ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1990

Seria: ENERGETYKA z. 113 Nr kol. 1101

Zbigniew BIS
Władysław GAJEWSKI
Wojciech NOWAK

Instytut Maszyn Cieplnych
Politechnika Częstochowska

KOTŁY ENERGETYCZNE Z CYRKULACYJNĄ WARSTWĄ FLUIDALNĄ

Streszczenie. W pracy przedstawiono zasadnicze wyniki badań i analiz wpływu podstawowych parametrów geometrycznych i przepływowych na konstrukcję oraz pracę kotłów z cyrkulacyjną warstwą fluidalną. Szczególną uwagę zwrócono na zasady doboru tych parametrów konstrukcyjnych i przepływowych, które mają bezpośredni wpływ na sprawność procesu spalania paliwa w palenisku takiego kotła.

1. WSTĘP

Znamienną cechą rozwoju gospodarczego jest rosnące zapotrzebowanie na energię oraz wzrost zanieczyszczenia środowiska. Ograniczenie emisji szkodliwych związków do atmosfery, nieodłącznie towarzyszące procesowi spalania, zwłaszcza paliw stałych, podniesienie efektywności wykorzystania paliw, gdyż podaż i jakość ich stale maleje - oto zadania wymagające szybkiego i zadowalającego rozwiązania.

Jednym z takich rozwiązań było wprowadzenie spalania fluidalnego. Jego specyfika, polegająca na intensywnym ruchu ziaren w strumieniu przepływającego gazu, możliwość bezpośredniego odsiarczania spalin poprzez dodawanie do warstwy rozdrobnionego dolomitu oraz temperatura procesu nie wyższa niż temperatura mięknięcia popiołu (850-900°C), pozwalała znacznie zwiększyć jednostkową wydajność (do 2 MW/m^{2}) oraz wydatnie obniżyć poziom emisji SO_2 i NO_x.

Technologia ta ma jednak swe ograniczenia odnoszące się głównie do:

- znacznych strat niecałkowitego spalania, zmuszających do stosowania

kłopotliwego dopalania lotnego koksiku oraz ograniczenia prędkości przepływu gazu,
- skomplikowanego systemu zasilania paliwem,
- stosunkowo wysokiego ilorazu Ca/S = 2.5-3.5, wymagającego dostarczania znacznych ilości dolomitu,
- trudności z zapewnieniem dostatecznie czułej i niezawodnej regulacji paleniska.

Pojawienie się techniki cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej (CWF) oraz zastosowanie jej do spalania paliw stałych pozwoliło przełamać to ograniczenie oraz dało szereg nowych możliwości organizacji procesu spalania spełniającego współczesne wymagania.

Niniejsza praca ze względu na swój charakter zawiera jedynie zasadnicze wyniki badań i analiz technologii spalania paliw stałych w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej, zebrane w trakcie realizacji tematu "Badania kinetyki i mechanizmu spalania ziaren węgla w warstwach cyrkulacyjnych" (CPBP 2.1.2.6.).

2. ANALIZA TECHNOLOGII SPALANIA PALIW STAŁYCH W CYRKULACYJNEJ WARSTWIE FLUIDALNEJ

Typowy schemat kotła fluidyzacyjnego z cyrkulcyjną warstwą fluidalną przedstawia Rys. 1. W jego skład wchodzą następujące elementy:
- układ zasilania paliwem i sorbentem siarki,
- układ zasilania powietrzem,
- komora paleniskowa,
- "gorący" cyklon,
- podajnik fluidyzacyjny zamykający kontur cyrkulacyjny,
- zewnętrzna powierzchnia ogrzewalna typu konwekcyjnego,
- układ oczyszczania spalin.

