym błędem pomiarowym.

Rozwiązując równanie (31) względem sprawności η otrzymuje się wzór

$$\eta_{II} = \frac{(K_{opt\ II} - k_{max\ II})(503{,}5\ g_{II} + 100)}{(100 - K_{optII})(235 - 3{,}784\ k_{max\ II})\varrho_{II}} \qquad (32)$$

W równaniu tym literą ϱ zastąpiono wyrażenie $(1 + \frac{q_1}{W_d})$. Wskaźnik II oznacza, że równanie (32) zostało napisane dla krzywej II wyciągniętej pełną linią na rysunku 4. Jeżeli tę krzywą użyje się do wyznaczenia sprawności pieca, który nie spełnia wszystkich założeń omówionych poprzednio, to tak wyznaczona sprawność η_{II} będzie sprawnością pozorną, obarczoną błędem. Sprawność rzeczywistą η można obliczyć za pomocą równania (32) podstawiając w miejsce wielkości oznaczonych indeksem II wielkości od nich różne, nie dotyczące tej krzywej

$$\eta = \frac{(K_{opt} - k_{max})(503{,}5g + 100)}{(100 - K_{opt})(235 - 3{,}784\ k_{max})\varrho} \qquad (32a)$$

Różnica Δ między odpowiednimi wielkościami równań (32a) i (32) jest spowodowana przede wszystkim odmiennymi parametrami technologicznymi (inny rodzaj paliwa i surowca, inny stosunek q_1/W_d), a także błędem pomiarowym popełnionym przy wyznaczaniu K_{opt} procesu. Sprawność pozorna η_{II} może być większa lub mniejsza od sprawności rzeczywistej określonej równaniem (32a).

Zgodnie z równaniem (32a) sprawność η jest funkcją czterech zmiennych. Różniczkę zupełną tej funkcji wyraża wzor

$$d\eta = \left(\frac{\partial \eta}{\partial K_{opt}}\right)_{II} dK + \left(\frac{\partial \eta}{\partial g}\right)_{II} dg + \left(\frac{\partial \eta}{\partial k_{max}}\right)_{II} dk_{max} + \left(\frac{\partial \eta}{\partial \rho}\right)_{II} d\rho \qquad (33)$$

Równanie (33) wiąże nieskończenie mały przyrost sprawności z nieskończenie małymi przyrostami zmiennych niezależnych w obranym miejscu. Ze względów praktycznych jest celowe obranie tego miejsca na krzywej II, a różniczki (nieskończenie małe przyrosty) zastąpić wyżej wspomnianymi różnicami skończonymi Δ .

$$\Delta\eta = \left(\frac{\partial \eta}{\partial K_{opt}}\right)_{II} \Delta K + \left(\frac{\partial \eta}{\partial g}\right)_{II} \Delta g + \left(\frac{\partial \eta}{\partial k_{max}}\right)_{II} \Delta k_{max} + \left(\frac{\partial \eta}{\partial \rho}\right)_{II} \Delta\rho \qquad (34)$$

Różnica $\Delta\eta$ dodana do sprawności pozornej odczytanej z wykresu daje sprawność rzeczywistą badanego pieca

$$\eta = \eta_{II} + \Delta\eta \qquad (35)$$

stąd

$$\Delta\eta = \eta - \eta_{II}$$

Analogiczne równania określają różnice występujące po prawej stronie równania (34):

$$\Delta K = K_{opt} - K_{opt\ II}$$

$$\Delta g = g - g_{II}$$

$$\Delta\rho = \rho - \rho_{II}$$

Jak widać z równania (34) różnica $\Delta\eta$ między sprawnością rzeczywistą i sprawnością pozorną składa się z 4-ch składników. Można więc napisać

$$\Delta\eta = (\Delta\eta)_K + (\Delta\eta)_g + (\Delta\eta)_k + (\Delta\eta)_\varrho \qquad (34a)$$

Poszczególne składniki poprawki sprawności można obliczyć z następujących wzorów

$$\left.\begin{aligned}
(\Delta\eta)_K &= \left(\frac{11,66}{100 - K_{opt}}\right)^2 \Delta K \\
(\Delta\eta)_g &= 3,129\,\frac{K_{opt} - 20}{100 - K_{opt}}\,\Delta g \\
(\Delta\eta)_k &= 0,0106\,\frac{3,784\,K_{opt} - 235}{100 - K_{opt}}\,\Delta k_{max} \\
(\Delta\eta)_\varrho &= -1,672\,\frac{K_{opt} - 20}{100 - K_{opt}}\,\Delta\varrho
\end{aligned}\right\} \qquad (36)$$

W równaniach tych występują odpowiednie pochodne cząstkowe sprawności dla punktów leżących na krzywej II.

Na rysunku 5 przedstawiono wartości poprawek obliczone za pomocą wyżej podanych równań (36) dla obranych wartości K_{opt}. Suma poprawek składowych wprowadzona do równania (35) pozwala skorygować pozorną sprawność η_{II} do sprawności rzeczywistej η.

