ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Nr 104 Energetyka z. 14 1964

JAN SZARGUT, ANDRZEJ ZIĘBIK

Katedra Energetyki Cieplnej

WPŁYW WZBOGACANIA POWIETRZA TLENEM NA STRATY EGZERGII PRZY SPALANIU

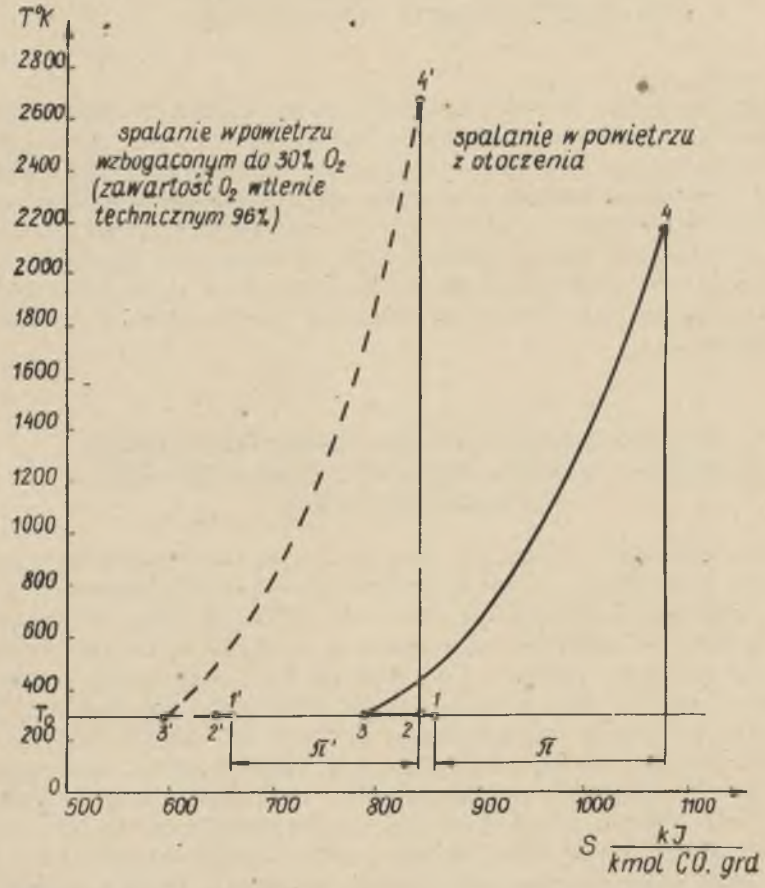
Streszczenie. Stratę egzergii spowodowaną przez nieodwracalność procesu spalania można zmniejszyć m.in. przez wzbogacenie tlenem powietrza do spalania. Skuteczność tej metody można ocenić za pomocą mnożnika zmniejszenia nieodwracalności. Mnożnik ten wyraża stosunek przyrostu egzergii spalin uzyskanych po izobaryczno-adiabatycznym spalaniu do egzergii tlenu użytego do wzbogacania powietrza. Wartości mnożnika zmniejszenia nieodwracalności wyznaczono przykładowo dla spalania tlenku węgla.

1. Straty egzergii w adiabatyczno-izobarycznym procesie spalania, przy stosowaniu powietrza wzbogaconego tlenem

Zgodnie z wywodami pracy [2] analizę zjawisk nieodwracalnych towarzyszących procesowi spalania można ułatwić przyjmując, że w pierwszej kolejności przebiega spalanie adiabatyczne, a dopiero po jego zakończeniu rozpoczyna się wymiana ciepła. W adiabatyczno-izobarycznym procesie spalania występują znaczne straty egzergii. Jedna z metod zmniejszenia nieodwracalności tego procesu polega na zastosowaniu powietrza wzbogaconego w tlen. Na skutek zmniejszenia udziału azotu w powietrzu zmniejsza się ilość spalin, czego następstwem jest podwyższenie temperatury spalania. Temperatura ta wzrasta z dość dobrym przybliżeniem proporcjonalnie do udziału tlenu we wzbogaconym powietrzu. Dzięki podwyższeniu temperatury spalania uzyskuje się wyraźne zwiększenie egzergii spalin po adiabatycznym spalaniu.

