

Pavel NOSKIEVIČ

Katedra Energetyki

Vysoka Škola Baňská w Ostrawie

WPŁYW DYFUZJI NA PROCES SPALANIA W PALENISKU PYŁOWYM

Streszczenie. Przeanalizowano wpływ dyfuzji w palenisku kotła pyłowego na proces spalania. Przedstawiono metodykę wyznaczania współczynnika wnikania masy za pomocą pomiarów w palenisku za pomocą chłodzonej wodą sondy. Na przykładzie 3 wybranych badań wyjaśniono sposób zastosowania uzyskanych wyników badań oraz rozpatrzone możliwości metody przy rozwiązywaniu problemów związanych ze spalaniem różnych paliw.

1. WSTĘP

Proces spalania pyłu węglowego składa się z kilku następujących po sobie i częściowo na siebie zachodzących faz. Są to: odparowanie wody z paliwa, uwolnienie się części lotnych, ich zapłon i spalanie, zapłon i spalanie części stałych oraz ich dopalanie. Z punktu widzenia jakości spalania zasadnicze znaczenie mają fazy zapłonu determinujące poziom temperatur i koncentracji w czasie spalania. Znaczenie następujących później faz wypływa z faktu, że w ich trakcie dochodzi do uwolnienia największej części energii chemicznej paliwa. Rosnące wymagania co do jakości procesu spalania w warunkach pogarszania się jakości paliw, przy konieczności zapewnienia możliwie najmniejszej emisji szkodliwych związków do atmosfery, narzucają konieczność precyzyjnego analizowania zjawisk fizykochemicznych zachodzących podczas spalania, co pozwala na optymalne sterowanie procesem.

2. SPALANIE KINETYCZNE I DYFUZYJNE

Spalanie pyłu węglowego jest heterogeniczną reakcją utleniania części palnych paliwa w tlenie atmosferycznym. Proces ten jest sumą jednocześnie przebiegających homogenicznych i heterogenicznych reakcji o dodatnim i ujemnym efekcie cieplnym. Sumaryczna szybkość spalania:

$$w_h = \frac{dc_h}{dt}$$

(1)

określona ubytkiem części palnych paliwa zależy od szybkości reakcji zgod- nie z prawem kinetyki chemicznej (jest więc funkcją temperatury wg prawa Arrheniusa) oraz od szybkości transportu tlenu do powierzchni reakcji, tzn. od szybkości dyfuzji. Ogólnie wiadomo, że w obszarze niskich tempe- ratur szybkość reakcji chemicznej jest mniejsza od szybkości dyfuzji, a spalanie ma charakter kinetyczny. W przypadku spalania pyłu węglowego fakt ten ma miejsce w początkowych fazach zapłonu, kiedy w reakcji bierze udział część palna paliwa i tlen z pierwotnej mieszanki. Jeśli ta mieszanka (po- wietrze pierwotne + węgiel) jest jednorodna, to warunki dyfuzji tlenu do powierzchni cząstek są dobre, a szybkość dyfuzji nie ogranicza szybkości spalania. Warunki dyfuzji mogą ulec znacznemu pogorszeniu w przypadku nie- jednorodności mieszanki powstałych w wyniku wahań zasilania pyłem oraz rozdzielenia pyłu i powietrza na kolanach przewodów pyło-powietrznych. W takim przypadku szybkość spalania jest określona przez koncentracje O_2 i pyłu w mieszance oraz temperaturę reakcji. Reakcja będzie zmierzała ku wyższej temperaturze i szybkości dopóty, dopóki uwolnione ciepło będzie większe od ciepła zużytego na podgrzanie mieszanki i rozproszenie. Proble- matyka bilansu cieplnego zapłonu jest znana i została opisana np. w [1]. Szybkość spalania w obszarze kinetycznym można wyrazić równaniem:

$$w_h = k C_{O_2}^2 = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) C_{O_2}^2 \quad (2)$$

w którym stała szybkości reakcji k określa temperaturową zależność daną prawem Arrheniusa. Szybkość spalania jest przy tym określona zużyciem tle- nu, które przy znanym składzie paliwa można za pomocą równań stechiome- trycznych przeliczyć na zużycie węgla i części palnych.