Wyznaczenie g i k_{max} z dużą dokładnością nie jest trudne. Również stosunek q_1/W_d dla każdego pieca może być określony z wystarczającą dokładnością. O dokładności niniejszej metody wyznaczania sprawności pieca cementowniczego decyduje więc przede wszystkim dokładność wyznaczenia wielkości $K_{opt\,II}$ procesu, która jest podstawą wyznaczenia pozornej sprawności η_{II} z krzywej II. Jeżeli w szczególnym przypadku wielkość K_{opt} jest równa wyznaczonej pomiarem wielkości $K_{opt\,II}$, wtedy $\Delta K = 0$ i $(\Delta\eta)_K = 0$. Różnica ΔK jest więc ściśle związana

tylko z błędem pomiarowym. Błąd ten może być popełniony przy poborze próbki spalin i przy wykonaniu analizy. Ujemne wartości ΔK są spowodowane głównie poborem próbki spalin w miejscu, gdzie spaliny są produktami spalania niecałkowitego. Natomiast dodatnie wartości ΔK są spowodowane tylko błędami poboru i analizy próbki spalin. Z rysunku 5a widać wpływ dokładności wyznaczenia K_{opt} procesu na dokładność określenia sprawności pieca.

Posługując się rysunkiem 4 i wykresami poprawek sprawności można wyznaczyć sprawność jakiegokolwiek pieca cementowniczego, jeżeli znany jest skład spalin suchych, rodzaj paliwa i udział kilogramowy g dwutlenku węgla w surowcu bezwodnym.

V. PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA METODY KONTROLI

V.1. Piec szybowy

Można tu przytoczyć przykład wyznaczenia sprawności pieca i zużycia energii oparty o dane z literatury. H.Eigen [3] podaje pozycje bilansu energetycznego dla szybowego pieca cementowniczego i skład dwóch próbek spalin suchych opuszczających ten piec. Maksymalna zawartość dwutlenku węgla w spalinach obliczona wg równania (1) wynosi $K_{opt\,II} = 40,4$ dla jednego z dwóch podanych składów spalin. Paliwem był koks. Ciepło reakcji chemicznej $q_{ch\,kl} = 373$ kcal/kg. Niską wartość $q_{ch\,kl}$ autor [3] tłumaczy niską zawartością CaO i wysoką zawartością SiO_2 w klinkierze. W piecu tym stwierdzono jednostkowe zużycie energii $q = 697$ kcal/kg. Sprawność pieca wynosiła więc $\eta \approx 0,535$ /równ.(30)/.

Na podstawie rysunku 3 podanej wartości $q_{ch\,kl}$ odpowiada $g=0,322$. Dla koksu można przyjąć $k_{max} = 20,6$. Z danych tych wynika, że

$$\Delta g = -0,019$$

$$\Delta k_{max} = +0,6$$

Pozorna wartość sprawności η_{II} odczytana z krzywej II (rys.4) wynosi

$$\eta_{II} = 0,57$$

Poprawki sprawności odczytuje się z rys. 5

$$(\Delta\eta)_g = -0,02$$

$$(\Delta\eta)_k = -0,009$$

Pozostałych dwóch poprawek nie można wyznaczyć z powodu braku odnośnych danych w cytowanym artykule. Uwzględniając tylko dwie wyżej określone poprawki sprawność pieca wyniesie

$$\eta = 0{,}541$$

Drugi skład spalin podany przez Eigen'a (dla spalin rozrzedzonych powietrzem szkodliwym) pozwala obliczyć $K_{opt.II} = 40{,}8$. Ponieważ oba składy spalin dotyczą tego samego procesu, rozbieżność K_{opt} świadczy o pewnym błędzie w pobraniu próbki lub przy wykonywaniu analizy. Dla tego przypadku skorygowana sprawność wynosi $\approx 0{,}55$.

Zużycie energii odczytane z krzywej VII (rys.4) dla $\eta = 0{,}54$ wynosi

$$q \approx 700 \text{ kcal/kg}$$

Uzyskaną zgodność wyników można uważać za bardzo dobrą zwłaszcza, że przy wyznaczaniu sprawności pieca z analizy spalin nie uwzględniono poprawki ze względu na spalanie niecałkowite, a takie w piecach szybowych występuje.

V.2. Piec obrotowy

W cementownictwie stosowany jest między innymi układ przedstawiony na rys. 1. Spaliny opuszczające piec obrotowy kierowane są do kotła bezpaleniskowego. Układ taki daje możliwość wykorzystania entalpii spalin odlotowych.

