

**ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ**

Robert SEKRET

**WARUNKI CIEPLNO-PRZEPIYWOWE
I EMISJE ZANIECZYSZCZEŃ
W KOTŁACH
Z CYRKULACYJNĄ WARSTWĄ FLUIDALNĄ
DUŻEJ MOCY**



Gliwice 2005

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 1694

ROBERT SEKRET

**WARUNKI CIEPLNO-PRZEPLYWOWE
I EMISJE ZANIECZYSZCZEŃ
W KOTŁACH
Z CYRKULACYJNĄ WARSTWĄ FLUIDALNĄ
DUŻEJ MOCY**

Opiniodawcy

Prof. dr hab. inż. Zdzisław KABZA
Prof. dr hab. inż. Roman ZARZYCKI

Kolegium redakcyjne

Redaktor naczelny – Prof. dr hab. inż. Andrzej BUCHACZ
Redaktor działu – Prof. dr hab. inż. Zbigniew RUDNICKI
Sekretarz redakcji – Mgr Elżbieta LEŚKO

Redakcja

Mgr Aleksandra KŁOBUSZOWSKA

Redakcja techniczna

Alicja NOWACKA

PL ISSN 0372-9796

© Copyrihgt by
Robert SEKRET
Gliwice 2005

Pamięci OJCA

SPIS TREŚCI

WYKAZ UŻYTYCH OZNACZEŃ I INDEKSÓW	7
1. WSTĘP	13
2. GŁÓWNE TEZY PRACY, CELE I ZAKRES BADAŃ	14
3. OBIEKTY BADAŃ	16
4. TECHNIKI POMIAROWE CWF W SKALI TECHNICZNEJ	23
4.1. POMIAR CIŚNIENIA W KOMORZE PALENISKOWEJ	23
4.2. POMIARY TEMPERATURY W KOMORZE PALENISKOWEJ	25
4.3. POMIARY PRZEPŁYWU I STĘŻENIA FAZY STAŁEJ	25
4.3.1. <i>Sonda próbkująca</i>	25
4.3.2. <i>Sondy ciśnieniowe</i>	28
4.3.3. <i>Sonda pojemnościowa</i>	31
4.4. POMIAR STĘŻEŃ SKŁADNIKÓW GAZU W KOMORZE PALENISKOWEJ	34
5. WARUNKI PRZEPŁYWOWE W KOTLE Z CWF	35
5.1. WPROWADZENIE	35
5.2. PULSACJE CIŚNIENIA MATERIAŁU WARSTWY	36
5.3. ROZKŁAD STĘŻENIA ZIAREN MATERIAŁU WARSTWY	39
5.4. OBSZAR DOLNY STRUKTURY CWF	44
5.4.1. <i>Struktura i warunki pracy obszaru dolnego</i>	44
5.4.2. <i>Współpraca komory paleniskowej i skrzyni powietrza pierwotnego</i>	47
5.5. OBSZAR ROZRZEDZONY STRUKTURY CWF	51
5.5.1. <i>Struktura i warunki pracy obszaru rozrzedzonego</i>	51
5.5.2. <i>Gęstość strumienia masy ziaren materiału warstwy</i>	53
5.5.3. <i>Prędkość ziaren w CWF</i>	58
5.6. SEGREGACJA ZIAREN MATERIAŁU WARSTWY W CWF	62
5.7. PODSUMOWANIE	64
6. EMISJE ZANIECZYSZCZEŃ GAZOWYCH	66
6.1. WPROWADZENIE	66
6.2. ROZKŁAD PALIWA W OBJĘTOŚCI CWF	66
6.3. ROZKŁAD TEMPERATURY W KOTLE Z CWF	70
6.4. ROZKŁAD STĘŻEŃ ZANIECZYSZCZEŃ GAZOWYCH W KOMORZE PALENISKOWEJ	73
6.5. WPLYW WARUNKÓW CIEPLNO-PRZEPŁYWOWYCH W KOMORZE PALENISKOWEJ NA STĘŻENIA ZANIECZYSZCZEŃ GAZOWYCH	84
6.5.1. <i>Efektywność wykorzystania sorbentu</i>	84
6.5.2. <i>Rozprowadzenie powietrza pierwotnego w objętości CWF</i>	88
6.5.3. <i>Stopniowanie powietrza i rozdział paliwa</i>	93
6.6. WPLYW SKUTECZNOŚCI SEPARACJI CYKLONU NA EMISJĘ ZANIECZYSZCZEŃ	98
6.7. PODSUMOWANIE	104
7. WNIOSKI	105
LITERATURA	106
STRESZCZENIE	115

CONTENTS

NOMENCLATURE	7
1. INTRODUCTION	13
2. THE MAIN POINTS OF THE STUDY, THE OBJECTIVES AND SCOPE OF INVESTIGATION	14
3. THE OBJECTS OF INVESTIGATION	16
4. MEASUREMENT TECHNIQUES IN TECHNICAL-SCALE CFB BOILERS	23
4.1. MEASUREMENTS OF PRESSURE IN THE COMBUSTION CHAMBER	23
4.2. MEASUREMENTS OF TEMPERATURE IN THE COMBUSTION CHAMBER	25
4.3. MEASUREMENTS OF SOLID FLOW AND SOLID CONCENTRATION	25
4.3.1. <i>The sampling probe</i>	25
4.3.2. <i>The pressure probes</i>	28
4.3.3. <i>The capacitive probe</i>	31
4.4. MEASUREMENT OF GAS COMPONENTS CONCENTRATIONS IN THE COMBUSTION CHAMBER	34
5. FLOW CONDITIONS IN THE CFB BOILER	35
5.1. INTRODUCTION	35
5.2. PULSATIONS OF BED MATERIAL PRESSURE	36
5.3. DISTRIBUTION OF SOLID CONCENTRATION	39
5.4. THE BOTTOM REGION OF THE CFB STRUCTURE	44
5.4.1. <i>The structure and operation conditions of the bottom region</i>	44
5.4.2. <i>Co-operation of the combustion chamber and the primary air windbox</i>	47
5.5. THE DILUTE REGION OF THE CFB STRUCTURE	51
5.5.1. <i>The structure and operation conditions of the dilute region</i>	51
5.5.2. <i>The solid mass flux</i>	53
5.5.3. <i>The particle velocity in the CFB</i>	58
5.6. SEGREGATION OF BED MATERIAL PARTICLES WITHIN THE CFB	62
5.7. SUMMARY	64
6. EMISSIONS OF GASEOUS POLLUTANTS	66
6.1. INTRODUCTION	66
6.2. DISTRIBUTION OF FUEL PARTICLES IN THE CFB	66
6.3. DISTRIBUTION OF BED TEMPERATURE WITHIN THE CFB BOILER	70
6.4. DISTRIBUTION OF GASEOUS POLLUTANT CONCENTRATIONS WITHIN THE COMBUSTION CHAMBER	73
6.5. THE EFFECT OF THERMAL AND FLOW CONDITIONS IN THE COMBUSTION CHAMBER ON THE CONCENTRATIONS OF GASEOUS POLLUTANTS	84
6.5.1. <i>The effectiveness of sorbentu utilization</i>	84
6.5.2. <i>Distribution of primary air within the CFB space</i>	88
6.5.3. <i>Air staging and fuel distribution</i>	93
6.6. THE EFFECT OF CYCLONE SEPARATION EFFICIENCY ON POLLUTANT EMISSIONS	98
6.7. SUMMARY	104
7. CONCLUSIONS	105
REFERENCES	106
ABSTRACT	117

WYKAZ UŻYTYCH OZNACZEŃ I INDEKSÓW, NOMENCLATURE

A_k	- pole przekroju poziomego komory paleniskowej, m^2 combustion chamber cross-sectional area
A_{hvp}	- pole powierzchni hydrodynamicznej strefy przyściennej, m^2 hydrodynamic wall boundary layer surface area
A_{kor}	- pole powierzchni hydrodynamicznej strefy rdzenia, m^2 hydrodynamic core zone surface area
Ar	- liczba Archimedes, - Archimedes number
a_g	- współczynnik rozkładu profilu osiowego stężenia objętościowego ziaren dla obszaru gęstego, m^{-1} coefficient of solids volume concentration axial profile distribution for the dense region
a_r	- rozrzedzonego, m^{-1} coefficient of solids volume concentration axial profile distribution for the dilute region
C_D	- współczynnik oporu aerodynamicznego ziarna, - drag coefficient
C_i	- stężenie składnika spalin, $mg\ m_n^{-3}$, combustion-gas component concentration
c	- udział gramowy węgla pierwiastkowego w paliwie, - elementary carbon mass fraction of fuel
c_v	- stężenie objętościowe ziaren materiału warstwy, - solids volume concentration
D_e	- średnica hydrauliczna komory paleniskowej, m hydraulic combustion chamber diameter
D_w	- średnica portu pomiarowego ciśnienia, m pressure measurement port diameter
d_0	- średnica sondy, m probe diameter
d_k	- zastępcza średnica ziaren paliwa, m effective fuel particle diameter
d_p	- zastępcza średnica ziaren materiału warstwy, m effective bed material particle diameter
d_{pd}	- zastępcza średnica ziaren popiołu dennego, m effective bottom ash particle diameter
E_{CO}	- jednostkowa emisja CO, $kg\ CO\ kg^{-1}\ C$ CO emission per unit
E_{NO}	- jednostkowa emisja NO, $kg\ NO\ kg^{-1}\ N_2$ NO emission per unit
E_{SO_2}	- jednostkowa emisja SO ₂ , $kg\ SO_2\ kg^{-1}\ S$ SO ₂ emission per unit
F	- udział frakcyjny ziaren, - particle fraction
Fr	- liczba Froude, - Froude number
f	- częstotliwość, Hz frequency
f_d	- częstotliwość dominująca, Hz dominant frequency
\dot{G}_p	- gęstość strumienia masy ziaren na wejściu do sondy, $kg\ m^{-2}s^{-1}$ solids mass flux density at the probe entry
\dot{G}_s	- gęstość strumienia masy ziaren materiału warstwy, $kg\ m^{-2}s^{-1}$ solids mass flux density

\dot{G}_s^*	- graniczna gęstość strumienia masy ziaren materiału warstwy, $\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ limiting solids mass flux density
g	- przyspieszenie ziemskie, m s^{-2} gravitational acceleration
H_k	- wysokość komory paleniskowej, m combustion chamber height
I	- natężenie prądu elektrycznego, A current intensity
K	- stopień redukcji średnicy ziaren paliwa, - fuel particle diameter reduction rate
K_{de}	- względna stała dielektryczna, - relative dielectric constant
KR	- krotność cyrkulacji, - solids circulation rate
k_d	- współczynnik wymiany masy pomiędzy rdzeniem a hydrodynamiczną strefą przysięcienną, m s^{-1} coefficient of mass transfer between the core zone and the hydrodynamic wall boundary layer
L	- długość drogi spowalniania ziaren w końcówce sondy, m length of the particle slowing-down path in the probe tip
L_t	- odległość pomiędzy końcówkami sondy, m distance between the probe tips
M	- wytrzymałość na ściskanie, Pa compressive strength
m	- współczynnik rozkładu profilu poziomego strumienia masy ziaren, m^{-1} coefficient of solids mass flux horizontal profile distribution
m_{mw}	- masa materiału warstwy w komorze paleniskowej, kg mass of bed material in the combustion chamber
m_s	- masa pobranej próbki, kg mass of a sample taken
\dot{m}_A	- strumień masy popiołu wprowadzanego do komory paleniskowej, kg s^{-1} mass flux of ash supplied to the combustion chamber
\dot{m}_C	- strumień masy węgla pierwiastkowego wprowadzanego do komory paleniskowej, kg s^{-1} mass flux of elementary carbon supplied to the combustion chamber
\dot{m}_{cyr}	- strumień masy recykulowanego materiału, kg s^{-1} recycled solids mass flux
\dot{m}_k	- strumień masy paliwa, kg s^{-1} fuel mass flux
\dot{m}_{pd}	- strumień masy popiołu dennego wyprowadzonego z komory paleniskowej, kg s^{-1} mass flux of bottom ash discharged from the combustion chamber
\dot{m}_{plt}	- strumień masy popiołu lotnego wyprowadzonego z komory paleniskowej, kg s^{-1} mass flux of fly-ash discharged from the combustion chamber
\dot{m}_{sor}	- strumień masy sorbentu wprowadzanego do komory paleniskowej, kg s^{-1} mass flux of sorbent supplied to the combustion chamber
N	- całkowita ilość danych, - total amount of data
n	- udział gramowy azotu w paliwie, - nitrogen mass fraction of fuel numer danej, data number
P	- gęstość widmowa, $\text{kPa}^2 \text{Hz}^{-1}$ power spectral density
p_{mw}	- ciśnienie materiału warstwy, Pa bed material pressure
p_z	- stała sondy ciśnieniowej typu „T”, Pa „T”-type pressure probe constant

P_{skp}	- ciśnienie w skrzyni powietrza pierwotnego, Pa primary air windbox pressure
P_{sp}	- ciśnienie spiętrzenia netto, Pa net impact pressure
P_{wk}	- ciśnienie materiału warstwy na wysokości wlotu do cyklonu, Pa bed material pressure at the cyclone inlet height
\dot{Q}	- strumień ciepła, W heat flux
Re_k	- liczba Reynoldsa dla komory paleniskowej, - Reynolds number related to the combustion chamber diameter
Re_p	- liczba Reynoldsa dla ziaren, - Reynolds number related to the particle diameter
RI	- wskaźnik reaktywności, - reactivity index
r	- odległość od ściany komory paleniskowej, m distance from the combustion chamber wall
s	- udział gramowy siarki w paliwie, - sulfur mass fraction of fuel
t	- temperatura, °C temperature
U	- prędkość gazu, m s ⁻¹ superficial gas velocity
U_a	- prędkość gazu oczyszczającego sondę, m s ⁻¹ velocity of gas leaving the probe
U_c	- prędkość gazu odpowiadająca początkowi przejścia do fluidyzacji turbulენტnej, m s ⁻¹ superficial gas velocity corresponding to the starting of transition to turbulent fluidization
U_{ei}	- napięcie na elektrodzie igłowej sondy pojemnościowej, V voltage at the capacitive probe needle electrode
U_{ep}	- napięcie na elektrodzie płaszczowej sondy pojemnościowej, V voltage at the capacitive probe jacket electrode
U_k	- prędkość gazu odpowiadająca fluidyzacji turbulენტnej, m s ⁻¹ superficial gas velocity corresponding to turbulent fluidization
U_{ref}	- napięcie referencyjne sondy pojemnościowej, V capacitive probe reference voltage
U_{sp}	- napięcie wyjściowe sondy pojemnościowej, V capacitive probe output voltage
U_t	- prędkość unoszenia ziaren, m s ⁻¹ terminal velocity
U_{tr}	- prędkość transportu, m s ⁻¹ transport velocity
U_0	- prędkość gazu w dolnej części komory paleniskowej, m s ⁻¹ superficial gas velocity in the bottom combustion chamber part
u	- prędkość ssania sondy, m s ⁻¹ probe suction velocity
u_p	- prędkość ziaren, m s ⁻¹ particle velocity
u_{po}	- prędkość ziaren opuszczających sondę, m s ⁻¹ velocity of particles leaving the probe
u_{pi}	- prędkość ziaren na wejściu do sondy, m s ⁻¹ particle velocity at the probe entry

u_s	-	prędkość poślizgu ziaren, m s^{-1} particle slip velocity
V_{st}	-	jednostkowa objętość spalin suchych, m^3 spalin/kg paliwa dry combustion-gas volume per unit, m^3 combustion gas/kg fuel
W_i	-	wskaźnik stężenia składnika fazy gazowej, - gaseous phase component concentration index
w	-	współczynnik rozkładu profilu poziomego stężenia objętościowego ziaren, m^{-1} coefficient of solids volume concentration horizontal profile distribution
X_d	-	udział masowy popiołu dennego, % bottom ash mass fraction
X_k	-	stężenie masowe paliwa w materiale warstwy, kg m^{-3} fuel mass concentration in the bed material
X_f	-	udział masowy popiołu lotnego, % fly-ash mass fraction
Z	-	stopień cyrkulacji ziaren materiału warstwy w komorze paleniskowej, - rate of bed material particle circulation in the combustion chamber
z	-	odległość od rusztu komory paleniskowej, m distance from the combustion chamber grid
z_d	-	górna granica obszaru dolnego, m bottom region upper limit
z_g	-	górna granica obszaru gęstego, m dense region upper limit
z_r	-	górna granica obszaru rozrzedzonego, m dilute region upper limit
z_{ws}	-	wysokość wprowadzenia sorbentu do komory paleniskowej, m height of sorbent feed to the combustion chamber
[CO]	-	stężenie CO, mg CO m_n^{-3} gazu CO concentration, mg CO m_n^{-3} gas
[NO]	-	stężenie NO, mg NO m_n^{-3} gazu NO concentration, mg NO m_n^{-3} gas
[SO ₂]	-	stężenie SO ₂ , $\text{mg SO}_2 \text{m}_n^{-3}$ gazu SO ₂ concentration, $\text{mg SO}_2 \text{m}_n^{-3}$ gas
Δ	-	różnica, - difference
α	-	współczynnik wymiany pędu, - momentum transfer coefficient
δ_{exp}	-	grubość chemicznej strefy przyściennej, m thickness of the chemical wall boundary layer
δ_{hsp}	-	grubość hydrodynamicznej strefy przyściennej, m thickness of the hydrodynamic wall boundary layer
δ_{tp}	-	grubość termicznej strefy przyściennej, m thickness of the thermal wall boundary layer
ϕ_p	-	czynnik sferyczności ziaren, - sphericity factor of particle
η_{obs}	-	skuteczność odsiarczania, % desulfurization efficiency
λ	-	stosunek nadmiaru powietrza, - excess air ratio
μ	-	dynamiczny współczynnik lepkości gazu, $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ dynamic viscosity coefficient of gas
ρ_g	-	gęstość masy gazu, kg m^{-3} mass density of gas

ρ_p	- gęstość masy ziaren materiału warstwy, kg m^{-3} - mass density of bed material particle
σ	- odchylenie standardowe, Pa - standard deviation
τ	- czas pobytu ziaren, s - particle residence time
ζ	- względne stężenie objętościowego ziaren, - - relative solids volume concentration

Indeksy dolne, Subscripts

d	- obszar dolny - bottom region
$emitor$	- stężenie zanieczyszczenia gazowego za II ciągiem kotła - gaseous pollutant concentration downstream boiler draft II
exp	- badania eksperymentalne - experimental tests
g	- obszar gęsty - dense region
hsp	- hydrodynamiczna strefa przyścienna - hydrodynamic wall boundary layer
hsr	- hydrodynamiczna strefa rdzenia - hydrodynamic core zone
l	- wartość lokalna - local value
lt	- popiół lotny - fly-ash
max	- wartość maksymalna - maximum value
mf	- warunki odpowiadające minimalnej prędkości fluidyzacji - conditions corresponding to the minimum fluidization velocity
mod	- obliczenia - calculations
$pomiar$	- stężenie lokalne, pomiar w komorze paleniskowej - local concentration, measurement in the combustion chamber
r	- obszar rozrzedzony - dilute region
sdf	- środowisko dwufazowe - two-phase medium
sg	- środowisko gazowe - gas medium
sor	- sorbent - sorbent
sr	- wartość średnia - average value
tot	- wartość całkowita - total value
wk	- wlot do cyklonu - cyclone inlet

Indeksy górne, Superscripts

o	- materiał warstwy opadający - falling bed material
u	- materiał warstwy unoszony - floating bed material

1. WSTĘP

W ostatnim dziesięcioleciu technologia fluidalna była bardzo często wykorzystywana w procesach modernizacji energetyki zawodowej w Polsce i na świecie. Swą popularność osiągnęła dzięki jej zdolności do zgodnego z normami ochrony środowiska spalania paliw stałych. Korzyści z prowadzenia procesu spalania w warstwie fluidalnej to między innymi: wysoka sprawność kotłów (~90%), niska emisja NO_x i SO_2 bez konieczności stosowania dodatkowych instalacji w celu ich redukcji oraz możliwość jednoczesnego spalania różnych typów paliw [19, 44, 112]. W pracy [36] przedstawiono także możliwości oczyszczania popiołów lotnych z dioksyn podczas procesu spalania w warstwie fluidalnej. W dodatku technologia fluidalna pozwala na osiągnięcie wysokiej pewności ruchowej oraz kosztów wytwarzania elektryczności i ciepła porównywalnych z kosztami występującymi przy wykorzystaniu kotłów pyłowych [2, 12, 19, 44]. Cechą szczególną jest także atrakcyjność cenowa w momencie konieczności wymiany starych kotłów lub zmiany paliwa podstawowego na paliwo niskojakościowe lub odpadowe [71, 73, 76, 79].

