

Maciej MICHAŁOWSKI, Maciej ROZPONDEK

Seweryn STOJER

Instytut Metalurgii
Politechniki Śląskiej

STABILNOŚĆ PŁOMIENIA DYFUZYJNEGO PRZY SPALANIU GAZU KOKSOWNICZEGO W PIECACH HUTNICZYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań spalania gazu koksowniczego w przestrzeni otwartej i zamkniętej. Stwierdzono, że zasadnicza różnica w przebiegu spalania dyfuzyjnego w przestrzeni otwartej i zamkniętej polega na występowaniu tylko w warunkach przestrzeni zamkniętej płomieni oderwanych w tzw. obszarze Z. Określono, że obszar Z rozszerza się znacznie ze wzrostem temperatury ścian.

Wyniki badań opracowano matematycznie.

1. WPROWADZENIE

Pomimo powszechnego używania palników dyfuzyjnych gazowych w piecach hutniczych, nie poświęcono dotychczas należytej uwagi dla zbadania zachowania się płomienia dyfuzyjnego w zamkniętej przestrzeni roboczej pieca. Wykonano wiele prac poświęconych płomieniom dyfuzyjnym w przestrzeni otwartej, chociaż taki przebieg spalania jest rzadko stosowany w praktyce przemysłowej.

Spalanie gazów w przestrzeni zamkniętej, mającej łączność z otaczającą atmosferą tylko poprzez system doprowadzania powietrza spalania i odprowadzenia spalin, przebiega w warunkach o wiele bardziej złożonych niż spalanie w przestrzeni otwartej. Wymiana ciepła pomiędzy fazą gazową i powierzchnią wewnętrzną ścian, prędkość i kierunek przepływu gazów w przestrzeni zamkniętej, stosunek ilościowy paliwa gazowego do powietrza, wynikają z budowy układu piecowego i wartości parametrów jego prowadzenia i muszą być stosowane w bardzo szerokim zakresie. Wszystkie te czynniki wywierają wpływ na ostateczny charakter płomienia, a więc i na jego stabilność. W porównaniu z tą różnorodnością możliwych warunków, spalanie dyfuzyjne w przestrzeni otwartej może być sterowane przez znacznie mniejszą ilość czynników. Fakty te spowodowały, że duża ilość prac badawczych dotyczy łatwiejszego problemu spalania w przestrzeni otwartej, zaś złożoność zjawisk spalania w przestrzeni zamkniętej spowodowała, że ilość prac na ten temat jest o wiele mniejsza, a ich wyniki dość skromne.

Do niedawna podobny stan badań był w zakresie płomieni kinetycznych. Dopiero obszerna praca [3] o zachowaniu się płomienia kinetycznego w przestrzeni zamkniętej uzupełniła liczne informacje o przebiegu spalania kinetycznego w przestrzeni otwartej.

Jedną z istotnych cech płomienia jest jego stabilność. Decyduje ona o zakresie stosowalności, wpływając bezpośrednio na bezpieczeństwo pracy urządzenia. Płomienie dyfuzyjne i kinetyczne mogą oderwać się od wylotu palnika i zgasnąć. Płomień kinetyczny może ponadto cofnąć się do wnętrza palnika, co także może niekiedy doprowadzić do zgaśnięcia.

Dwie istotne różnice stabilności płomieni kinetycznych w przestrzeniach otwartej i zamkniętej [3] pozwalały przypuszczać, że stabilności płomieni dyfuzyjnych w przestrzeni otwartej [2] i zamkniętej będą także różniły się pomiędzy sobą.

Płomienie dyfuzyjne w przestrzeniach roboczych pieców przemysłowych posiadają wiele cennych zalet, a to:

- małą wrażliwość na ciśnienia w komorze spalania,
- znaczną stabilność w dużym zakresie mocy palnika,
- niemożliwość cofnięcia się płomienia,
- łatwość sterowania długością płomienia, a tym samym rozkładem temperatury.

2. STABILNOŚĆ PŁOMIENIA DYFUZYJNEGO W PRZESTRZENI OTWARTEJ

Stabilność płomienia określono jako naturalne zjawisko utrzymywania się płomienia przy wylocie palnika. W przestrzeni otwartej spalanie dyfuzyjne gazu może przebiegać:

- a) przy wypływie tylko strugi paliwa gazowego,
- b) przy wypływie strug paliwa gazowego i powietrza.

W pierwszym przypadku o stabilności płomienia decydują: skład chemiczny gazu i prędkość jego wypływu. W drugim przypadku dodatkowy wpływ wywierają jeszcze: parametry wypływu powietrza i geometria wypływu obu strug.