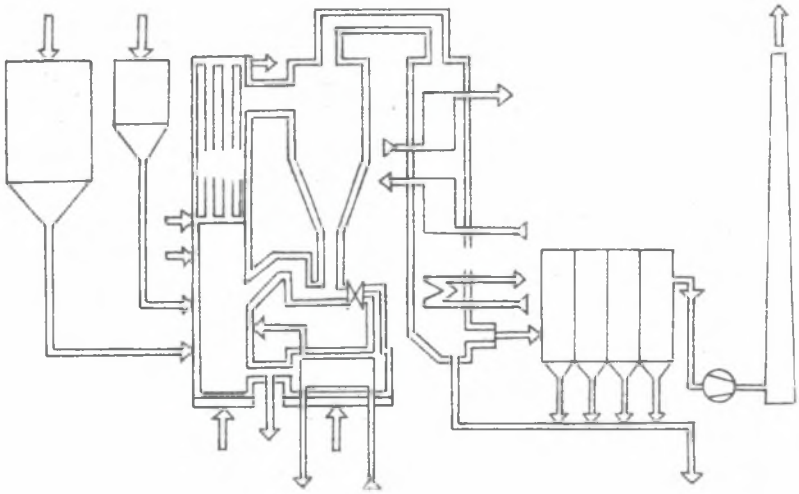
W zależności od konstrukcji dodatkowe powierzchnie ogrzewalne spełniające rolę parownika rozmieszczane są wewnątrz komory paleniskowej lub jako zewnętrzny fluidyzacyjny wymiennik ciepła.

Wartość jednostkowego obciążenia cieplnego poprzecznego przekroju komory paleniskowej przyjmuje się [10] w granicach q_F = 3-5 MW/m^2.

Zakres temperatury spalania, podobnie jak w przypadku palenisk z warstwą pęcherzową, organiczony jest od góry temperaturą mięknięcia popiołu, od dołu zaś temperaturą gwarantującą stabilne spalanie i wynosi 750 do 950 ^oC.

Maksymalne prędkości przepływu gazu w komorze paleniskowej mieszczą się w granicach 6-8 m/s.

Udział całkowitego ciepła jakie w tych warunkach może być odebrane



Rys.1. Schemat kotła z cyrkulacyjną warstwą fluidalną

Fig.1. A Circulating Fluidized Bed Boiler

przez zewnętrzne, konwekcyjne powierzchnie ogrzewalne nie przekracza 40 % [7], wobec tego zasadnicza część ciepła musi być przekazana powierzchniom wymiany ciepła zlokalizowanym wewnątrz komory paleniskowej lub w zewnętrznym fluidyzacyjnym wymienniku ciepła.

Badania aerodynamiki oraz wymiany ciepła, których wyniki zawierają m.in. prace [3,4,6,11,13,14], wykazują, że jedynie uzasadniona jest lokalizacja powierzchni wymiany ciepła na ściankach komory paleniskowej, ponieważ w centralnej jej części (wzdłuż osi) ziarna poruszają się ze znacznymi prędkościami, a lokalne wartości współczynnika przejmowania ciepła [4] są znacznie niższe w strefie peryferyjnej (w pobliżu ścianek komory). Takie ograniczenie powierzchni wymiany ciepła w komorze paleniskowej powoduje, że ze wzrostem wydajności kotła maleje iloraz pola powierzchni wymiany ciepła do objętości komory spalania [8], co wymusza konieczność instalowania dodatkowych powierzchni wymiany ciepła w zewnętrznym fluidyzacyjnym wymienniku ciepła.

Takie rozwiązanie może w praktyce okazać się pożądanym ze względów regulacyjnych. Na podkreślenie zasługuje także fakt, że warunki wymiany ciepła, jakie charakteryzują fluidyzacyjny wymiennik ciepła, są w każdych warunkach korzystniejsze od tych, które występują wewnątrz komory spalania. Wartości współczynnika przejmowania ciepła pomiędzy cyrkulacyjną warstwą fluidalną a ścianką określone w warunkach laboratoryjnych [4] i technicznych [13] nie przekraczają na ogół 250 W/m^2K, chociaż stwierdza się także wartości rzędu 100-150 W/m^2K.