W piecu obrotowym spaliny i wypalana masa przemieszczają się w przeciwprądzie. Mączka surowa po zwilżeniu i zgranulowaniu na talerzu obrotowym doprowadzana jest do pieca w sąsiedztwie przekroju oznaczonego literą A . Układ przedstawiony na rys. 1 był przedmiotem badan cieplnych w ramach jednej z magisterskich prac dyplomowych wykonanych w Katedrze Teorii Maszyn Cieplnych na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Śląskiej W pracy tej była użyta omawiana metoda kontroli procesu piecowego. Przydatność tej metody do badań cieplnych pieców cementowniczych potwierdza uzyskana w jej pierwszym zastosowaniu zgodność bilansów energetycznych pie-

ca i kotła bezpaleniskowego. Przeprowadzone były trzy pomiary podczas jednej doby. Czas trwania jednego pomiaru wynosił około 3 godzin. Można tu przytoczyć niektóre wyniki:

Pomiar	I	II	III
K_{opt}	27,3	27,1	28,4
Stosunek nadmiaru powietrza λ w miejscu A (rysunek 1)	0,74	0,64	0,69
Sprawność pieca η	0,17	0,165	0,20
Zużycie energii q kcal/kg kl	≈2400		2050

Energia zużyta w układzie pieca cementowniczego stanowi około połowy wartości podanych wyżej, a reszta była wykorzystana częściowo w kotle bezpaleniskowym (rys. 1)

Pierwszy pomiar był wykonany przed południem, drugi po południu, trzeci zaś w nocy. Piec był regulowany ręcznie. Mniejsze zużycie energii podczas pomiaru trzeciego pochodzi stąd, że w nocy mniejsze było zapotrzebowanie pary wytwarzanej w kotle i palacz ograniczył dopływ pyłu węglowego do pieca.

Na rys.1 zaznaczono sondę, która umożliwiała pobieranie próbki spalin z miejsca A przy końcu pieca właściwego, przed pierwszymi nieszczelnościami. Sonda ta była chłodzona wodą (obieg wody grawitacyjny) i umożliwiała we wspomnianych badaniach cieplnych pomiar temperatury spalin opuszczających piec właściwy. Zastosowanie takiej sondy pozwala na kontrolę nadmiaru powietrza w piecu. Ruchową kontrolę procesu spalania można jednak realizować i wtedy, gdy nie ma możliwości pobierania próbki spalin z pieca właściwego.

Z rys. 4 widać, że im większe K_{opt}, tym mniejsze jednostkowe zużycie energii q, tym ekonomiczniejsza eksploatacja pieca cementowniczego. Wielkość K_{opt} przy danym paliwie i surowcu zależy od stanu technicznego pieca, od szczelności kanałów dymowych i od ilości paliwa doprowadzanego do palnika. Nieszczelności kanałów

dymowych za piecem (rys.1) powodują często niedomiar powietrza ($\lambda < 1$) w piecu obrotowym, co pomniejsza ilość ciepła wywiązanego w piecu i tym samym ilość wypalanego klinkieru. Paliwo, które nie może zostać utlenione w piecu z powodu niedomiaru powietrza dopala się wtedy, gdy strumień spalin zetknie się z powietrzem wnikającym do kanałów dymowych przez nieszczelności. Piec cementowniczy powinien być eksploatowany w ten sposób, aby nie było dopalania paliwa poza piecem właściwym. Ciepło reakcji chemicznej dopalania paliwa poza piecem może być wykorzystane w kotle bezpaleniskowym, jeżeli ilość powietrza wnikającego przez nieszczelności odpowiada zapotrzebowaniu powietrza do reakcji dopalania. Nieszczelności kanałów dymowych bywają jednak tak dotkliwe, że ciepło reakcji chemicznej dopalania nie wystarcza do podgrzania powietrza szkodliwego do temperatury spalin. W takim przypadku temperatura między wylotem z pieca i dolotem do kotla spada skutkiem mieszania się spalin z chłodnym powietrzem szkodliwym. W tym przypadku paliwo dopalane za piecem jest stracone tak dla procesu piecowego, jak i dla procesu wytwarzania pary w kotle bezpaleniskowym.

Dokładność wyników kontroli spalania zależy m.in. od dokładności pobrania i wykonania analizy próbki spalin. Należy tutaj podkreślić, że nie można posługiwać się pojedynczymi, chwilowymi próbkami, lecz próbkami średnimi w czasie. Katedra Teorii Maszyn Cieplnych Politechniki Śląskiej posiada prototyp aspiratora suchego, który był użyty do pobierania średnich próbek spalin we wspomnianych badaniach cieplnych pieca obrotowego. Przyrząd ten wykonany wg pomysłu autora niniejszej pracy umożliwia równoczesny pobór dwóch różnych próbek spalin w czasie kilku godzin. Jeżeli nie można pobrać średniej próbki za pomocą takiego przyrządu, to należy wykonać szereg analiz chwilowych próbek spalin i ustalić skład średni. Do tego celu należy obrać takie miejsce na drodze spalin gdzie spaliny są już produktami spalania zupełnego i całkowitego, np. przekrój C na rys 1. Analizy chwilowych próbek spalin aparatem Orsata w takim przypadku sprowadzałyby się do stwierdzenia zawartości CO_2, O_2 i ewentualnie CO. Średni skład z wielu analiz próbek chwilowych może w podanych wzorach zastąpić skład próbki średniej pobranej aspiratorem. W tym przypadku należy jednak liczyć się ze znacznym błędem pomiarowym (rys.5a).

