ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1990

Seria: ENERGETYKA z. 110 Nr kol. 1091

Jaroslav DOBROZEMSKÝ
Pavel NOSKIEVIČ
Katedra energetiky VŠB w Ostrawie

SPALANIE W PALENISKACH PYŁOWYCH Z MINIMALIZACJĄ POWSTAWANIA SKŁADNIKÓW SZKODLIWYCH

Streszczenie. Omówiono sterowanie procesem spalania w paleniskach pyłowych dużej mocy pozwalające na obniżenie ilości powstających w trakcie spalania szkodliwych składników. Zagadnienie rozwiązano opierając się na kompleksowych pomiarach aerodynamiki spalania, zapewniając jednocześnie stabilne spalanie przy zmieniających się własnościach paliwa.

1. WSTĘP

Przeważająca część kotłów energetycznych w CSRS opalana jest niskokalorycznymi węglami brunatnymi o dużej zawartości popiołu. W tych warunkach konieczne jest zapewnienie właściwego wypalenia paliwa przy zmianach jego charakterystyki oraz bardzo trudne w realizacji niedopuszczenie do powstawania większych ilości substancji szkodliwych. Wyniki licznych pomiarów przeprowadzonych w paleniskach dużych kotłów pozwalają stwierdzić, że interweniując odpowiednio w proces spalania, można wpłynąć nie tylko na przebieg wypalenia pyłu, ale również obniżyć ilości tlenków siarki i azotu w spalinach oraz poprzez zmianę własności fizykochemicznych popiołu lotnego zwiększyć sprawność odpylania w elektrofiltrze.

Przebieg spalania pyłu węglowego przebiega w następujących fazach: parowanie wody, wydzielenie się części lotnych, ich zapłon i spalanie, zapłon i spalanie poszczególnych frakcji pyłu, doprowadzenia powietrza wtórnego i ewentualnie trzeciego oraz jego mieszanie się ze spalinami z mieszanki pierwotnej. W wyniku reakcji utleniania wzrasta temperatura płomienia będąca funkcją bilansu energii procesu. Punkt, w którym temperatura osiąga maksimum, rozdziela przebieg spalania na dwa obszary.

Pierwszy, kończący się osiągnięciem maksymalnej temperatury i odpowiadający zapłonowi i początkowi palenia się pyłu, nazwano obszarem palnikowym. Drugim jest obszar palenia i dopalania stałej pozostałości. W tym obszarze wydziela się większość ciepła związanego w paliwie.

O ile procesy przebiegające w obszarze palenia i dopalania koksiku są stosunkowo szczegółowo zbadane, o tyle obszar palnikowy jest nadal przedmiotem intensywnych badań. Zapłon pyłu węglowego, który jak wspomniano, decyduje o jakości procesu, jest zdeterminowany własnościami paliwa zgodnie z bilansem cieplnym strumienia pyłu i powietrza. Szybkość reakcji opisana prawem Arrheniusa wyznacza ilość ciepła uwolnionego podczas reakcji. Część tego ciepła przekazywana jest mieszance pyło-powietrznej, a reszta odprowadzana jest do przestrzeni paleniska. Jednocześnie mieszanka wypływająca z palnika jest ogrzewana poprzez recyrkulację (przysysanie) gorących spalin z przestrzeni komory oraz w pewnym stopniu poprzez promieniowanie ozoła płomienia. Wynik bilansu tych procesów decyduje o szybkości zapłonu pyłu w początkowych fazach spalania.

2. SPALANIE KINETYCZNE I DYFUZYJNE

Spalanie pyłu węglowego jest heterogeniczną reakcją utleniania substancji palnej paliwa za pomocą tlenu z powietrza. Jest to szereg jednocześnie przebiegających reakcji (homo- i heterogenicznych) o dodatnim i ujemnym efekcie cieplnym. Sumaryczna szybkość spalania

$$w_h = \frac{d\,C_h}{d\,\tau} \tag{1}$$

określona jest jako prędkość obniżania się udziału substancji palnej w paliwie i zależy od temperatury oraz szybkości transportu tlenu do powierzchni reakcji, czyli od intensywności dyfuzji.