Badania hydrodynamiki i procesu spalania w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej (CWF), które zrealizowano na stanowiskach laboratoryjnych lub jednostkach pilotażowych, pozwoliły na wyjaśnienie wielu zagadnień jej dotyczących [3, 4, 5, 9, 14, 28, 63, 67, 110, 112, 118]. Jednakże prace te dotyczyły jednostek o zdecydowanie mniejszej mocy, niż stosowanej obecnie w energetyce. Co więcej, w przeciwieństwie do stanowisk laboratoryjnych i jednostek pilotażowych, wysoki stopień trudności w realizacji badań kotłów pracujących w dużej skali technicznej spowodował, iż informacji o procesach cieplno-przepływowych zachodzących zwłaszcza wewnątrz komory paleniskowej jest bardzo niewiele. Fragmentaryczne dane, które są dostępne w literaturze dotyczą kilku kotłów o mocy od 12 MW do 1.1 GW i były prezentowane między innymi w pracach [11, 13, 113, 121].

Pomiędzy stanowiskami laboratoryjnymi a kotłami w małej czy też dużej skali technicznej występują znaczne różnice. Dotyczą one zarówno gabarytów reaktora (komory paleniskowej), jak również warunków cieplno-przepływowych. Wiele szczegółowych badań hydrodynamiki i procesu spalania prowadzonych w warunkach laboratoryjnych dokonano na jednostkach, które charakteryzowały się stosunkiem wysokości (H_k) do średnicy (D_e) reaktora powyżej 20. Jako materiał warstwy wykorzystywano ziarna zaliczane do grupy A według klasyfikacji Geldarta [47] (np. koks naftowy), a gęstości strumienia masy cyrkulujących ziaren materiału warstwy w konturze zewnętrznym wynosiły powyżej $20 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. W przeciwieństwie do tych stanowisk dla kotłów w skali technicznej stosunek H_k/D_e wynosi poniżej 10, natomiast w przypadku kotłów w dużej skali technicznej mieści się on w zakresie od 2 do 4. Wykorzystywane w nich materiały sypkie zaliczane są do grupy B. Kotły pracują przy gęstości strumienia masy materiału cyrkulującego w konturze zewnętrznym od 5 do $15 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Ze względu na planowane budowy nowych kotłów z CWF o mocy powyżej 1 GW, jak również konieczność optymalizacji pracy kotłów będących już w użyciu, istnieje potrzeba poznania warunków pracy cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej w kotłach dużej mocy. Wiedza ta pozwoli na weryfikację wyników badań z mniejszej skali technicznej i uzyskanie danych koniecznych do opracowania metod projektowania i modelowania dla nowych i istniejących kotłów. Wymiernym efektem będzie ograniczenie emisji zanieczyszczeń gazowych, poprawa efektywności wykorzystania i oszczędzania zasobów surowców energetycznych, a tym samym poprawa stanu środowiska naturalnego.

2. GŁÓWNE TEZY PRACY, CELE I ZAKRES BADAŃ

Różnorodność konstrukcji kotłów z cyrkulacyjną warstwą fluidalną w skali technicznej oraz ich warunków pracy wyklucza możliwość dokonania analizy wszystkich aspektów związanych z hydrodynamiką i emisją zanieczyszczeń w ramach jednej pracy. Dlatego też szczególną uwagę skupiono na tych fundamentalnych zagadnieniach, które mają zasadniczy wpływ na warunki pracy kotła dużej mocy z cyrkulacyjną warstwą fluidalną. Rozwiązanie tych zagadnień pozwoli stworzyć zarys teorii kontroli warunków pracy kotłów z CWF w dużej skali technicznej. Idąc więc za przedstawionym tokiem rozumowania sformułowano następujące tezy:

- **Struktura cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej zależy od gabarytów komory paleniskowej.**
- **Odpowiednia organizacja warunków ciepło-przepływowych w strukturze cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej umożliwi minimalizację emisji zanieczyszczeń z procesu spalania realizowanego w kotle dużej mocy.**

Udowodnienie postawionych tez pracy wymagało osiągnięcia następujących celów pracy:

- Opracowanie technik pomiarowych charakterystycznych parametrów pracy komory paleniskowej kotłów z CWF w dużej skali technicznej.
- Określenie struktury cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej w komorze paleniskowej kotła dużej mocy.
- Określenie wpływu warunków ciepło-przepływowych na wartość emisji zanieczyszczeń.

Osiągnięcie tych celów wymagało przeprowadzenia badań eksperymentalnych, które przewidziano na kotle z cyrkulacyjną warstwą fluidalną o mocy 670 MW oraz wykonania analiz teoretycznych uzyskanych wyników badań. Na prace badawcze składał się następujący zakres badań i analiz cząstkowych:

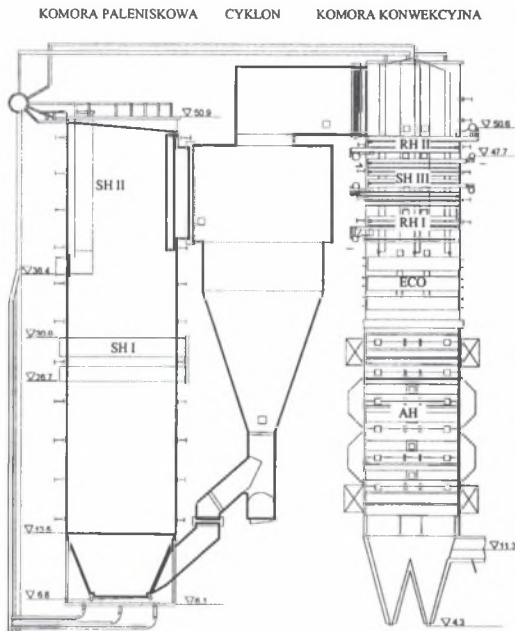
- opracowanie siatki portów pomiarowych na kotle w dużej skali technicznej,
- opracowanie metod pomiarowych do sondowania wnętrza struktury cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej komory paleniskowej kotła dużej mocy, pozwalających na określenie:
 - ✓ stężeń, prędkości i strumieni masy fazy stałej,
 - ✓ rozkładu ziaren materiału warstwy w przekroju poziomym i pionowym komory paleniskowej,
 - ✓ rozkładu temperatury w objętości CWF,
 - ✓ rozkładu stężeń charakterystycznych składników fazy gazowej w komorze paleniskowej,
- wyznaczenie częstotliwości dominujących pulsacji ciśnienia będących miarą jakości fluidyzacji CWF przy wykorzystaniu analizy gęstości widmowej mocy sygnału pochodzącego z pomiaru ciśnienia,
- określenie profilu stężenia objętościowego ziaren materiału warstwy wzdłuż wysokości komory paleniskowej pozwalającego na identyfikację charakterystycznych obszarów cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej kotła dużej mocy,
- zbadanie struktury i warunków pracy obszaru położonego w dolnej części komory paleniskowej, jak również określenie wzajemnej zależności pomiędzy komorą paleniskową a skrzynią powietrza pierwotnego,
- określenie warunków ciepło-przepływowych w górnej części komory paleniskowej,

- określenie intensywności segregacji ziaren materiału inertnego i ziaren paliwa w objętości CWF,
- określenie wpływu gabarytów komory paleniskowej kotłów z CWF w skali technicznej na grubość hydrodynamicznej strefy przyściennej i stopień wewnętrznej cyrkulacji ziaren materiału warstwy,
- zbadanie rozkładu prędkości ziaren w przekroju poziomym i pionowym CWF oraz porównanie uzyskanych wyników badań przeprowadzonych dwoma niezależnymi od siebie metodami pomiarowymi,
- określenie rozkładu temperatury w objętości CWF kotła dużej mocy,
- zbadanie rozkładu stężeń składników fazy gazowej w objętości komory paleniskowej kotła dużej mocy oraz wyznaczenie charakterystycznych obszarów powstawania i redukcji zanieczyszczeń gazowych z procesu spalania realizowanego w obrębie CWF,
- określenie wpływu zmian warunków cieplno-przepływowych w dolnej części komory paleniskowej na emisję zanieczyszczeń gazowych,
- wyznaczenie wpływu układu separacji kotła na warunki cieplno-przepływowe w komorze paleniskowej i wartość emisji zanieczyszczeń.

Przedstawiony szeroki zakres badań zrealizowanych na kotle o mocy 670 MW został również uzupełniony badaniami eksperymentalnymi przeprowadzonymi na najnowszej generacji kotle typu Compact o mocy 700 MW. Przeprowadzono ponadto analizę porównawczą uzyskanych wyników badań własnych z danymi literaturowymi dotyczącymi pracy kotłów z CWF o mniejszej mocy.

3. OBIEKTY BADAŃ

Zasadniczą część badań eksperymentalnych przeprowadzono na kotle z cyrkulacyjną warstwą fluidalną o mocy 670 MW. Schemat kotła przedstawiono na rysunku 3.1 [96]. Podstawowe dane konstrukcyjne zamieszczone zostały w tabelcy 3.1 [96].



Rys. 3.1. Schemat kotła CWF 670 MW
Fig. 3.1. Schematic diagram of the CFB 670 MW boiler

Dane konstrukcyjne kotła CWF 670 MW

Tabela 3.1

Wyszczególnienie	Jednostki	Wartości
Strumień masy pary pierwotnej	kg s ⁻¹	185,4
Ciśnienie pary pierwotnej	MPa	13,2
Temperatura pary pierwotnej	°C	540
Paliwo		węgiel brunatny
Wysokość komory paleniskowej	m	44,8
Pole przekroju komory paleniskowej na poziomie rusztu	m ²	21,2 x 5,2
Pole przekroju komory paleniskowej powyżej leja	m ²	21,2 x 9,9
Wysokość dolnej części komory paleniskowej (tzw. leja)	m	6,7

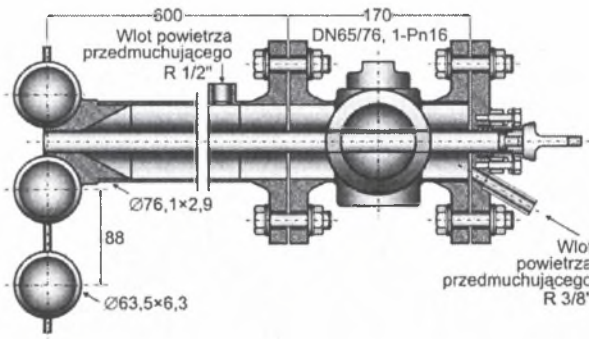
Komora paleniskowa na poziomie rusztu fluidyzującego ma przekrój 21,2 m x 5,2 m. Od poziomu 6,7 m w stosunku do rusztu przekrój komory paleniskowej wynosi 21,2 m x 9,9 m. Całkowita wysokość komory paleniskowej jest równa 44,8 m. Kocioł wyposażony jest w dwa gorące cyklony o średnicy 10 m każdy. W komorze paleniskowej, oprócz ścian membranowych, umieszczony jest przegrzewacz pierwotny pary I stopnia (przegrzewacz Omega) oraz przegrzewacz pierwotny pary II stopnia (ściana skrzydłowa). Pozostałe przegrzewacze pary (przegrzew pierwotny stopień III oraz I i II stopień przegrzewu

wtórnego) oraz podgrzewacze wody i powietrza (pierwotnego i wtórnego) umiejscowione są w ciągu konwekcyjnym. Kocioł spala węgiel brunatny o wartości opałowej 8,2-12,1 MJ/kg. Analiza techniczna i elementarna spalanego paliwa przedstawiona została w tabelicy 3.2.

Tablica 3.2
Analiza techniczna i elementarna węgla brunatnego w stanie roboczym

Wyszczególnienie	Jednostki	Wartości
Wartość opałowa	MJ kg ⁻¹	8,2-12,1
Wilgoć całkowita	% masowy	40-48
Części lotne	% masowy	17,6-22,0
Części palne stałe	% masowy	12,2-15,1
Popiół	% masowy	6,5-31,5
C	% masowy	23,9
H	% masowy	1,9
S	% masowy	0,4-0,8
N	% masowy	0,2
O	% masowy	6,8

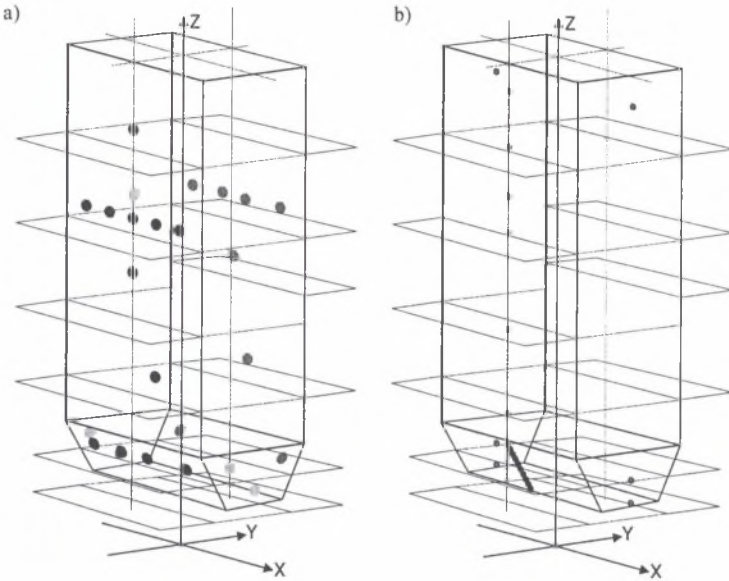
Badania kotła przeprowadzono w dwóch etapach. Etap I obejmował badania stacjonarne kotła, które wykonano przy jego pełnym obciążeniu i niezmiennych strumieniach masy wprowadzanego: paliwa, sorbentu i powietrza do komory paleniskowej. Etap II obejmował badania związane ze stopniowaniem paliwa i powietrza, jak również zmiennymi właściwościami fizykochemicznymi sorbentu oraz strumieniami masy materiału warstwy cyrkulującego w konturze zewnętrznym badanego kotła. W celu realizacji badań w komorze paleniskowej wykonano 25 portów pomiarowych o przekroju prostokątnym 22 mm x 52 mm. Schemat portu dla sond pomiarowych przedstawiono na rysunku 3.2.



Rys. 3.2. Schemat portu pomiarowego dla sond
Fig. 3.2. Schematic diagram of the probe measurement port

Kształt i powierzchnia pola przekroju wykonanych portów poddyktowane były dostępnym miejscem w płetwach ścian membranowych. Poprzez przygotowane porty wprowadzano do komory paleniskowej chłodzone wodą sondy pomiarowe. Na potrzeby standardowej kontroli pracy kotła w komorze paleniskowej zamontowanych jest pięć portów pomiaru ciśnienia, tj. trzy porty bezpośrednio nad rusztem ($z=0,25$ m) oraz dwa na poziomie wlotu do cyklonów (pomiaru ruchowe kotła). Dla pomiaru profilu i pulsacji ciśnienia w komorze paleniskowej liczba tych portów, jak również ich rozmieszczenie, były niewystarczające. Dlatego też przygotowano 27 dodatkowych portów do pomiaru ciśnienia o średnicy 10 mm. Schemat rozmieszczenia portów dla sond i pomiaru ciśnienia przedstawiono na rysunku 3.3. Ze względu na przewidywany wysoki pionowy gradient ciśnienia materiału

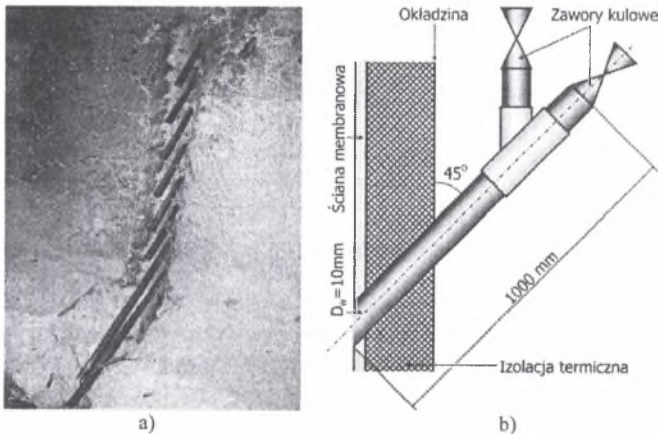
warstwy w dolnej części komory paleniskowej w tym obszarze porty pomiarowe zostały gęsto rozmieszczone. Na rysunku 3.4 przedstawiono układ portów ciśnienia (widok od wewnątrz komory paleniskowej) oraz schemat portu pomiarowego ciśnienia.



Rys. 3.3. Schemat rozmieszczenia portów pomiarowych w komorze paleniskowej kotła 670 MW:

a) rozmieszczenie portów pomiarowych dla sond; b) rozmieszczenie portów ciśnienia

Fig. 3.3. Schematic diagram of the arrangement of measurement ports in the combustion chamber of the 670 MW CFB boiler: a) arrangement of measurement ports for probes; b) arrangement of pressure ports



Rys. 3.4. Porty ciśnienia: a) rozmieszczenie portów pomiarowych ciśnienia w dolnej części komory paleniskowej (widok od wewnątrz komory paleniskowej); b) schemat portu ciśnienia

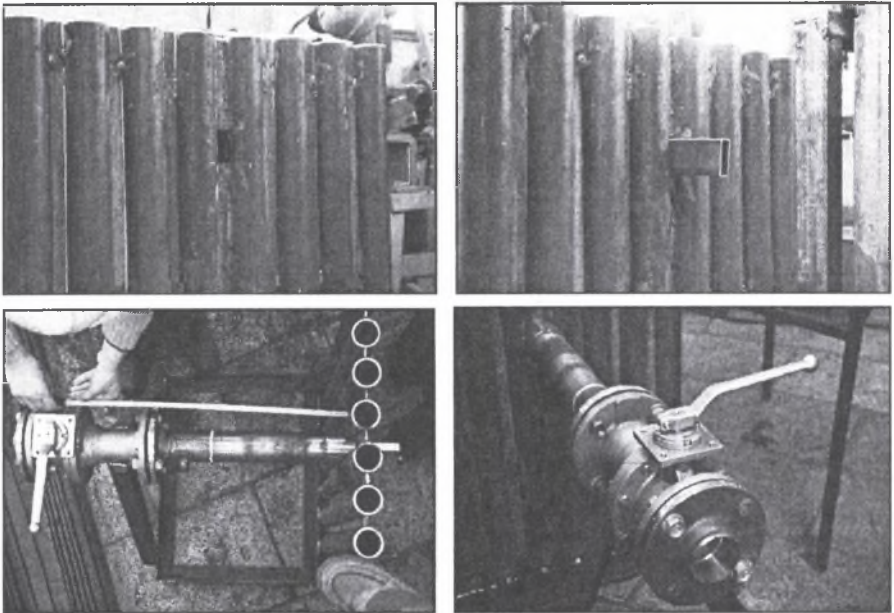
Fig. 3.4. Pressure ports: a) arrangement of pressure measurement ports in the bottom combustion chamber part (as viewed from the inside of the combustion chamber); b) schematic diagram of the pressure port

Wszystkie porty wyposażono w armaturę odcinającą i podłączono do systemu sprężonego powietrza. Na poziomach pomiarowych wokół komory paleniskowej wykonano układy wspomagające sondy, tj.: układ wody chłodzącej, układ sprężonego powietrza oraz układ zasilania w energię elektryczną. W trakcie prowadzonych badań pobierane były również próbki: paliwa, sorbentu, popiołu dennego oraz popiołu lotnego.