VI. WNIOSKI

1/ Opracowana metoda jest metodą ogólną, gdyż obejmuje wszystkie typy pieców cementowniczych niezależnie od rodzaju używanego surowca i paliwa i wielkości energii q_1 pochodzącej ze wstępnych procesów technologicznych. Jedyny wyjątek stanowią piece zużywające wapno palone do wytwarzania klinkieru. Metoda ta dotyczy również procesu wypalania wapna w wapiennikach. Oba procesy technologiczne (cementowniczy i wapienniczy) różnią się bowiem tylko wielkością ciepła reakcji chemicznej /równanie (25a) i (24)/. Nie załączono tu opracowania wykreślonego dla wapienników, gdyż nie jest to przedmiotem niniejszej pracy.

Większość wyprowadzonych wzorów może być użyta do badań cieplnych, w których zachodzi zjawisko niecałkowitego spalania. Do tej grupy procesów cieplnych może być włączony również proces koksowniczy.

2/ Wprowadzone do rozważań pojęcie maksymalnej zawartości dwutlenku węgla w spalinach K_{opt} procesu jest liczbą charakteryzującą proces technologiczny pod względem cieplnym i jest podstawową wielkością do obliczania sprawności oraz jednostkowego zużycia energii q (rys.4). Niewielki wpływ pozostałych parametrów technologicznych jak rodzaj paliwa, surowca, stosunek energii q_1 do wartości opałowej uwzględniony jest za pomocą odpowiednich poprawek (rys.5). Każdy proces technologiczny wytwarzania klinkieru cechuje wielkość $K_{opt\,max}$ - największa optymalna zawartość CO_2 w spalinach suchych /równ.(28)/.

3/ Ruchowa kontrola procesu cementowniczego sprowadza się do pobrania średniej próbki spalin, obliczenia K procesu z równania (1) i odczytania z rysunku 4 sprawności η i jednostkowego zużycia energii q . Poprawki sprawności $(\Delta\eta)_g$, $(\Delta\eta)_k$, $(\Delta\eta)_\rho$ (rys.5) dla konkretnej cementowni są praktycznie stałe, jeżeli nie zmienia się rodzaju paliwa i surowca.

4/ Pobieranie próbki spalin średniej w czasie należy wykonywać w miejscu, gdzie spaliny są produktami spalania całkowitego, a nie uległy jeszcze rozrzedzeniu powietrzem szkodliwym. Znaczne rozrzedzenie spalin powietrzem szkodliwym powoduje uwielokrotnienie błędu wykonania analizy spalin.

5/ Przy dokładnych badaniach należy próbkę spalin pobierać przez dłuższy czas w sposób ciągły, aby uniezależnić wyniki badań od chwilowych odchyłek stanu pieca od stanu równowagi termicznej i masowej. Chwilowe, pojedyńcze próbki spalin mogą być wykorzystane tylko do badań orientacyjnych.

6/ Pełna analiza procesu cieplnego przeprowadzona w tej pracy pozwala wyznaczyć wielkości poszczególnych względnych strat cieplnych. Istnieją piece o niskiej sprawności. Rozpoznanie wielkości poszczególnych strat jest warunkiem koniecznym wprowadzenia odpowiednich usprawnień prowadzących do podwyższenia sprawności pieca.

7/ Ze względu na prostotę niniejszej metody upowszechnienie kontroli procesu wypalania klinkieru cementowego jest możliwe. W niejednym przypadku kontrola taka pozwoli w łatwy sposób uzyskać znaczne korzyści ekonomiczne. Możliwości poprawy ekonomii procesu są oczywiste, jeżeli chodzi o piec przedstawiony na rys.1 i omówiony w rozdziale V.2. niniejszej pracy.

L I T E R A T U R A

[1] I.Abrends, W.Cieśliński: Technologia cementu, B. i A. Warszawa, 1956.

[2] K.Brachthäuser: Ableitung einer Formel zur rechnerischen Ermittlung des Wärmeverbrauches von Zementöfen aus der Abgasanalyse, Tonind. Ztg. 1956, 371.

[3] H.Elgen: Auswertung der Abgasanalyse des Koksbeheizten Zementschachtofens, Radex Rundschau 1958, str. 277 - 281.

[4] H.Eigen: Grundlagen der Wärmephysik des Zementschachtofens, Zement, Kalk Gips, 1960, str.458-466.

[5] H.Eigen: Einfluss der Klinkervorkühlung im Zementdrehofen auf den Wärmeverbrauch, - Zement Kalk Gips, 1960, str. 226 - 229..

[6] H.Kühl: Zement Chemie - Verlag Technik, Berlin 1951.