W zakresie niskich temperatur szybkość reakcji chemicznej jest niższa w porównaniu z szybkością dyfuzji, a spalanie ma charakter kinetyczny. Przypadek ten zachodzi w początkowych fazach spalania pyłu, kiedy w reakcji bierze udział substancja palna i tlen z mieszanki pierwotnej. Jeżeli mieszanka ta jest homogeniczna, to warunki transportu tlenu do powierzchni cząstek są korzystne, a szybkość dyfuzji nie determinuje szybkości spalania. Szybkość ta określona jest przez koncentracje tlenu i pyłu oraz temperaturę. Reakcja będzie dążyła w kierunku wyższych szybkości i temperatur dopóty, dopóki bilans ciepła będzie pozytywny. Szybkość spalania w obszarze kinetycznym można opisać zależnością:

$$w_h = k\,C_{O_2} = k_o\,e^{-\frac{E}{RT}}\,C_{O_2} \tag{2}$$

w której stała szybkości reakcji określa zależność temperaturową daną prawem Arrheniusa. Szybkość spalania związana jest ze zużyciem tlenu i znając stechiometrię procesu, można ją przeliczyć na zużycie pierwiastka węgla lub substancji palnej.

W normalnych warunkach reakcja przebiega w czasie zgodnie z zależnością eksponencjalną i szybko przechodzi do obszaru dyfuzyjnego. Średni strumień dyfuzji tlenu do powierzchni reakcji:

$$m_D = \beta (C^P_{O_2} - C^S_{O_2}) \tag{3}$$

jest mniejszy niż szybkość reakcji (zużycie tlenu) przy danej temperaturze. Tlen musi być doprowadzony do powierzchni cząstek pyłu w skomplikowany sposób ze strugi powietrza wtórnego. Szybkość spalania jest więc ograniczona szybkością dyfuzji. Koncentracja tlenu w strudze $C^P_{O_2}$ wynika z koncentracji tlenu w powietrzu oraz z ilości i składu gorących, recyrkulujących spalin. Koncentracja tlenu na powierzchni cząstek jest zerowa ze względu na szybsze zużycie tlenu niż jego dopływ do powierzchni, tzn. $C^S_{O_2} = 0$, a wielkość dyfuzyjnego strumienia tlenu określają fizyczne warunki transportu opisane współczynnikiem wnikania masy.

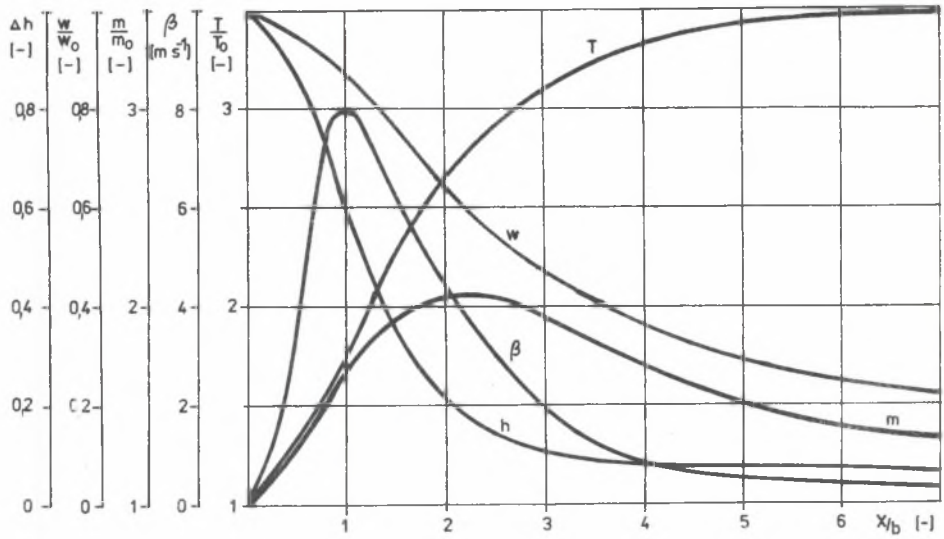
Jeżeli z pomiarów w palenisku znana jest szybkość przepływu mieszanki oraz koncentracja pyłu, przebieg jego wypalenia, jak również jego powierzchnia właściwa, można wartość współczynnika wnikania masy wyznaczyć jako:

$$\beta = \frac{\beta_s \Delta h \; w_{x\ śr}}{s(x_2 - x_1) C^P_{O_2}} \tag{4}$$

3. POMIARY W PALENISKU I INTERPRETACJA WYNIKÓW

Do opisu procesu spalania konieczne jest zmierzenie chwilowych wartości wielkości charakterystycznych we właściwie wybranych miejscach [2]. Wybór punktów pomiaru opiera się na założonych trajektoriach cząstek (na tzw. drodze spalania), zaś z uwagi na duże gradienty mierzonych wielkości gęstość punktów pomiarowych musi być duża. Dobór punktów jest ograniczony ilością otworów w ścianach. Do pomiaru stosowane są sondy z chłodzeniem wodnym, których długość sięga 10 m. Mierzone są pola temperatur, prędkości, koncentracji tlenu, CO_2, CO, SO_2, NO_x, substancji palnej, (pierwiastka węgla), pola wielkości turbulentnych. Można w ten sposób uzyskać obraz procesu spalania na drodze od palnika w głąb komory.

Na rys. 1 przedstawiono część wyników pomiarów przeprowadzonych w palenisku kotła 200 MW dla pewnego przypadku pracy. Przedstawiono przebiegi 5 wybranych wielkości bezwymiarowych, tzn. odniesiono te wielkości do stanu u wylotu palnika. W bezwymiarowej postaci podana jest także droga strumienia, którą odniesiono do wymiaru charakterystycznego palnika.

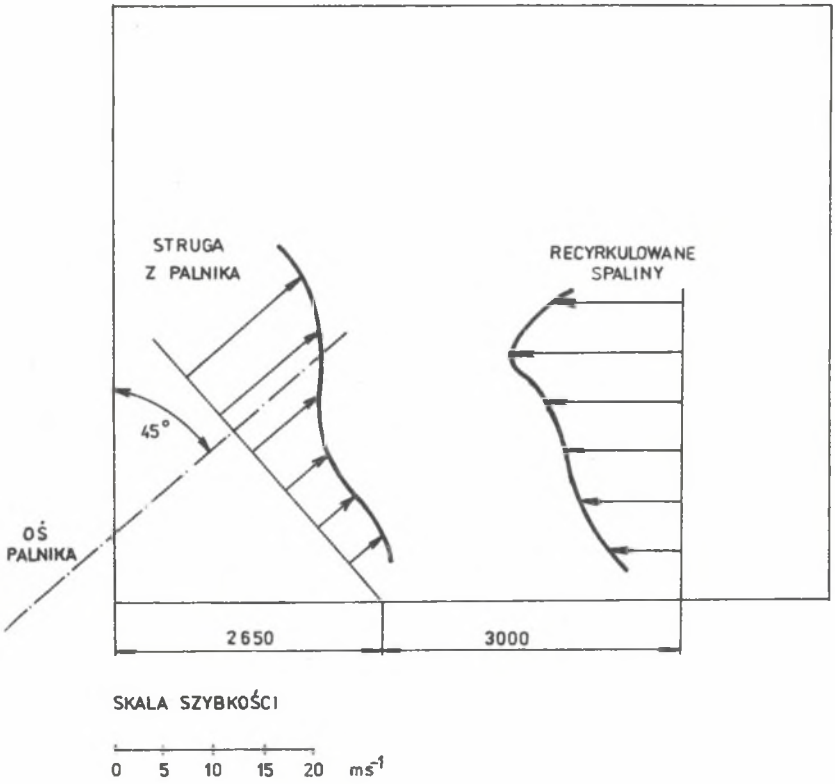


Rys. 1. Zmienność wybranych wielkości wzdłuż drogi spalania dla paleniska pyłowego o mocy 200 MW

Fig. 1. Variations of the chosen variables along a combustion path for dust beds 200 MW

Przebieg wypalenia pyłu przedstawia krzywa h. Po wejściu paliwa do paleniska następuje bardzo szybkie zapalenie się i spalanie, przy czym prędkość spalania można określić przez różniczkowanie tej krzywej względem czasu. Dla typowego przebiegu krzywej wyznaczono punkt przegięcia I. Jego położenie określa przejście z obszaru kinetycznego do dyfuzyjnego, tzn. miejsce, gdzie kończy się tlen z mieszanki pierwotnej i zachodzi konieczność doprowadzenia tlenu z powietrza wtórnego. Transport tlenu jest zdeterminowany fizycznymi warunkami dyfuzji i w punkcie I intensywność dyfuzji osiąga maksimum (krzywa β). Dlatego następuje nieprzerwany wzrost temperatury - krzywa T, osiągając maksimum w odległości x/b = 7. Recyrkulacja gorących spalin opisana jest krzywą $\dot{m}$, przedstawiającą w bezwymiarowej postaci strumień masy w przekroju strugi i określa optymalne warunki cieplne procesu. Należy nadmienić, że większa ilość recyrkulowanych spalin obniża nadmierne koncentracje tlenu w strudze i spowalnia proces spalania.