W badaniach wykorzystano specjalnie do tego celu zaprojektowane oraz wykonane sondy pomiarowe:

- sondę do poboru gazu,
- sondę do poboru ziaren materiału warstwy,
- sondy do pomiaru ciśnienia,
- sondę pojemnościową,
- sondę do pomiaru temperatury.

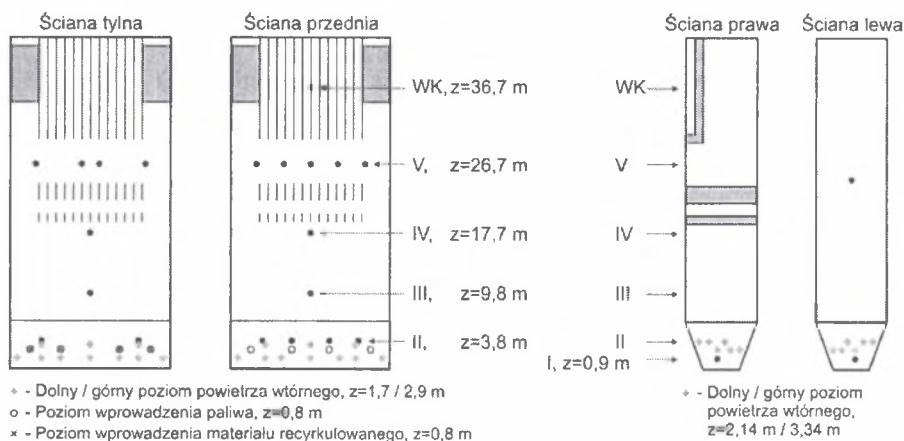
Sondy pomiarowe miały przekrój 20 mm x 50 mm. Maksymalna długość sond wyniosła 4,5 m i ograniczona była dostępną wolną przestrzenią wokół komory paleniskowej. Niemniej jednak głębokość penetracji komory wyniosła do 3 m. Pozwoliło to na przeprowadzenie badań w strefie przyściennej oraz w rdzeniu obszaru rozrzedzonego cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej. Na rysunku 3.5 przedstawiono wycinek ściany membranowej z wykonanym portem pomiarowym dla sond. Wloty materiałów sypkich (paliwo, sorbent, materiał recykulowany), jak również powietrza pierwotnego i powietrza wtórnego zlokalizowane są w obrębie dolnej części komory paleniskowej badanego kotła.



Rys. 3.5. Zdjęcia wycinka ściany membranowej wraz z zamontowanym portem dla sond
Fig. 3.5. Photographs of a membrane wall section with a probe port mounted

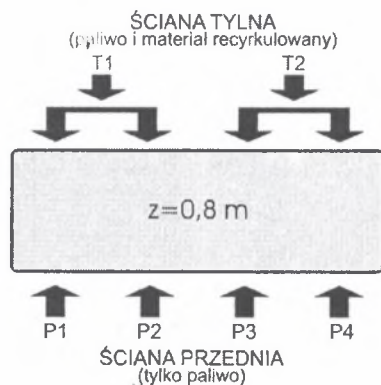
Na rysunkach 3.6 i 3.7 przedstawiono rozmieszczenie tych punktów dla wszystkich ścian komory paleniskowej. Ponieważ niemożliwe było przeprowadzenie wszystkich pomiarów w jednym czasie, należało uzyskać stabilne warunki pracy komory paleniskowej przez okres kilkunastu godzin. W tym celu konieczne jest między innymi uzyskanie

niezmienności wartości strumieni masy paliwa i powietrza oraz ich rozdzielenia na poszczególne ściany komory paleniskowej w trakcie trwania eksperymentu.



Rys. 3.6. Rozmieszczenie wlotów materiałów sypkich oraz powietrza dla badanej komory paleniskowej

Fig. 3.6. Arrangement of loose material and air inlets to the combustion chamber tested

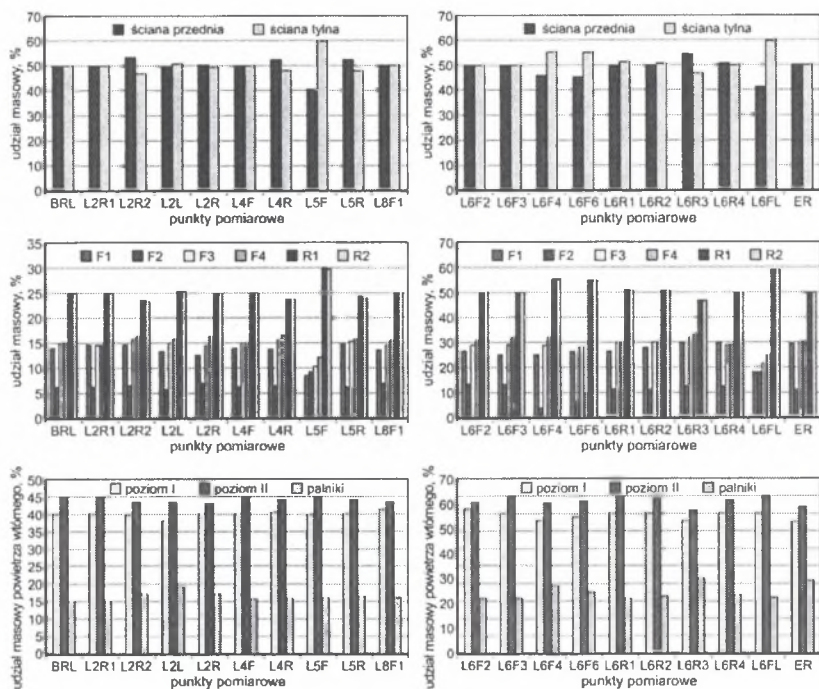


Rys. 3.7. Rozdział paliwa w dolnej części komory paleniskowej kotła z CWF 670 MW

Fig. 3.7. Distribution of fuel in the bottom combustion chamber part of the CFB 670 MW boiler

Na rysunku 3.8 przedstawiono rozkład paliwa oraz rozdział powietrza wtórnego w trakcie realizowanych badań zasadniczych na kotłach 670 MW. Dane przedstawione na rysunku 3.8 wskazują na uzyskanie porównywalnych warunków pracy kotła. Pozwalają one na przeprowadzenie spójnej analizy uzyskanych danych z okresu 30-dniowej zasadniczej serii pomiarowej. Badania uzupełniające założonego zakresu prac przeprowadzono na kotłach z cyrkulacyjną warstwą fluidalną typu COMPACT o mocy 700 MW. Schemat kotła przedstawiono na rysunku 3.9, a jego charakterystykę w pracy [99]. Komora paleniskowa kotła, przedstawionego na rysunku 3.9, na poziomie rusztu fluidyzującego ma przekrój 21,9 m x 5,2 m. Od poziomu 8,7 m w stosunku do rusztu przekrój komory paleniskowej wynosi 21,9 m x 10,1 m. Całkowita wysokość komory paleniskowej jest równa 42,1 m. Podstawową cechą wyróżniającą ten typ kotła w stosunku do kotła o mocy 670 MW w Elektrowni Turów jest odmienna

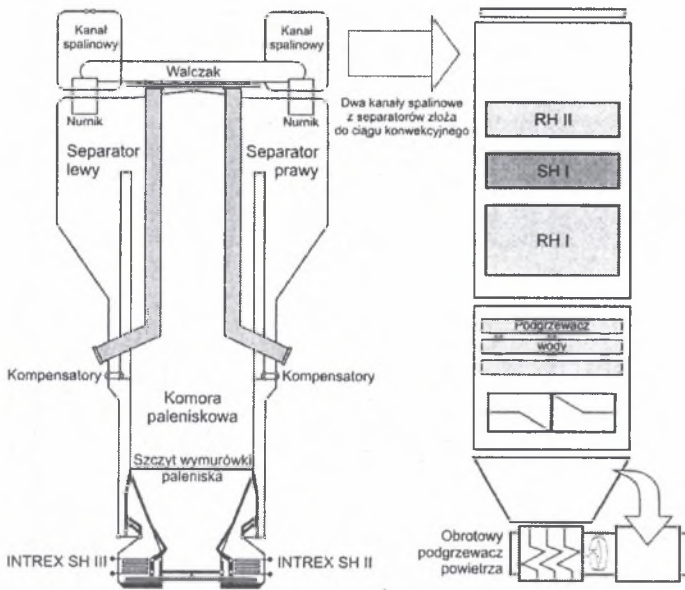
konstrukcja układu separacji ziaren materiału sypkiego od gorących spalin oraz układu nawrotu odseparowanych ziaren do komory paleniskowej. Separator nowego typu, zwany separatorem kompaktowym, wykonany jest z paneli ścian membranowych i wyłożony wewnątrz cienką wykładziną z materiału odpornego na erozję o grubości około 50 mm.



Rys. 3.8. Rozdział paliwa i powietrza wtórnego w trakcie badań kotła z CWF o mocy 670 MW
Fig. 3.8. Distribution of fuel and secondary air during testing of the 670 MW CFB boiler

Poprzeczny przekrój separatora jest prostokątny. Separator kompaktowy oraz kanał nawrotny, co warto podkreślić, zintegrowane są ze ścianą boczną kotła. Przyczynia się to do lepszego wykorzystania przestrzeni wokół komory paleniskowej oraz wymaga zdecydowanie mniej miejsca na zabudowę takiego kotła. Separator materiału sypkiego (4 sztuki) stanowią konstrukcję szczelną, ściany chłodzone są parą z walczaka. Zmiana konstrukcji separatora pozwoliła na poprawę skuteczność separacji w kotle COMPACT – obniżono średnicę separowanych ziaren z 150 μm do 80-100 μm za separatorem. W celu zmniejszenia wysokości komory paleniskowej w jej wnętrzu umieszczono ściany grodziowe, stanowiące elementy parownika. W przeciwieństwie do kotłów 670 MW przegrzewacz pierwotny pary I stopnia nie jest umiejscowiony w komorze paleniskowej, lecz w II ciągu kotła, natomiast przegrzewacz pierwotny pary II stopnia i przegrzewacz pary pierwotnej III stopnia zostały zlokalizowane w zewnętrznych wymiennikach ciepła typu INTREX. Pozostałe przegrzewacze pary (I i II stopień przegrzewu wtórnego) oraz podgrzewacze wody i powietrza (pierwotnego i wtórnego) umiejscowione są w ciągu konwekcyjnym. W dolnej części komory paleniskowej, osłoniętej wymurówką, tradycyjnie zlokalizowane są wloty wszystkich czynników doprowadzanych do komory paleniskowej (powietrze, paliwo, materiał inertny itp.), przy

czym w przeciwieństwie do kotła o mocy 670 MW, sorbent podawany jest wraz z paliwem do komory paleniskowej.



Rys. 3.9. Schemat kotła z CWF COMPACT 700 MW
 Fig. 3.9. Schematic diagram of the COMPACT 700 MW CFB boiler

Na potrzeby analizy warunków ciepło-przepływowych i emisji zanieczyszczeń z kotłów z cyrkulacyjną warstwą fluidalną wykorzystano również wyniki dostępnych w literaturze badań dotyczących kotłów z CWF w mniejszej skali technicznej. Zestawienie tych jednostek przedstawiono w tabelicy 3.3.

Zestawienie warunków badań eksperymentalnych CWF

Tablica 3.3

Autor	Miejsce	\dot{Q} , MW	Przekrój	H_k/D_c	D_{in} , m	H_k , m	Materiał warstwy	ρ_p , kg m ⁻³	d_p , mm	t_{tr} , °C	U_1 , m s ⁻¹	G_s , kg m ⁻² s ⁻¹
Zhang [121]	Geteborg	12	□	8,65	1,56	13,5	popiół	2600	0,22-0,33	850	3,4- 5,9	1-45
Couturier [13]	Chatham	72	□	6,01	3,96	23,8	popiół	2500	-	850	6,4	36
Werdermann [113]	Flensburg	109	□	5,49	5,10	28,0	popiół	2500	0,21	860	6,3	15
Zhang [121]	Orebro	165	□	4,93	6,80	33,5	popiół	2600	0,28	830	4,6	<5
Werdermann [113]	Duisburg	226	O	4,00	8,00	32,0	popiół	2500	0,18	860	5,3	10
Caloz [11]	Gardanne	685	□	2,81	12,8	36,0	popiół	-	-	-	5,5	-

4. TECHNIKI POMIAROWE CWF W SKALI TECHNICZNEJ

W celu przeprowadzenia analizy procesów hydrodynamiki i spalania zachodzących w komorach paleniskowych kotłów z cyrkulacyjną warstwą fluidalną, ilość danych możliwych do uzyskania ze standardowego układu rejestracji parametrów ruchowych kotła i ich zakres są niewystarczające. Dlatego też w trakcie realizacji badań eksperymentalnych wykorzystano dodatkowo szereg inwazyjnych technik pomiarowych lokalnych wartości kluczowych parametrów, które charakteryzują warunki ciepło-przepływowe cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej w komorze paleniskowej kotła w dużej skali technicznej. Do parametrów tych zaliczyć należy: lokalne stężenie ziaren materiału warstwy, lokalne prędkości ziaren materiału warstwy, lokalny strumień masy ziaren materiału warstwy, rozkład zastępczej średnicy ziaren materiału warstwy w przekroju poziomym i pionowym reaktora, rozkład temperatury w komorze paleniskowej i stężenia charakterystycznych składników gazu. Przedstawione poniżej techniki pomiarowe zostały po raz pierwszy wspólnie zastosowane na tak dużym obiekcie przemysłowym. Wymagało to opracowania nowych metod pomiarowych i nowych konstrukcji sond pomiarowych w stosunku do tych, które wykorzystywano już w mniejszej skali technicznej i skali laboratoryjnej [115].

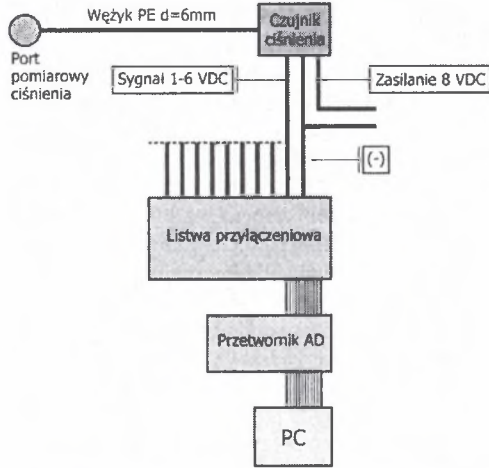
4.1. Pomiar ciśnienia w komorze paleniskowej

Jednym z podstawowych pomiarów przeprowadzanych w badaniach hydrodynamiki warstwy fluidalnej jest pomiar ciśnienia. W pracach [10, 36, 63, 67, 68, 104, 105, 106, 111, 122] przedstawiono, iż wykorzystując metodę analizy gęstości widmowej mocy sygnału pochodzącego z pomiaru ciśnienia można określić częstotliwość dominującą jako miarę jakości fluidyzacji. Ponadto metoda ta, jak wskazują badania [10], może być wykorzystana do weryfikacji wyników w trakcie zwiększania gabarytów stanowisk badawczych z CWF. Na rysunku 4.1 przedstawiono schemat wykorzystanego układu pomiarowego ciśnienia. Układ ten składał się z komputera PC wyposażonego w dwie 16-kanalowe karty pomiarowe, zestawu czujników, zasilacza oraz kabli pomiarowych przenoszących sygnały i zasilanie. W badaniach wykorzystano czujniki ciśnienia Honeywell typ 164PC i 142PC. Sygnał napięciowy z sensora proporcjonalny do badanego ciśnienia poprzez kable pomiarowe i listwę przyłączeniową przesyłany był na kartę przetworników A/D. Dane rejestrowano z częstotliwością 200 Hz w ciągu 10 min. Pozwoliło to na uzyskanie zbiorów posiadających 120 000 danych. Pomiar ciśnienia w komorze paleniskowej przeprowadzono jako pomiar różnicowy w stosunku do ciśnienia otoczenia. Zbiór danych dzielono na 30 podzbiorów, z których każdy zawierał 8192 odczyty wartości ciśnienia. Następnie obliczano średni rozkład gęstości widmowej ciśnienia w funkcji częstotliwości przy wykorzystaniu transformaty Fouriera. Pulsację ciśnienia analizowano również wykorzystując ich amplitudę opisaną jako odchylenie standardowe eksperymentalne według następującej zależności [21, 102]:

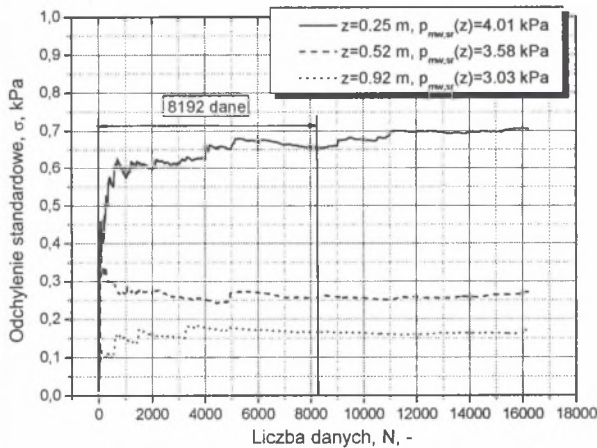
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (p_{mw}(n) - p_{mw,cr})^2} . \quad (4.1)$$

Na rysunku 4.2 przedstawiono wartość odchylenia standardowego w funkcji liczby danych w zarejestrowanym zbiorze wartości ciśnień. Jak widać na rysunku 4.2, niezależnie od odległości od rusztu, w jakiej przeprowadzano badania, 8192-elementowy zbiór danych można uznać za wystarczający do analizy pulsacji ciśnienia. Również Van Der Schaaf w

badaniach [111] stwierdził, iż w celu właściwej i zadowalającej oceny pulsacji ciśnienia wymagany jest zbiór danych o 100 000 elementów zarejestrowanych w czasie od 300 do 1200 s.



Rys. 4.1. Schemat układu pomiarowego ciśnienia wzdłuż wysokości komory paleniskowej
 Fig. 4.1. Schematic diagram of a system for the measurement of pressure along the combustion chamber height



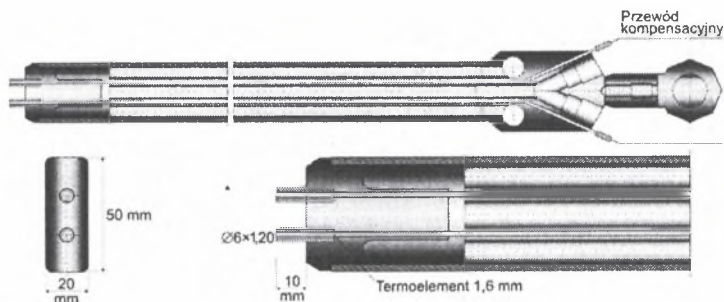
Rys. 4.2. Odchylenie standardowe ciśnienia w funkcji ilości zarejestrowanych danych
 Fig. 4.2. Standard deviation of pressure as a function of the amount of recorded data

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów ciśnienia wzdłuż wysokości komory paleniskowej obliczono wartość średnią stężenia objętościowego ziaren materiału warstwy na podstawie następującej zależności [110]:

$$c_{v, sr}(z) = \frac{\Delta p_{mv}}{\Delta z \cdot \rho_p \cdot g} \quad (4.2)$$

4.2. Pomiary temperatury w komorze paleniskowej

Pomiar temperatury w komorze paleniskowej dostarcza podstawowych informacji o przepływie ciepła oraz intensywności zachodzących reakcji chemicznych w objętości cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej. Wyniki pomiarów temperatury wskazywać mogą ponadto na występowanie problemów np. z niewystarczającym mieszaniem ziaren materiału warstwy i gazu, co z kolei prowadzić może do defluidyzacji warstwy. W pomiarach lokalnych wartości temperatury w objętości warstwy w komorze paleniskowej zrezygnowano z tradycyjnego montażu termoelementów na ścianach komory paleniskowej, gdyż dokonują one pomiaru jedynie w strefie przysiennej, a wykorzystano sondę pomiarową prezentowaną na rysunku 4.3. Sonda pozwalała na pomiar lokalnej wartości temperatury w komorze paleniskowej w odległości do 3 m od ściany, charakteryzowała się przekrojem 20 mm x 50 mm i wyposażona była w układ dwóch termoelementów NiCr-Ni.