[7] F.Linnhoff: Vereinfachte Berechnung des Wärmeverbrauches koksbeheizter Zementschachtöfen aus der Abgasanalyse - Zement Kalk Gips, 1959.

[8] St.Ochęduszko: Teoria Maszyn Cieplnych (część.II), PWT W-wa, 1953.

[9] J.Wuhrer: Wirtschaftliche und verfahrenstechnische Probleme beim brennen vom Portlandklinker aus Brandkalk, Zement Kalk Gips 1960, str. 181-192.

[10] H. zur Strassen: Der theoretische Wärmebedarf des Zementbrandes, Zement Kalk Gips, 1957, str. 1 - 11.

Контроль процесса выжигания цементного клинкера

Резюме

В этой работе автор произвёл полный анализ процесса выжигания цементного клинкера. Свои выводы базирует на объёмном составе сухих продуктов сгорания, роде сырья и роде горючего.

Род сырья определяется содержанием CO_2 в его безводной субстанции, а род горючего определяет величина k_{max} (максимальное содержание CO_2 в газообразных продуктах сгорания).

Средний объёмный состав газообразных продуктов цементного процесса автор характеризирует величиной K_{opt}, которая связана с термическим коэффициентом полезного действия η цементной печи. Теоретически характерная величина K_{opt} может изменятся от $K_{opt\ max}$ (для к. п. д. печи $\eta = 1$) до k_{max} (для к. п. д. печи $\eta = 0$).

Метод контроля печьного процесса есть приспособлён к эксплоатационным целям через построение графических зависимостей между K_{opt}, термическим к. п. д. η и единичным употреблением теплоты (на 1 кг клинкера).

Этод метод контроля относится к всем цементным печям (шахтным и ротационным), в которых производится клинкер из карбонатного сыря.

Testing of the kiln process for the cement clinker

Summary

In this paper the author deals with the complete analysis of the cement clinker kiln process. The considerations are based on the volume composition of dry exit-gas and take into account the kind of the raw material and of the fuel.

The kind of raw material (raw meal) is determined by the CO_2 contents in its waterless substance. The kind of fuel, however, is defined by the magnitude k_{max} (the maximum contents of CO_2 n the combustion gases).

The author characterizes the average volum composition of the gas products of the kiln process by the magnitude K_{opt} closely related to the thermal efficiency of the kiln. Theoretically the characteristic magnitude of K_{opt} can assume any value from $K_{opt\ max}$ (for efficiency $\eta = 1$) to k_{max} (for efficiency $\eta = 0$).

The controlling method of he kiln process has been adapted to exploitation purposes by giving graphical relatons between K_{opt}, thermal efficiency of the kiln and unit heat consumption (per kg clinker).

The proposed controlling method can be used for all types of cement kilns (rotary and shaft ones as well) provided that the clinker has been obtained from a carbonate raw meal.

