ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1989

Seria: ENERGETYKA z. 106 Nr kol. 998

Andrzej ZIĘBIK
Tadeusz KRUCZEK
Eugeniusz MAJZA

Instytut Techniki Cieplnej
Politechniki Śląskiej

METODY INTENSYFIKACJI PROCESÓW CIEPLNYCH W PIECACH PRZEMYSŁOWYCH

Streszczenie. W pierwszej części referatu przedstawiono metodę oceny efektów energetycznych przy stosowaniu wzbogaconego tlenem dmuchu i podwyższonego ciśnienia w procesie wielkopiecowym. Podano wyniki przykładowych obliczeń. W drugiej części przeprowadzono analizę termodynamiczną wpływu wzbogacenia powietrza tlenem na procesy cieplne w piecu wgłębnym. Dla oceny wpływu wzbogacenia powietrza tlenem na jakość płomienia przy spalaniu paliwa o stałej jakości wykorzystano model dyfuzyjnego płomienia gazowego.

1. STOSOWANIE DODATKU TLENU DO DMUCHU I PODWYŻSZONEGO CIŚNIENIA W PROCESIE WIELKOPIECOWYM

1.1. Wstęp

Czynnikiem decydującym o wydajności procesu wielkopiecowego jest ilość tlenu dostarczanego z dmuchem wielkopiecowym. Ilość tę można zwiększyć przez wzbogacanie dmuchu tlenem lub przez zwiększenie strumienia dmuchu. Ze względu na ograniczenia związane z przepływem gazów w strefie spadków i w szybie wielkiego pieca zwiększanie strumienia dmuchu (a jednocześnie przepływających w przeciwprądzie gazów) jest możliwe poprzez podwyższenie ciśnienia w przestrzeni roboczej pieca. Podwyższenie ciśnienia powoduje także obniżenie zużycia koksu, ponieważ stany równowagi przesuwają się na korzyść gazów CO_2, H_2O, a mniejszych udziałów CO i H_2. Natomiast wzbogacanie dmuchu tlenem powoduje zmniejszenie ilości azotu w gazie, przez co następuje zwiększenie ciśnień składnikowych tlenków węgla i tym samym przesunięcie stanów równowagi w kierunku większych udziałów CO_2. W ten sposób poprawia się sprawność wykorzystania tlenku węgla, co wpływa na zmniejszenie zużycia koksu.

Wzbogacenie dmuchu tlenem oraz podwyższenie ciśnienia w gardzieli wielkiego pieca wpływają na jednostkowe zużycie koksu - K, na jednostkowe zu-

życie dmuchu - D, na ilość wytwarzanego gazu wielkopiecowego - G i jego energię chemiczną - E, na produkcję energii elektrycznej w układzie rozprężnym gazu - E_{el} oraz na zużycie energii chemicznej gazu wielkopiecowego w nagrzewnicach - E_N i ilość energii chemicznej gazu oddawanego do podsystemu gazoenergetycznego huty - E_Z. Wielkości te odniesione do jednostkowej ilości surówki nazwano jednostkowymi wskaźnikami energetycznymi [3, 6]. Do oceny efektów energetycznych podwyższania ciśnienia można zastosować także różniczkowe wskaźniki energetyczne [3, 6] zdefiniowane następująco:

$$\omega_{YX} = -\frac{1}{Y}\frac{\partial Y}{\partial X}, \tag{1}$$

gdzie:

Y - wybrany wskaźnik jednostkowy,

X - parametr intensyfikujący proces (p_G - ciśnienie w gardzieli, O_{2D} - udział tlenu w dmuchu).

Przy badaniu wpływu parametrów intensyfikujących proces na całość gospodarki energetycznej kraju należy analizować wskaźnik skumulowanego zużycia energii w odniesieniu do jednostki surówki - w_s lub lokalne mnożniki zastępowania energii skumulowanej - ν_{EX}. Mnożnik ν_{EX} - wyraża stosunek energii skumulowanej zaoszczędzonej dzięki zmianom parametru intensyfikującego X (ciśnienia w gardzieli lub wzbogacenia dmuchu tlenem) do skumulowanego zużycia energii, które zapewnia tę zmianę.

1.2. Metoda bilansowa wyznaczania jednostkowych i różniczkowych wskaźników energetycznych procesu wielkopiecowego

Do badania wpływu wzbogacenia dmuchu tlenem i podwyższenia ciśnienia w gardzieli wielkiego pieca na wskaźniki energetyczne procesu wielkopiecowego zastosowano teoretyczno-empiryczną metodę bilansową typu "input - output". Podstawą części teoretycznej tej metody są bilanse pierwiastków C+S, H, O i N oraz bilans energii. Każde z równań bilansowych, z wyjątkiem bilansu azotu, zawiera nieznany a priori parametr (stałą procesu), zależny od specyfiki badanego procesu wielkopiecowego. Część empiryczna dotyczy zbadania wpływu ciśnienia w gardzieli wielkiego pieca i wzbogacenia dmuchu tlenem, na skład i temperaturę gazu wielkopiecowego oraz na ilość wydmuchiwanego pyłu [4, 5, 8]. Każda z zależności empirycznych zawiera jeden nieznany a priori parametr uwzględniający specyfikę rozpatrywanego procesu. Część doświadczalna jest ograniczona do jednorazowego pomiaru cieplnego badanego wielkiego pieca. Pomiar ten umożliwia wyznaczenie nieznanych parametrów występujących w równaniach bilansowych i zależnościach empirycznych.

Równania bilansowe pierwiastków i bilansu energii sporządza się przy założeniu, że warunki wsadowe i skład surówki są stałe w rozpatrywanym procesie. Ponadto zakłada się, że następujące wielkości odniesione do jednostkowej ilości surówki nie zależą od zmian p_G, O_{2D} [2, 3]:

a) różnica między ilością węgla i siarki w produktach nieenergetycznych (z wyjątkiem pyłu wielkopiecowego) oraz ilością C+S w substratach nieenergetycznych (stała procesu α, kmol C/Mg sur.),
b) wilgoć wsadu (stała procesu β, kmol H_2O/Mg sur.),
c) różnica między ilością tlenu w produktach nieenergetycznych (z wyjątkiem pyłu) a ilością tlenu w substratach nieenergetycznych (stała procesu γ, kmol O/Mg sur.),
d) różnica między sumą entalpii produktów nieenergetycznych (z wyjątkiem pyłu) a entalpią substratów nieenergetycznych (stała procesu δ, kJ/Mg sur.).