Rys. 4.3. Schemat sondy do pomiaru temperatury w komorze paleniskowej

Fig. 4.3. Schematic diagram of a probe for temperature measurement in the combustion chamber

Sonda współpracowała ponadto z układem zasilającym w energię elektryczną i wodę chłodzącą. Dla każdego punktu pomiarowego w komorze paleniskowej wykonano 5 serii pomiarowych. Czas trwania jednego pomiaru wyniósł 10 min.

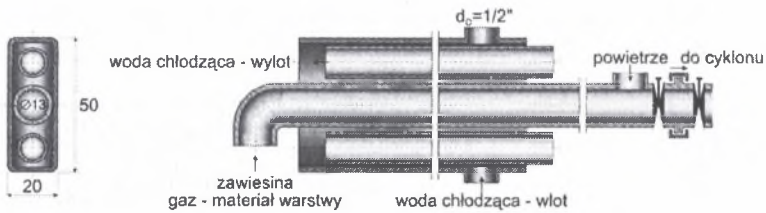
4.3. Pomiary przepływu i stężenia fazy stałej

Jednymi z zasadniczych parametrów charakteryzujących warunki pracy CWF są lokalne wartości: prędkości ziaren, stężenia objętościowe ziaren oraz gęstości strumienia masy cyrkulujących ziaren. W celu określenia wartości tych parametrów wykorzystano 3 typy sond chłodzonych wodą, tj: sondę próbkującą, sondy ciśnieniowe oraz sondę pojemnościową.

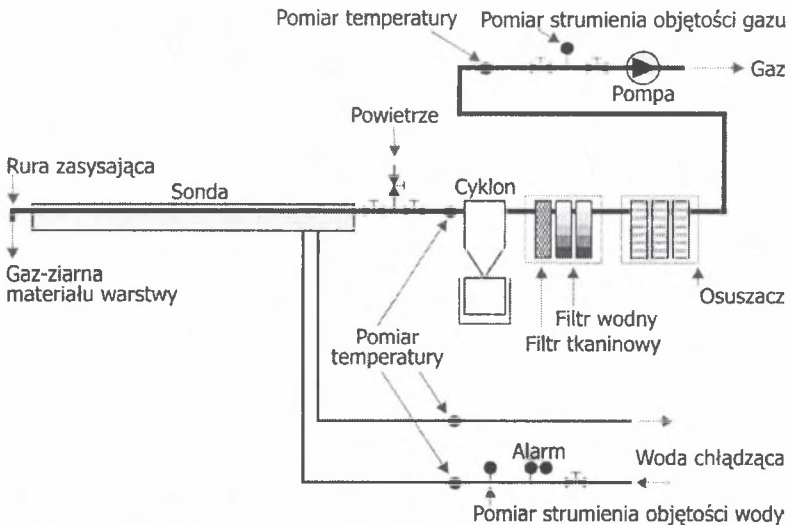
4.3.1. Sonda próbkująca

Sondy próbkujące są bardzo dobrze znane przy próbkowaniu strumieni gazu zawierających pyły [17], na przykład przy pomiarach stężenia pyłów w przewodach gazu odlotowego w elektrowniach opalanych paliwem stałym. Warunkiem koniecznym takich pomiarów jest zachowanie izokinetyczności zasysania próbek materiału warstwy, tzn. dla pomiarów naukowych średnia wartość ilorazu prędkości gazu zasysającego przez sondę i prędkości gazu opływającego sondę z zewnątrz powinna mieścić się w zakresie od 0,95 do 1,1. Wymaganie to umożliwia dokładne zarejestrowanie prędkości przepływu gazu i fazy stałej. Warunek ten nie jest możliwy do spełnienia w warstwach fluidalnych, gdzie znana jest jedynie

średnia powierzchniowa prędkość gazu. W konkretnym obszarze wewnątrz objętości warstwy fluidalnej zarówno ilość, jak i kierunek oraz zwrot przepływu gazu i fazy stałej mogą ulegać znacznym pulsacjom. W pewnych momentach sonda może być zanurzona w rozrzedzonej zawieszynie poruszającej się do góry, a chwilę później końcówka sondy może napotkać poruszające się w dół skupiska ziaren w postaci tzw. aglomeratów czy skupisk. Sonda próbkująca może być więc stosowana w warstwie fluidalnej jedynie w trybie nieizokinetycznego ssania. Jednakże pomiary wielu autorów (np. Rhodes [10, 82], Leckner [80], Rhodes i Laussmann [52], Kruse i Werther [81]) wykazały, że dla danej konstrukcji sondy istnieje zakres prędkości zasysania gazu, w którym gęstość strumienia masy netto (przepływ lokalny do góry minus przepływ lokalny w kierunku w dół) pobieranej fazy stałej jest niezmienna. Z powodu relatywnie wysokich stężeń materiału warstwy, przepływ fazy gazowej i stałej w cyrkulacyjnych warstwach fluidalnych jest wystarczająco stabilny i prędkość ssania, która jest znacznie wyższa od prędkości fluidyzującego gazu, nie powoduje znaczącego wzrostu masy pobieranej fazy stałej. Na rysunku 4.4. przedstawiono schemat sondy próbkującej, natomiast na rysunku 4.5 układ pomiarowy.

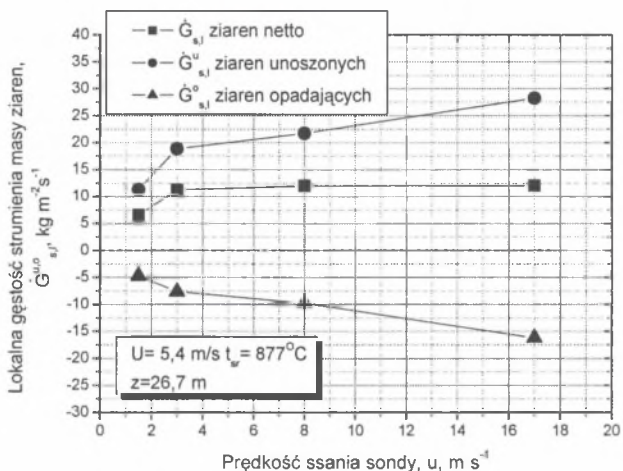


Rys. 4.4. Schemat nieizokinetycznej sondy próbkującej
 Fig. 4.4. Schematic diagram of a non-isokinetic sampling probe



Rys. 4.5. Schemat układu do poboru ziaren materiału warstwy
 Fig. 4.5. Schematic diagram of a system for taking bed material particles

Układ pomiarowy prezentowany na rysunku 4.5 składał się z sondy o przekroju 20 mm x 50 mm chłodzonej wodą. Średnica rury zasysającej wynosiła 12 mm. Pobierane ziarna materiału warstwy były oddzielane od gazu w cyklonie. Konstrukcja sondy oparta była na założeniu, iż lokalna gęstość strumienia masy ziaren materiału warstwy netto jest niezmienna w określonym eksperymentalnie zakresie prędkości ssania sondy. Na rysunku 4.6 przedstawiono rozkład lokalnej gęstości strumienia masy ziaren unoszonych, opadających oraz lokalnej gęstości strumienia masy ziaren netto w funkcji prędkości ssania sondy.



Rys. 4.6. Lokalna gęstość strumienia masy ziaren materiału warstwy w funkcji prędkości ssania sondy
Fig. 4.6. Local solids mass flux density as a function of probe suction velocity

Na podstawie przeprowadzonych badań wstępnych ustalono prędkość ssania sondy równą $10 m s^{-1}$. Była ona wystarczająco wysoka do utrzymywania transportu ziaren w poziomej części sondy we wszystkich warunkach pomiarowych. W zależności od odległości od rusztu komory paleniskowej czas pomiaru mieścił się w zakresie od 300 do 600 s. W celu zabezpieczenia pompy przed drobnymi ziarnami nie odseparowanymi w cyklonie w układzie zainstalowany został filtr tkaninowy oraz filtr wodny. Dodatkowo układ wyposażono w zawory odcinające umożliwiające przedmuchiwanie sondy w przypadku jej zablokowania materiałem warstwy. W celu zabezpieczenia przed przegrzaniem układu w systemie wody chłodzącej i systemie zasysania ziaren materiału warstwy zainstalowano czujniki temperatury. Poza tym prowadzono pomiar strumienia objętości wody oraz gazu. Lokalną gęstość strumienia masy cyrkulujących ziaren, tzw. netto, będącą wypadkową gęstości strumienia masy ziaren: unoszonych i ziaren opadających w badanym obszarze komory paleniskowej, obliczano według następującej zależności:

$$\dot{G}_{s,i} = \dot{G}_{s,i}^u + \dot{G}_{s,i}^o, \quad (4.3)$$

gdzie:

$$\dot{G}_{s,i}^{u,o} = \frac{4 \cdot m_{s,i}^{u,o}}{\pi \cdot d_0^2 \cdot t}, \quad (4.4)$$

Średnią gęstość strumienia masy ziaren materiału warstwy netto na danej wysokości komory paleniskowej obliczono z zależności (4.5):

$$\dot{G}_s = \frac{\dot{G}_{s, hsr, sr} \cdot A_{hsr} + \dot{G}_{s, hsp, sr} \cdot A_{hsp}}{A_k}, \quad (4.5)$$

gdzie:

$$\dot{G}_{s, hsp, sr} = \frac{1}{\delta_{hsp}} \int_0^{\delta_{hsp}} \dot{G}_{s, l}(r) dr, \quad (4.6)$$

$$\dot{G}_{s, hsr, sr} = \frac{2}{D_e - 2\delta_{hsp}} \int_0^{D_e/2} \dot{G}_{s, l}(r) dr. \quad (4.7)$$

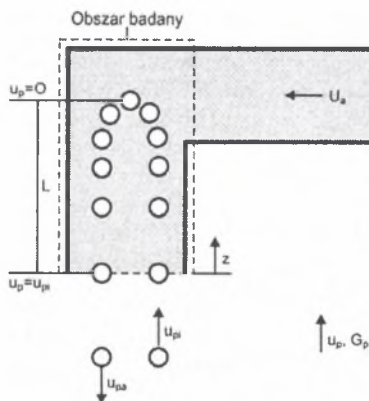
Grubość hydraulicznej strefy przyściennej, δ_{hsp} , zdefiniowano jako odległość od ściany, gdzie uśredniona w czasie gęstość strumienia masy ziaren netto przyjmuje wartość zero.

4.3.2. Sondy ciśnieniowe

W badaniach cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej kotła w dużej skali technicznej wykorzystano dwa typy sond spiętrzających, tj. sondę typu „T” oraz sondę typu „L”. Zestawienie konstrukcji sond spiętrzających oraz ich opis przedstawiono między innymi w pracy [38].

4.3.2.1. Sonda ciśnieniowa typu „T”

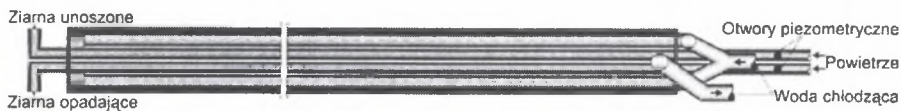
Oddziaływanie zawiesiny gaz-ziarna na dyszę sondy typu „T” ma swój wyraz w złożonym przekazywaniu pędu pomiędzy gazem a ziarnami materiału warstwy wewnątrz i na zewnątrz końcówki sondy. Jeżeli założymy, iż kontrolną objętością jest objętość części sondy oznaczona linią kreskowaną na rysunku 4.7 [120], to analizowane będą jedynie procesy zachodzące wewnątrz końcówki.



Rys. 4.7. Schemat pracy końcówki sondy

Fig. 4.7. Schematic diagram probe tip operation

Ziarna w głównym strumieniu zostają spowolnione do prędkości u_{pi} przy wejściu do końcówki sondy. W końcówce ruch ziaren może być podzielony na dwa etapy. W pierwszym etapie ziarna są spowalniane poprzez powietrze oczyszczające dopóki nie zostanie osiągnięty stan ustalony. W drugim etapie ziarna zmieniają kierunek, przyspieszają i są wyłapywane z prędkością wyjściową u_{pa} . Procesy odbywające się w obydwu etapach spowodowane są wzrostem statycznego ciśnienia gazu w tylnej części końcówki. Długość L oznacza długość spowalniania dla ziaren od wejścia, aż do prędkości zerowej. Na rysunku 4.8 przedstawiono schemat wykorzystanej w badaniach sondy typu „T”.



Rys. 4.8. Schemat sondy ciśnieniowej typu „T”

Fig. 4.8. Schematic diagram of „T”- type pressure probe

Sonda przedstawiona na rysunku 4.8 składa się z dwu równoległych rurek przymocowanych do siebie. Rurki mają średnicę wewnętrzną 8 mm. Końce rurek są wygięte pod kątem prostym i skierowane do góry i w dół. Powietrze oczyszczające przechodzi przez obydwie rurki w celu uniemożliwienia zatykania końcówek oraz poprawy wymiany pędu pomiędzy fazą gazową i fazą stałą. Sondę wykonano o przekroju 20 mm x 50 mm i chłodzono w trakcie pomiarów wodą. Przepływ powietrza oczyszczającego monitorowany był przez dwa przepływomierze kontrolne. Różnica ciśnienia p_{sp} , tzw. ciśnienie spiętrzenia netto, pomiędzy dwiema końcówkami mierzona jest przez dwa otwory piezometryczne przedstawione na rysunku 4.8. Średnie ciśnienie spiętrzenia obliczane było dla każdej serii pomiarowej. Czas pomiaru w jednej serii wyniósł 5 min i 10 min, natomiast częstotliwość próbkowania odpowiednio 100 Hz i 200 Hz. Podobne sondy były wykorzystane w pracach [1, 80, 120]. Sonda wykorzystana w obecnych badaniach była zbliżona do sondy wykorzystanej przez Zhanga, który to w pracy [120] przedstawił jej szczegółowy opis. Różnica ciśnień, która bezpośrednio związana jest z prędkością ziaren i gęstością strumienia masy ziaren, opisana została następującą zależnością:

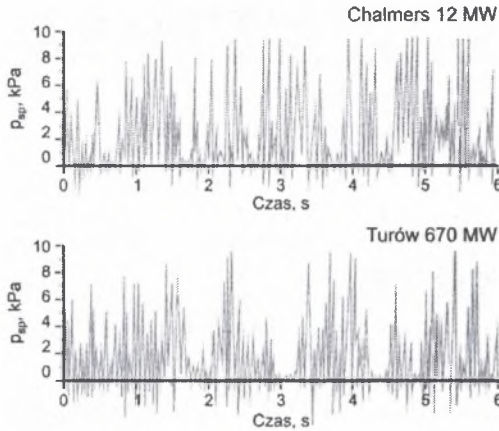
$$p_{sp} = \alpha \cdot c_{v,l} \cdot \rho_p \cdot (u_{p,l})^2 + p_s = \alpha \cdot \dot{G}_{s,l} \cdot u_{p,l} + p_s = \frac{\alpha \cdot (\dot{G}_{s,l})^2}{c_{v,l} \cdot \rho_p} + p_s \quad (4.8)$$

Współczynnik α bezpośrednio zależał od ilorazu prędkości ziaren na wejściu do końcówki sondy i prędkości ziaren w głównym strumieniu. Stała p_s odnosiła się do wewnętrznego przepływu powietrza oczyszczającego i otaczającego przepływu gazu w pobliżu końcówki sondy oraz uwzględniała wpływ grawitacji. Na rysunku 4.9 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów ciśnienia spiętrzenia netto na badanym obiekcie o mocy 670 MW oraz na kotle z CWF o mocy 12 MW w Chalmers University of Technology [86]. Prezentowane wyniki dotyczą strefy przyściennej obszaru rozrzedzonego cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej. Jak widać (rys. 9), uzyskane sygnały, z dwóch różniących się między sobą konstrukcją sond, mają tę samą strukturę pod względem pulsacji i skali czasu. Pomiaru stężenia objętościowego ziaren pokazują częste występowanie skupisk ziaren (aglomeratów), które są widoczne jako lokalne piki. Wykorzystując wartość netto ciśnienia spiętrzenia pomierzoną przez sondę ciśnieniową typu „T”, gęstość strumienia masy ziaren oraz prędkość ziaren można obliczyć z zależności:

$$\dot{G}_{s,l} = \frac{P_{sp,sp} - P_s}{\alpha \cdot u_{p,l}} \quad (4.9)$$

Równanie (4.9) wymaga, aby jeden z parametrów, tj. gęstość strumienia masy lub prędkość ziaren, mierzony był oddzielnie. Wartość lokalną gęstości strumienia masy ziaren można obliczyć również z zależności:

$$\dot{G}_{s,l} = c_{v,l} \cdot \rho_p \cdot u_p \quad (4.10)$$



Rys. 4.9. Rozkład ciśnienia spiętrzenia netto w funkcji czasu dla kotła 12 MW oraz 670 MW
Fig. 4.9. Distribution of net impact pressure as a function of time for the 12 MW and 670 MW boilers

Wykorzystując równanie (4.9) i (4.10) określono wartości stałych α i ρ_s . Przyjęto ponadto, iż prędkość ziaren z zależności (4.10) w trakcie wzorcowania [15] sondy obliczana będzie z następującego równania:

$$u_p = U - U_t \quad (4.11)$$

Prędkość unoszenia ziaren obliczona została zgodnie z równaniem Haidera i Levenspiela [24]:

$$U_t = \left(\frac{4d_p \cdot (\rho_p - \rho_g)}{3\rho_g C_D} \right)^{1/2} \quad (4.12)$$

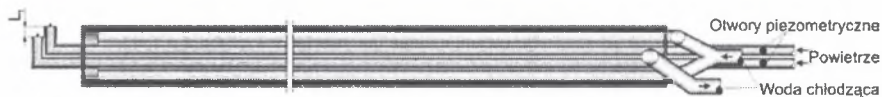
gdzie:

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}_p} \left[1 + (8,1716 \cdot e^{-4,0655 \phi_p}) \cdot \text{Re}_p^{0,0964+0,5565 \phi_p} \right] + \frac{73,69 \cdot (e^{-5,0748 \phi_p}) \cdot \text{Re}_p}{\text{Re}_p + 5,37 \cdot e^{6,2122 \phi_p}} \quad (4.13)$$

Dla danych warunków przepływowych w komorze paleniskowej, tj. prędkości gazu, średnicy ziaren materiału warstwy oraz prędkości powietrza oczyszczającego, uzyskano następujące wartości parametrów α i ρ_s , odpowiednio 2,4 i 50 Pa dla badanego kotła.

4.3.2.2. Sonda ciśnieniowa typu „L”

Sonda ciśnieniowa typu „L” wykorzystana została do pomiaru prędkości skupisk ziaren materiału warstwy. Ponieważ dokonywany jest tylko pomiar prędkości, nie ma potrzeby doboru optymalnej prędkości przepływu powietrza wewnątrz sondy. Jedyny warunek, który należy spełnić, to utrzymanie wystarczająco wysokiej prędkości gazu oczyszczającego, aby nie dopuścić do blokowania sondy przez ziarna materiału warstwy. Schemat sondy przedstawiono na rysunku 4.10.

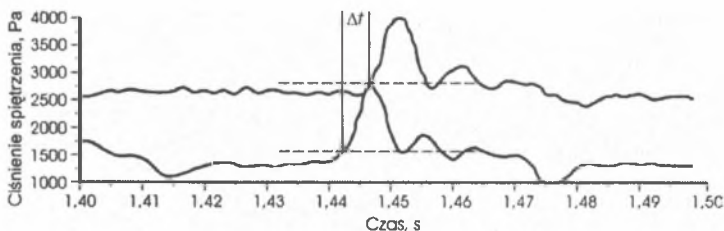


Rys. 4.10. Schemat sondy ciśnieniowej typu „L”
Fig. 4.10. Schematic diagram of „L”-type pressure probe

W przypadku omawianej sondy, jak widać na rysunku 4.10, obie końcówki usytuowane są w tym samym kierunku, a odległość w kierunku pionowym między nimi, L_t , wynosi 10 mm. W konsekwencji prędkość skupisk ziaren materiału warstwy jest określana na podstawie czasu opóźnienia wystąpienia pików w rejestrowanym sygnale na górnej i dolnej końcówce sondy z następującą zależnością:

$$u_p = \frac{L_t}{\Delta t} \quad (4.14)$$

Na rysunku 4.11 przedstawiono przykładowy przebieg czasowy odczytu ciśnienia na końcówkach sondy. W chwili przejścia aglomeratu w sąsiedztwie sondy rejestrowane są zdecydowanie wyższe wartości ciśnień odpowiednio dla dolnej i górnej końcówki sondy. W trakcie trwania pomiarów czas próbkowania wyniósł od 100 do 300 s, natomiast częstotliwość próbkowania w zależności od warunków pracy kotła wyniosła od 400 do 2000 Hz.