Na rysunku 1 pokazano w układzie (T,S) straty egzergii w adiabatyczno-izobarycznym procesie spalania przy stosowaniu powietrza atmosferycznego i powietrza wzbogaconego tlenem. Przyjęto, że paliwem jest czysty tlenek węgla spalany przy nadmiarze tlenu $\lambda = 1,4$. Substraty spalania mają ciśnienie równe ciśnieniu otoczenia i temperaturę równą temperaturze otoczenia $T_o = 291\ ^oK$. Założono spalanie zupełne bez dysocjacji.

Punkt 1 odnosi się do sumarycznej entropii chemicznej substratów spalania. W punkcie 2 zaznaczono sumę entropii składników spalin w stanie równowagi termodynamicznej z otoczeniem. Krzywa 3-4 przedstawia odcinek izobary spalin w zakresie od temperatury otoczenia do temperatury T_4 adiabatycznego spalania. Punkt 3 odnosi się więc do spalin w temperaturze otoczenia i pod ciśnieniem otoczenia. Pole pod krzywą 3-4 określa wartość opałową paliwa. Sumę przyrostów entropii w adiabatyczno-izobarycznym procesie spalania określa wielkość $\Pi = S_4 - S_1$.



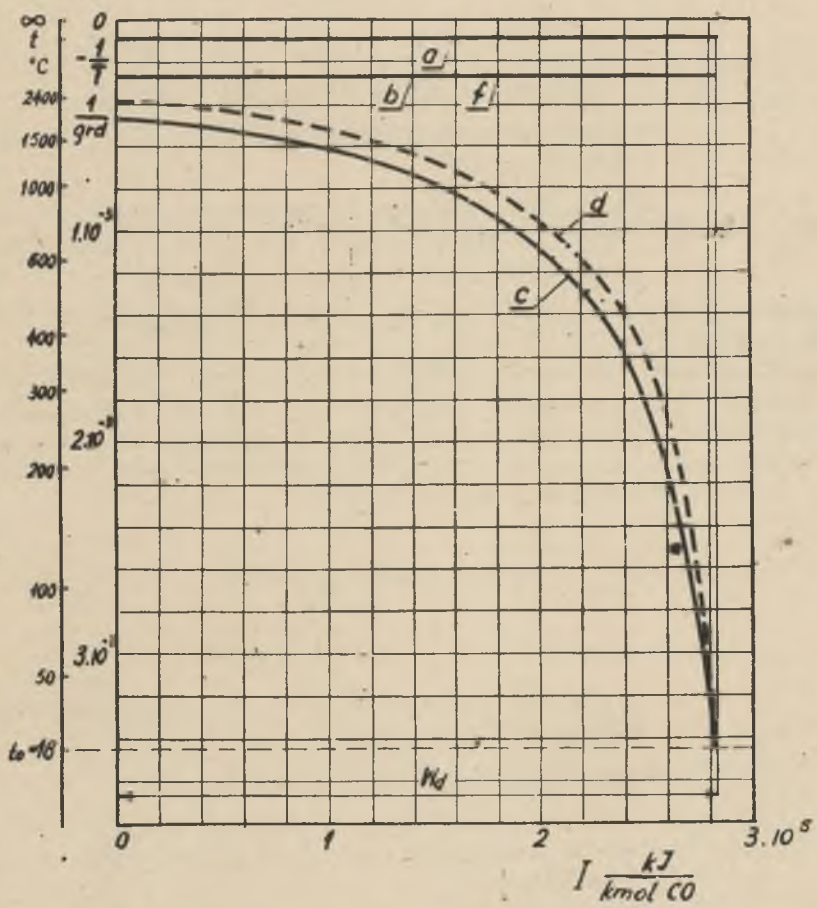
Rys. 1. Straty egzergii przy adiabatyczno-izobarycznym spalaniu w powietrzu atmosferycznym i w powietrzu wzbogaconym tlenem