S Y M B O L E

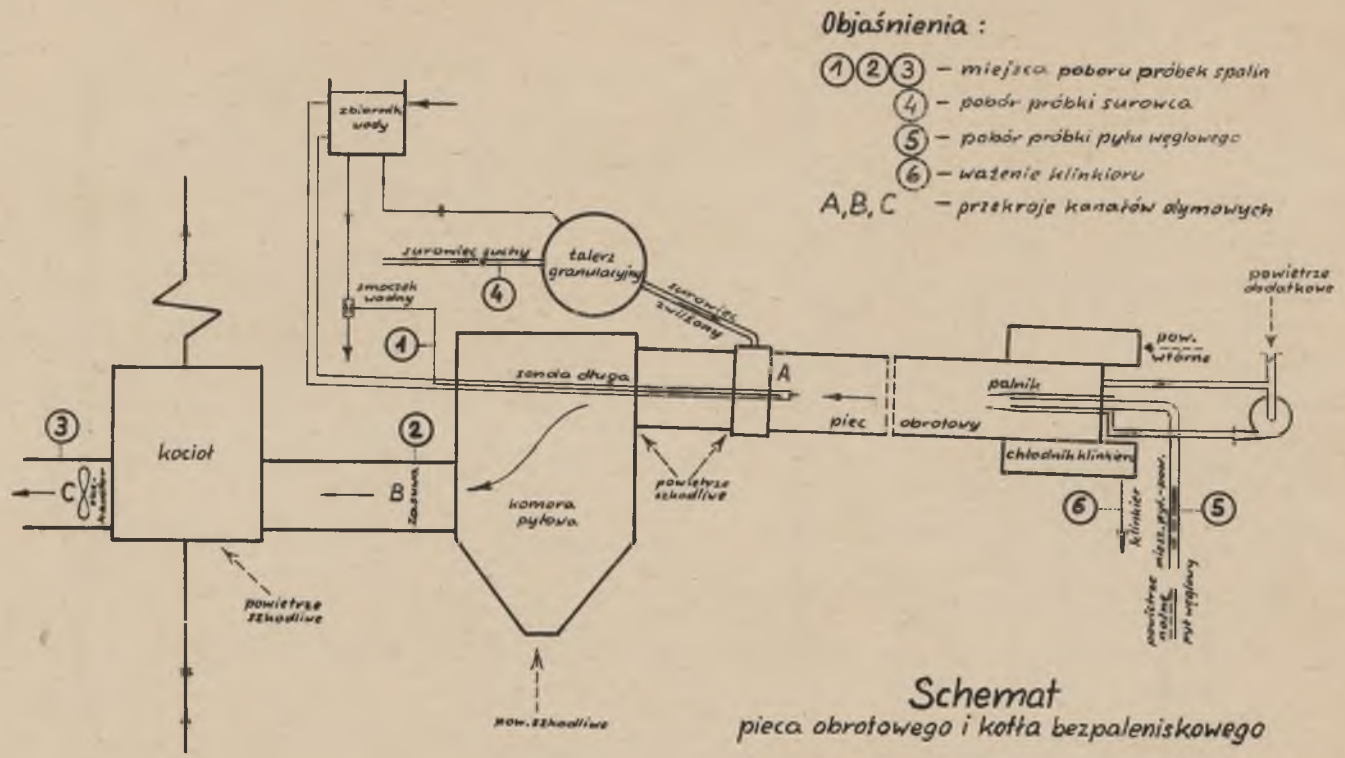
K	%	- maksymalna zawartość CO_2 w gazowych produktach procesu piecowego po spalaniu niecałkowitym,
K_{opt}	%	- maksymalna zawartość CO_2 po spalaniu całkowitym (wielkość charakteryzująca proces piecowy),
k_{max}		- maksymalna zawartość CO_2 w gazowych produktach spalania paliwa po spalaniu całkowitym i zupełnym (wielkość charakeryzująca rodzaj paliwa),
[i]	%	- zawartość procentowa i-tego składnika w spalinach suchych,
c,h,o,n,p,w		- składniki analizy elementarnej,
n''_{ss}	kmol/kg	- ilość spalin suchych przypadająca na 1 kg paliwa,
n''_c	kmol/100 kmol	- ilość kilomoli pierwiastka węgla w 100 kilomolach gazowych produktów procesu piecowego (z analizy aparatem Orsata),
Δn_L	kmol/100 kmol	- ilość powietrza szkodliwego dopływającego do 100 kilomoli spalin suchych,
Δn_c	kmol/100 kmol	- ilość kilomoli stałego pierwiastka węgla w 100 kilomolach spalin suchych,
$n_{s\ min}$	kmol/kg	- minimalne zapotrzebowanie tlenu,
g		- udział kiligramowy CO_2 w surowcu bezwodnym,
$g_ż$		- strata żarzenia,
q	kcal/kg kl	- zużycie energii na wytwarzanie 1 kg klinkieru,
$q_{ch\ kl}$	kcal/kg kl	- ciepło reakcji chemicznej wytwarzania 1 kg klinkieru z surowca suchego,
W_d	kcal/kg	- wartość opałowa paliwa,

x	- stopień spalania niecałkowitego,
y	- stopień wykorzystania popiołu,
z kg/kg kl	- wskaźnik zużycia paliwa,
$\varepsilon_r, \varepsilon_w, \varepsilon_{kl}, \varepsilon_o$	- straty względne,
η	- sprawność termiczna pieca,
λ	- stosunek nadmiaru powietrza,
ν	- stosunek ilości kilomoli azotu zawartego w paliwie do ekwiwalentnej ilości kilomoli pierwiastka węgla,
ξ	- stosunek wzrostu ilości spalin suchych.

I N D E K S Y

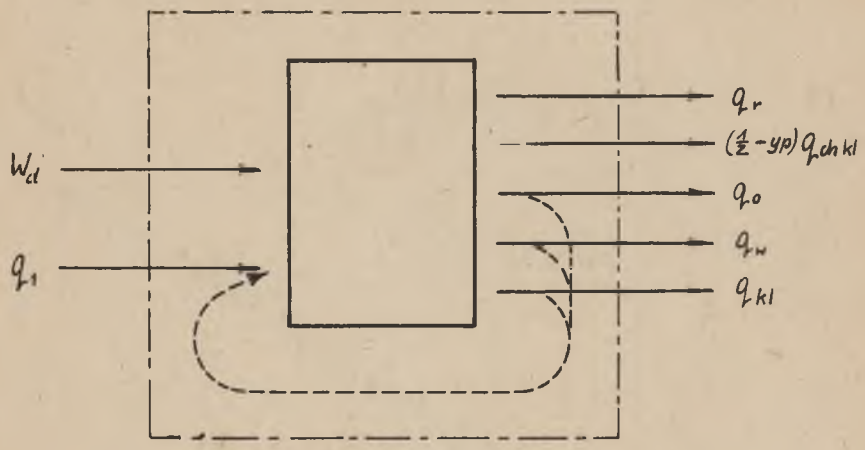
$(\quad)_{kl}$	- przy wielkościach dotyczących klinkieru,
$(\quad)_{nc}$	- przy wielkościach dotyczących spalania niecałkowitego,
$(\quad)_p$	- przy wielkościach dotyczących paliwa,
$(\quad)_s(\quad)_m$	- przy wielkościach dotyczących surowca,
$(\quad)^*$	- przy wielkościach odniesionych do jednostki czasu.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA Gliwice