Odbiór ciepła w warunkach cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej charakteryzuje się pozytywnymi możliwościami kontroli intensywności przekazywania ciepła do ścianki [4]. Wynikają one z proporcjonalnej zależności pomiędzy wartością α a koncentracją materiału sypkiego, którą można zmieniać w szerokich granicach, kontrolując przepływ recyrkulowanego materiału sypkiego [3]. Zmiany profilu koncentracji mogą być wywołane także poprzez zmiany proporcji pomiędzy powietrzem pierwotnym i wtórnym. Takie dwustopniowe spalanie wydatnie zmniejsza także emisję tlenków azotu, co jest niewątpliwą zaletą tego rodzaju technologii spalania.

Spalanie węgla w CWF przebiega w warunkach intensywnego mieszania się obu faz - stałej i gazowej. Płonące ziarna paliwa unoszone przez gaz przebywając wzdłuż komory spalania w kierunku cyklonu usytuowanego na jej wylocie wykonują po drodze losowe ruchy związane z tworzeniem się i rozpadem skupisk ziaren stanowiących charakterystyczny element struktury CWF [11,14]. Ponieważ średnice ziaren paliwa są zróżnicowane, jak również rozkład prędkości przepływu gazu w przekroju komory spalania jest niejednorodny, nie wszystkie ziarna wędrujące w górę opuszczają komorę, wpływając z gazem do cyklonu. Część z nich

pozostaje w komorze i tworzy w niej specyficzny kontur cyrkulacji wewnętrznej [3,13,14] o wyraźnie pierścieniowym charakterze.

Ziarna opuszczające komorę paleniskową wpływają, unoszone przez gaz, do cyklonu, gdzie w zależności od rozmiaru następuje odseparowanie ich od gazu. Ziarna o rozmiarze większym od granicznej średnicy d_{50}, odpowiadającej 50 % skuteczności odpylania zastosowanego cyklonu, po oddzieleniu od gazu są poprzez układ recyrkulacji powtórnie zawracane do komory paleniskowej i ponownie wchodzą do strefy reakcji spalania. Ziarna drobne o średnicy mniejszej od d_{50} opuszczają cyklon i unoszone przez gorące spaliny przepływają przez część konwekcyjną kotła do tradycyjnych urządzeń separacyjnych zainstalowanych za kotłem.

Charakter obu rodzajów cyrkulacji - zewnętrznej i wewnętrznej ma decydujący wpływ [3] na rozkład koncentracji materiału sypkiego w obrębie komory paleniskowej, a tym samym także na przebieg podstawowych procesów fizycznych i chemicznych. W efekcie obu rodzajów cyrkulacji ziarna paliwa są intensywnie mieszane i kilkakrotnie obiegają kontur cyrkulacyjny, poprzez co wydłuża się ich czas pobytu w przestrzeni reakcji, a więc rośnie stopień wypalenia.

Paleniska z CWF zasilane są paliwem i sorbentem siarki o rozmiarach ziaren zależnych od typu i warunków pracy określonej instalacji. Rozmiary sorbentu są na ogół dobierane zgodnie z rozmiarami ziaren cyrkulujących w układzie i nie przekraczają 300 μm. Takie ich rozdrobnienie umożliwia obniżenie stosunku moloweggo Ca/S do wartości rzędu 1.5. Spotykane są instalacje [12] pracujące przy szerokim zakresie frakcyjnym paliwa, co stanowi ich niewątpliwą zaletę. Taki skład frakcyjny powoduje jednakże segregację ziaren w komorze paleniskowej. Ziarna grube gromadzą się w dolnej strefie komory, chociaż, jak wykazują wyniki badań [12,13], część z nich jest unoszona z tej zagęszczonej strefy i cyrkuluje nie tylko w obrębie komory paleniskowej, ale przechodzi także do cyklonu, a więc wchodzi do zewnętrznego konturu cyrkulacji.

Istnieje również liczna grupa palenisk np. Combustion Engineering Lurgi, pracujących przy mniejszych rozmiarach ziaren.

Wysoka sprawność procesu spalania paliwa zależy przede wszystkim od stopnia przereagowania frakcji najdrobniejszych, zwłaszcza tych, których rozmiary są mniejsze od granicznej średnicy d_{50}, charakterystycznej dla danego cyklonu. Ziarna grube będą po odseparowaniu w cyklonie cyrkulowały w układzie do momentu aż ich średnica wskutek wypalenia będzie mniejsza od średnicy granicznej d_{50}.