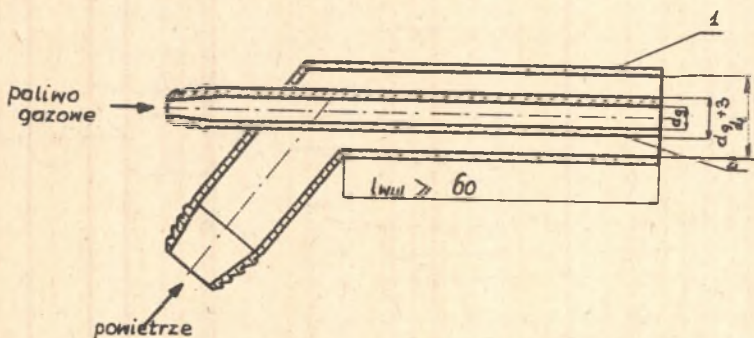
W oparciu o powyższe dane opracowano kryteria [2, 4] liczbowe określające warunki, w których należy się spodziewać:

- płomienia stabilnego,
- płomienia oderwanego,
- zdmuchnięcia płomienia.

Kryteria te przedstawił wykreslinie w układzie współrzędnych, na których naniesiono wartości parametrów uznanych za istotne dla stabilności płomienia, np. w układzie: współczynnik nadmiaru powietrza - suma prędkości wypływu gazu i powietrza [2]. Układ taki przyjęli również autorzy dla określenia warunków stabilności płomienia w przestrzeni zamkniętej.

3. BADANIE STABILNOŚCI PŁOMIENIA DYFUZYJNEGO W PRZESTRZENI ZAMKNIĘTEJ

Oprócz wymienionych wyżej parametrów autorzy uznali, że najważniejszym dodatkowym parametrem, charakteryzującym przestrzeń roboczą, jest jej temperatura. Potraktowano ją jako trzecią zmienną dla określenia kryteriów stabilności płomienia. Jako wielkości stałe uznano: geometrię przestrzeni roboczej (walec) i palników (rys. 1), skład chemiczny gazu (tabl.1) oraz temperaturę substratów (ok. 20°C). Dla wszystkich palników zachowano stosunek $\frac{F}{F_g} = 4$, dzięki czemu przy spalaniu ze współczynnikiem nadmiaru powietrza $\lambda = 4$ prędkości wypływu obu substratów są w przybliżeniu takie same. Niezmienny wpływ tych stałych wielkości nie jest więc istotny dla oceny oddziaływania trzech wybranych zmiennych (współczynnik nadmiaru powietrza, suma prędkości wypływu substratów, temperatura przestrzeni roboczej), i został pominięty w dalszych rozważaniach.



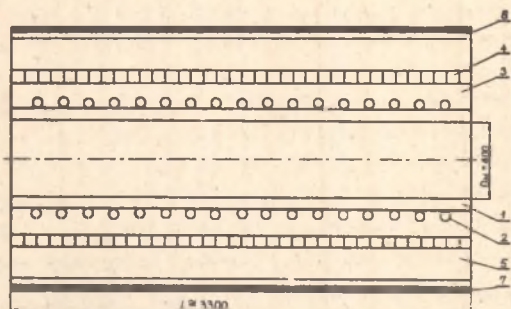
Rys. 1. Schemat palnika doświadczalnego

d_g - średnica dyszy gazowej, $d_g + 3$ - średnica wewnętrzna wylotu powietrza, d_1 - zewnętrzna średnica wylotu powietrza