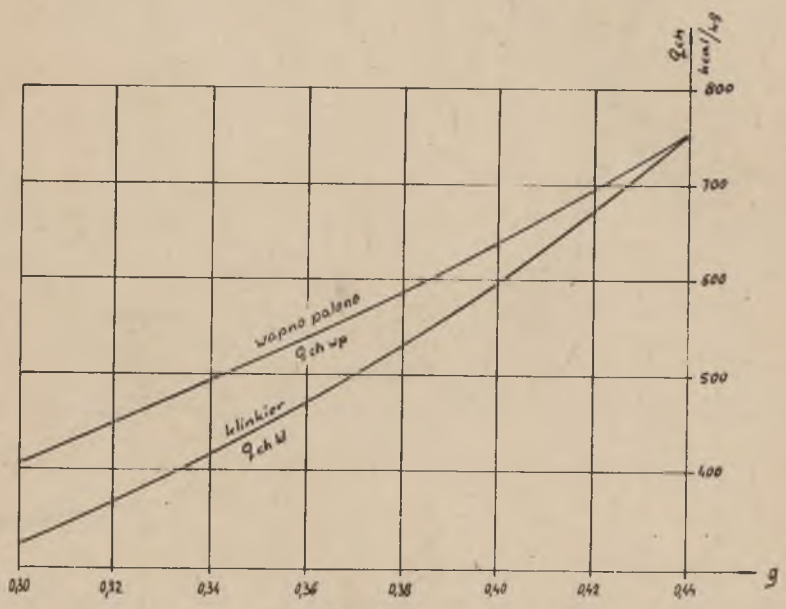


Schemat
pieca obrotowego i kotła bezpaleniskowego

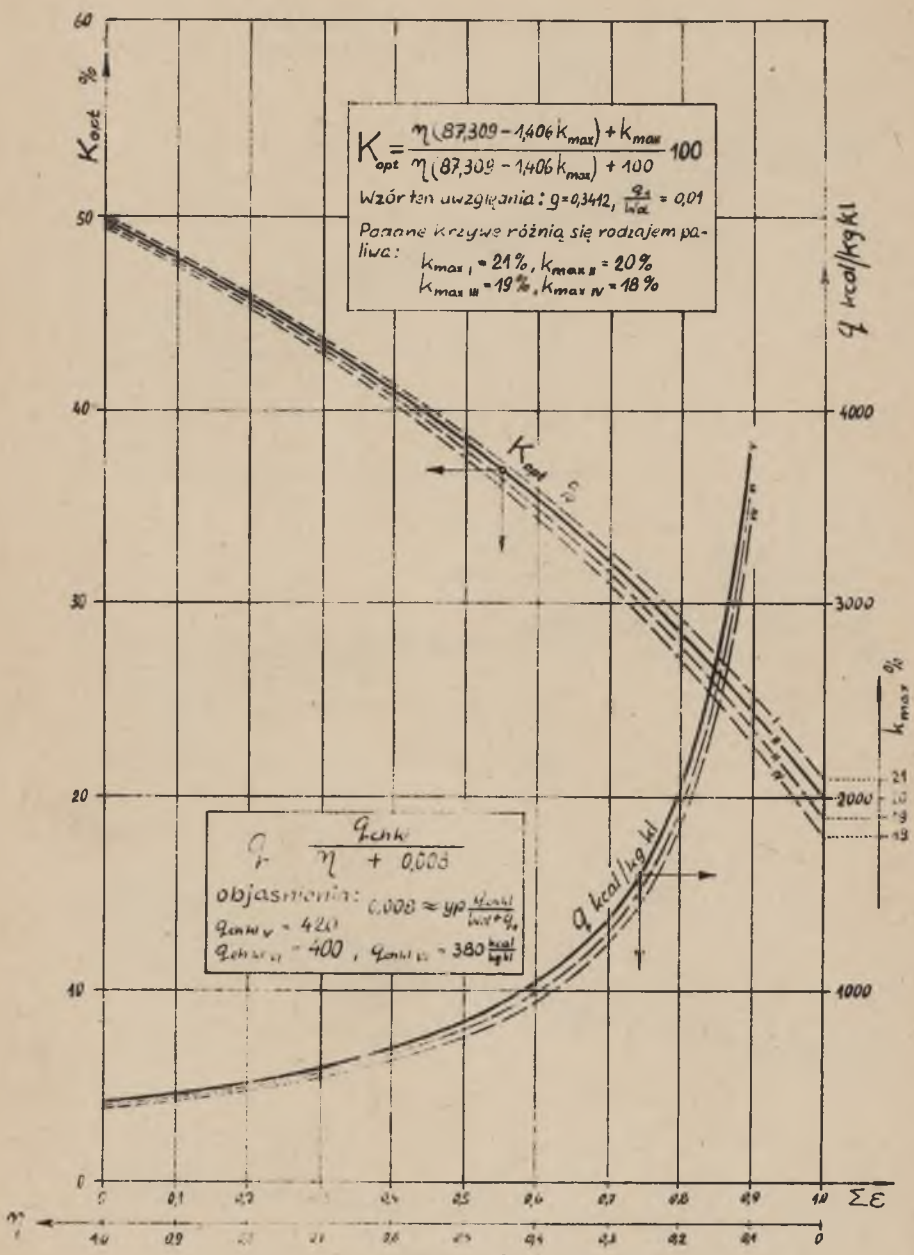
Rys. 1.