Zakłada się również, że strumień strat ciepła do otoczenia i wody chłodzącej jest stały ($\dot{Q}_{ow}$ = idem, kW).

Równania połączonego bilansu C+S, bilansu H, różnicy bilansów O i H oraz bilansu N i energii mają postacie:

$$(K - P\frac{c_P}{d_K})(\frac{c_K}{12} + \frac{s_K}{32}) + F(C_F + S_F) = \alpha + G(CO_2 + CO), \tag{2}$$

$$(K - P\frac{c_P}{c_K})(\frac{h_K}{2} + \frac{w_K}{18}) + DX_D + FH_{2F} + \beta = G(H_2 + X_G), \tag{3}$$

$$(K - P\frac{c_P}{c_K})(\frac{o_K}{32} - \frac{h_K}{4}) + DO_{2D} + F(O_{2F} - 0,5\,H_{2F} + 0,21\,l) =$$

$$= \gamma + G\left[0,5(CO - H_2) + CO_2\right], \tag{4}$$

$$D(1 - O_{2D}) + F(N_{2F} + 0,79\,l) = G(1 - CO - CO_2 - H_2), \tag{5}$$

$$(K - P\frac{c_P}{c_K})d_K + F(d_F + i_F + li_l) + D(i_D + X_D i_{XD}) =$$

$$= \delta + \frac{\dot{Q}_{ow}D}{\dot{D}} + G(W_G + i_G + X_G i_{XG}), \tag{6}$$

gdzie: K, D, F, G - jednostkowe zużycie koksu, dmuchu, paliwa zastępczego i produkcja gazu wielkopiecowego, kg/Mg sur. lub kmol/Mg sur.; P - ilość wydmuchiwanego pyłu, kg/Mg sur.; c_P, c_K, s_K, h_K, o_K, w_K - udziały gramowe C w pyle i koksie oraz S, H, O, H_2O w koksie; C_F, S_F, H_{2F}, O_{2F},

N_{2F} - ilości wymienionych pierwiastków w paliwie zastępczym, kmol/kg lub kmol/kmol; CO, CO_2, H_2, N_2 - udziały molowe w suchym gazie wielkopiecowym; X_D, X_G - stopnie zawilżenia dmuchu i gazu wielkopiecowego, kmol H_2O/kmol; l - zużycie powietrza sprężonego do rozpylania paliwa zastępczego, kmol/kg; O_{2D} - udział tlenu w suchym dmuchu; d_K, d_F - entalpia dewaluacji koksu i paliwa zastępczego, kJ/kg, kJ/kmol; W_G - wartość opałowa gazu wielkopiecowego, kJ/kmol; $\dot{D}$ - strumień dmuchu, kmol/s; i_j (gdzie j : D, F, l, G, XD, XG) - właściwe entalpie fizyczne dmuchu, paliwa zastępczego, powietrza sprężonego, gazu wielkopiecowego, pary wodnej w dmuchu i gazie w gardzieli.

W celu wyznaczenia jednostkowych wskaźników energetycznych układ równań (2-6) uzupełnia się zależnościami empirycznymi ujmującymi wpływ ciśnienia i wzbogacenia dmuchu tlenem na skład gazu wielkopiecowego (funkcje φ, Ψ), na jego temperaturę (funkcja T_G) oraz na wydmuch pyłu (funkcja P). Funkcje φ, Ψ są zdefiniowane następująco:

$$\varphi = \frac{CO}{CO_2}, \tag{7}$$

$$\Psi = \frac{GH_2}{\frac{1}{2} Kh_K + FH_{2F} + DX_D}. \tag{8}$$

1.3. Równania empiryczne

Postać matematyczną równań empirycznych przyjęto opierając się na analizie teoretycznej i analizie danych doświadczalnych. Konkretne postacie tych zależności wyznaczono na podstawie danych pomiarowych zebranych w literaturze stosując metodę rachunku wyrównawczego. Ujmują je formuły:

$$\varphi = 69{,}01(O_{2D} - 0{,}2756)^2 + 0{,}107/p_G + \varphi_0, \tag{9}$$

$$\Psi = -\frac{1{,}080}{1+\varphi} + \Psi_0, \tag{10}$$

$$T_G = -986\, O_{2D} + (-1510 + 1{,}155\, T'_{GO})p_G + T_{GO}, \tag{11}$$

$$P = (58{,}24 + 2{,}65\, P'_0)u_G + P_0, \tag{12}$$

gdzie:

u_G - prędkość przepływu gazu w gardzieli, m/s,

$)_0$ - parametry wyznaczane na podstawie jednorazowego pomiaru cieplnego badanego wielkiego pieca.

1.4. Wpływ podwyższonego ciśnienia oraz wzbogacenia dmuchu tlenem na wydajność procesu wielkopiecowego

Pomiędzy ciśnieniem w gardzieli - p_G a ciśnieniem dmuchu - p_D zachodzi relacja:

$$p_D = \sqrt{(p_{D1}^2 - p_{G1}^2)(\dot{D}/\dot{D}_1)^2 + p_G^2}, \tag{13}$$

gdzie wielkości $)_1$ dotyczą pomiaru jednorazowego.

W celu wyznaczenia ilości gazów powstających w strefie garu wykorzystuje się bilanse N, H, O i C. Ilość powstających gazów wynika z zależności:

$$G_g = aD + b, \tag{14}$$

gdzie:

$$a = 1 + 2X_D + O_{2D} + \frac{(2O_{2D} + X_D)h_K}{\frac{c_K}{6} + \frac{s_K}{16}},$$

$$b = F\left[H_{2F} + N_{2F} + 2O_{2F} + \frac{(2O_{2F} - C_F)h_K}{\frac{c_K}{6} + \frac{s_K}{16}}\right].$$

W celu wyznaczenia strumienia dmuchu - $\dot{D}$ wykorzystuje się zależności (13) i (14), równanie stanu, równanie ciągłości oraz warunek stałości ciśnienia dynamicznego gazów garowych przepływających przez umowną płaszczyznę leżącą nad strefą dysz [3].