Tablica 1

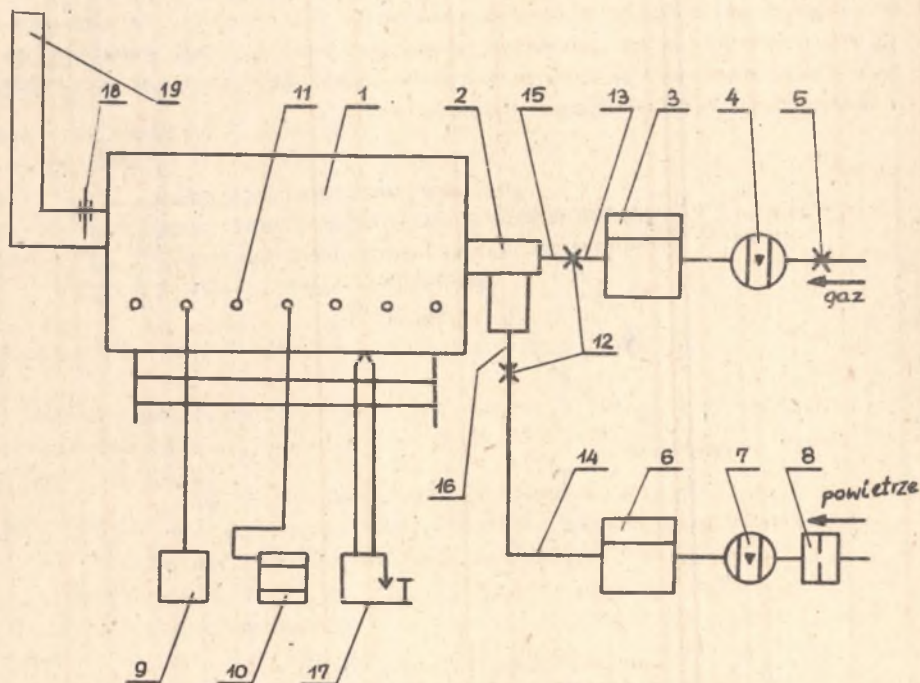
Skład chemiczny gazu opałowego

Składnik	Zawartość
	% obj. (mol)
CO ₂	2,6
C _m H _n	2,8
O ₂	1,8
CO	9,8
H ₂	51,5
CH ₄	24,0
N ₂	7,5



Rys. 2. Doświadczalna komora spalania - przekrój podłużny

1 - wymurówka ceramiczna, 2 - oporowe elektryczne elementy grzejne, 3 - izolacja wysokotemperaturowa, 4 - sznur azbestowy, 5 - wełna żużłowa, 6 - płyta azbestowa, 7 - pancierz



Rys. 3. Schemat układu badawczego

1 - doświadczalna komora spalania, 2 - palnik doświadczalny, 3 - licznik gazowy, 4 - rotametr gazowy, 5 - zawór gazowy, 6 - licznik powietrza, 7 - rotametr powietrza, 8 - zwężka powietrza, 9 - ciśnieniomierz, 10 - rejestrator temperatury, 11 - otwory pomiarowe, 12 - regulatory przepływu, 13, 15 - przewód gazu koksowniczego, 14, 16 - przewód powietrzny, 17 - układ automatycznej regulacji temperatury ścian, 18 - zasuwa spalin, 19 - odciąg spalin

Aby uzyskać miarodajne porównanie stabilności płomienia dyfuzyjnego w przestrzeni otwartej i zamkniętej, należało spalać w obu przypadkach ten

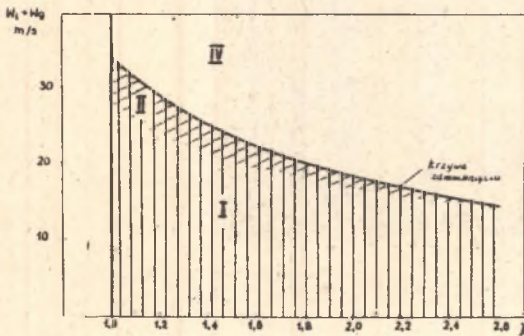
sem gaz w tym samym palniku. Charakterystycznymi cechami przestrzeni zamkniętej, stanowiącej komorę spalania, są między innymi:

- wypełnienie jej spalinami,
- określona jej temperatura, będąca jednym ze zmiennych wielkości określających warunki stabilności płomienia.

Wypełnienie komory spalinami uzyskiwano przez spalanie w niej gazu do chwili zużycia znajdującego się tam powietrza, co stwierdzano na podstawie analizy chemicznej uchodzących gazów. Żądaną temperaturę komory uzyskiwano przez spalanie w niej gazu oraz za pomocą dodatkowego trójstrefowego elektrycznego układu grzejjego, sterowanego przez system automatyki, otrzymujący sygnał sterujący od temperatury ścian. Ponieważ wartość sygnału sterującego, czyli żądanej temperatury komory, była równoczesnego nagrzewania gazem i energią elektryczną, system automatyki wyłączał prąd tym częściej, im więcej spalano gazu. Schemat komory przedstawiono na rys. 2, a schemat całego układu badawczego na rys. 3.

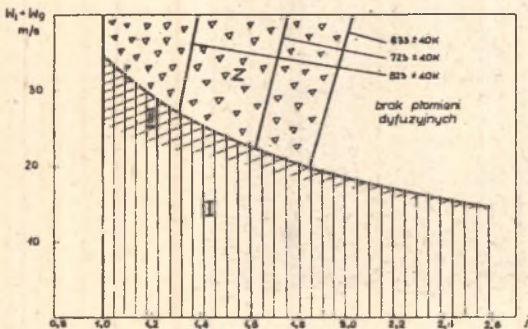
Dla zilustrowania wyników badań, prowadzonych na palnikach o średnicy dyszy gazowej d_g od 7 do 16 mm, wybrano palnik o wartości $d_g = 13,5$ mm.