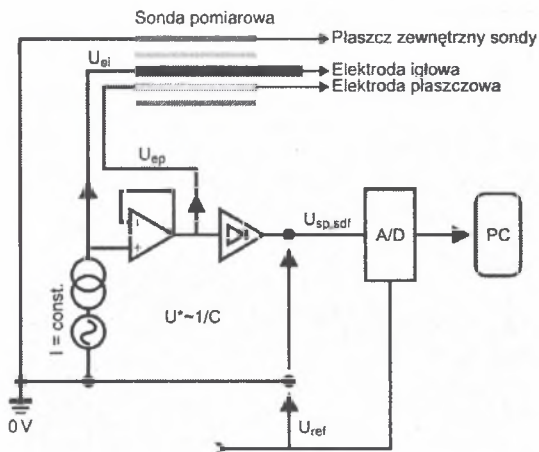


Rys. 4.11. Przebieg czasowy sygnałów ciśnienia z sondy ciśnieniowej typu „L”
Fig. 4.11. Time variation of pressure signals from the „L”-type pressure probe

4.3.3. Sonda pojemnościowa

Sondę pojemnościową wykorzystano do pomiaru stężenia objętościowego ziaren materiału warstwy, jak również do pomiaru prędkości skupisk ziaren. Stężenie objętościowe ziaren materiału warstwy określone zostało na podstawie zmian względnej wartości stałej

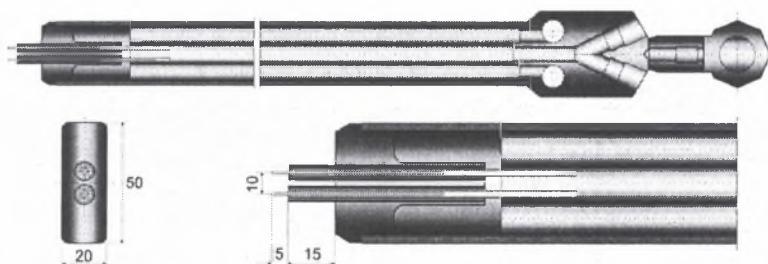
dielektrycznej w badanym obszarze struktury cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej. Na rysunku 4.12 przedstawiono schemat układu pomiarowego lokalnego stężenia ziaren materiału warstwy. W celu pomiaru prędkości ziaren materiału warstwy sondę pojemnościową wyposażono w układ dwóch kondensatorów. Pozwoliło to na określenie czasu przejścia skupisk ziaren materiału warstwy pomiędzy nimi. Znając czas przejścia i odległość pomiędzy kondensatorami oraz wykorzystując metodę korelacji wzajemnej obliczano prędkość skupisk ziaren materiału warstwy.



Rys. 4.12. Schemat układu pomiarowego lokalnego stężenia ziaren materiału warstwy w komorze paleniskowej

Fig. 4.12. Schematic diagram of a system for the measurement of local solids volume concentration in the combustion chamber

Schemat sondy przedstawiono na rysunku 4.13. Sondy pomiarowe wyposażono dodatkowo w systemy zasilające energią elektryczną i wodą chłodzącą. Częstotliwość pomiaru sondą pojemnościową wyniosła 10 kHz. Każdy zbiór danych zawierał 130 000 odczytów dla jednego kanału. Czas pomiaru wyniósł około 13 s. Dla każdego punktu pomiarowego w komorze paleniskowej wykonano 5 serii pomiarowych.

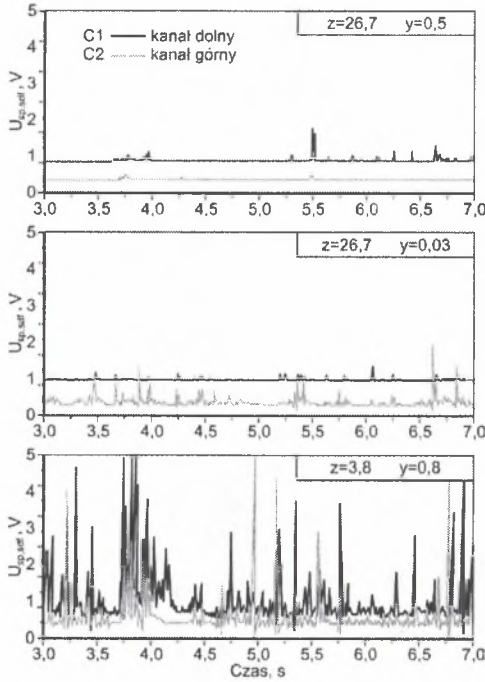


Rys. 4.13. Schemat sondy pojemnościowej do pomiaru prędkości skupisk ziaren

Fig. 4.13. Schematic diagram of a capacitive probe for the measurement of particle cluster velocity

Na rysunku 4.14 przedstawiono przykładową strukturę sygnału uzyskanego sondą pojemnościową dla kilku poziomów pomiarowych w badanym kotle o mocy 670 MW. Jak

widać w dolnej części komory paleniskowej, gdzie należało się spodziewać zdecydowanie wyższych stężeń ziaren materiału warstwy, niż w jej górnej części, zarejestrowane sygnały są bardziej intensywne. Ponadto w górnej części komory paleniskowej amplituda uzyskanego sygnału w strefie przyściennej jest większa niż w przypadku wnętrza kotła, co z kolei potwierdza zmianę stężenia objętościowego ziaren w przekroju poziomym rozrzedzonego obszaru cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej.



Rys. 4.14. Przebieg czasowy sygnału z sondy pojemnościowej
 Fig. 4.14. Time variation of the signal from the capacitive probe

Względną wartość stałej dielektrycznej określano przy wykorzystaniu zależności [116]:

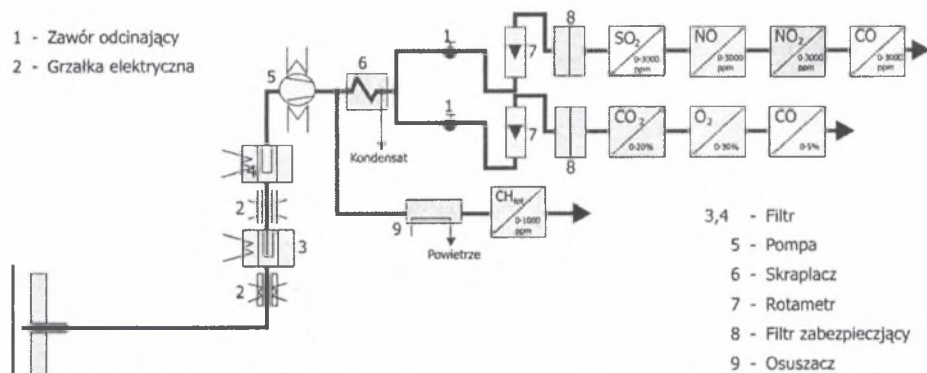
$$K_{de} = \frac{U_{ref} - U_{sp,sg}}{U_{ref} - U_{sp,sdf}}, \quad (4.15)$$

natomiast lokalną wartość stężenia objętościowego ziaren materiału warstwy z zależności [116]:

$$c_{v,l} = \frac{c_{v,mf} \cdot (K_{de} - 1)}{K_{de,mf} - \left(1 + \frac{(K_{de,mf} - K_{de}) \cdot (K_{de,mf} - 3)}{K_{de,mf}} \right)}, \quad (4.16)$$

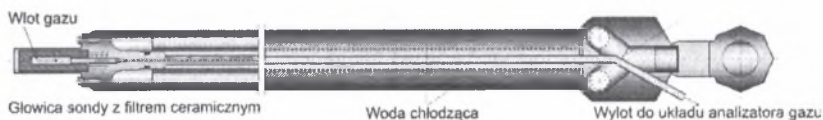
4.4. Pomiar stężeń składników gazu w komorze paleniskowej

Układ pomiarowy, który został wykorzystany do poboru gazu z komory paleniskowej, przedstawiono na rysunku 4.15, natomiast schemat sondy pomiarowej prezentuje rysunek 4.16. Przekrój sondy wyniósł 20 mm x 50 mm. Płaszcz zewnętrzny sondy chłodzony wodą zabezpieczał przed jej przegrzaniem w trakcie pracy w komorze paleniskowej, natomiast we wnętrzu sondy temperatura utrzymywana była powyżej kwaśnego punktu rosy, tj. 150°C poprzez grzejny przewód elektryczny. Układ pomiarowy, przedstawiony na rysunku 4.15, rejestrował stężenia: NO, N₂O, CO, CO₂, O₂ i SO₂. Do analizy wyników badań przyjęto wartość średnią stężenia poszczególnych rejestrowanych składników gazu z każdej serii pomiarowej. Czas serii pomiarowej wyniósł 10 min. Szczegółowy opis wykorzystanego systemu zawarto w pracach [31-34].



Rys. 4.15. Schemat układu pomiarowego

Fig. 4.15. Schematic diagram of the measuring system



Rys. 4.16. Schemat sondy pomiarowej do poboru gazu z komory paleniskowej

Fig. 4.16. Schematic diagram of a measuring probe for the sampling of gas from the combustion chamber

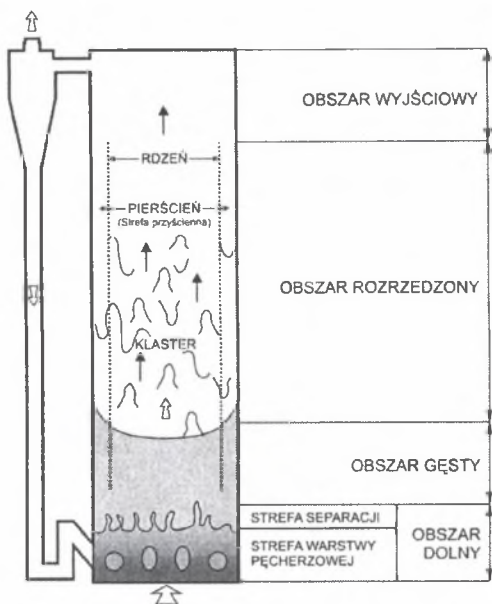
Badania prowadzone były przez okres 30 dni, dlatego też w celu wyeliminowania wpływu zmian składu elementarnego paliwa na wartość emitowanych zanieczyszczeń gazowych uzyskane lokalne stężenia wymienionych powyżej składników fazy gazowej odniesiono do stężeń odpowiednich składników pomierzonych przez system kotłowy na wlocie do komina. W konsekwencji tego do analizy wyników pomiarów wykorzystano poniższą zależność [80]:

$$W_i = \frac{C_{i, \text{pomiar}}}{C_{i, \text{emitor}}} \quad (4.17)$$

5. WARUNKI PRZEPLYWOWE W KOTLE Z CWF

5.1. Wprowadzenie

Badania modelowe hydrodynamiki cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej w skali laboratoryjnej oraz w małej skali technicznej [25, 28, 63, 67] wykazały, iż w objętości komory paleniskowej można wyróżnić cztery charakterystyczne obszary różniące się między sobą stężeniem ziaren materiału warstwy. Rozkład ich obrazowo przedstawiono na rysunku 5.1 [28].



Rys.5.1. Schemat obrazujący strukturę cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej

Fig.5.1. Schematic diagram illustrating the structure of the circulating fluidized bed

Pierwszy z nich to obszar dolny, który zachowywał się bardzo podobnie jak warstwa pęcherzowa i miał wysokie stężenie objętościowe ziaren materiału warstwy. Charakterystycznym miejscem CWF był również obszar gęsty. Rozkład stężenia materiału warstwy w tym obszarze zmieniał się wraz z wysokością, od wysokiego na granicy z obszarem dolnym, do niskiego na granicy z obszarem rozrzedzonym [101]. W związku z tym był to obszar o wysokiej intensywności mieszania. Górną część CWF stanowił obszar rozrzedzony, który charakteryzował się strukturą „rdzeniowo-pierścieniową” dla reaktorów o przekroju kołowym lub strukturą „rdzeń-strefa przyścienna” dla reaktorów o przekroju prostokątnym. Badania [25] dowiodły, że rdzeń formowany jest przez przepływ ziaren materiału warstwy do góry i występuje w osi CWF. Pierścień lub strefa przyścienna są formowane w wyniku przepływu skupisk ziaren w dół i występują w bliskim sąsiedztwie ścian reaktora. Strefa przyścienna charakteryzuje się wyższym stężeniem ziaren materiału warstwy, niż strefa rdzenia. Kolejnym miejscem CWF charakterystycznym dla odmiennego mechanizmu zachowania się ziaren był obszar wyjściowy. Jak pokazano na rysunku 5.1, obszar ten położony był w sąsiedztwie wylotu ziaren materiału warstwy z reaktora. Według

badan Kruse i Werthera [45], na zachowanie się ziaren materiału warstwy w tym obszarze główny wpływ ma ukształtowanie wylotu z reaktora. Poza reaktorem charakterystycznym elementem CWF jest układ nawrotu, ponieważ ze względu na wyższe prędkości gazu w komorze paleniskowej od prędkości unoszenia ziaren materiału warstwy, osiągnięcie fluidyzacji rozwiniętej (fluidyzacji cyrkulacyjnej) wymaga ciągłego dostarczania materiału warstwy do reaktora celem utrzymania założonego rozkładu stężenia ziaren materiału warstwy. Jest to zwykle uzyskiwane poprzez ponowne zawracanie unoszonych z komory paleniskowej ziaren materiału warstwy w dolny obszar reaktora przez układ recyrkulacji.

Podstawowymi wielkościami oddziałującymi bezpośrednio na warunki ciepłoprzepływowe w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej są parametry charakteryzujące konstrukcję kotła, tj.:

- gabaryty komory paleniskowej,
- konstrukcja i rodzaj dna dyszowego,
- konstrukcja separatora ziaren i układu nawrotu,

jak również parametry procesowe, tj.:

- właściwości fizykochemiczne gazu i ziaren,
- prędkość gazu i ziaren,
- strumień masy ziaren cyrkulujących w objętości komory paleniskowej i pomiędzy komorą a układem nawrotu (skuteczność separacji),
- stężenie i rozkład ziaren materiału warstwy,
- temperatura w komorze paleniskowej.

Wymienione parametry bezpośrednio i pośrednio oddziałują na:

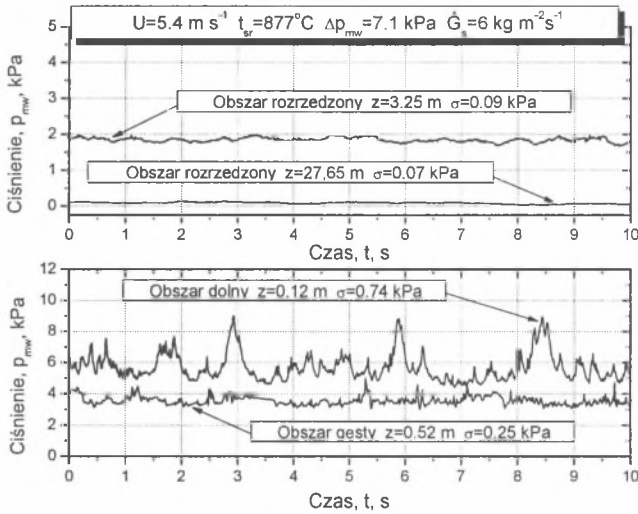
- przebieg procesu ścierania i rozdrabniania ziaren w warstwie,
- miejsce przebiegu poszczególnych etapów procesów spalania w układzie CWF,
- rozkładu strefy redukcyjnej i utleniającej w komorze paleniskowej kotła,
- czasu pobytu produktów procesu spalania,
- miejsca ostatecznego utleniania CO do CO₂,
- skuteczności procesu odsiarczania,
- konwersji azotu zawartego w paliwie do NO_x i N₂O,
- udziału części palnych w popiele dennym i lotnym.

Dlatego też podejmując próbę analizy warunków ciepłoprzepływowych w komorze paleniskowej kotła, zwłaszcza w dużej skali technicznej, należy wziąć pod uwagę wszystkie wymienione wielkości, które współzależnie od siebie kształtują strukturę cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej, co z kolei odgrywa zasadniczą rolę w powstawaniu emisji zanieczyszczeń z procesu spalania.

5.2. Pulsacje ciśnienia materiału warstwy

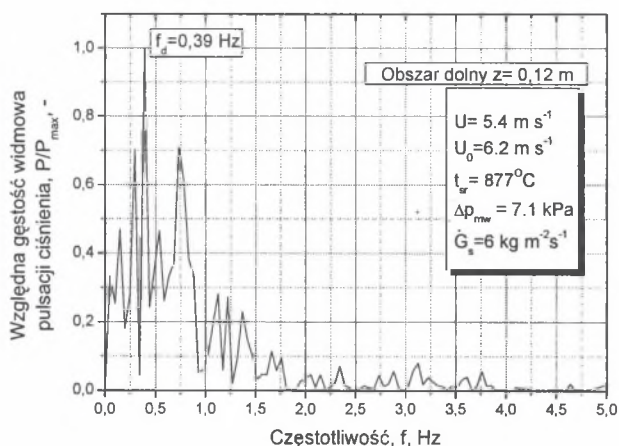
Zagadnienia związane z pulsacją ciśnienia materiału warstwy dotyczą głównie obszaru dolnego CWF i prezentowane były między innymi w pracach [36, 106]. Badania te przeprowadzono w temperaturze otoczenia na stanowisku z CWF o stosunku H_k/D_e wynoszącym 41 oraz na kotle z CWF o stosunku H_k/D_e równym 8,8. W pierwszym przypadku częstotliwość dominująca w obszarze dolnym wyniosła 1 Hz, natomiast w przypadku drugim 0,5 Hz. Według autorów pracy [36, 106], istniały dwie główne przyczyny różnic pomiędzy uzyskanymi wynikami. Pierwsza z nich to gabaryty wykorzystanych stanowisk badawczych, a druga - to różnica temperatury warstwy fluidalnej. Autorzy stwierdzili ponadto, że wraz ze zmianą prędkości gazu lub wysokości obszaru dolnego częstotliwość dominująca nie ulegała zmianom, niemniej jednak wysokość dolnego obszaru

miała znacznie większy wpływ na wielkość amplitudy pulsacji ciśnienia niż prędkość gazu. W badaniach [36] uzyskano częstotliwość dominującą w zakresie 0,7 Hz do 1,5 Hz oraz 0,4 Hz do 0,7 Hz dla stanowisk o stosunku H_w/D_e odpowiednio 31 i 7. W badaniach [68] autorzy uzyskali częstotliwość dominującą w zakresie od 0,6 do 1,6 Hz w strefie przyściennej, natomiast w osi reaktora częstotliwość dominująca wyniosła od 1,5 do 4 Hz. Badania pulsacji ciśnienia w komorze paleniskowej kotła dużej mocy przedstawiono w pracy [85, 95]. Na rysunku 5.2 przedstawiono rozkład ciśnienia w komorze paleniskowej w funkcji czasu dla badanego kotła o mocy 670 MW.