Zależności te znacznie upraszczają się w przypadku, gdy w procesie nie są stosowane paliwa zastępcze węglowodorowe. Gazy opuszczające adiabatyczną komorę zgazowania koksu zawierają wówczas głównie CO i N_2. Wykorzystując warunek ciągłości strugi oraz równanie stanu otrzymuje się:

$$\dot{n}_{GR} = \dot{n}_{GRo}\sqrt{\frac{T_o}{T}}, \tag{15}$$

gdzie:

$\dot{n}_{GRo}$, T_o - strumień i temperatura gazów redukcyjnych przed wzbogaceniem dmuchu w tlen;

$\dot{n}_{GR}$, T - strumień i temperatura gazów po wzbogaceniu dmuchu w tlen.

Strumienie $\dot{n}_{GR}$ i $\dot{n}_{GRo}$ wyznacza się z relacji:

$$\dot{n}_{GR} = (1 + O_{2D})\dot{D}, \tag{16}$$

$$\dot{n}_{GRo} = (1 + O_{2Do})\dot{D}_o, \tag{17}$$

gdzie:

$\dot{D}_o$, O_{2Do} - strumień dmuchu i udział tlenu w dmuchu przed wzbogaceniem,

$\dot{D}$, O_{2D} - strumień dmuchu i udział tlenu po wzbogaceniu dmuchu w tlen.

Na podstawie zależności (15)÷(17) otrzymuje się:

$$\dot{S} = \dot{S}_o \frac{D_o}{D} \frac{1 + O_{2Do}}{1 + O_{2D}} \sqrt{\frac{T_o}{T}}, \tag{18}$$

gdzie:

$\dot{S}_o$, D_o - strumień surówki i jednostkowe zużycie dmuchu przed wzbogaceniem w tlen,

$\dot{S}$, D - strumień surówki i jednostkowe zużycie dmuchu po wzbogaceniu dmuchu w tlen.

Wykorzystując równania bilansu energii adiabatycznej komory zgazowania koksu dla stanu przed wzbogaceniem dmuchu i po wzbogaceniu dmuchu w tlen oraz przyjmując w przybliżeniu:

$$\frac{T_o - T_{ot}}{T - T_{ot}} \approx \frac{T_o}{T}$$

(T_{ot} oznacza temperaturę otoczenia), otrzymuje się:

$$\dot{S} = \dot{S}_o \frac{D_o}{D} \sqrt{\frac{d_K + i_K + \frac{1}{24}\frac{c_K}{O_{2Do}} i_D - g_Ż i_Ż - \frac{c_K}{12} W_{CO} \frac{O_{2Do}}{O_{2D}} \frac{1 + O_{2Do}}{1 + O_{2D}}}{d_K + i_K + \frac{1}{24}\frac{c_K}{O_{2D}} i_D - g_Ż i_Ż - \frac{c_K}{12} W_{CO}}}, \tag{19}$$

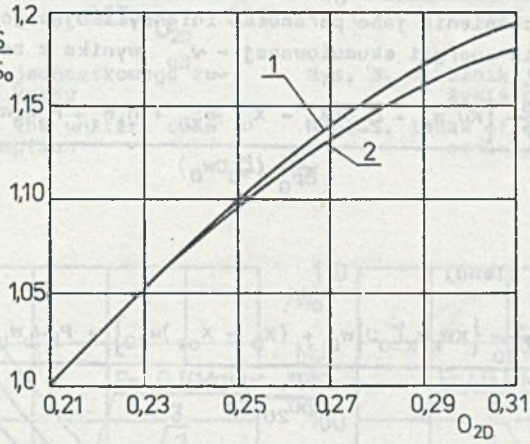
gdzie:

i_K - entalpia fizyczna właściwa koksu doprowadzonego do komory zgazowania,

$g_Ż$, $i_Ż$ - ilość żużla pochodzącego z koksu przypadająca na jednostkę koksu i entalpia fizyczna właściwa żużla,

W_{CO} - wartość opałowa CO.

Na rys. 1 przedstawiono wyniki obliczeń wpływu wzbogacenia dmuchu w tlen na wydajność procesu wielkopiecowego. Dla niewielkich dodatków tlenu ($O_{2D} \approx 23\%$) przyrost wydajności wynosi około 2,6% na 1% przyrostu udziału tlenu w dmuchu. Przy większych udziałach tlenu w dmuchu ($O_{2D} \approx 30\%$) uzyskuje się średni przyrost wydajności około 2% na 1% przyrostu udziału tlenu w dmuchu. Uproszczenia poczynione w przekształceniach powodują zaniżenie końcowych wyników jedynie o kilka procent.



Rys. 1. Wpływ udziału tlenu w dmuchu na wydajność procesu wielkopiecowego
Fig. 1. Influence of the oxygen-fraction in the blast on the capacity of blast furnace

1.5. Wskaźniki skumulowanego zużycia energii

Analizując wpływ ciśnienia w gardzieli wielkiego pieca i dodatku tlenu na skumulowaną energochłonność produkcji surówki wystarczy uwzględnić tylko te składniki skumulowanego zużycia energii w procesie produkcji surówki, które są zależne od p_G i O_{2D}:

$$w_s = KW_K w_K + FW_F w_F + \zeta_D D\left[w_D + (x_D - x_{ot})w_{xD}\right] +$$

$$+ n_t w_t + F_b W_b w_b - E_Z w_G - E_{el} w_{el}, \qquad (20)$$

gdzie:

w_K, w_F, w_b – wartość opałowa koksu, paliwa zastępczego i gazu bogatego uzupełniającego opalanie nagrzewnic, kJ/kg, kJ/kmol,

F_b – zużycie gazu bogatego, kmol/Mg sur.,

ζ_D – mnożnik uwzględniający straty dmuchu,

n_t – zużycie tlenu do wzbogacania dmuchu, kmol/Mg sur.,

E_{el}, E_Z – jednostkowa produkcja energii elektrycznej w zespole rozprężnym gazu oraz energia chemiczna gazu wielkopiecowego dla zewnętrznych odbiorców, kJ/Mg sur.,

$w_K, w_F, w_b, w_G, w_D, w_{XD}, w_t, w_{el}$ – wskaźniki skumulowanego zużycia energii dla koksu, paliwa zastępczego, gazu bogatego, gazu wielkopiecowego, sprężania dmuchu, pary do nawilżania dmuchu, tlenu i energii elektrycznej, kJ/kJ, kJ/kg, kJ/kmol.