Charakterystykę przepływu w płaszczyźnie horyzontalnej na poziomie narożnego palnika strumieniowego paleniska bloku 200 MW pracującego pod obciążeniem 180 MW przedstawiono na rys. 2. Silny strumień recyrkulujących spalin o temperaturze ok. 900°C odrzuca strugę z palnika w kierunku bocznej ściany. Pomiar przeprowadzono chłodzoną, trójotworową sondą walcową.



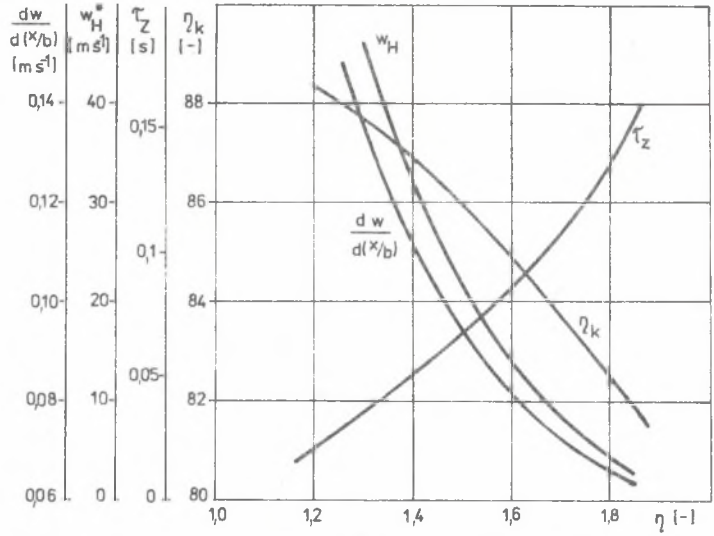
Rys. 2. Pole prędkości w płaszczyźnie horyzontalnej na poziomie palnika narożnikowego kotła 200 MW

Fig. 2. Velocity field on the horizontal plane at the level of angle fireplace of the 200 MW bed

W wyniku dobrze zorganizowanego spalania osiowa prędkość strugi wzdłuż drogi spalania spada względnie stromo, co jest wynikiem doskonałego mieszania się wszystkich czynników oraz stromego wzrostu temperatury spalin, a tym samym lepkości.

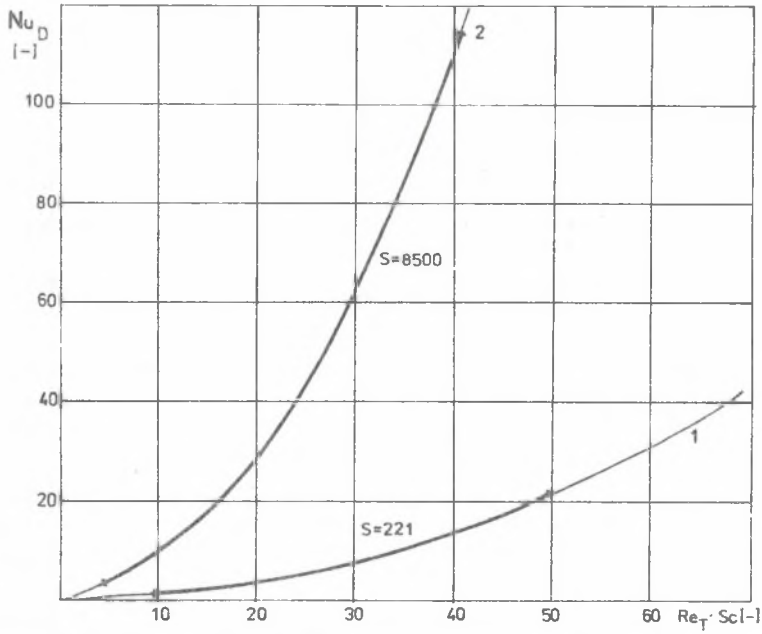
Opisany przypadek przedstawia dobrze zorganizowane spalanie w obszarze paleniska z palnikami strumieniowymi. W efekcie następuje dobre wypalenie pyłu, szybki spadek temperatury spalin po osiągnięciu temperatury maksymalnej przy niskiej zawartości tlenu w obszarze spalania.