Po zastosowaniu powietrza wzbogaconego tlenem wszystkie punkty przesuwają się w kierunku mniejszych entropii. Dla spalania w powietrzu zawierającym 30% O_2 (udział molowy) otrzymano punkty 1', 2', 3', 4'. Pole pod krzywą 3'-4' jest równe polu pod krzywą 3-4.

Temperatura T_4' adiabatycznego spalania jest jednak wyższa niż przy spalaniu w powietrzu atmosferycznym. Widać stąd, że suma przyrostów entropii w procesie spalania ulega zmniejszeniu:

$$S_4' - S_1' < S_4 - S_1 \qquad (1)$$

Analizę strat egzergii w adiabatyczno-izobarycznym procesie spalania można też w bardzo przejrzysty sposób przeprowadzić na wykresie Thringa [3]. Wykres ten sporządza się w układzie współrzędnych ($-\frac{1}{T}$, I). Na rysunku 2 pokazano wykres Thringa sporządzony przy założeniach przyjętych dla wykresu na rys. 1. Prostokąt



Rys. 2. Wykres Thringa adiabatyczno-izobarycznego spalania CO z uwzględnieniem wzbogacenia powietrza tlenem

pomiędzy odcinkiem "a" i prostą T_o = idem przedstawia zredukowaną egzergię chemiczną paliwa b_{ch}/T_o. Odcinek "a" nakreślono dla temperatury zastępczego źródła ciepła. Sposób obliczania tej temperatury wyjaśniono w publikacji [2]. Prostokąt pomiędzy odcinkami "a" i "b" określa zredukowaną egzergię chemiczną spalin $B_{ch\ sp}/T_o$ [1]. Krzywa "c" dotyczy spalin otrzymanych po spalaniu w powietrzu atmosferycznym. Pole pomiędzy krzywą "c" i prostą T_o = idem określa zredukowaną fizyczną egzergię spalin $B_{f\ sp}/T_o$.

Stratę egzergii ΔL_o spowodowaną przez nieodwracalność adiabatycznego spalania w powietrzu atmosferycznym można wyznaczyć odejmując sumę egzergii produktów od sumy egzergii substratów spalania:

$$\Delta L_o = b_{ch} + B_L - B_{f\ sp} - B_{ch\ sp} \tag{2}$$

gdzie:

b_{ch} - właściwa egzergia chemiczna paliwa,

B_L - egzergia powietrza atmosferycznego (wielkość równa zeru),

$B_{f\ sp}$, $B_{ch\ sp}$ - egzergia fizyczna i chemiczna spalin otrzymanych po adiabatycznym spalaniu, przypadająca na jednostkę paliwa.

Zredukowaną stratę egzergii $\Delta L_o/T_o$ określa pole pomiędzy krzywą "c" i odcinkiem "b".

Po zastosowaniu powietrza wzbogaconego tlenem otrzymuje się dla spalin krzywą "d" przesuniętą względem krzywej "c" w kierunku wyższych temperatur. Przy wyznaczaniu straty egzergii dla adiabatycznego procesu spalania należy tym razem uwzględnić, że w skład substratów wchodzi dodatkowo tlen techniczny:

$$\Delta L = b_{ch} + B'_L + B_t - B'_{f\ sp} - B'_{ch\ sp} \tag{3}$$

gdzie:

B'_L - egzergia zmniejszonej ilości powietrza atmosferycznego (równa zeru),

B_t - egzergia tlenu technicznego,

$B'_{f\ sp}$, $B'_{ch\ sp}$ - egzergia fizyczna i chemiczna spalin otrzymanych po adiabatycznym spalaniu w powietrzu wzbogaconym tlenem.