W przypadku ciśnienia jako parametru intensyfikującego, mnożnik lokalnego zastępowania energii skumulowanej – ν_{Ep} wynika z zależności:

$$\nu_{Ep} = \frac{-\frac{\partial}{\partial p_G}\left[K w_K w_K + \zeta_D D(X_D - X_{ot}) w_{XD} + n_t w_t + F_b w_b w_b - E_Z w_G - E_{el} w_{el}\right]}{\frac{\partial}{\partial p_G}(\zeta_D D w_D)}, \tag{21}$$

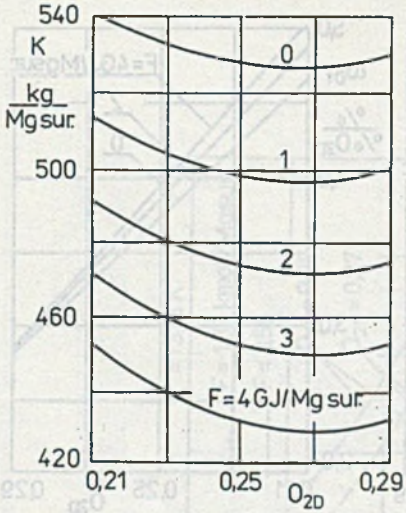
zaś w przypadku tlenu:

$$\nu_{Et} = \frac{-\frac{\partial}{\partial O_{2D}}\left\{K w_K w_K \zeta_D D\left[w_D + (X_D - X_{ot}) w_{XD}\right] + F_b w_b w_b - E_Z w_G - E_{el} w_{el}\right\}}{\frac{\partial n_t}{\partial O_{2D}} w_t}. \tag{22}$$

1.6. Wyniki przykładowych obliczeń wskaźników energetycznych

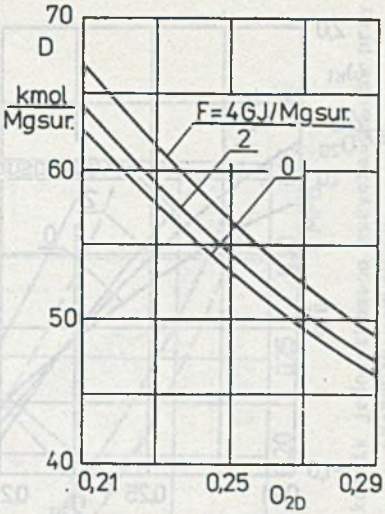
Na podstawie przedstawionego algorytmu opracowano program komputerowy i przeprowadzono przykładowe obliczenia dla wielkiego pieca o objętości 3200 m^3, w którym stosuje się wzbogacanie dmuchu tlenem oraz dodawanie gazu ziemnego zaazotowanego lub wysokometanowego. Wyniki przedstawiono na rys. 2-13. Obliczenia przeprowadzono dla różnych dodatków paliwa zastępczego (1 GJ energii chemicznej gazu ziemnego odpowiada 1,83 kmol gazu ziemnego zaazotowanego lub 1,28 kmol gazu wysokometanowego).

Wzbogacaniu dmuchu tlenem do 27% O_{2D} towarzyszy zmniejszenie jednostkowego zużycia koksu w zakresie 1,5-0%/%O_{2D} oraz dmuchu 5-3%/%O_{2D} (rys.2, 3, 6, 7). Jednocześnie zmniejsza się ilość gazu i zwiększa jego wartość opałowa. Powyżej granicy 27% O_{2D} występuje pewne zwiększenie zużycia



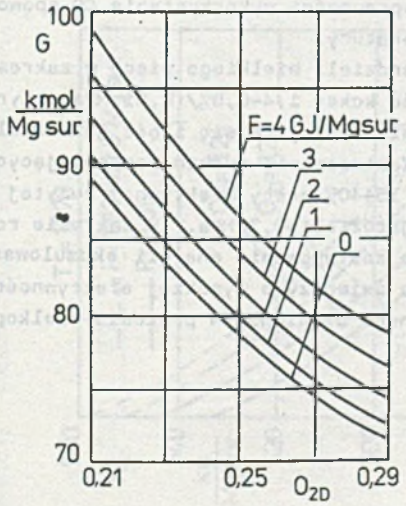
Rys. 2. Wskaźnik jednostkowego zużycia koksu

Fig. 2. Index of the unitary coke consumption



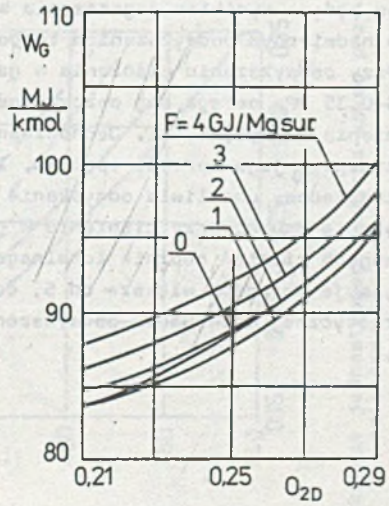
Rys. 3. Wskaźnik jednostkowego zużycia dmuchu

Fig. 3. Index of the unitary blast consumption



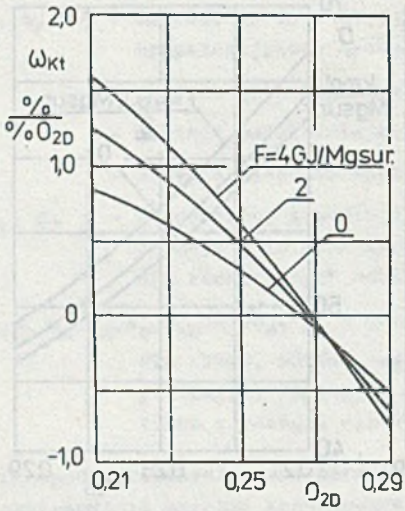
Rys. 4. Wskaźnik jednostkowej produkcji gazu wielkopiecowego