Stabilność uzyskanych płomieni przedstawiono na rys. 4 i 5.



Rys.4. Wykres stabilności płomieni dyfuzyjnych w przestrzeni otwartej dla gazu koksowniczego, przy $d_g = 13,5$ mm

I - płomień przyległy, II - płomień przyległy i niesymetryczny (b. stabilne), IV - brak płomieni dyfuzyjnych



Rys.5. Wykres stabilności płomieni dyfuzyjnych w przestrzeni zamkniętej dla gazu koksowniczego, przy $d_g = 13,5$ mm

- płomień przyległy,
 - płomień przyległy i płomień niesymetryczny (b. stabilne),
 - płomień oderwane,
 - brak płomienia,
 - wytwórcze płomień oderwane obczar Z



Rys. 6. Płomień przyległy



Rys. 7. Płomień niesymetryczny



Rys. 8. Płomień oderwany

W obszarze I występują tylko płomienie przyległe (rys. 6). Przy wzroście współczynnika nadmiaru powietrza λ , bądź sumy prędkości wypływu powietrza i gazu - płomień przyległy przechodzi w obszar II, w którym bardziej stabilny od płomienia przyległego jest płomień niesymetryczny (rys.7).

Przy dalszym zwiększaniu współczynnika nadmiaru powietrza lub sumy prędkości wypływu substratów płomienie przechodząc w obszar IV ulega zdmuchnięciu wzdłuż krzywej zdmuchnięcia (rys. 4). W przestrzeni otwartej przy spalaniu gazu koksowniczego z nadmiarem powietrza nie stwierdzono występowania płomieni oderwanych. Natomiast przy spalaniu z nadmiarem powietrza w warunkach przestrzeni zamkniętej otrzymuje się dodatkowy obszar stabilności, tzw. obszar Z [1] (rys. 5), w którym występują płomienie oderwane. Krzywa zdmuchnięcia płomienia w warunkach przestrzeni zamkniętej przesuwają się poza obszar Z, ponieważ w obszarze Z wzdłuż krzywej zdmuchnięcia następuje tzw. wtórne oderwanie się płomienia. Występowanie tych płomieni wywołane jest recyrkulacją spalin i ciepłym oddziaływaniem ścian. Obszar Z rozszerza się znacznie ze wzrostem temperatury ścian. Krzywą zdmuchnięcia (i wtórnego oderwania) przedstawiono równaniem:

$$w_1 + w_g = A d_g^N \lambda^M,$$

gdzie:

- d_g - średnica dyszy gazowej, mm,
 w_1 - prędkość wypływu powietrza, $\frac{m}{s}$,
 w_g - prędkość wypływu gazu, $\frac{m}{s}$,
 A, N, M - współczynniki wg tablicy 2.

Tablica 2

Zestawienie współczynników równania prędkości zdmuchnięcia płomieni dyfuzyjnych w przestrzeni zamkniętej

$$w_1 + w_g = A d_g^N \lambda^M \quad (1)$$

dla $\lambda = 1 - 2,6$ i $d_g = 7,9 - 15,9$ mm

Średnica dyszy gazowej d_g mm	A	N	M
7,9	13,4	0,414	- 1,1992
11,2	13,4	0,387	- 0,9194
13,5	13,4	0,3665	- 0,9169
15,9	13,4	0,3654	- 0,9677

Zestawienie współczynników równania prędkości zdmuchnięcia płomieni dyfuzyjnych w przestrzeni Z $w_1 + w_g = B + C \lambda z$ dla ustalonych wartości średnicy dyszy gazowej d_g i temperatury ścian przestrzeni zamkniętej

Srednica dyszy gazowej d_g mm	Temperatura ścian przestrzeni zamkniętej $^{\circ}C$	B	C	Współczynnik nadmiaru powietrza w zakresie
7,9	350	- 260,968	242,864	$\lambda = 1,2 - 1,23$
	450	- 221,419	196,063	$\lambda = 1,25 - 1,31$
	560	- 168,518	137,632	$\lambda = 1,37 - 1,47$
11,2	350	- 146,896	142,328	$\lambda = 1,25 - 1,33$
	450	- 247,667	198,557	$\lambda = 1,38 - 1,47$
	560	- 314,185	213,583	$\lambda = 1,57 - 1,73$
13,5	350	- 197,018	171,379	$\lambda = 1,3 - 1,4$
	450	- 199,485	136,157	$\lambda = 1,64 - 1,8$
	560	- 171,068	103,948	$\lambda = 1,87 - 2,09$
15,9	350	- 110,536	101,924	$\lambda = 1,37 - 1,42$
	450	- 210,249	137,46	$\lambda = 1,7 - 1,9$
	560	- 231,41	132,785	$\lambda = 1,9 - 2,1$