Na rys. 3 przedstawione są przebiegi wybranych wielkości w ogólniejszej postaci [1]. W zależności od współczynnika nadmiaru powietrza podano przebiegi sprawności kotła bloku 200 MW, szybkości spalania pyłu wyrażone jako względne obniżenie udziału części palnych w czasie, gradienty spadku osiowej prędkości strugi w obszarze palnikowym oraz czasy zapłonu pyłu



Rys. 3. Zależność wybranych wielkości od współczynnika nadmiaru powietrza w palenisku kotła pyłowego o mocy 200 MW

Fig. 3. Relation between chosen variables and the superaerial coefficient for the dustbed 200 MW



Rys. 4. Funkcja $Nu_D = a(Re_T\ Sc)^n$ wzdłuż szerokości strugi w odległości x/b = 2 od wylotu palnika

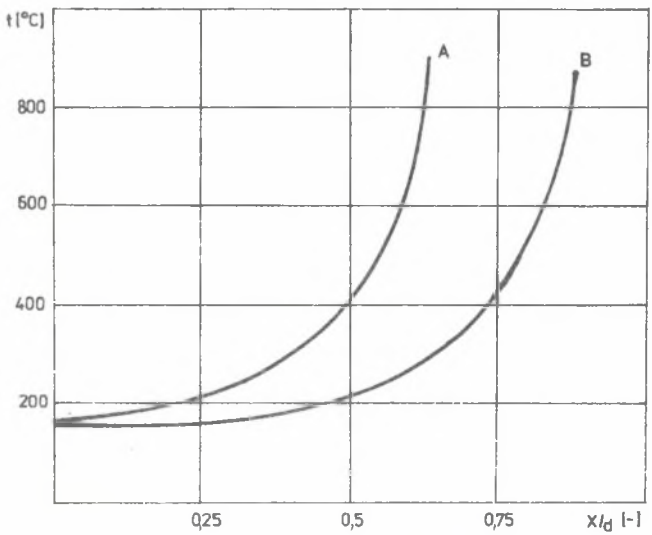
Fig. 4. Function $Nu_D = a(Re_T Sc)^n$ along the broath of the stream at the distance x/b = 2 from the outlet of the furnace

wyznaczone z temperaturowych warunków zapłonu mieszanki pierwotnej. Wpływ nadmiaru powietrza jest we wszystkich przypadkach widoczny, a przedstawione zależności obrazują możliwość kierowania spalaniem za pomocą ilości doprowadzonego powietrza.

Szczegółowe pomiary w obszarze palnika pozwalają na uzyskanie szeregu ważnych danych, których uogólnienie prowadzi do zbudowania równań kryterialnych określających warunki przenoszenia pędu, masy i energii w palenisku. Na rys. 4 przedstawiono funkcję $Nu_D = a(Re_T Sc)^n$. Odpowiada ona pomiarom na szerokości strugi w odległości $x/b = 2$) od wylotu palnika dla dwu palników pracujących w różnych warunkach. Podano obszar ważności funkcji wyznaczając miarę stabilności spalania [3]. Wielkość ta opisana jest wyrażeniem:

$$S = Nu_{D\ śr} \int_1^2 \frac{d\ Nu_D}{d(Re_T\ Sc)}\ d(Re_T\ Sc) \tag{5}$$

opartym na założeniu, że im większa jest wartość gradientu Nu_D w zależności od $Re_T Sc$, tym silniej zmienia się szybkość spalania podczas zmian w eksploatacji. Im bardziej funkcja ta jest płaska i im mniejszy jest przedział zmienności, tym korzystniejsze są aerodynamiczne warunki spalania. Na tej podstawie określić można uniwersalność palnika, który zapewniłby stabilne spalanie przy zmianach parametrów wejściowych.