W wyniku analizy dokonanej w pracy [8] wykazano, że wysoką sprawność procesu spalania ziaren węgla w warunkach CWF można osiągnąć już przy krotnościach cyrkulacji rzędu 10-12, lecz taka ich wartość powoduje znaczny gradient temperatury wzdłuż wysokości komory paleniskowej..

Obrazuje to Rys. 2. [8], na którym przedstawiono zmiany względnej temperatury ziaren cyrkulujących w palenisku (odniesionej do temperatury w dolnej części komory paleniskowej T_{wd}) ze wzrostem krotności cyrkulacji. Zadowalające wyrównanie wzdłużnego profilu temperatury w palenisku możliwe jest do odsiągnięcia dopiero przy krotnościach cyrkulacji rzędu 100 i więcej. Potwierdzają to również wyniki pomiarów zawartych w cytowanej wyżej pracy[8]. Potwierdziły one także wyraźny wpływ na powyższe parametry proporcji pomiędzy powietrzem pierwotnym i wtórnym.

Przedstawiona analiza oraz materiał zawarty m.in. w pracach [1,3,8,8,13] wskazuje, że podstawowe znaczenie dla osiągnięcia wysokiej efektywności procesu spalania w kotłach z CWF ma taki wybór konstrukcji ich poszczególnych elementów, który zapewni czas pobytu ziaren paliwa dostateczny dla pełnego ich wypalenia.

3. CZAS SPALANIA I CZAS POBYTU ZIAREN W PALENISKU Z CWF

Zapewnienie wymaganej relacji pomiędzy czasem pobytu i czasem spalania odnosi się szczególnie do frakcji najdrobniejszych, których obecność w komorze paleniskowej kotła z CWF może być efektem trzech zasadniczych mechanizmów:

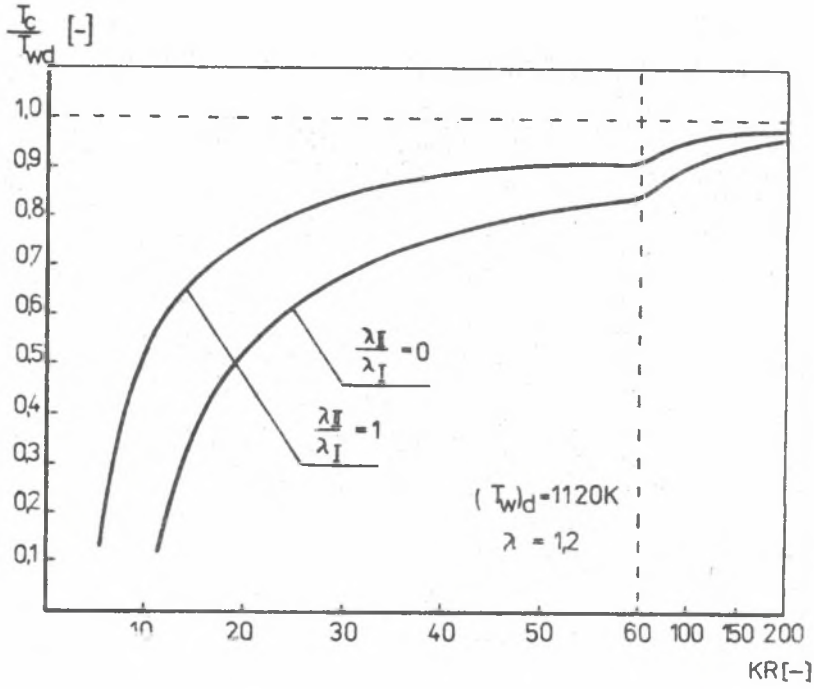
- zawartości drobnych frakcji w strumieniu paliwa zasilającego,
- tworzenia się drobnych frakcji w efekcie termicznego rozpadu,
- tworzenia się drobnych frakcji wskutek ścierania.