Ustalono zależność zdmuchnięcia płomienia oderwanego w obszarze Z, przy $T = \text{const.}$ i $d_g = \text{const.}$ w postaci:

$$w_l + w_g = B + C\lambda.$$

gdzie:

B, C - współczynniki wg tablicy 3.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wyniki badań stabilności płomieni dyfuzyjnych w przestrzeni zamkniętej potwierdziły znaczne różnice w przebiegu zjawiska spalania w porównaniu do spalania w przestrzeni otwartej. Najistotniejszą różnicą jest to, że w przestrzeni zamkniętej występuje szeroki zakres płomieni oderwanych od wartości $\lambda < 1$ do $\lambda \approx 2$, a w przestrzeni otwartej płomień oderwany występuje tylko przy $\lambda < 1$. Stwierdzono, że płomienie oderwane w przestrzeni zamkniętej wykazują na tyle znaczną stabilność, że nie grożą zgaśnięciem. Wzrost temperatury przestrzeni roboczej sprzyja tej stabilności.

Płomienie oderwane w przestrzeni zamkniętej wykazują specyficzną zdolność stabilnego trwania w obszarze Z. Zjawisko to jest wynikiem równoczesnego oddziaływania procesu recyrkulacji gazów i wymiany ciepła w układzie jednofazowym gazów jak i dwufazowym, gazów i powierzchni ciał stałych. Okazało się również [1], że obszar Z rozszerza się ze wzrostem temperatury przestrzeni zamkniętej i ze zwiększeniem średnicy dyszy gazowej.

Stwierdzono także [1], że zdmuchnięcie płomienia w przestrzeni zamkniętej, nawet o temperaturze powyżej temperatury zapłonu gazu, można osiągnąć najłatwiej poprzez zwiększenie współczynnika nadmiaru powietrza. W niższych temperaturach jego wpływ jest jeszcze wyraźniejszy (rys. 5). Wskazuje to na konieczność dokładnej kontroli ustalonego stosunku natężeń przepływów powietrza i gazu w okresach, gdy piec jest chłodny. Przekroczenie ustalonej wartości tego stosunku doprowadza łatwo do zdmuchnięcia płomienia, a w konsekwencji do wybuchu.

LITERATURA

- [1] Rozpondek M.: Warunki stabilności płomienia dyfuzyjnego przy spalaniu gazu koksowniczego w hutniczych piecach grzewczych. Praca doktorska, Politechnika Śląska Wydział Metalurgiczny, Katowice, 1978.
- [2] Konkiew A.: Awtostabilizacja dyfuzyjnego gazowego fackała. Archiwum Procesów Spalania, vol. V., 1974, nr 2.
- [3] Hutny W.: Zjawisko odrywania płomienia przy spalaniu gazu koksowego i ziemnego w przestrzeni zamkniętej. Praca doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza Wydział Metalurgiczny, Kraków 1972.
- [4] Barr J.: Czwarty symposium po wprostach górnictwa i detonacyjnych wołn. Oborongiz 1958, s. 534.

СТАБИЛЬНОСТЬ ДИФФУЗИОННОГО ПЛАМЕНИ ПРИ СГОРАНИИ КОКСОВОГО
ГАЗА В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧАХ

Р е з ю м е

В статье даны результаты исследований сжигания коксового газа в закрытом и открытом пространстве.

Доказывается, что основная разница в процессе диффузионного сжигания в открытом пространстве и закрытом состоит в том, что они выступают только в условиях закрытого пространства оторванного пламени в так называемой области Z.

Определено, что область Z расширяется значительно с увеличением температуры стен.

Результаты исследований разработано математически.

DIFFUSION FLAME STABILITY DURING COKE-OVEN GAS COMBUSTION
IN THE METALLURGICAL FURNACES

S u m m a r y

The paper presents the results of coke-oven gas combustion in the open and closed space. The essential difference in the process of diffusion combustion in the closed and open space was stated to be the occurrence of the detached flames only in the conditions of the closed space, in the so called Z area.

The Z area was determined to be reasonably enlarging together with the increase of walls temperature.

The results have been interpreted mathematically.