Reakcje w zwykłych warunkach przebiegają bardzo szybko. Przebieg szyb- kości spalania i temperatury reakcji jest eksponencjalny, a reakcja prze- chodzi do obszaru dyfuzyjnego, w którym szybkość spalania determinowana jest prędkością dyfuzji. Średni strumień dyfuzji tlenu do powierzchni reakcji:

$$\dot{m}_D = \beta (C_{O_2}^P - C_{O_2}^S) \quad (3)$$

jest mniejszy niż szybkość reakcji przy danej temperaturze. Tlen musi być wówczas transportowany do powierzchni cząstek pyłu w skomplikowany sposób ze strugi powietrza wtórnego. Szybkość spalania jest wówczas zdetermino- wana szybkością dyfuzji, która jest funkcją różnicy koncentracji tlenu w strudze i na powierzchni ziarna. Koncentracja tlenu w strudze $C_{O_2}^P$ wyini- ka z koncentracji tlenu w powietrzu oraz ilości i składu gorących recyr- kulujących spalin. Koncentracja tlenu na powierzchni ziaren $C_{O_2}^S$ jest zerowa, ze względu na szybsze jego zużycie niż dopływ do powierzchni.

3. WSPÓŁCZYNNIK WNIKANIA MASY

Zakłada się, że w odległości x_1 od wylotu palnika udział części palnych jest h_1 , zaś w odległości x_2 ten udział wynosi h_2 . Znana jest średnia prędkość cząstek w_{xsr} oraz średnia koncentracja tlenu $C_{O_2}^P$ w strudze w obszarze spalania dyfuzyjnego. Przy założeniu stałej ilości popiołu ubytek części palnych, a więc i pierwiastka węgla między punktami 1 i 2:

$$\Delta h = h_1 - \frac{p_1}{p_2} h_2 \quad (4)$$

czemu odpowiada zapotrzebowanie tlenu określone wg stechiometrycznego współczynnika β_S :

$$m_{O_2} = \beta_S \Delta h \quad (5)$$

Powyższa ilość tlenu dyfundowała pomiędzy punktami 1 i 2 do powierzchni cząstek pyłu węglowego o masie 1 kg w czasie:

$$\tau = \frac{x_2 - x_1}{w_{xsr}} \quad (6)$$

Względną powierzchnię pyłu można określić za pomocą charakterystyki pozostałości sitowych i nomogramu Rosina-Rammlera. Tak określona wielkość obejmuje zewnętrzną i wewnętrzną powierzchnię cząstek. W procesie dyfuzji wewnętrzna powierzchnia reakcji nie bierze udziału z uwagi na fakt, że w bezpośredniej bliskości cząstek ma miejsce wyraźny niedobór tlenu. Wygodniej jest określić względną powierzchnię pyłu, obliczając ją dla sześciianików o boku równym charakterystycznemu rozmiarowi cząstek x_0 , tzn. dla pozostałości 36,8% [2].

Strumień dyfuzji tlenu do powierzchni 1 kg cząstek można określić jako:

$$\dot{m}_D = \frac{m_{O_2}}{s \tau} \quad (7)$$

lub po podstawieniu (5) i (6):

$$\dot{m}_D = \frac{\beta_S \Delta h w_{xsr}}{s(x_2 - x_1)} \quad (8)$$

Wykorzystując równanie (3), które definiuje współczynnik wnikania masy w sposób analogiczny do określenia współczynnika wnikania ciepła, przy

logicznym założeniu, że w czasie dyfuzji na powierzchni cząstek koncentracja tlenu jest zerowa, można napisać:

$$\dot{m}_D = \beta C_{O_2}^P = \frac{\beta_s \Delta h w x_{sr}}{s(x_2 - x_1)}$$

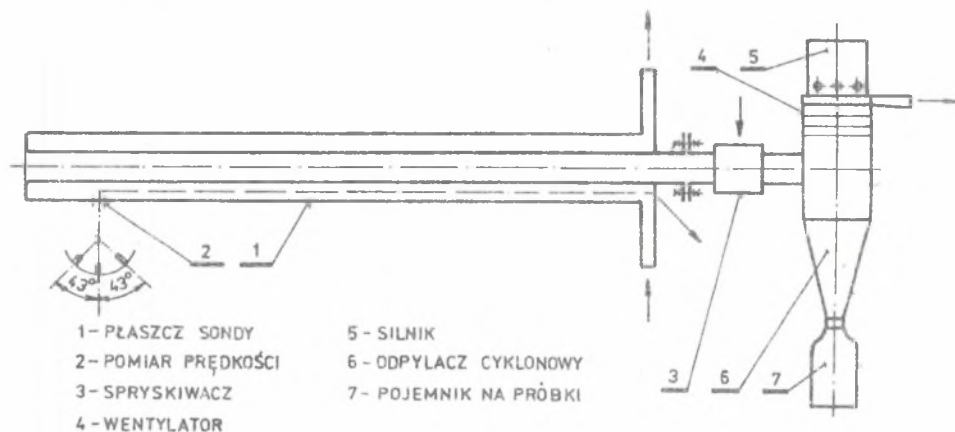
a stąd:

$$\beta = \frac{\beta_s \Delta h w x_{sr}}{s(x_2 - x_1) C_{O_2}^P} \quad (9)$$

W celu określenia wartości współczynnika wnikania masy należy więc w dwu przekrojach płomienia pobrać próbki pyłu mierząc jednocześnie wektory prędkości i koncentracje tlenu.

4. KONSTRUKCJA CHŁODZONEJ SONDY

Do badań wykorzystano chłodzoną sondę o konstrukcji przedstawionej na rys. 1. Podwójny płaszcz sondy 1 zbudowany jest z dwu cienkościennych rur. Wewnętrzny przekrój jest rozdzielony wzdłużnymi żebrami tak, aby woda chłodząca mogła przepływać od wlotu do końca sondy i z powrotem. W płaszczu wodnym sondy umieszczone są trzy otwory 2 służące do pomiaru wektorów prędkości (trójotworowa sonda prędkościowa) z wykorzystaniem dwu mikromanometrów w klasycznym układzie.



Rys. 1. Chłodzona sonda pomiarowa

Fig. 1. Cooled measurement sensor

Za pomocą urządzenia odsysającego składającego się z wentylatora 4 i silnika 5 są z przestrzeni paleniska odsysane gorące spaliny razem z płonącymi cząstkami pyłu węglowego. Ulegają one natychmiastowemu ochłodzeniu po wejściu do sondy, co przerywa proces palenia. Cząstki te w spryskiwaczu 3 zostają spryskane wodą i po oddzieleniu od spalin w odpylaczu cyklonowym 6 zostają zebrane w pojemniku na próbki 7. Uchwyconą próbkę odfiltrowuje się, suszy i laboratoryjnie określa udział części palnych w próbce stałej.

Do określenia udziału tlenu w spalinach można użyć jednego z otworów impulsowych do pomiaru wektora prędkości. Po odłączeniu urządzenia odsysającego można środkiem sondy wsunąć termoparę w celu określenia temperatury spalin, co jest konieczne przy określaniu prędkości.