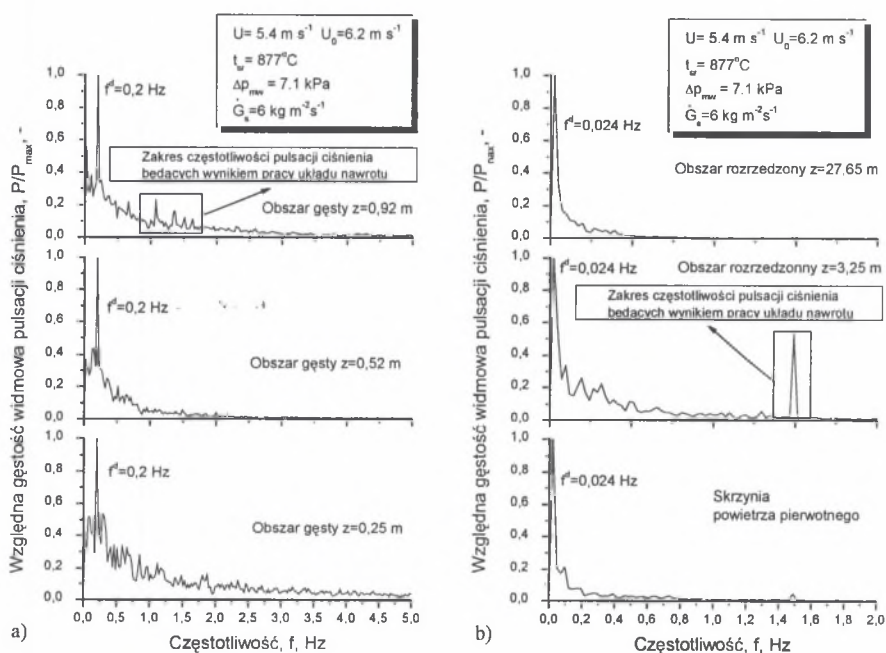


Rys. 5.2. Rozkład ciśnienia w komorze paleniskowej w funkcji czasu dla kotła o mocy 670 MW
 Fig. 5.2. Distribution of pressure within the combustion chamber as a function of time for the 670 MW boiler

Jak widać na rysunku 5.2, największe pulsacje ciśnienia materiału warstwy występowały w obszarze dolnym i gęstym cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej, potwierdzając intensywny proces mieszania w tej części komory paleniskowej. Wraz ze wzrostem odległości od rusztu pulsacje ciśnienia materiału warstwy były coraz mniejsze, wskazując w obszarze rozrzedzonym na proces intensywnego unoszenia ziaren w kierunku wylotu z komory paleniskowej. Na rysunku 5.3 przedstawiono gęstość widmową pulsacji ciśnienia materiału warstwy w funkcji częstotliwości dla obszaru dolnego CWF. Zaobserwowany na rysunku 5.3 wyraźny pik w widmie pulsacji ciśnienia (częstotliwość dominująca 0,39 Hz) bezpośrednio związany jest z pulsacją ciśnienia powodowaną przez przepływające przez ten obszar pęcherze gazowe. Przyczyną pulsacji w tym obszarze może być tworzenie się pęcherzy i ich ruch lub też erupcja pęcherzy na powierzchni warstwy w tym obszarze. Jak wykazały badania, każdy pęcherz powstający nad dystrybutorem powietrza fluidyzującego zabiera pewną ilość ziaren materiału warstwy i unosi je w kierunku powierzchni warstwy, natomiast część ziaren opada w obszarze powstałym za pęcherzem. Pęcherze gazowe docierają do powierzchni obszaru dolnego, pękają i wyrzucają ziarna do obszaru gęstego. Na rysunku 5.4a przedstawiono gęstość widmową pulsacji ciśnienia materiału warstwy w funkcji częstotliwości dla obszaru gęstego CWF.



Rys. 5.3. Względne widmo pulsacji ciśnienia w funkcji częstotliwości dla obszaru dolnego
 Fig. 5.3. Relative pressure fluctuation spectrum as a function of frequency for the bottom region



Rys. 5.4. Względne widmo pulsacji ciśnienia w funkcji częstotliwości: a) dla obszaru gęstego, b) dla obszaru rozrzedzonego oraz skrzyni powietrza pierwotnego
 Fig. 5.4. Relative pressure fluctuation spectrum as a function of frequency: a) for the dense region, b) for the dilute region and for the primary air windbox

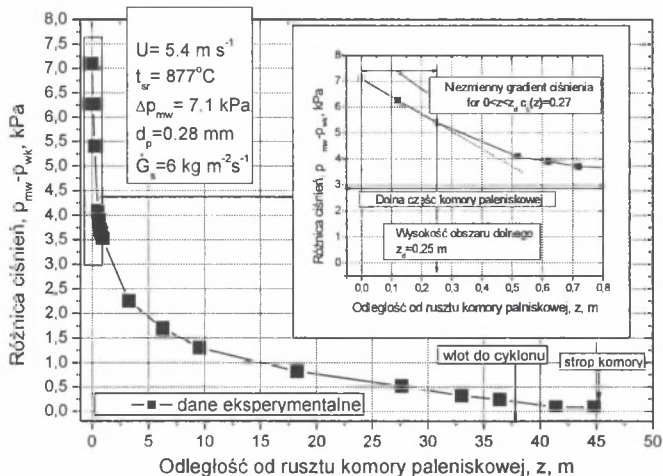
Wartość częstotliwości dominującej pulsacji ciśnienia dla obszaru gęstego, rysunek 5.4a, wyniosła 0,2 Hz. Częstotliwość ta może być interpretowana jako częstotliwość zmian masy materiału warstwy w obszarze gęstym w wyniku intensywnego procesu unoszenia i opadania ziaren. Niemniej jednak źródło pulsacji ciśnienia w tym obszarze CWF nie jest jeszcze do końca poznane. Dla obszaru rozrzedzonego i skrzyni powietrza pierwotnego, jak widać na rysunku 5.4b, wartość częstotliwości dominującej wyniosła 0,024 Hz. Określone, znacznie niższe pulsacje ciśnienia w obszarze rozrzedzonego komory paleniskowej wskazują na intensywny unos ziaren materiału warstwy w przeciwieństwie do obszaru dolnego i gęstego, gdzie wyższe pulsacje wskazywały na intensywny proces unoszenia i opadania ziaren. Zbliżone wnioski uzyskano w badaniach [16], w których to stwierdzono, iż pulsacje ciśnienia w obszarze rozrzedzonym mogą być wynikiem ruchu ziaren w postaci aglomeratów. Natomiast w pracy [111] autorzy stwierdzili, iż jedną z głównych przyczyn są pulsacje prędkości gazu. Porównując wyniki badań prezentowanych na rysunkach 5.3 i 5.4b można stwierdzić, że w trakcie pracy badanego kotła o mocy 670 MW z nominalną prędkością gazu w dolnej części komory paleniskowej, tj. $U_0=6.2$ m/s, brak jest bezpośredniej zależności pomiędzy częstotliwością dominującą ciśnienia w obszarze dolnym komory paleniskowej a częstotliwością dominującą ciśnienia w skrzyni powietrza pierwotnego. Na rysunku 5.4 zaobserwować można ponadto wyróżniający się zakres częstotliwości pulsacji ciśnienia na wysokości wprowadzenia materiału recyrkulowanego ($z=0.92$ m), tj. zakres częstotliwości od 1 Hz do 1.5 Hz, jak również na granicy obszaru gęstego i rozrzedzonego, tj. 3.25 m, gdzie znaczny udział w widmie pulsacji ciśnienia ma częstotliwość 1.5 Hz. Stan ten jest wynikiem okresowej pracy syfonu znajdującego się pomiędzy rurą opadową cyklonu a komorą paleniskową i wskazuje na silny wpływ materiału recyrkulowanego na proces mieszania w dolnej części komory paleniskowej.

Analizując wyniki badań przedstawionych na rysunkach 5.2-5.4, należy stwierdzić obecność przynajmniej trzech charakterystycznych obszarów w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej kotła w dużej skali technicznej. Obszary te różnią się pomiędzy sobą częstotliwością dominującą ciśnienia materiału warstwy, co wskazuje na odmienną intensywność procesu mieszania w tych regionach i uwidaczniają nierównomierny rozkład ziaren materiału warstwy wzdłuż wysokości komory paleniskowej.

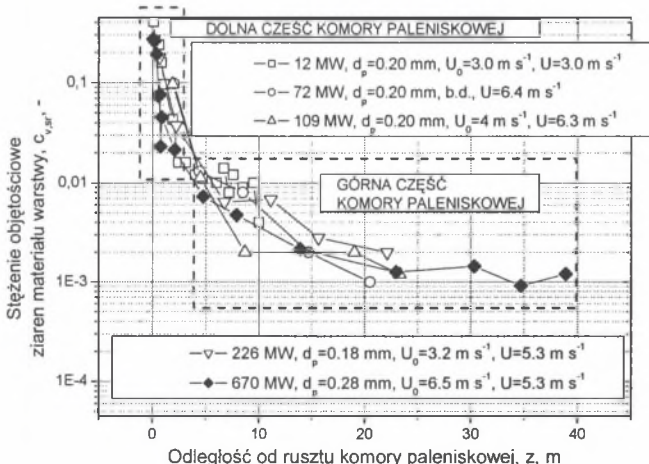
5.3. Rozkład stężenia ziaren materiału warstwy

W celu określenia średniej wartości stężenia objętościowego ziaren materiału warstwy wzdłuż wysokości komory paleniskowej wykorzystano pomiar różnicy ciśnień pomiędzy komorą paleniskową a otoczeniem kotła przy wykorzystaniu portów pomiarowych prezentowanych na rysunku 3.3a oraz systemu pomiarowego przedstawionego na rysunku 4.1. Na rysunku 5.5 przedstawiono rozkład uzyskanego ciśnienia w funkcji odległości od rusztu komory paleniskowej dla badanego kotła o mocy 670 MW przy prędkości gazu $5,4$ m s⁻¹ oraz całkowitym spadku ciśnienia w komorze paleniskowej wynoszącym 7,1 kPa. Gęstość strumienia masy cyrkulujących ziaren materiału warstwy pomiędzy komorą paleniskową a układem nawrotu wyniosła $9,6$ kg m⁻² s⁻¹. Prędkość gazu w komorze paleniskowej była znacznie wyższa od prędkości unoszenia dla pojedynczego ziarna materiału warstwy o zastępczej średnicy 0,28 mm. Jak widać na rysunku 5.5, w dolnej części komory paleniskowej należy stwierdzić obecność wysokich wartości pionowego gradientu ciśnienia w porównaniu do jej górnej części. Stan ten potwierdza obecność wyższych stężeń ziaren materiału warstwy w dolnej części komory paleniskowej w przeciwieństwie do niższych stężeń ziaren materiału warstwy w jej pozostałej części. Dane przedstawione na rysunku 5.5, a dotyczące badanego kotła 670 MW, wskazują również na obecność w dolnej części komory paleniskowej bez-

pośrednio nad rusztem obszaru charakteryzującego się niezmiennym gradientem ciśnienia. Dla danych warunków ciepło-przepływowych, tj. temperatury w komorze paleniskowej 877°C oraz prędkości gazu $5,4\text{ m s}^{-1}$, wysokość obszaru dolnego wyniosła $0,25\text{ m}$. Zbliżone zależności obserwowano również na kotłach w mniejszej skali technicznej, tj. na kotłach: 12 MW [121], 72 MW [13], 109 MW [113] i 226 MW [113]. Wyniki z tych badań zestawiono na rysunku 5.6.



Rys. 5.5. Rozkład ciśnienia w funkcji odległości od rusztu komory paleniskowej
 Fig. 5.5. Distribution of pressure as a function of the distance from the combustion chamber grid



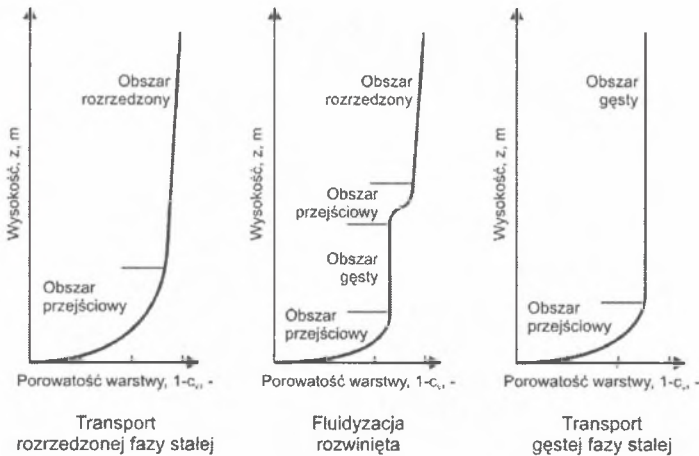
Rys. 5.6. Rozkład stężenia objętościowego ziaren materiału warstwy dla kotłów z CWF w małej i dużej skali technicznej
 Fig. 5.6. Distribution of solids volume concentration for small and large technical-scale CFB boilers

Dlatego też, na podstawie uzyskanego profilu ciśnienia materiału warstwy oraz rozkładu częstotliwości dominującej w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej kotła dużej mocy, stwierdzono obecność trzech charakterystycznych obszarów różniących się między sobą stężeniem objętościowym ziaren materiału warstwy, tj. obszaru dolnego, obszaru gęstego i obszaru rozrzedzonego.

Jak wskazują badania [54, 103], osiowy rozkład stężenia ziaren materiału warstwy w CWF można opisać jednym z trzech charakterystycznych profili, których kształt uzależniony jest od wartości granicznej gęstości strumienia masy materiału warstwy unoszonego z komory paleniskowej. Graniczna gęstość strumienia masy została zdefiniowana następująco:

$$\frac{\dot{G}_s^* \cdot d_p}{\mu} = 0.125 Fr^{1.85} Ar^{0.63} \left(\frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g} \right)^{-0.44} \quad (5.1)$$

Na rysunku 5.7 przedstawiono charakterystyczne profile rozkładu stężenia ziaren wzdłuż wysokości reaktora [90].



Rys. 5.7. Profile rozkładu stężenia ziaren materiału warstwy dla fluidyzacji cyrkulacyjnej: a) transport fazy rozrzedzonej, b) fluidyzacja rozwinięta, c) transport fazy gęstej

Fig. 5.7. Solids volume concentration distribution profiles for circulating fluidized bed: a) dilute phase transport, b) developed fluidization, c) dense phase transport

Poniżej wartości granicznej gęstości strumienia masy ziaren obserwowany jest wykładniczy rozkład stężenia ziaren materiału warstwy, natomiast powyżej tej wartości występuje kształt tzw. „S” lub też prawie linia prosta. Te charakterystyczne warunki pracy układu cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej nazwano odpowiednio jako: transport rozrzedzonej fazy stałej, fluidyzacja rozwinięta oraz transport gęstej fazy stałej. W przypadku kotłów z cyrkulacyjną warstwą fluidalną zarówno małej i dużej mocy gęstości strumienia masy ziaren unoszonych z komory paleniskowej są zdecydowanie niższe od wartości granicznej (w przypadku badanego kotła 670 MW wartość graniczna wyniosła $207 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, natomiast gęstość strumienia masy ziaren cyrkulujących w konturze zewnętrznym równa była $6 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Dlatego też do opisu profilu stężenia objętościowego ziaren wzdłuż wysokości obszaru gęstego i obszaru rozrzedzonego CWF badanego kotła założono profil wykładniczy oraz niezmienną wartość stężenia ziaren dla obszaru dolnego położonego bezpośrednio nad

rusztem. Ostatecznie na podstawie przeprowadzonych obserwacji rozkładów stężeń ziaren w komorze paleniskowej kotła z cyrkulacyjną warstwą fluidalną małej mocy, tj. kotła Chalmers (12 MW) [30] i badanego kotła dużej mocy (670 MW), zaproponowano następujące równania rozkładu średniego stężenia objętościowego ziaren materiału warstwy wzdłuż wysokości komory paleniskowej:

$$\text{dla } z \leq z_d \quad c_{v,rs}(z) = c_{v,d}, \quad (5.2)$$

$$\text{dla } z_d < z < z_e \quad c_{v,rs}(z) = (c_{v,d} - c_{v,g}) \cdot \exp(-a_g(z - z_d)) + c_{v,e} \cdot \exp(a_r(z_e - z)), \quad (5.3)$$

gdzie:

$$c_{v,g} = c_{v,e} \cdot \exp(a_r(z_e - z_d)). \quad (5.4)$$

Charakterystycznymi parametrami rozkładu stężenia ziaren materiału warstwy w obszarze gęstym i obszarze rozrzedzonym są współczynniki a_g i a_r , które zostały opisane następującymi zależnościami:

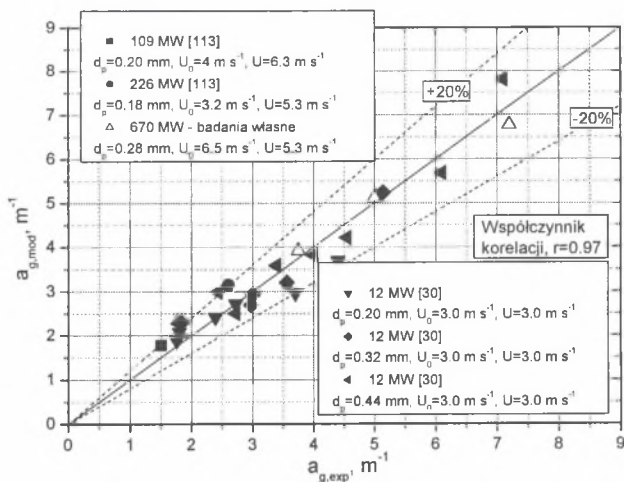
$$a_g = 4238 \cdot D_e^{-1} \cdot \left(\frac{U_0}{U_i}\right)^{-0.621} \cdot \left(\frac{H_k}{D_e}\right)^{-3.035}. \quad (5.5)$$

$$a_r = \frac{4 \cdot k_d}{D_e \cdot (U - U_i)}, \quad (5.6)$$

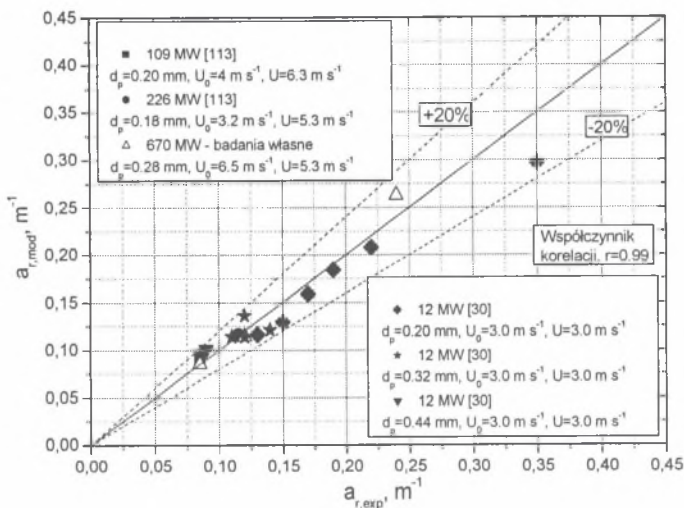
gdzie:

$$k_d = 2.939 \cdot (U - U_i) \cdot \left(\frac{U_0}{U - U_i}\right)^{0.457} \cdot \left(\frac{H_k}{D_e}\right)^{-1.891} \cdot \text{Re}_p^{-0.139}. \quad (5.7)$$

Powyższe zależności (5.5-5.7) zostały opracowane przy wykorzystaniu danych uzyskanych na kotłach o mocach w zakresie od 12 MW do 670 MW. Na rysunku 5.8 i rysunku 5.9 przedstawiono porównanie wartości eksperymentalnych współczynników a_g i a_r uzyskanych na wymienionych powyżej kotłach z wartościami uzyskanymi przy wykorzystaniu opracowanych zależności (5.5-5.7). Współczynnik korelacji w przypadku danych prezentowanych na rysunku 5.8 wyniósł 0,97, natomiast w przypadku danych przedstawionych na rysunku 5.9 wartość jego równa była 0,99. Rysunek 5.10 przedstawia rozkład stężenia objętościowego ziaren materiału warstwy w funkcji odległości od rusztu komory paleniskowej badanego kotła 670 MW. Średnie stężenie objętościowe materiału warstwy w obszarze dolnym wyniosło 0,27. Uzyskana wartość potwierdza wyniki badań przedstawionych w pracy [48], w której autorzy stwierdzili, iż dla cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej stężenie objętościowe ziaren materiału warstwy w obszarze dolnym mieści się w zakresie od 0,2 do 0,4. Obszar gęsty przedstawiony na rysunku 5.10 charakteryzował się średnim stężeniem objętościowym materiału warstwy równym 0,06. Dla obszaru rozrzedzonego wartość $c_{v,rs}$ wyniosła 0,004, natomiast w przypadku obszaru położonego powyżej wlotu do cyklonu średnie stężenie objętościowe równe było 0,0008. W badaniach laboratoryjnych [46] stwierdzono, iż przy niskich wartościach gęstości strumienia masy cyrkulujących ziaren materiału warstwy, tj. do wartości $20 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, stężenie objętościowe ziaren dla obszaru gęstego wynosi pomiędzy 0,05 i 0,15. W przypadku obszaru rozrzedzonego, jak wskazują badania [46], wartość ta powinna zawierać się w przedziale od 0,01 do 0,05, natomiast dla obszaru wyjściowego wynosić poniżej 0,01.