Strata egzergii ΔL wyrażona wzorem (3) uwzględnia nieodwracalność tworzenia mieszanki powietrza atmosferycznego z tlenem technicznym. Pominięcie tej części straty egzergii prowadziłoby do zbyt optymistycznej oceny skutków stosowania tlenu.

Zredukowane wyrażenie $(B'_{ch\ sp} - B_t)/T_o$ przedstawiono na rysunku 2 prostokątem zawartym pomiędzy odcinkiem "a" i odcinkiem "f". Wysokość tego prostokąta wynika z relacji:

$$\Delta\left(\frac{1}{T}\right) = \frac{B'_{ch\ sp} - B_t}{W_d\ T_o} \tag{4}$$

gdzie:

W_d - wartość opałowa paliwa.

Odcinek "f" pokrywa się niemal z odcinkiem "b".
Pole pomiędzy krzywą "d" i odcinkiem "f" przedstawia więc zredukowaną stratę egzergii $\Delta L/T_o$ dla adiabatycznego procesu spalania, w którym uczestniczą powietrze, paliwo i tlen techniczny.

2. Mnożnik zmniejszenia nieodwracalności

Wpływ wzbogacania powietrza tlenem na straty egzergii przy spalaniu można ująć podobnie jak w pracy [2], za pomocą wprowadzonego przez J. Szarguta pojęcia mnożnika zmniejszenia nieodwracalności. Całkowy mnożnik zmniejszenia nieodwracalności definiuje się wzorem:

$$\nu = \frac{\Delta B_{sp}}{B_t} \tag{5}$$

gdzie:

B_t - egzergia tlenu technicznego użytego do wzbogacania powietrza,

ΔB_{sp} - przyrost egzergii spalin uzyskany dzięki wzbogacaniu powietrza tlenem.

Należy podkreślić, że wartość ν zależy nie tylko od stopnia wzbogacania powietrza lecz także od czystości tlenu użytego do wzbogacania. W zasadzie udział czystego tlenu w tlenie technicznym użytym do wzbogacania powietrza powinien być jak najbardziej zbliżony do żądanego końcowego udziału tlenu w powietrzu wzbogaconym. W ten bowiem sposób unika się nadmiernych strat egzergii przy mieszaniu powietrza z tlenem technicznym. Jeżeli założy się, że tlen

techniczny użyty do wzbogacania powietrza ma ustalony skład, to różniczkowy mnożnik zmniejszenia nieodwracalności ν_d można zdefiniować wzorem:

$$\nu_d = \frac{dB_{sp}}{b_t \, dG_t} \tag{6}$$

gdzie:

b_t - właściwa egzergia tlenu technicznego użytego do wzbogacania powietrza,

G_t - ilość substancji tlenu technicznego (wielkości B_{sp} i G_t odniesione są do jednakowej ilości substancji paliwa).

3. Przybliżony wzór na różniczkowy mnożnik zmniejszenia nieodwracalności

Mnożnik ν_d zmniejszenia nieodwracalności dotyczący wzbogacenia powietrza tlenem nie zmienia się w tak szerokich granicach jak omówiony w publikacji [2] mnożnik ν_d ujmujący wpływ podgrzewania powietrza. Wielkość bowiem G_t we wzorze (6) może zmieniać się od zera do wartości wynikającej z zapotrzebowania tlenu do spalania. Przy $G_t = 0$ wartość ν_d nie jest nieskończenie wielka, z drugiej zaś strony nawet przy pełnym pokryciu zapotrzebowania tlenu do spalenia za pomocą tlenu technicznego uzyskuje się wartości $\nu_d > 1$.