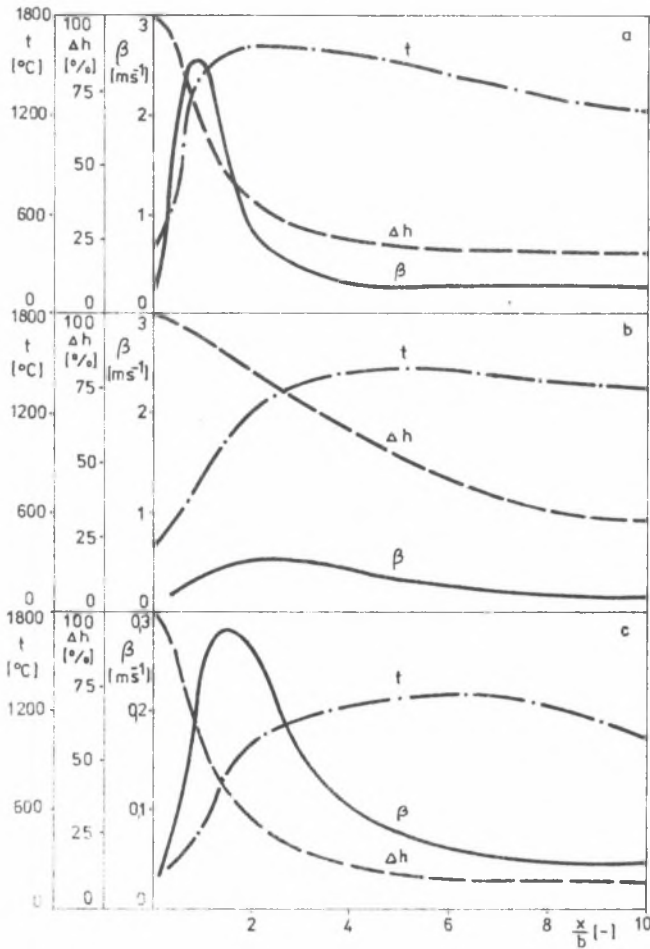
Wykorzystywana sonda miała zewnętrzną średnicę 50 mm i maksymalną długość 10 m. Rozmiary sondy można przystosowywać do wymiarów komory i otworów w ścianach.

5. WYNIKI POMIARÓW

Za pomocą opisanej metodyki zostały zbadane paleniska wszystkich kotłów 200 MW w CSRS oraz szereg mniejszych jednostek. Uzyskane wyniki jednoznacznie wykazują zależność procesu spalania od intensywności dyfuzji. Jest to widoczne na rys. 2 dla trzech różnych badań. Przedstawiono przebiegi stopnia wypalenia jako ubytku części palnych, osiowe rozkłady temperatury płomienia oraz współczynniki wnikania masy wyrażone w funkcji bezwymiarowej drogi.

Na rys. 2a i b przedstawiono wyniki pomiarów bloku 110 MW elektrowni Voiany (kotły z ciekłym odprowadzeniem żużla, palniki wirowe na antracyt). W czasie badań moc bloku wynosiła 102 MW, pracowało 5 z 6 palników. Na rys. 2a przedstawiono przebieg spalania po przeprowadzeniu regulacji na podstawie wyników badań, natomiast na rys. 2b dla warunków przed regulacją. Na rys. 2c w celu porównania przedstawiono przebieg zmienności badanych wielkości w bloku 200 MW elektrowni Chvaletice, przy obciążeniu 180 MW i działających 5 młynach. Spalano północnoczeskie węgle brunatne, w palenisku granulacyjnym, z 6 palnikami wirowymi.

Z punktu widzenia doskonałości wypalenia paliwa decydujące znaczenie ma krzywa wypalenia Δh . Dobry zapłon pyłu po wlocie do paleniska objawia się stromym spadkiem krzywej kończącym się w punkcie przegięcia. Punkt ten określa moment przejścia procesu spalania z obszaru kinetycznego do dyfuzyjnego. Znaczy to, że w tym miejscu tlen z mieszanki pierwotnej został zużyty i aby proces mógł się kontynuować, niezbędne jest doprowadzenie tlenu z powietrza wtórnego. W tym momencie rozpoczyna się obszar spalania dyfuzyjnego, zaś przy dobrze prowadzonym procesie spalania dyfuzyjnego strumień tlenu (a tym samym współczynnik wnikania masy) powinien



Rys. 2. Wpływ dyfuzji na proces spalania

Fig. 2. An effect of the diffusion on the combustion process

osiągnąć maximum. Tak jest w przypadku przedstawionym na rys. 2a. W efekcie następuje szybkie wypalenie pyłu z minimalnym niedopałem na końcu komory oraz stromy wzrost temperatury gwarantujący stabilne spalanie.