Fig. 4. Index of the unitary blast-furnace gas production



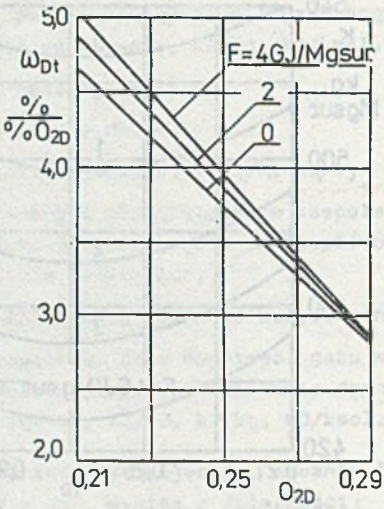
Rys. 5. Wartość opałowa gazu wielkopiecowego

Fig. 5. Heating value of the blast-furnace gas



Rys. 6. Różniczkowy wskaźnik oszczędności koksu

Fig. 6. Differential index of coke economy

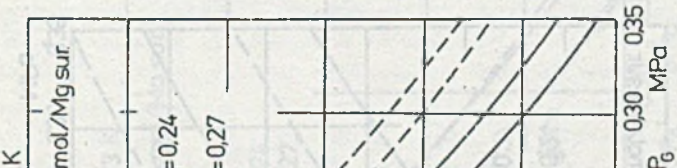


Rys. 7. Różniczkowy wskaźnik oszczędności dmuchu

Fig. 7. Differential index of blast economy

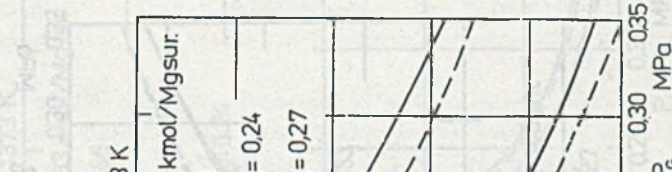
koksu będąc wynikiem pogorszenia sprawności wykorzystania CO spowodowanego nadmiernym podwyższeniem temperatury.

Przy podwyższaniu ciśnienia w gardzieli wielkiego pieca w zakresie 0,15÷0,35 MPa osiąga się oszczędność koksu 1,4-0,5%/(0,01 MPa przyrostu ciśnienia) - rys. 8, 11. Jednocześnie zmniejsza się ilość gazu wielkopiecowego i jego wartość opałowa. Zastosowanie turbin rozprężających gaz wielkopiecowy umożliwia odzyskanie 35÷40% pracy efektywnej zużytej do sprężania dmuchu przy ciśnieniu w gardzieli 0,3 MPa. W zakresie rozpatrywanych ciśnień mnożnik lokalnego zastępowania energii skumulowanej przyjmuje wartości większe od 5, co świadczy o wysokiej efektywności energetycznej stosowania podwyższonego ciśnienia w procesie wielkopiecowym.



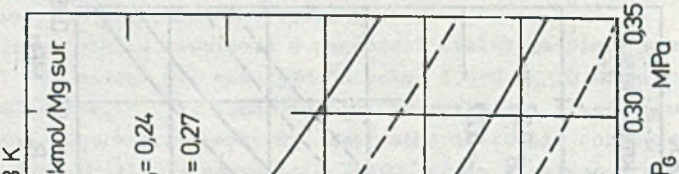
Rys. 8. Wskaźnik jednostkowego zużycia koksu przy zmiennym ciśnieniu

Fig. 8. Index of the unitary consumption of coke at changing pressure inside the furnace



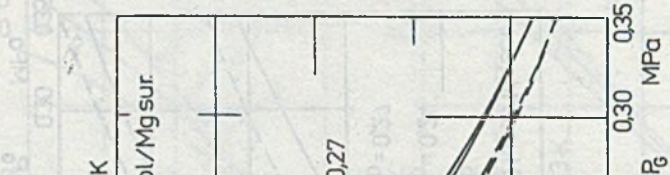
Rys. 9. Wskaźnik jednostkowego zużycia dmuchu przy zmiennym ciśnieniu

Fig. 9. Index of the unitary consumption of blast at changing pressure inside the furnace



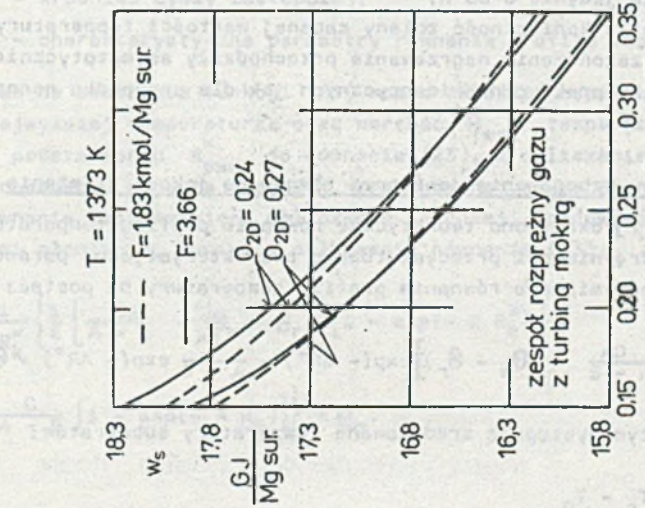
Rys. 10. Wskaźnik jednostkowej produkcji gazu wielkopiecowego przy zmiennym ciśnieniu w piecu

Fig. 10. Index of the unitary production of blast-furnace gas at changing pressure inside the furnace

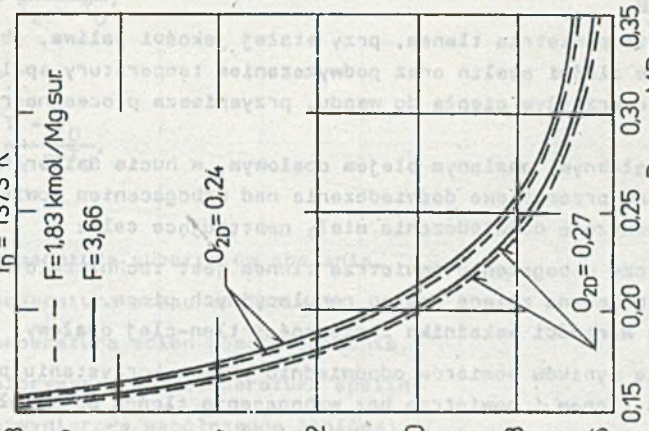


Rys. 11. Różniczkowy wskaźnik oszczędności koksu przy zmiennym ciśnieniu

Fig. 11. Differential index of coke economy at changing pressure inside the furnace



Rys. 12. Wskaźnik skumulowanego zużycia energii
Fig. 12. Index of cumulative energy consumption



Rys. 13. Lokalny mnożnik zastępowania energii skumulowanej
Fig. 13. Local multiplier of the substitution of cumulative energy

2. WPŁYW WZBOGACENIA POWIETRZA TLENEM NA PROCESY CIEPLNE W PIECU WGŁĘBNYM

2.1. Wstęp

Wzbogacenie powietrza tlenem, przy stałej jakości paliwa, objawia się zmniejszeniem ilości spalin oraz podwyższeniem temperatury spalania, co intensyfikuje przepływ ciepła do wsadu, przyspiesza proces nagrzewania wsadu.