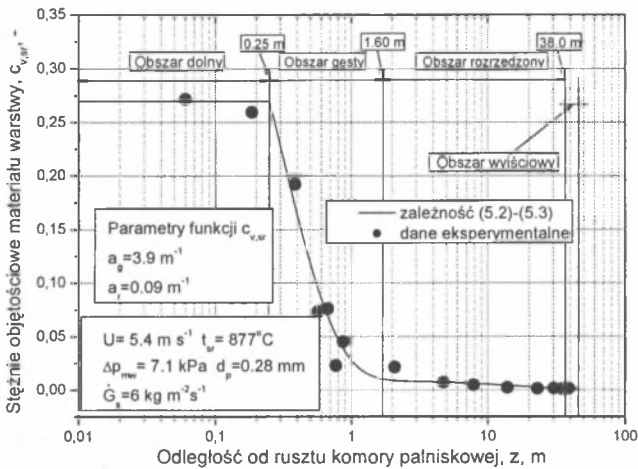
Rys. 5.8. Rozkład wartości współczynnika a_g dla kotłów z CWF w małej i dużej skali technicznej
 Fig. 5.8. Distribution of a_g coefficient values for small and large technical-scale CFB boilers



Rys. 5.9. Rozkład wartości współczynnika a_r dla kotłów z CWF w małej i dużej skali technicznej
 Fig. 5.9. Distribution of a_r coefficient values for small and large technical-scale CFB boilers

Należy zatem stwierdzić, iż w przypadku badanego kotła 670 MW stężenie objętościowe ziaren materiału warstwy dla obszaru rozrzedzonego i wyjściowego jest znacznie niższe w porównaniu do badań laboratoryjnych i kotłów w małej skali technicznej [46]. Na podstawie pomiaru ciśnienia w komorze paleniskowej, jak widać na rysunku 5.10, stwierdzono, że dla prezentowanych warunków cieplno-przepływowych obszar dolny sięgał do wysokości 0,25 m, natomiast obszar gęsty do wysokość 1,6 m (przy założeniu, że gęsta

faza stała znajduje się tylko w tym obszarze). Wysokość obszaru dolnego zdefiniowano jako odległość od rusztu komory paleniskowej, dla której pionowy gradient ciśnienia jest niezmienny. W górnej części komory paleniskowej, do wysokości 38 m (wlot do separatora), występował obszar rozrzedzony, natomiast powyżej tego poziomu obszar wyjściowy. Niemniej jednak nie zaobserwowano znaczącej różnicy w rozkładzie stężenia ziaren pomiędzy obszarem rozrzedzonym a obszarem wyjściowym położonym powyżej wlotu do separatorów. Dlatego też w przypadku badanego kotła nie zauważono obecności obszaru wyjściowego charakteryzującego się odmiennym zachowaniem ziaren materiału warstwy niż obszar rozrzedzony.



Rys. 5.10. Rozkład stężenia objętościowego materiału warstwy w funkcji odległości od rusztu komory paleniskowej

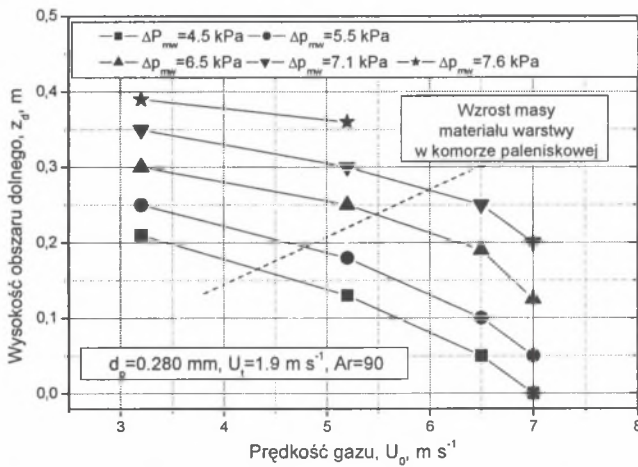
Fig. 5.10. Distribution of solids volume concentration as a function of the distance from the combustion chamber grid

5.4. Obszar dolny struktury CWF

5.4.1. Struktura i warunki pracy obszaru dolnego

Jednym z podstawowych parametrów, który charakteryzuje warunki przepływowe w obszarze dolnym struktury CWF, jest prędkość transportu, U_{tr} . Prędkość ta definiowana jest zwykle jako prędkość gazu, przy której obszar dolny zanika, tj. wszystkie ziarna materiału warstwy są unoszone z tego regionu. W ramach badań hydrodynamiki dolnej części komory paleniskowej kotła 670 MW wykonano pomiar ciśnienia wzdłuż wysokości obszaru dolnego, następnie dokonano oznaczenia jego wysokości oraz przeprowadzono analizę amplitudy zarejestrowanych wartości ciśnienia. Na rysunku 5.11 przedstawiono rozkład wysokości obszaru dolnego w funkcji prędkości gazu dla 5 wariantów, które różniły się pomiędzy sobą całkowitą masą materiału warstwy w komorze paleniskowej. W przypadku najmniejszej masy warstwy, identyfikowanej jako najniższa wartość spadku ciśnienia w komorze paleniskowej mierzona na wysokości rusztu, obszar dolny zanikał po przekroczeniu prędkości gazu U_0 równej 7 m s^{-1} , podczas gdy przy wzroście masy materiału warstwy w komorze obszar dolny

był obecny przy porównywalnych warunkach ciepłno-przepływowych. Należy zatem stwierdzić, iż obecność obszaru dolnego zależała nie tylko od warunków ciepłno-przepływowych, właściwości fizycznych ziaren i gazu, ale również od masy materiału warstwy w komorze paleniskowej. Wraz ze wzrostem masy materiału warstwy w komorze paleniskowej rosła również wartość prędkości transportu.



Rys. 5.11. Rozkład wysokości obszaru dolnego w funkcji prędkości gazu i masy materiału warstwy w komorze paleniskowej dla badanego kotła

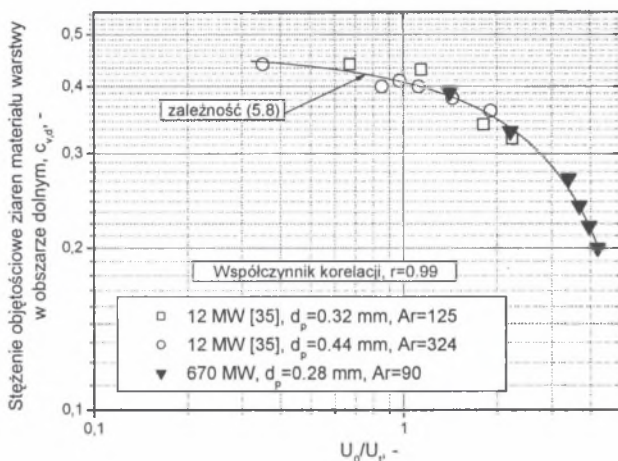
Fig. 5.11. Distribution of bottom region height as a function of superficial gas velocity and bed material mass in the combustion chamber for the boiler tested

W trakcie prowadzonych badań na kotle o mocy 670 MW stwierdzono, iż w danych warunkach ciepłno-przepływowych w komorze paleniskowej wraz ze wzrostem masy materiału warstwy i jednocześnie wzrostem wysokości obszaru dolnego stężenie objętościowe ziaren w tym obszarze jest niezmiennie. Zasadniczymi parametrami wpływającymi na wartość $c_{v,d}$ były więc parametry przepływowe. Na rysunku 5.12 przedstawiono rozkład stężenia ziaren materiału warstwy dla obszaru dolnego badanego kotła oraz kotła o mocy 12 MW [106] w funkcji ilorazu prędkości gazu w dolnej części komory paleniskowej i prędkości unoszenia ziaren. Dane prezentowane na rysunku 5.12 opisano następującą zależnością:

$$c_{v,d} = \ln \left(1.59 - 0.087 \cdot \frac{U_g}{U_t} \right). \quad (5.8)$$

Dla badanego zakresu ilorazu U_g/U_t , tj. 0,35-4,21, współczynnik korelacji danych zawartych na rysunku 5.12 wyniósł 0,99. Na rysunku 5.13 przedstawiono obserwacje zachowania się ziaren materiału warstwy powyżej rusztu w modelowym stanowisku laboratoryjnym [59], które zostało wyposażone w dysze powietrzne wykorzystywane w kotle 670 MW. Struktura prezentowana na rysunku 5.13 przedstawia znaczny przepływ gazu przez pęcherze. Ponadto można zaobserwować duże eksplodujące pęcherze, rozciągające się prawie przez całą drogę od dna do szczytu warstwy – warstwa wygląda na burzliwą. Należy więc stwierdzić, iż w rozległej i swobodnie pęcherzykującej warstwie tworzące się pęcherze lub nieregularne

przestrzenie nie zawierające ziaren materiału warstwy nie ulegają rozbiću na mniejsze pęcherzyki i nie są ograniczone przez szerokość komory paleniskowej, a jedynie przez wysokość obszaru dolnego.



Rys. 5.12. Rozkład stężenia ziaren materiału warstwy w funkcji ilorazu prędkości gazu i prędkości unoszenia ziaren

Fig. 5.12. Distribution of solids volume concentration as a function of the quotient of superficial gas velocity to terminal velocity

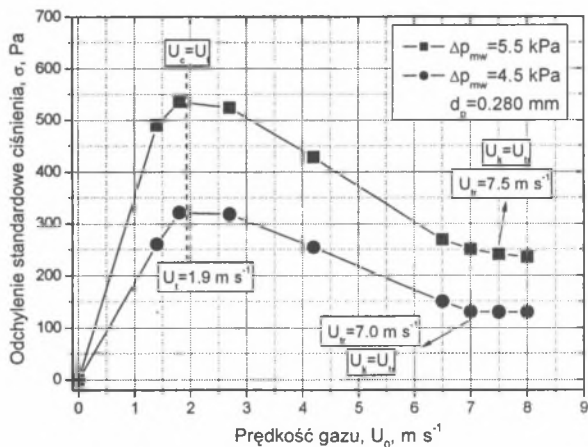


Rys. 5.13. Struktura obszaru dolnego CWF

Fig. 5.13. Structure of the bottom CFB region

Efekt ten prowadzi do przepływu gazu przez pęcherze i braku zmian charakteru warstwy. Co więcej, warstwa nie zwiększa swej objętości wraz ze wzrostem prędkości (tak jak to występuje w przypadku warstwy turbulენტnej) pod warunkiem, że recyrkulacja ziaren w konturze zewnętrznym układu CWF jest wystarczająca do utrzymania wymaganej masy ziaren w komorze paleniskowej. Początek warunków turbulენტnych, U_k , definiowany jest zwykle jako prędkość gazu, przy której amplituda pulsacji ciśnienia osiąga minimalny poziom po wartości maksymalnej odpowiadającej U_c . Jedną ze standardowych metod określania

początku fluidyzacji turbulentnej jest badanie amplitudy pulsacji ciśnienia materiału warstwy [35, 83]. Na rysunku 5.14 przedstawiono rozkład odchylenia standardowego [21] pulsacji ciśnienia materiału warstwy w obszarze dolnym CWF w funkcji prędkości gazu dla badanego kotła 670 MW. Prezentowane wyniki badań wskazują na wzrost amplitudy pulsacji ciśnienia materiału warstwy wraz ze wzrostem masy materiału warstwy w komorze paleniskowej, a więc również wraz ze wzrostem wysokości obszaru dolnego. Jak wynika z danych przedstawionych na rysunku 5.14, wartość U_c jest zbliżona lub też odpowiada wartości prędkości unoszenia U_t obliczonej dla ziarna o zastępczej średnicy. Natomiast prędkość gazu U_k porównywalna jest z prędkością transportu U_{tr} , czyli z warunkami przepływowymi odpowiadającymi warunkom zanikania obszaru dolnego. Jak przedstawiono na rysunku 5.14, występuje ścisła zależność pomiędzy prędkościami gazu U_k i U_{tr} a masą materiału warstwy w komorze paleniskowej kotła z CWF. Podobne zależności obserwowano w pracy [35, 36], gdzie badania przeprowadzono na kotle o mocy 12 MW. Prezentowane wyniki wskazują na obecność burzliwej warstwy pęcherzowej w strukturze cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej kotłów w skali technicznej, pomimo panujących wyższych prędkości gazu od prędkości unoszenia ziaren. Ponadto przejście do fluidyzacji turbulentnej obserwowane na stanowiskach laboratoryjnych określane z pulsacji ciśnienia jest charakterystyczne tylko dla tych stanowisk.



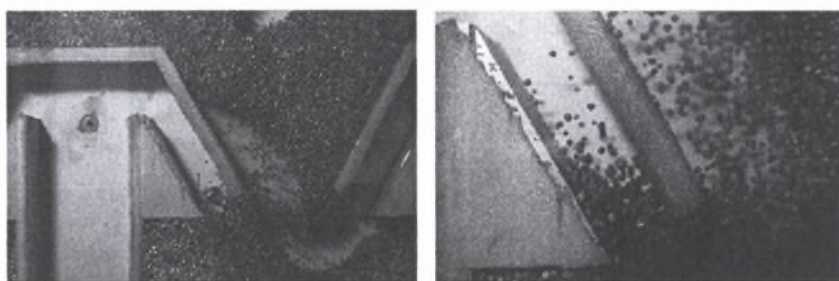
Rys. 5.14. Rozkład odchylenia standardowego pulsacji ciśnienia materiału warstwy w obszarze dolnej struktury CWF w funkcji prędkości gazu dla kotła 670 MW

Fig. 5.14. Distribution of the standard deviation of bed material pressure fluctuation in the bottom CFB structure region as a function of superficial gas velocity for the 670 MW boiler

5.4.2. Współpraca komory paleniskowej i skrzyni powietrza pierwotnego

Zasadniczym czynnikiem, pomijając parametry procesowe, wpływającym na warunki pracy dolnej części komory paleniskowej, tj. obszaru dolnego i obszaru gęstego, jest konstrukcja dysz powietrza pierwotnego [59]. Zadaniem dysz powietrznych jest zapewnienie równomiernego rozpyłu powietrza pierwotnego w przekroju poprzecznym dolnej części komory spalania. Jest to szczególnie ważne z uwagi na konieczność uzyskania jednorodnej fluidyzacji w komorze i wynikającej z tego jednorodnego stężenia tlenu w jej przekroju poprzecznym. Odpowiednie ukształtowanie dysz nie powinno powodować także przesypu materiału syckiego do skrzyni powietrznej. Ma to szczególne znaczenie zwłaszcza w

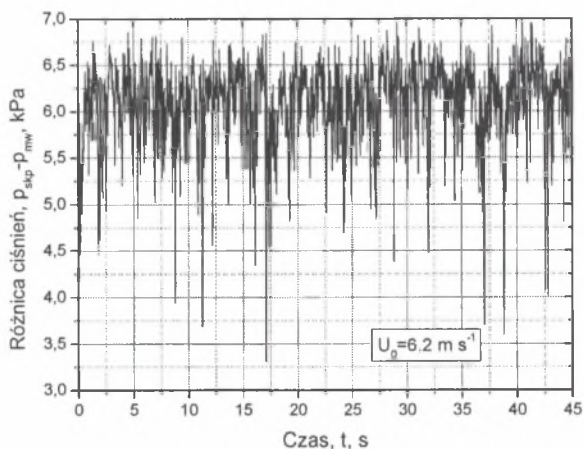
chwilałach rozruchu kotła bądź jego pracy przy niższych obciążeniach. Na rysunku 5.15 przedstawiono zdjęcia uzyskane na stanowisku laboratoryjnym wskazujące na możliwość przesypania ziaren materiału warstwy z komory paleniskowej do skrzyni powietrza pierwotnego poprzez dysze. Powodem takich przesypania są pulsacje ciśnienia w warstwie fluidalnej. Może, na przykład, wystąpić taki przypadek, że ciśnienie na pewnej wysokości nad rusztem będzie wyższe od ciśnienia pod nim i wówczas wystąpi wsteczny przepływ gazu. Aby uniknąć takich stanów, należy tak dobrać spadek ciśnienia, aby był on wyższy od maksymalnej amplitudy pulsacji ciśnienia. Jak stwierdzono w badaniach [37], wartość ilorazu spadku ciśnienia na ruszcie i spadku ciśnienia w warstwie wynosić powinna powyżej wartości 0,5. O ile można to osiągnąć w stanie pełnego obciążenia kotła, o tyle problem pozostaje otwarty przy jego niskich obciążeniach. W warunkach pracy kotła przy niskich obciążeniach spadek ciśnienia na dystrybutorze obniża się proporcjonalnie do pierwiastka ze strumienia powietrza pierwotnego, podczas gdy amplituda pulsacji zmienia się nieznacznie, a nawet może wzrosnąć ze spadkiem obciążenia. Taki stan prowadzi do przesypania się ziaren do skrzyni powietrznej.



Rys. 5.15. Przesyp materiału sykiego do skrzyni powietrznej
Fig. 5.15. Loose material backflow to the windbox

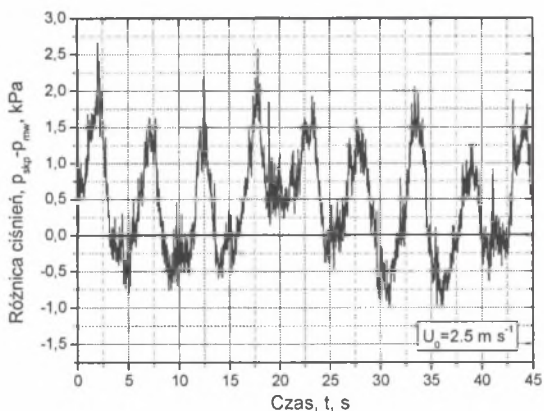
Na rysunku 5.16 zaprezentowano przykład wyników pomiaru różnicy ciśnień statycznych w skrzyni powietrznej badanego kotła z CWF o mocy 670 MW (na wysokości 0.25 m powyżej rusztu) oraz w komorze paleniskowej, dla pełnego obciążenia kotła. Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że maksymalna wartość amplitudy fluktuacji różnicy ciśnień statycznych nie przekracza wartości 3.25 kPa. W rezultacie w stanie pełnego obciążenia kotła różnica ciśnienia pomiędzy skrzynią powietrzną i komorą paleniskową jest wystarczająco duża, aby uniknąć odwróconego gradientu ciśnienia. Na rysunku 5.17 przedstawiono wyniki pomiarów różnicy ciśnienia statycznego w skrzyni powietrznej i komorze paleniskowej badanego kotła o mocy 670 MW dla minimalnego obciążenia kotła wynoszącego 40%. Charakter zmian ciśnienia w takim przypadku ma postać przebiegu okresowego o częstotliwości ok. 0.2 Hz. Można zauważyć również, że w pewnych okresach amplitudy przekraczają zerową wartość różnicy ciśnień, co oznacza, że lokalne ciśnienie w komorze paleniskowej osiągnęło w tych przedziałach czasowych większą wartość od ciśnienia w skrzyni powietrznej - a więc wystąpił odwrócony gradient ciśnienia i zaistniały warunki dogodne dla wstecznego przepływu gazu. Na uwagę zasługuje fakt, że maksymalny czas, przy którym większa wartość ciśnienia występuje po stronie komory paleniskowej, osiągnąć może wartość nawet 5 s. Problem przesypania materiału pojawia się więc, jak to stwierdzono wcześniej, przy minimalnym obciążeniu kotła, gdy różnica ciśnień pomiędzy komorą paleniskową a skrzynią powietrzną osiąga wartość ok. 1 kPa. Wdmuchiwanie mieszaniny dwufazowej do dyszy może wystąpić zwłaszcza w obszarach przysciankowych komory paleniskowej, gdzie materiał warstwy obsypuje ścianę komory. W takiej sytuacji

otwory wylotowe dysz znajdujące się w pobliżu ścianki mogą nie pracować (zbyt duży opór warstwy), przy czym prędkość powietrza w otworze pracującym wzrasta.