Aby zbadać granice w jakich zmieniają się wartości ν_d najlepiej posłużyć się przybliżonym wzorem na mnożnik ν_d. Przybliżenie oparli autorzy na następujących założeniach:

1) Pomija się zmiany egzergii chemicznej spalin. Obliczenia próbne wykazały, że zmiany te nie przekraczają 0,5% egzergii spalin.

2) Przyjmuje się, że w rozpatrywanym zakresie ciepło właściwe spalin nie zależy od temperatury.

3) Nie uwzględnia się dysocjacji spalin.

Przyjęto ponadto, że stosunek nadmiaru tlenu przy spalaniu jest stały i że udział czystego tlenu w tlenie technicznym ma stałą wartość.

Fizyczną egzergię spalin pod ciśnieniem otoczenia, przy założeniu stałego ciepła właściwego wyraża wzór:

$$B_{f\,sp} = n_{sp} (Mc_p)(T - T_o - T_o \ln \frac{T}{T_o}) \tag{7}$$

Pojemność cieplna spalin zmniejsza się ze stopniem wzbogacenia powietrza podług następującego wzoru:

$$n_{sp}\,(Mc_p) = n_{sp\,o}\,(Mc_p)_o - n_t\,(Mc_p)_{N_2}\left(\frac{[O_2]_t}{0,21} - 1\right) \qquad (8)$$

gdzie:

$n_{sp\,o}$ - ilość substancji spalin przy spalaniu w powietrzu atmosferycznym w kmol/jedn. paliwa,

n_t - ilość substancji tlenu technicznego w kmol/jedn. paliwa,

$(Mc_p)_o$ - molowe ciepło właściwe spalin otrzymanych po spalaniu w powietrzu atmosferycznym,

$[O_2]_t$ - udział molowy czystego tlenu w tlenie technicznym.

Zgodnie z założeniem, że egzergia chemiczna spalin nie ulega zmianie, w równaniu (6) w miejsce dB_{sp} można podstawić wynikającą z równania (7) wartość $dB_{f\,sp}$. Po wykorzystaniu wzoru (8) z równania (7) otrzymuje się:

$$dB_{f\,sp} = n_{sp\,o}(Mc_p)_o\,\frac{T-T_o}{T}\,dT - (Mc_p)_{N_2}\left(\frac{[O_2]_t}{0,21} - 1\right)\left[\,n_t\,\frac{T-T_o}{T}\,dT + \right.$$

$$\left. + dn_t\,(T - T_o - T_o \ln\frac{T}{T_o}\right] \qquad (9)$$

gdzie:

T - temperatura kalorymetryczna spalania.

Temperaturę kalorymetryczną spalania można obliczyć za pomocą bilansu energetycznego:

$$n_{sp\,o}\,(Mc_p)_o\,(T_{kal\,o} - T_o) =$$

$$= \left[n_{sp\,o}\,(Mc_p)_o - n_t\,(Mc_p)_{N_2}\left(\frac{[O_2]_t}{0,21} - 1\right)\right](T - T_o) \qquad (10)$$

gdzie:

$T_{kal\ o}$ - temperatura kalorymetryczna spalania w powietrzu atmosferycznym.

Z równania (10) wynika:

$$n_{sp\ o}\,(Mc_p)_o\,dT = (Mc_p)_{N_2}\left(\frac{[O_2]_t}{0,21} - 1\right)\left[n_t\,dT + dn_t\,(T - T_o)\right] \qquad (11)$$

Po podstawieniu zależności (11) do wzoru (9) otrzymuje się wyrażenie określające $dB_{f\ sp}$, które z kolei można podstawić do wzoru (6) otrzymując ostatecznie

$$\nu_d = \frac{(Mc_p)_{N_2}}{(Mb)_t}\left(\frac{[O_2]_t}{0,21} - 1\right) T_o\left(\ln\frac{T}{T_o} - \frac{T - T_o}{T}\right) \qquad (12)$$

gdzie:

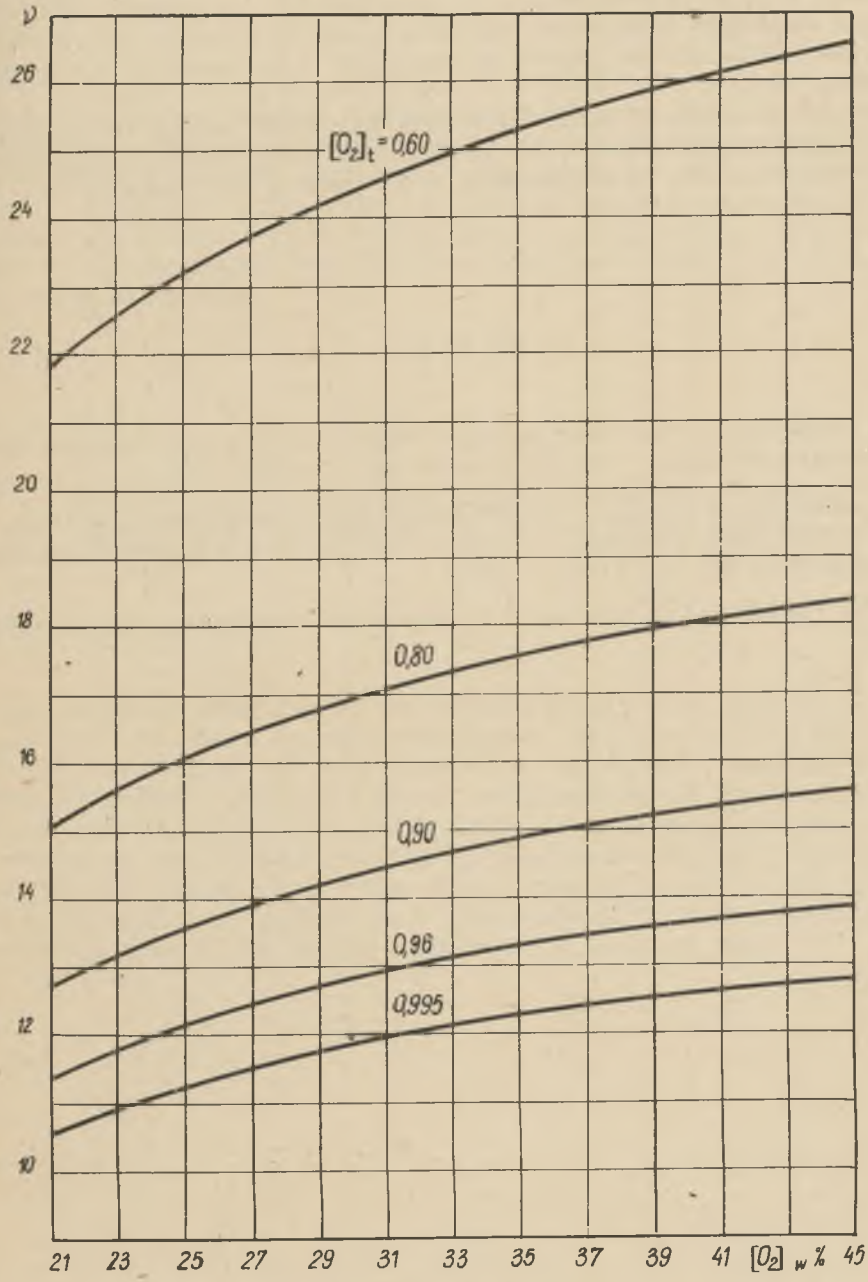
$(Mb)_t$ - molowa egzergia właściwa tlenu technicznego.