W piecu wgłębnym, opalanym olejem opałowym, w hucie Sailor-Rombas, przeprowadzono przemysłowe doświadczenia nad wzbogaceniem powietrza tlenem. Przeprowadzone doświadczenia miały następujące cele:

- ustalenie czy wzbogacenie powietrza tlenem jest technicznie możliwe i czy jest konieczna zmiana nastaw regulacyjnych pieca,
- określenie wartości wskaźnika zamienności tlen-olej opałowy.

Porównanie wyników pomiarów odpowiednio przy wykorzystaniu powietrza wzbogaconego tlenem i powietrza bez wzbogacenia tlenem pozwoliło na sformułowanie następujących wniosków:

- wzbogacenie powietrza tlenem zwiększa szybkość przepływu ciepła do wlewków. Całkowity czas nagrzewania skrócił się z 6 do 5 godzin,
- zmniejszyło się zużycie paliwa o ~22%,
- nie stwierdzono przegrzania górnej części wlewków, temperatura na powierzchni wlewków w pobliżu głowy wlewków wzrosła na końcu procesu nagrzewania jedynie o 25 K,
- nie wystąpiła konieczność zmiany zadanej wartości temperatury, ponieważ wlewki po zakończeniu nagrzewania przechodziły asymptotycznie do stanów termicznych, praktycznie identycznych jak dla przypadku normalnego biegu pieca.

2.2. Wpływ wzbogacenia powietrza tlenem na jakość płomienia

W pracy [7] określono teoretyczne równanie profilu temperatury płomienia, wyodrębniono i przedyskutowano charakterystyczne parametry tego równania. Bezwymiarowe równanie profilu temperatury ma postać:

$$\Theta = \left[\frac{CA}{A - E} - (\Theta_w - \Theta_r)\right]\exp(-ER^*) - \frac{CA}{A - E}\exp(-AR^*) + \Theta_w. \qquad (23)$$

W równaniu tym występują zredukowane temperatury substratów:

$$\Theta_r = \frac{T_r - T_0}{T_k - T_0}, \qquad (24)$$

ścian komory spalania:

$$\Theta_w = \frac{T_w - T_0}{T_k - T_0}, \tag{25}$$

płomienia:

$$\Theta = \frac{T - T_0}{T_k - T_0}, \tag{26}$$

gdzie:

T_r - temperatura substratów spalania,

T_0 - temperatura stanu odniesienia,

T_w - temperatura ścian komory spalania,

T_k - kalorymetryczna temperatura spalin,

R^* - bezwymiarowa współrzędna liniowa:

$$R^* = R/d_0, \tag{27}$$

gdzie:

R - odległość od wylotu palnika,

d_0 - średnica dyszy zastępczej,

A, C, E - charakterystyczne parametry równania profilu temperatury.

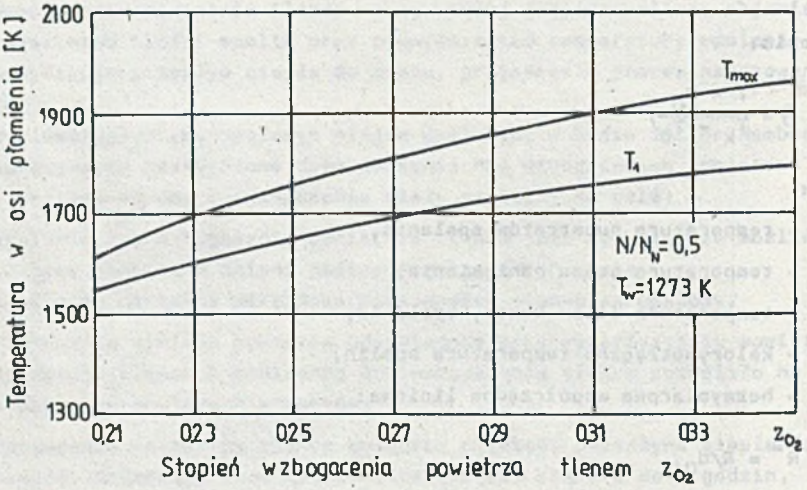
Z warunku na ekstremum funkcji (23) można określić współrzędną R_{max} punktu o najwyższej temperaturze oraz wartość Θ_{max} temperatury maksymalnej, po podstawieniu R^*_{max} do równania (23). W obliczeniach symulacyjnych wprowadzono pojęcia średniej, zredukowanej temperatury w osi płomienia. Równanie umożliwiające obliczenie średniej, zredukowanej temperatury w osi płomienia, wynika z całkowania równania (23):

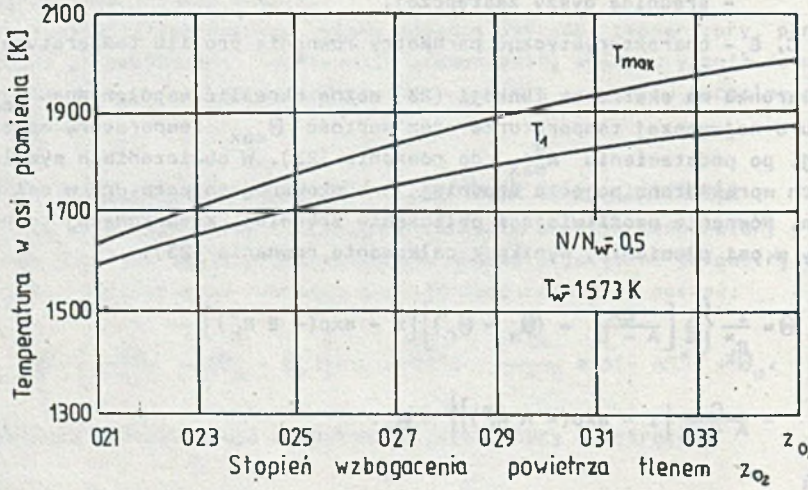
$$\bar{\Theta} = \frac{1}{R^*_k}\left\{\frac{1}{E}\left[\frac{CA}{A - E} - (\Theta_w - \Theta_r)\right]\left[1 - \exp(-E R^*_k)\right] - \right.$$

$$\left. - \frac{C}{A - E}\left[1 - \exp(-A R^*_k)\right]\right\} + \Theta_w, \tag{28}$$

gdzie:

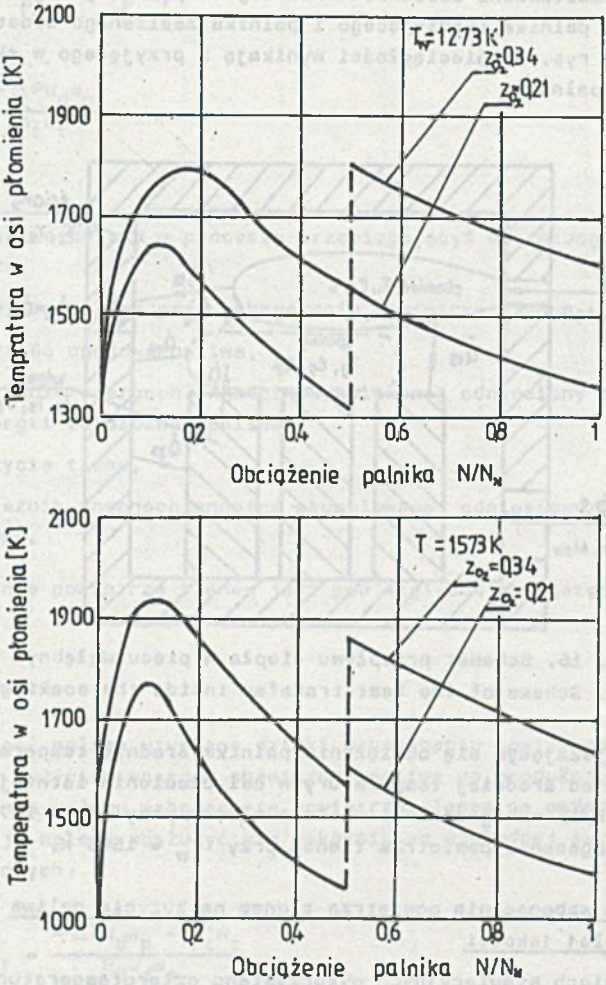
R^*_k - zredukowana odległość ostatniego punktu pomiarowego od wylotu palnika.





Rys. 14. Wpływ wzbogacenia powietrza tlenem na temperaturę płomienia przy obciążeniu palnika $N/N_N = 0,5$

Fig. 14. Influence of the air enrichment with oxygen on the flame temperature at the burner capacity $N/N_N = 0,5$



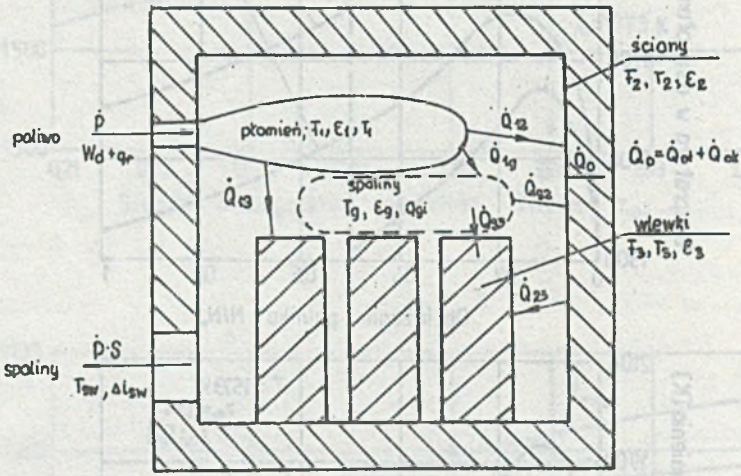
Rys. 15. Zależność średniej temperatury w osi płomienia od mocy palnika istniejącego i palnika zasilanego dodatkowo tlenem

Fig. 15. Dependence of the mean temperature in the burner and burner supplied additionally with oxygen

Średnia temperatura w osi płomienia wynika z równania:

$$T_1 = \bar{\Theta}(T_k - T_0) + T_0. \tag{29}$$

Na rys. 14 przedstawiono wpływ wzbogacenia powietrza tlenem na maksymalną i średnią temperaturę w osi płomienia dla palnika dwustopniowego działania konstrukcji "Biprohut", przy obciążeniu palnika $N/N_N = 0,5$. Na rys. 15 przedstawiono zależność średniej temperatury T_1 w osi płomienia od mocy palnika istniejącego i palnika zasilanego dodatkowo tlenem. Występujące na rys. 15 nieciągłości wynikają z przyjętego w eksploatacji sposobu pracy palnika.



Rys. 16. Schemat przepływu ciepła w piecu wgłębnym
Fig. 16. Scheme of the heat transfer inside the soaking pit

Przy zmniejszającym się obciążeniu palnika średnie temperatury płomienia są wyższe od średniej temperatury w osi płomienia istniejącego średnio od ~10 K/1% wzbogacenia powietrza tlenem przy $T_w = 1273$ K do ~20 K/1% wzbogacenia powietrza tlenem przy $T_w = 1573$ K.

2.3. Wpływ wzbogacenia powietrza tlenem na zużycie paliwa o stałej jakości

W obliczeniach symulacyjnych wykorzystano czterotemperaturowy model matematyczny pieca wgłębnego (płomień, spaliny, wsad, ściany pieca). Na rys. 16 przedstawiono schemat przepływu ciepła w komorze pieca wgłębnego.

Przepływ ciepła zachodzi przez promieniowanie i konwekcję, przy czym konwekcja występuje pomiędzy spalinami a płomieniem, spalinami i wsadem.