Przy niewłaściwej regulacji można proces spalania rozstroić do takiego stopnia, jak pokazano na rys. 2b. W tym przypadku brak warunków wstępnych do zapłonu mieszanki pierwotnej, a spalanie przebiega powoli. Intensyfikacja doprowadzenia tlenu przed punktem przegięcia krzywej wypalenia doprowadziłaby do jeszcze większego spowolnienia zapłonu.

W paleniskach z palnikami strumieniowymi wartość współczynnika wnikania masy jest o rząd niższa niż w przypadku wirowych (rys. 2c). Wynika stąd fakt, że kierowanie procesem spalania jest dla palników strumieniowych trudniejsze, co jest częściowo kompensowane wyższym udziałem części lotnych w węglu brunatnym. Punkt maksymalny krzywej współczynnika wnikania masy jest cofnięty, zaś wzrost temperatury jest wolniejszy. Omawiane wyniki zostały uzyskane przy prawidłowo wyregulowanym procesie spalania.

Uzyskane wyniki pozwalają na optymalizację procesu spalania poprzez maksymalizację stopnia wypalenia pyłu oraz minimalizację ilości szkodliwych związków powstających podczas spalania. Pracochłonne i trudne badania na obiektach rzeczywistych oraz prawidłowa interpretacja wyników mają decydujące znaczenie przy projektowaniu nowych konstrukcji palników i palenisk. Dla oceny wariantów konstrukcyjnych duże znaczenie ma możliwość prowadzenia badań modelowych. Opisaną w pracy metodykę można z niewielkimi zmianami wykorzystać podczas izotermicznych badań typu powietrze-CO₂, co pozwala na wzajemną weryfikację badań modelowych i na rzeczywistych kotłach.

6. PODSUMOWANIE

Uzyskane wyniki pozwalają na przeprowadzenie dokładnej analizy procesu spalania w palenisku kotłowym. Razem z wynikami pomiarów pól wielkości turbulentnych przeprowadzonych metodą opisaną w [3] i [4] dostarczają danych do przeprowadzenia uogólnień w formie równań kryterialnych, co ma istotne znaczenie przy rozwiązywaniu zagadnień z dziedziny spalania paliw stałych.

OZNACZENIA

- b - charakterystyczny wymiar palnika, m,
- C - koncentracja, kg/kg,
- h - udział części palnych, kg/kg,
- k - stała szybkości reakcji,

- m_D - strumień dyfuzji, $kg/m^2/s$,
 p - udział popiołu, kg/kg ,
 s - względna powierzchnia pyłu, m^2/kg ,
 t - temperatura, $^{\circ}C$,
 w - prędkość, m/s ,
 w_h - szybkość spalania,
 x - droga, m ,
 β - współczynnik wnikania masy, m/s ,
 β_s - współczynnik stechiometryczny,
 τ - czas, s .

LITERATURA

- [1] Vilenskij T.V., Chzmaljan D.M.: Dinamika gorenja pylevidnogo topliva. Moskva 1978.
 [2] Černý V.: Parní kotle. SNTL, Praha 1982.
 [3] Kolat P.: Přenos tepla a hmoty. Skript VŠB, Ostrava 1986.
 [4] Dobrozemsky J.: Termomechanika II. Skript VŠB, Ostrava 1972.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ludwik Gwynar

ВЛИЯНИЕ ДИФФУЗИИ НА ПРОЦЕСС СГОРАНИЯ В ПЫЛЕУГОЛЬНОЙ ТОПКЕ

Р е з ю м е

В работе проанализировано влияние диффузии на процесс сгорания. Представлена методика определения коэффициента проникновения массы использующая измерения в топке с помощью охлаждаемого водой зонда. На примере 3 избранных экспериментов объяснен способ использования полученных результатов. Рассмотрены также возможности метода для решения проблем связанных со сгоранием различных видов топлива.

AN EFFECT OF DIFFUSION ON THE COMBUSTION PROCESS IN DUST BEDS

S u m m a r y

An effect diffusion is analysed for chest beds. A technique for finding a coefficient of mass adsorption using measurements with cooled sensor is presented. Three chosen experiments are used to explain the method in the case of different fuel combustion.