Rys. 2.
Schemat bilansowy układu pieca cementowniczego



Rys. 3.
Zależność ciepła reakcji chemicznej od udziału kilogramowego CO_2 w surowcu bezwodnym

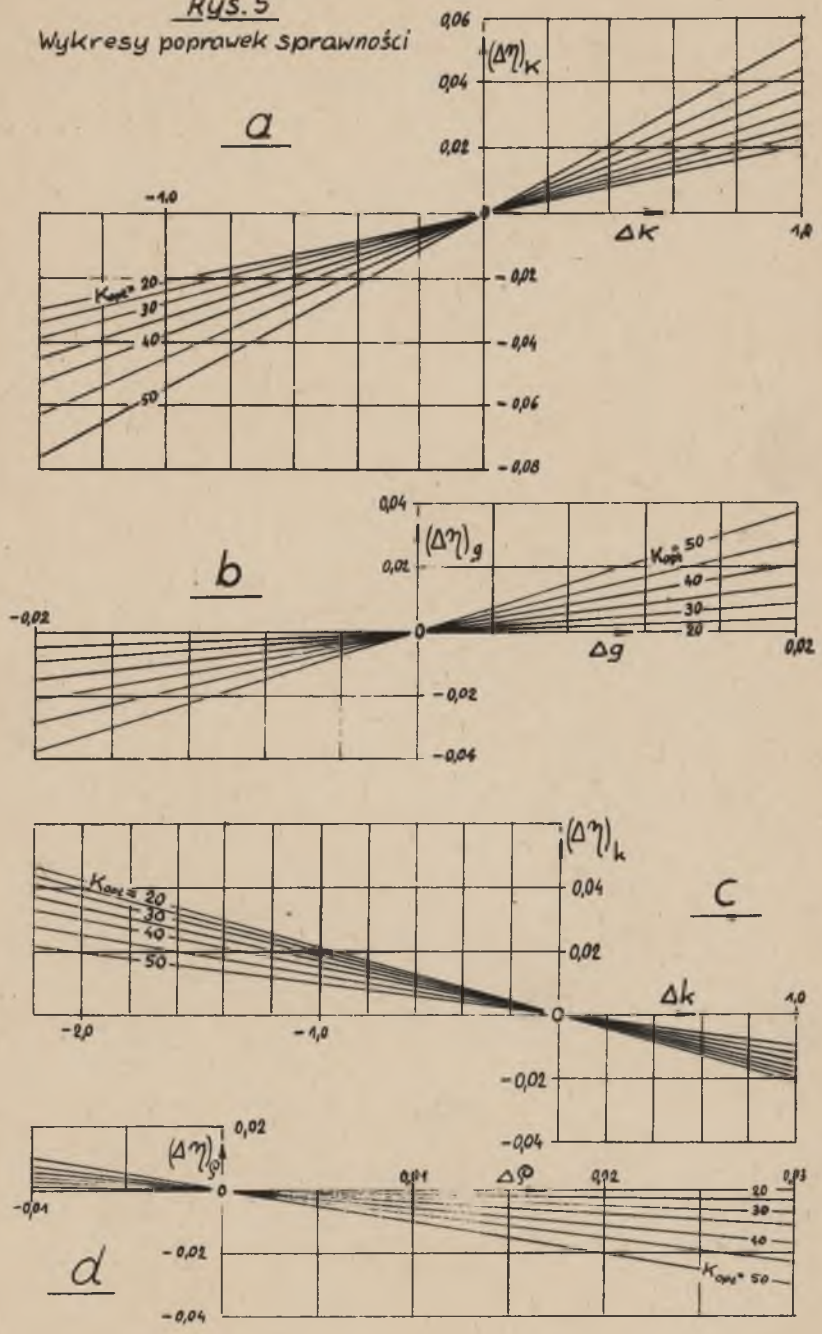


Rys 4.

Zależność K_{opt} i q od sprawności pieca

Rys. 5

Wykresy poprawek sprawności



BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej
P 3350 | 61