Rys. 5. Temperatura w osi płomienia przy koncentracji pyłu A=0,43 kg/kg pa
Fig. 5. Temperature in the flame axis with the dust concentration A=0,43 kg/kg pal

Z badań uzyskano stabilne spalanie przy wartościach $S < 100$. Zasadniczo można przyjąć, że stabilność spalania zapewnia dostatecznie szybki zapłon pyłu. Można to osiągnąć poprzez wysoką koncentrację pyłu w mieszance oraz zapewnienie odpowiednich warunków temperaturowych poprzez recyrkulację spalin. Wpływ koncentracji pyłu na przebieg zapłonu przedstawiono na rysunku 5, gdzie zobrazowano przebieg osiowej temperatury wzdłuż drogi strugi dla muflowego palnika wirowego o wydajności 8 MW. Krzywa A odpowiada koncentracji 0,43 kg pyłu/kg powietrza, krzywa B 0,36 kg/kg. Zakładając, że bezpieczny zapłon następuje w temperaturze ok. 600°C, można stwierdzić, że czas zapłonu dla pomiaru A wynosi 44 ms na drodze zapłonu 0,48 m, podczas gdy dla pomiaru B wielkości te wynoszą 50 ms i 0,75 m.

4. SPALANIE A POWSTAWANIE ZWIĄZKÓW SZKODLIWYCH

W wysokich temperaturach panujących w komorze paleniskowej zachodzi szereg reakcji utleniania. Podstawą procesu spalania jest utlenianie węgla, natomiast utlenianie siarki i azotu daje w wyniku tlenki szkodliwe dla środowiska. Funkcjonalne zależności we wszystkich przypadkach można przedstawić równaniem:

$$[P] = f([R_1], [R_2], [T, \tau]) \tag{6}$$

gdzie

P - koncentracja produktów reakcji,

R_1, R_2 - koncentracje substancji reagujących.

Z przedstawionego równania wynika, że intensyfikacja spalania pierwiastka węgla prowadzi do intensyfikacji powstawania tlenków siarki i azotu, natomiast dążenie do obniżenie ilości powstających podczas spalania szkodliwych tlenków musi prowadzić do pogorszenia wypalenia węgla.

Gruntowna znajomość procesów zachodzących w palenisku pozwala na zastosowanie rozwiązań technicznych prowadzących do obniżenia ilości powstających szkodliwych związków [4].

Opierając się na (6), można znaleźć kilka możliwych rozwiązań. Obniżając koncentrację tlenu w palenisku doprowadza się do znacznego obniżenia zawartości SO_2 i NO_x w spalinach. Rozwiązanie to wymaga doskonałej regulacji procesu spalania w kierunku minimalnego nadmiaru powietrza oraz maksymalnej szybkości spalania. Na ogół w pierwszej fazie spalania przyjmuje się warunki podstechiometryczne z pewnym niedoborem powietrza, które jednak muszą zapewnić szybki zapłon pyłu. Na płonącą mieszankę można oddziaływać sterowanym doprowadzeniem powietrza wtórnego, tak aby w żadnym miejscu nie wystąpiła nadmierna koncentracja tlenu. Stopniowe doprowadzanie

powietrza pozwala sterować temperaturą płomienia, tzn. obniżając maksymalną temperaturę można ograniczyć tworzenie się szkodliwych składników.

Istotny jest również wpływ czasu trwania reakcji, który należy traktować jako czas pobytu spalin w obszarze optymalnych temperatur.
Jeżeli zapewnia się stabilne spalanie z szybkim wzrostem temperatury w obszarze palnikowym, to musi następować bardziej stromy spadek temperatury za punktem maksimum z uwagi na odbiór ciepła drogą promieniowania przez membranowe ściany komory. W efekcie skraca się czas pobytu spalin w obszarze wysokich temperatur.
Sterując odpowiednio spalaniem można stworzyć warunki wyjściowe dla wtórnego obniżenia koncentracji tlenków azotu w spalinach. Wiadomo, że obecność rodników węglowodorowych, tlenku węgla, HCN obniża koncentrację NO_x poprzez redukcję do N_2. Fakt ten można wykorzystać poprzez obniżenie nadmiaru powietrza, jak również doprowadzenie tzw. paliwa wtórnego [5].