Wzór (12) pozwala skontrolować wpływ stopnia wzbogacania powietrza na mnożnik ν_d. Przy ilości tlenu technicznego zmierzającej do zera temperatura T we wzorze (12) zmierza do wartości $T_{kal\ o}$ odpowiadającej kalorymetrycznej temperaturze spalania w powietrzu atmosferycznym. Przy maksymalnej ilości tlenu technicznego pokrywającej całkowicie zapotrzebowanie tlenu do spalania, temperatura T we wzorze (12) jest kalorymetryczną temperaturą spalania w czystym tlenie technicznym.

4. Spalanie tlenku węgla w powietrzu wzbogaconym tlenem

Na rysunku 3 pokazano wyniki obliczenia mnożnika całkowego ν dla spalania tlenku węgla przy stosunku nadmiaru tlenu $\lambda = 1,4$. Nie uwzględniono dysocjacji spalin. Na osi odciętych podano wartości udziału molowego tlenu $[O_2]_w$ we wzbogaconym powietrzu. Wykres zawiera krzywe stałej czystości tlenu technicznego użytego do wzbogacania.

Wykres na rysunku 3 został sporządzony dla konkretnego przykładu, mimo to można jednak wyciągnąć z niego pewne ogólne wnioski. Przy stałej czystości tlenu technicznego mnożnik zmniejszenia nieodwracalności rośnie ze wzrostem stopnia wzbogacenia powietrza. Graniczne wartości ν dla $[O_2]_w \to 0,21$ (tj. dla malejącego do zera zużycia tlenu technicznego) obliczono, wyrażając izobaryczną



Rys.3. Całkowy mnożnik zmniejszenia nieodwracalności przy spalaniu CO

nadwyżkę entropii spalin przybliżonym równaniem drugiego stopnia. Równanie aproksymujące daje w porównaniu z danymi tablicowymi dokładność $\pm$ 0,3%. Aproksymację tę zastosowano oczywiście tylko w zakresie badanych temperatur adiabatycznego spalania. Jak widać z wykresu, najmniejsze graniczne wartości ν są znacznie większe od jedności.

Wartość mnożnika ν bardzo wyraźnie zależy od stopnia czystości tlenu technicznego użytego do wzbogacania powietrza. Im mniejsza jest czystość tlenu technicznego, tym większy jest mnożnik ν.

LITERATURA

[1] J. SZARGUT - Klasyfikacja pojęć egzergii, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Energetyka nr 14, Gliwice 1964.

[2] J. SZARGUT, P. WEISS - Wpływ podgrzania powietrza na straty egzergii przy spalaniu, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Energetyka nr 14, Gliwice 1964.

[3] M.W. Thring - The science of flames and furnaces, London 1952.

ВЛИЯНИЕ ОБОГАЩЕНИЯ ВОЗДУХА КИСЛОРОДОМ НА ПОТЕРИ ЭКСЕРГИИ ПРИ ГОРЕНИИ

Р е з ю м е

Потери эксергии, вызванные необратимостью горения, можно уменьшить, применяя обогащение воздуха кислородом. Эффективность этого метода можно оценить при помощи множителя уменьшения необратимости. Эта величина выражает соотношение прирощения эксергии продуктов горения к эксергии технического кислорода, использованного к обогащению воздуха. Множитель уменьшения необратимости всегда больше единицы и его значение зависит, главным образом, от концентрации технического кислорода. Разработана диаграмма множителя уменьшения необратимости для горения CO в обогащенном воздухе.

THE INFLUENCE OF AIR ENRICHEMENT INTO THE OXYGEN ON THE EXERGY LOSSES IN THE COMBUSTION PROCESSES

S u m m a r y

The exergy losses due to the irreversibility of combustion process can be cut down by air enrichement into the oxygen. Effectiveness of this method can be estimated by using the "irreversibility decrease factor" (IDF). The above mentioned factor is defined by the authors as a ratio of exergy increase of combustion products by exergy of oxygen used for air enrichement. The IDF is always greater than the unity and its value depends strongly upon the purity of technical oxygen used. The diagram for IDF determination for the CO combustion in the enriched air, was set up.