Frakcje najdrobniejsze powstałe według dwóch pierwszych mechanizmów charakteryzują się dużą gęstością i relatywnie małą powierzchnią właściwą. Przyczynia się do znacznego wydłużenia czasu ich spalania, co obrazuje Rys. 3. [9]. Potwierdzają to również wyniki badań [15], według których strata węgla w lotnym koksiku przewyższa znacznie zawartość węgla w popiele odprowadzanym z dolnej części komory spalania. W oparciu o badania hydrodynamiki CWF [3] oraz wyniki badań spalania ziaren węgla [1,2,5] w pracy [9] dokonano analizy porównawczej pomiędzy czasem pobytu oraz czasem spalania najdrobniejszych frakcji. Zasadnicze wyniki tej analizy prezentuje Rys. 4.

Średni czas pobytu ziaren w CWF można wyrazić zależnością:

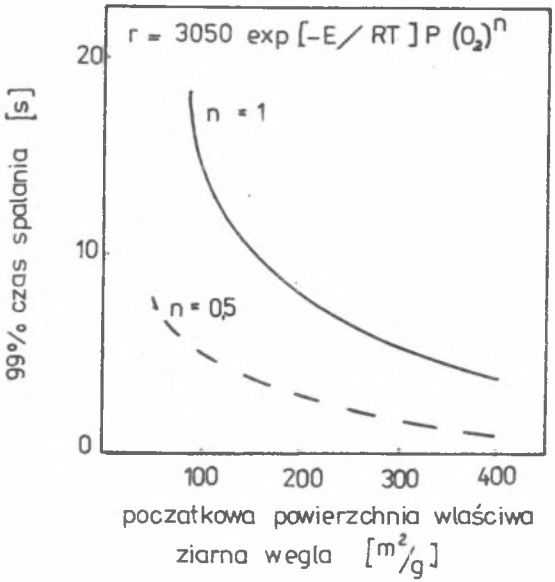
$$\tau_p = \frac{H_K \rho_W}{m_C}, \qquad (1)$$

gdzie: H_K - wysokość komory spalania,
ρ_W - średnia gęstość warstwy cyrkulacyjnej,
m_C - strumień masy cyrkulującego materiału sypkiego.



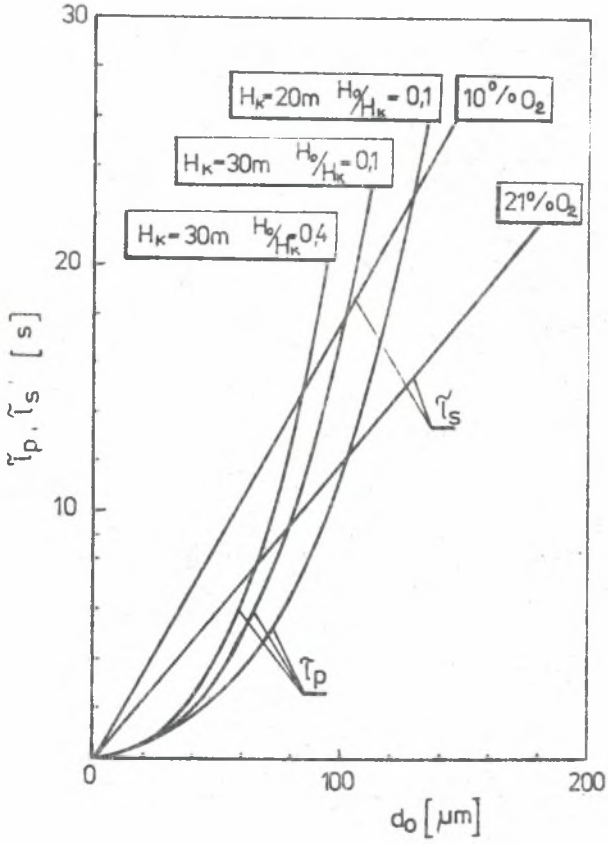
Rys. 2. Zmiana względnej temperatury materiału sypkiego cyrkulującego w palenisku, odniesionej do temperatury w dolnej części komory paleniskowej od krotności recyrkulacji dla różnych proporcji pomiędzy powietrzem pierwotnym i wtórnym

Fig.2 Change in temperature of solids circulating in the combustor (relatively to the temperature in the bottom part of the combustor) with circulating factor for different ratios primary/secondary air.