5. PODSUMOWANIE

Punktem wyjścia dla prawidłowego opisu procesów przebiegających w paleniskach kotłów pyłowych muszą być przeprowadzone w szerokim zakresie kompleksowe pomiary aerodynamiki w różnych warunkach eksploatacyjnych. Badania te można uzupełnić wynikami pomiarów izotermicznych oraz modelowaniem matematycznym. Na podstawie badań można sterować procesem w kierunku minimalizacji powstawania składników szkodliwych, dotrzymując jednocześnie właściwych warunków spalania zapewniających prawidłowe wypalenie paliwa. Można też w pewnym stopniu skompensować zwiększoną stratę niedopału przez obniżenie straty wylotowej w wyniku obniżenia nadmiaru powietrza.

W celu rozwiązania tych problemów, oprócz znajomości procesu spalania, konieczna jest szybka i pewna analiza spalin, pozwalająca na określenie koncentracji O_2, CO, CO_2, NO_x, SO_2 w obszarze temperatur spalin 800-650°C i przed podgrzewaczem powietrza, jak również w co najmniej 2 przekrojach komory spalania. Należy również zapewnić ściśle regulowany dopływ powietrza zorganizowanego przy jednoczesnym wyeliminowaniu przyssań.

Konieczne jest również prowadzenie szkolenia obsługi nie tylko w kierunku dążenia do poprawy sprawności kotła, lecz również w dążeniu do obniżenia emisji zanieczyszczeń pyłem i gazami.

OZNACZENIA

b - wymiar charakterystyczny palnika, m,

C - koncentracja, kg m^{-3},

d - średnica palnika, m,

E - energia aktywacji, kJ $kmol^{-1}$,

h - zawartość substancji palnej, kg/kg_{pal},

k - stała szybkości reakcji, m/s,

k_o - stała szybkości reakcji, m/s,

m - strumień spalin, kg/s,

m_D - strumień dyfuzji, kg $m^{-2}s^{-1}$,

n - współczynnik nadmiaru powietrza,

R - stała gazowa, kJ $kmol^{-1}K^{-1}$,

s - powierzchnia właściwa pyłu, m^2/kg,

S - miara stabilności spalania,

t - temperatura, ^oC,

T - temperatura, K,

w_H - szybkość spalania, kg m^{-2} s^{-1},

w_H^x - względna szybkość spalania, m/s,

w_x - prędkość osiowa strumienia, m/s,

x - droga strumienia od wylotu palnika, m,

Nu_D - dyfuzyjna liczba Nusselta,

Re_T - turbulentna liczba Reynoldsa,

Sc - liczba Schmidta,

β - współczynnik wymiany masy, m/s,

β_s - współczynnik stechiometryczny,

η_k - sprawność kotła,

τ - czas, s ,

τ_s - czas zapłonu, s,

LITERATURA

1 Noskievič P.: Charakteristika hořakové oblasti praškových ohnišť. Praca doktorska. VŠB, Ostrava 1987.

2 Kolat P., Noskievič P.: Řízene spalovani uhelneho prašku. Energetika CSRS - w druku.

3 Kolat P., Noskievič P.: Komplexni měřeni aerodynamiky spalovani v ohništich velkých elektrarenských bloků. Energetika 38 nr 3, 1988, s. 104-109.

4 Acre M.A., La Rue A.D.: Fortschrittliche Systeme zur Emissionsminderung durch NO_x - Reduktion im Feuerraum. Die Industriefeuerung 45/1988, s. 8-12.

5 Dobrozemský J. i inni: Měřeni aerodynamiky spalovani a emisi na K4-ECHVA. Praca badawcza VŠB Ostrava. Ostrava 1988.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ludwik Cwynar

СГОРАНИЕ В ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ ТОПКАХ С МИНИМИХАЦИЕЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВРЕДНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Р е з ю м е

Рассматривается управление процессом сгорания в пылеугольных топках большой мощности позволяющие понизить количество возникающих во время сгорания вредных компонентов. Проблема решается на основании комплексных измерений аэродинамики сгорания, учитывая одновременно устойчивое сгорание при изменяющихся свойствах топлива.

COMBUSTION IN THE DUST BEDS WITH MINIMIZATION OF HARMFUL COMPONENTS

S u m m a r y

Combustion process control in the dust beds of the large power is considered enabling decreasing of the emission of harmful components. A problem was solved basing on the complex measurements od combustion aerodynamics ensuring simultaneously stable combustion in spite of changing properties.