Dla sformułowanego modelu matematycznego układu komora pieca - zespół rekuperatorów, opracowano program obliczeniowy w języku PASCAL dla nikrokomputera standardu IBM PC/AT.

Parametry określające zmiany zużycia paliwa o stałej jakości i tlenu technicznego określono za pomocą wskaźnika ω względnej oszczędności paliwa i mnożnika ν efektywności energetycznej:

$$\omega = \frac{P_0 - P}{P_0} = \frac{-\Delta P}{P_0}, \tag{30}$$

$$\nu = \frac{-\Delta P W_d w_p}{n_t w_t}, \tag{31}$$

gdzie:

P_0 - zużycie paliwa w procesie przebiegającym bez wzbogacenia powietrza,

P - zużycie paliwa przy wzbogaceniu powietrza tlenem,

W_d - wartość opałowa paliwa,

w_p - wskaźnik energochłonności skumulowanej odniesiony do jednostki energii chemicznej paliwa,

n_t - zużycie tlenu,

w_t - wskaźnik energochłonności skumulowanej odniesiony do jednostki tlenu.

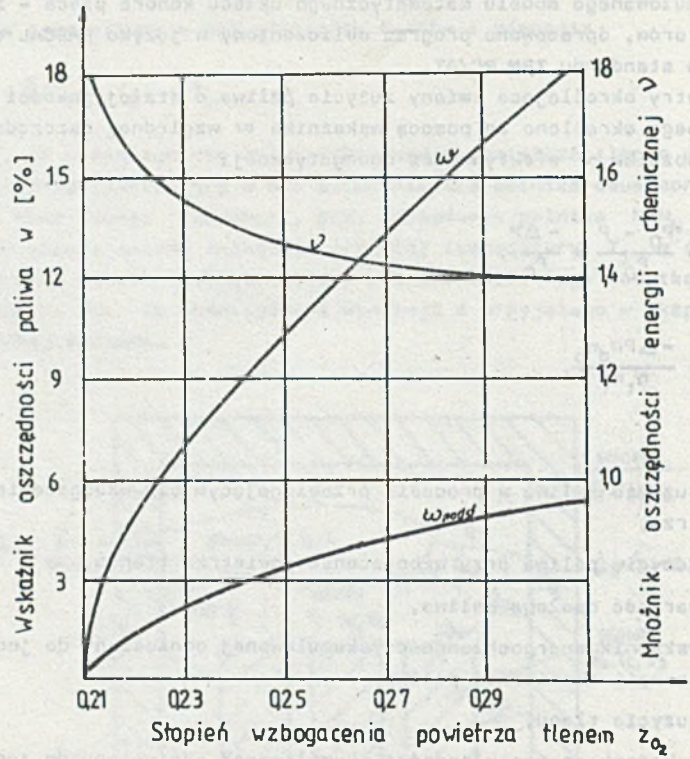
Wzbogacenie powietrza tlenem jest pod względem energetycznym korzystne, jeżeli:

$$\nu > 1. \tag{32}$$

Oszczędność paliwa uzyskaną dzięki wzbogaceniu powietrza tlenem należy porównać ze zużyciem energii chemicznej paliwa na produkcję tlenu. W celu skontrolowania wpływu wzbogacenia powietrza tlenem na oszczędność paliwa w skali kraju należy posłużyć się wskaźnikiem względnej oszczędności paliw podstawowych:

$$\omega_{podst} = \frac{-\Delta P W_d w_p - n_t w_t}{P_0 W_d w_p}. \tag{33}$$

Wpływ wzbogacenia powietrza tlenem na zużycie paliwa przedstawiono na rys. 17.



Rys. 17. Wpływ wzbogacenia powietrza tlenem w fazie nagrzewania i wygrzewania na oszczędność paliwa

Fig. 17. Influence of the air enrichment with oxygen during the phase of heating and soaking on the fuel economy

LITERATURA

[1] Della Casa H., Eyglument B.: Polepszenie wydajności spalania gazu wielkopiecowego za pomocą zastosowania tlenu. Circ. Inf. Techn. 1979, nr 1, s. 55.

[2] Kostowski E.: Analiza czynników wpływających na zużycie paliwa podczas nagrzewania wsadu w piecach wgłębnych. ZN Pol. Śl., Energetyka z. 49, 1973.

[3] Kruczek T.: Analiza wpływu podwyższonego ciśnienia w gardzieli wielkiego pieca na gospodarkę energetyczną zespołu wielkopiecowego. Praca doktorska, ITC Pol. Śl. 1987.

[4] Kruczek T.: Analiza statystyczna wydmuchiwania pyłu w gardzieli wielkiego pieca. Hutnik 1987, nr 5, s. 134.

[5] Kruczek T.: Wpływ ciśnienia w gardzieli wielkiego pieca na skład i temperaturę gazu wielkopiecowego. ZN Pol. Śl. Energetyka z.

[6] Szargut J., Ziębik A.: Wpływ parametrów dmuchu i czynników paliwowo-redukcyjnych na wskaźniki energetyczne zespołu wielkopiecowego. Wyd. PAN, 1983.

[7] Wilk K.: Badania dyfuzyjnych palników gazowych. ZN Pol. Śl. Energetyka z. 85, 1984.

[8] Ziębik A., Madeja M.: The influence of oxygen enrichment on the energy characteristics of the blast-furnace assembly. Bull. de l'Academie Polonaise des Sciences, 1985, nr 3-4.

МЕТОДЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ

Р е з ю м е

В первой части работы представлен метод оценки энергетических эффектов использования обогощенного кислородам дутья и повышенного давления колошникового газа в доменной печи. В работе дан также расчетный пример.

Во второй части представлен термодинамический анализ влияния обогащения воздуха кислородом на расход топлива и на качество газового пламени. Влияние обогащения воздуха кислородом на качество газового пламени определено с помощью теоретико-экспериментальной модели диффузионного газового пламени.

METHODS OF INTENSIFYING OF HEAT PROCESSES IN THE INDUSTRIAL FURNACES

S u m m a r y

In the paper the method of estimation of energy effects when oxygen and high pressure in the top of blast furnace are applied has been described. The results of exemplary calculations have been presented too. In the second part of the paper the thermodynamic analysis of the influence of oxygen enrichment of combustion air on fuel consumption and temperature distribution along the axis of the flame is discussed. In the study the model of a diffusive gas flame has been employed.