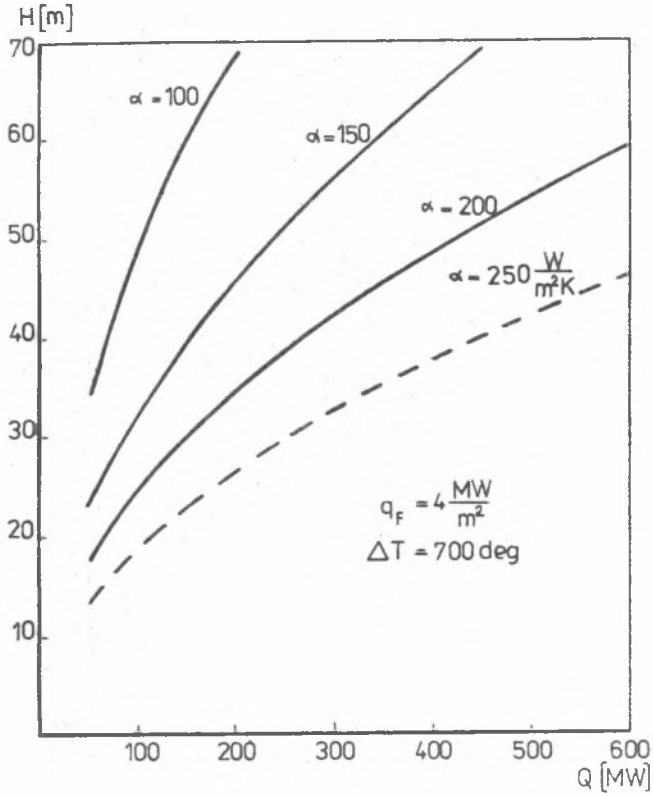
Rys.3. Zależność czasu spalania ziarna węgla od jego początkowej powierzchni właściwej

Fig.3. Relationship between the burn-out time of coal particle and the initial surface area



Rys.4. Zależność czasu spalania oraz czasu pobytu ziaren węgla o różnych średnicach początkowych.

Fig.4. Relationship between the burn-out time and the residence time of coal particles for different initial diameters



Rys.5. Zależność wysokości komory paleniskowej od mocy cieplnej kotła z cyrkulacyjną warstwą fluidalną

Fig.5. Relationship between the combustor height and the thermal output of circulating fluidized bed boiler

Gęstość warstwy oraz strumień masy cyrkulującego materiału sypkiego stanowią podstawowe parametry CWF i mogą być zmieniane poprzez zmiany prędkości oraz krotności cyrkulacji.

Wysokość komory paleniskowej determinowana jest na ogół koniecznością instalowania na jej ściankach powierzchni ogrzewalnych. Przykładową relację pomiędzy wysokością komory paleniskowej a wydajnością cieplną kotła z CWF uzyskaną w pracy [8] przedstawia Rys. 5. Relacja ta uzasadnia konieczność stosowania w tego rodzaju kotłach wysokich komór spalania.

Mimo to jednak, jak wynika z zależności widocznej na Rys. 4, relacja pomiędzy τ_p i τ_s dla frakcji drobnych poniżej 90 μm jest niekorzystna, wobec czego koniecznym jest stosowanie "gorących" cyklonów o małych wartościacj d_{50}.

LITERATURA

[1] BASU P. Inst. of Energy, 1986.
[2] BASU P., RITCHIE C., HALDER K. Proc. the First Int. Conf. on Circulating Fluidized Beds, 1985.
[3] BIS Z. Praca habilitacyjna (oddana do druku), 1990.
[4] BIS Z., BUSOUL M., GAJEWSKI W., NOWAK W. IV Int. Conference on Pneumatic Transport, Budapest, 1990.
[5] GAJEWSKI W. Praca habilitacyjna, 1984.
[6] GAJEWSKI W. i inni. Sprawozdanie z I etapu CPBP, 1986.
[7] GAJEWSKI W. i inni. Sprawozdanie z II etapu CPBP, 1987.
[8] GAJEWSKI W. i inni. Sprawozdanie z III etapu CPBP, 1988.
[9] GAJEWSKI W. i inni. Sprawozdanie z IV etapu CPBP, 1989.
[10] GALIA B.N., HALL A. 9th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, 1987.
[11] HATRGE E.U., RENSNER D., WERTHER J. Proc. of the Second Int. Conf. on Circulating Fluidized Beds, France, 1988.
[12] KOJIMA Y., MII T., KONO M. Proc. of the Second Int. Conf. on Circulating Fluidized Beds, France, 1988.
[13] NOWAK W. Praca habilitacyjna, Częstochowa, 1989.
[14] YERUSHALMI J., CANKURT N.T., GELDART D., LISS B. AIChE Symp. Series, 1978.
[15] YERUSHALMI J. Proc. of the 88 National Meeting AIChE, Philadelphia, 1980.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Tadeusz CHMIELNIAK

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОТЛЫ С ЦИРКУЛИРУЮЩИМ КИПЯЩИМ СЛОЕМ

Р е з ю м е

Топки с циркулирующим кипящим слоем являются новейшей техникой топок с кипящим слоем, в которых процесс сжигания топлива протекает отдельно от процесса теплообмена. Сжигание протекает в циркулирующим кипящим слое состаящим из частиц инертного материала. Топливо и известь подаваемые к слою мгновенно распрестреняются в объеме топки.

Произвидсво пара совершается от циркулирующих горячих частиц к мембранным поверхностиям; изменяя скорость циркуляции частиц возможно быстро изменять и контролировать мощность котла.

Из-за большого турбулентного смешения частиц можно применять простую систему подачи топлива.

Совершая процессы в циркулирующем кипящем слое бозможно решить многие проблемы окружающей среды, характерные в случае применения традиценных топок сжигающих угли с большим содержанием серы. Сера улавливается непосредсвенно в процессе сгорания и нет необходимости очистки от серы ухадящих газов. Низкаятемпература горения, турбулентная зона и двухступенчатая подача боздуха позваляет уменьшить уровень выхода NOx.

Друие положительные черты это:
- возможность использования разнообразных топлив с простой системой подачи топлива,
- высокая эффективность сгорания и использования известняка из-за рециркуляции золы,
- низкая инвестиценная стоимость.

В работе представлено анализ влияния основных геометрических и гидродинамических параметров на конструкцию топок с циркулирующим кипящим слоем. Прежде всегообращено вниамание на принципы подбора этих параметров, которые непосредсвенно влияют на эффективность процесса сжигания.

POWER BOILERS WITH A CIRCULATING FLUIDIZED BED

S u m m a r y

Circulating Fluidized Bed Boilers are a new generation of fluidized bed boilers in which the combustion process has been separated from the heat transfer. Combustion is carried out in a circulating fluidized bed of inert material. Fuel and limestone introduced to the bed are rapidly distributed by solids. Steam is generated by circulating hot solids through water-walled tubes; rapid and controlled turndown is achieved by adjusting the solids circulation rate.

Because of a very turbulant mixing of solids, a simple fuel injection system can be employed.

The Circulating Fluidized Bed boiler process provides solutions to several environmental problems inherent to a conventional coal-fired boilers burning high-sulfur coal. Sulfur in the coal is captured in the form of calcium sulfate, thus eliminating of the problem of SO2 removal from the flue gases. The low combustion temperatures, the turbulent zone and the staged addition of combustion air result in low levels of NOx.

Other advantages of a CFB result in:
- use a wide range of fuels with simple fuel preparation,
- high combustion efficiency and limestone utilization due to ash recirculation,
- low investment costs.

This paper describes the influence of main geometric and flow parameters on the design of the CFB boilers. Especially, the principles of evaluation of these parameters which influence the combustion efficiency are considered.