Rys. 5.16. Różnica ciśnień statycznych w skrzyni powietrznej oraz komorze paleniskowej kotła z CWF o mocy 670 MW dla pełnego obciążenia kotła

Fig. 5.16. Difference of static pressures in the windbox and in the combustion chamber of the 670 MW CFB boiler for full boiler loading

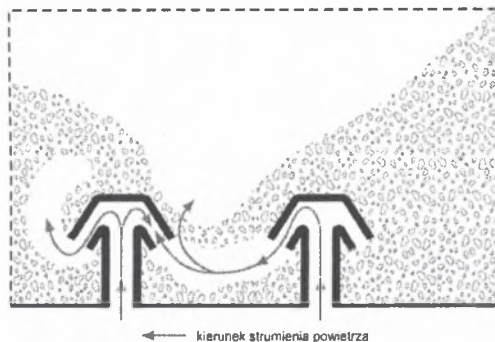


Rys. 5.17. Różnica ciśnień statycznych w skrzyni powietrznej oraz komorze paleniskowej kotła z CWF o mocy 670 MW dla minimalnego obciążenia kotła wynoszącego 40%

Fig. 5.17. Difference of static pressures in the windbox and in the combustion chamber of the 670 MW CFB boiler for a minimum boiler loading of 40%

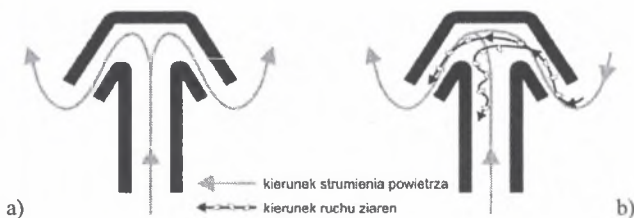
Efekt ten schematycznie przedstawiono na rysunku 5.18. Materiał warstwy usypujący się w pobliżu ścianki sływa w obszar kolejnego rzędu dysz przesłaniając ich wyloty. Strumień powietrza półotwartej dyszy jest więc na tyle silny, aby pokonać ten opór i przeciwdziałać wypływowi z dyszy sąsiedniej (o ile obie leżą w jednej płaszczyźnie). W przypadku gdy ilość powietrza dostarczonego do sąsiednich dysz jest zróżnicowana, w otoczeniu dyszy w komorze paleniskowej kotła może wytworzyć się poziomy gradient ciśnienia. W takiej

sytuacji następuje przepływ strumienia powietrza oraz unoszonego przez niego materiału sypanego przez dyszę (od jednego ramienia wylotowego dyszy do drugiego), czemu towarzyszy częściowe oddzielenie się materiału sypanego w kanale wlotowym. Na rysunku 5.19 pokazano różnice pomiędzy dyszą powietrzną pracującą poprawnie (a) oraz dyszą pracującą w warunkach poziomego gradientu ciśnienia (b). Dysza, przez którą przepływa mieszanina dwufazowa, zasilana jest mniejszym w stosunku do sąsiednich strumieniem powietrza.



Rys. 5.18. Mechanizm przesypywania materiału do skrzyni powietrznej na skutek wdmuchiwania materiału do sąsiedniej dyszy

Fig. 5.18. Mechanism of material backflow to the windbox as a result of the material being blown to the adjacent nozzle



Rys. 5.19. Praca dyszy powietrznej: a) w warunkach projektowych, b) w warunkach poziomego gradientu ciśnienia

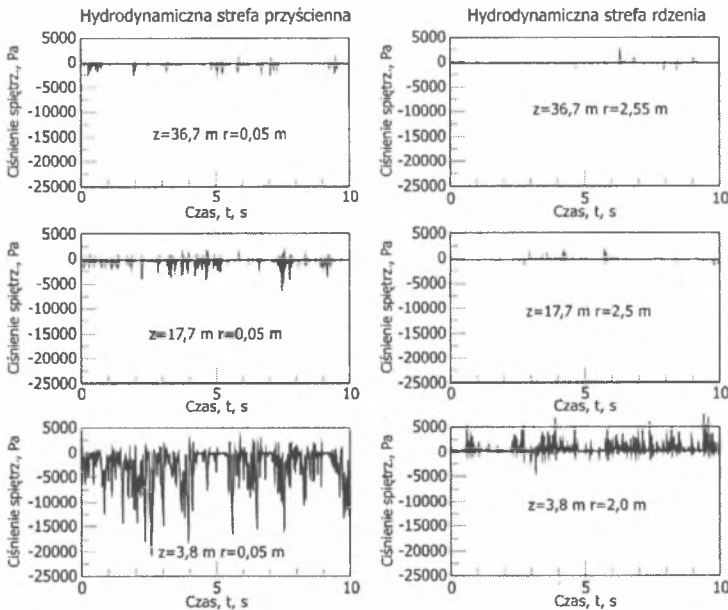
Fig. 5.19. Air nozzle operation: a) under the design conditions, b) under the conditions of a horizontal pressure gradient

Należy stwierdzić, iż występowanie pionowego gradientu ciśnienia, którego obecność wywołana jest zbyt małą różnicą ciśnień statycznych pomiędzy skrzynią powietrzną a komorą paleniskową kotła, sprzyja silnemu oddziaływaniu warstwy na ramiona wylotowe dyszy. Ponadto występowanie poziomego gradientu ciśnienia, który tworzy się w warunkach niejednorodnego pola prędkości w skrzyni, gdy sąsiednie dysze zasilane są zróżnicowanym strumieniem powietrza, prowadzi z jednej strony do wdmuchiwania materiału warstwy do kanałów wylotowych dyszy i ewentualnego przesypu do skrzyni powietrznej, a z drugiej strony do niejednorodnej fluidyzacji obszaru dolnego i gęstego. Dlatego też można wnioskować, że rozdział powietrza w dolnej części komory paleniskowej silnie oddziałuje na proces mieszania fazy gazowej i fazy stałej w tym obszarze, co w konsekwencji będzie miało znaczący wpływ na proces spalania w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej.

5.5. Obszar rozrzedzony struktury CWF

5.5.1. Struktura i warunki pracy obszaru rozrzedzonego

Obszar rozrzedzony struktury CWF położony jest pomiędzy obszarem gęstym a wylotem z komory paleniskowej. W obszarze tym można wyróżnić dwie strefy, tj. strefę położoną w bliskim sąsiedztwie ścian komory paleniskowej, tzw. strefę przyścienną, oraz strefę położoną w pozostałej objętości obszaru rozrzedzonego, tzw. rdzeń. Strukturę tę można zaobserwować na rysunku 5.20 [32], gdzie w strefie przyściennej, w przeciwieństwie do rdzenia, występują wyższe lokalne pulsacje ciśnienia materiału warstwy. Dodatkowo widoczny na rysunku 5.20 ujemny gradient ciśnienia w strefie przyściennej wskazuje na opadanie ziaren w tej części CWF, natomiast dodatni gradient ciśnienia ziaren w rdzeniu wskazuje na unoszenie ziaren. Prezentowane wyniki badań na rysunku 5.20 uzyskano przy wykorzystaniu sondy ciśnieniowej typu „T” opisaney w rozdziale 4.3.2. Zależność widoczną na rysunku 5.20 potwierdzają badania stężenia ziaren materiału warstwy w obszarze rozrzedzonym kotła o mocy 670 MW przeprowadzone przy wykorzystaniu sondy pojemnościowej opisaney w rozdziale 4.3.3. Wyniki tych badań przedstawiono na rysunku 5.21 [90]. Niezależnie od odległości od rusztu, jak widać na rysunku 5.21, stwierdzono wzrost stężenia ziaren materiału w strefie przyściennej. Co więcej, zgodnie z pomiarami ciśnienia wzdłuż wysokości komory paleniskowej i z uzyskanym pionowym profilem stężenia ziaren materiału warstwy, widoczne jest na rysunku 5.21 obniżenie wartości parametru c_v wraz ze wzrostem odległości od rusztu.



Rys. 5.20. Rozkład ciśnienia spiętrzania materiału warstwy w rdzeniu i strefie przyściennej struktury cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej

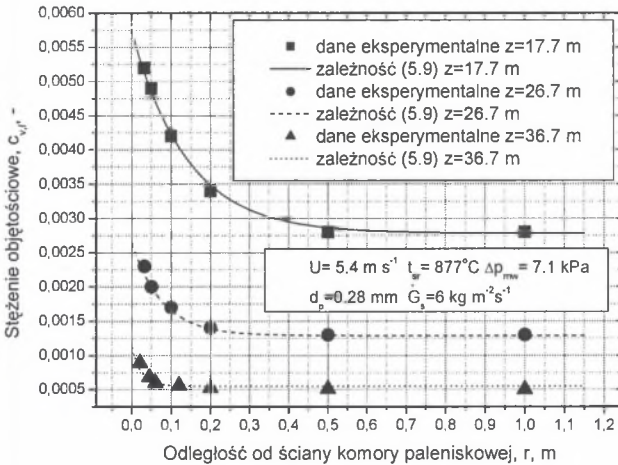
Fig. 5.20. Distribution of bed material impact pressure in the core and wall boundary layer of the circulating fluidized bed structure

Dane eksperymentalne dla badanego kotła 670 MW, przedstawione na rysunku 5.21, opisano następującą zależnością:

$$c_v(r, z) = c_{v, sr}(z) \cdot \left[1 - \frac{2\delta_{hsp}}{D_e} + \left(1 + \frac{2\delta_{hsp}}{D_e} \right) \cdot \exp(-w(z) \cdot r) \right], \quad (5.9)$$

gdzie:

$$w(z) = \frac{4k_d}{\delta_{hsp} \cdot (U - U_l(z))} \cdot \frac{H_k}{H_k - z}. \quad (5.10)$$

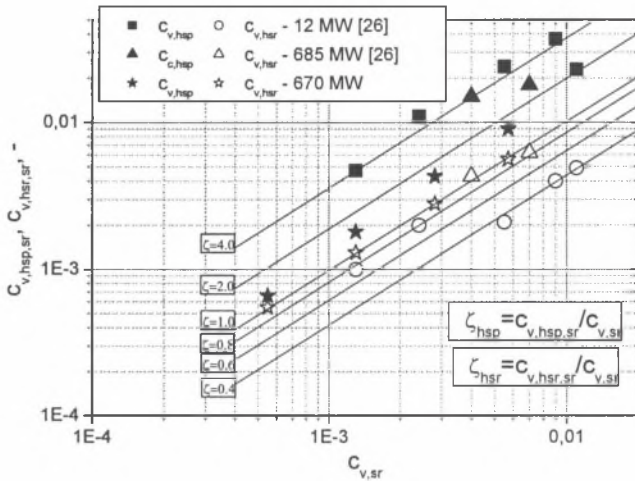


Rys. 5.21. Poziomy profil stężenia objętościowego ziaren materiału warstwy dla trzech badanych odległości od rusztu

Fig. 5.21. Horizontal profile of solids volume concentration for three distances from the grid examined

Na rysunku 5.22 przedstawiono rozkład stężenia ziaren w strefie przyściennej i rdzeniu obszaru rozrzedzonego w funkcji średniego stężenia objętościowego dla kotłów w małej i dużej skali technicznej. Jak widać na rysunku 5.22, wraz ze wzrostem mocy kotła następuje obniżenie średniego stężenia objętościowego ziaren w strefie przyściennej w stosunku do średniego stężenia w całkowitym przekroju poziomym komory paleniskowej. Dla kotła 12 MW i kotła 685 MW wartości stosunku ζ_{hsp} mieściły się w zakresie od 2.09 do 4.58, natomiast dla kotła 670 MW wartości stosunku ζ_{hsp} wyniosły od 1,2 do 1,6. Przedstawione dane wskazują również, iż wraz ze wzrostem gabarytów kotła średnie stężenie ziaren w rdzeniu obszaru rozrzedzonego CWF zbliża się do wartości średniego stężenia ziaren w całkowitym przekroju poziomym komory paleniskowej, tj. dla kotła 12 MW wartości stosunku ζ_{hsp} mieściły się w zakresie od 0.38 do 0.83, natomiast dla kotła 685 MW oraz kotła 670 MW wartości stosunku ζ_{hsp} były bliskie jedności. Ostatecznie należy stwierdzić, iż mimo obniżenia stężenia ziaren w strefie przyściennej wraz ze wzrostem gabarytów kotła wpływ jej obecności na proces przepływu ciepła pomiędzy ziarnami materiału warstwy a ścianami membranowymi oraz wymianę masy pomiędzy rdzeniem a strefą przyścinną nie może być pomijany, nawet w przypadku kotła dużej mocy. W dodatku należy się spodziewać, że

decydującym procesem przepływu ciepła pomiędzy ziarnami materiału warstwy a ścianami membranowymi komory paleniskowej będzie konwekcja.



Rys. 5.22. Stężenie ziaren w strefie przyściennej i rdzeniu obszaru rozrzedzonego w funkcji średniego stężenia dla kotła: 12 MW, 685 MW oraz 670 MW

Fig. 5.22. Solids volume concentration in the wall boundary layer and in the core of the dilute region as a function of the average solids volume concentration for the 12 MW, 685 MW and 670 MW boilers, respectively

5.5.2. Gęstość strumienia masy ziaren materiału warstwy

Wyniki badań dotyczące strumienia masy ziaren w CWF prezentowane były między innymi w pracach [88, 94]. Na rysunkach 5.23 i 5.24 przedstawiono poziomy profil gęstości strumienia masy ziaren materiału warstwy w funkcji odległości od ściany komory paleniskowej. Profile zostały określone przy wykorzystaniu wyników badań uzyskanych sondą próbkującą oraz przy wykorzystaniu zależności (4.2). Dane doświadczalne prezentowane na rysunku 5.23 i rysunku 5.24 opisano poniższymi zależnościami:

$$\dot{G}_s(r, z) = \dot{G}_{s, hsr, r = D_e} / 2(z) \cdot \left[1 - \exp\left(-m(z) \cdot (r - \delta_{hsp})\right) \right], \quad (5.11)$$

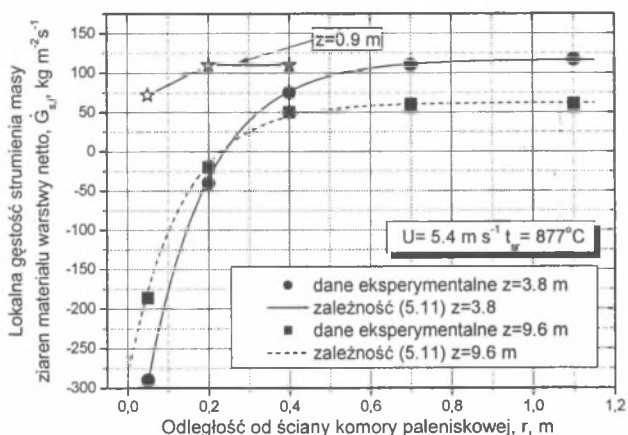
gdzie:

$$m(z) = \frac{4k_d}{\delta_{hsp}(z) \cdot (U - U_t(z))} \cdot \left(2 - \frac{z}{H_k} \right), \quad (5.12)$$

$$\dot{G}_{s, hsr, r = D_e} / 2(z) = c_{v, sr}(z) \cdot \left(1 - \frac{2\delta_{hsp}}{D_e} \right) \cdot (U - U_t(z)) \cdot \rho_p. \quad (5.13)$$

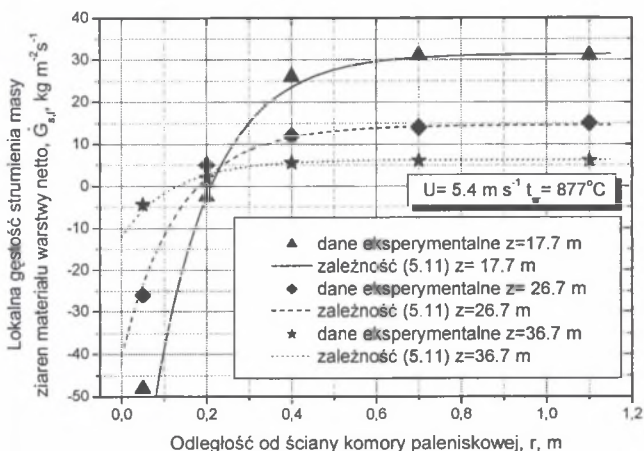
Jak przedstawiono na rysunkach 5.23 i 5.24, w obszarze rozrzedzonym badanego kotła 670 MW występuje intensywne opadanie ziaren materiału warstwy w bliskim sąsiedztwie ścian, w przeciwieństwie do pozostałej objętości CWF, gdzie widoczny jest ich unos. Lokalna wartość gęstości strumienia masy ziaren netto opadających wyniosła od $5 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ do $290 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, natomiast unoszonych od $6 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ do $117 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Takie zachowanie się

ziaren wskazuje na obecność struktury „rdzeń – strefa przyścienna” w obszarze rozrzedzonym CWF kotła dużej mocy. Uzyskane wyniki potwierdzają rezultaty prezentowane w pracach [13, 113, 121], a dotyczące kotłów charakteryzujących się stosunkiem H_b/D_c poniżej 10.



Rys. 5.23. Lokalna gęstość strumienia masy ziaren materiału warstwy netto w funkcji odległości od ściany komory paleniskowej badanego kotła 670 MW – $z=0,9$ m; 3,8 m; 9,6 m

Fig. 5.23. Local net solids mass flux density as a function of the distance from the combustion chamber wall of the 670 MW boiler tested – $z=0.9$ m; 3.8 m; 9.6 m

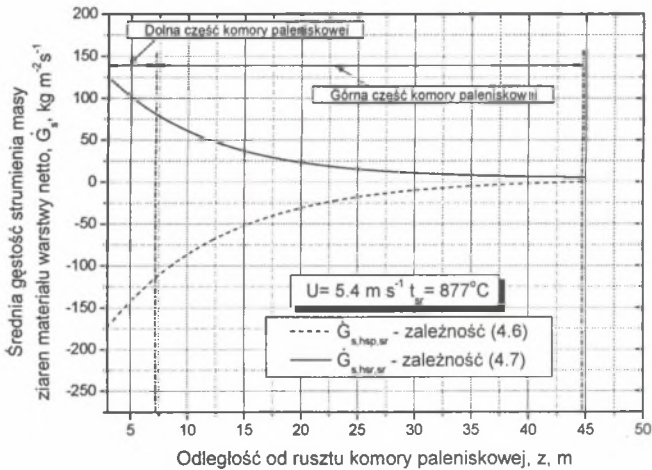


Rys. 5.24. Lokalna gęstość strumienia masy ziaren materiału warstwy netto w funkcji odległości od ściany komory paleniskowej badanego kotła 670 MW – $z=17,7$ m; 26,7 m; 36,7 m

Fig. 5.24. Local net solids mass flux density as a function of the distance from the combustion chamber wall of the 670 MW boiler tested – $z=17.7$ m; 26.7 m; 36.7 m

Poza strefą przyścienną, kotły w skali technicznej charakteryzują się płaskim poziomym profilem gęstości strumienia masy ziaren netto, w przeciwieństwie do stanowisk laboratoryjnych, gdzie obserwowano profil paraboliczny [61, 80, 113, 119]. Wykorzystując

zależności: (5.11), (4.6) i (4.7) obliczono średnią wartość gęstości strumienia masy ziaren materiału warstwy netto dla strefy przyściennej i rdzenia w funkcji odległości od rusztu komory paleniskowej badanego kotła.



Rys. 5.25. Średnia gęstość strumienia masy ziaren materiału warstwy netto w funkcji odległości od rusztu dla strefy przyściennej i rdzenia CWF badanego kotła 670 MW

Fig. 5.25. Average net solids mass flux density as a function of the distance from the grid for the wall boundary layer and core of the 670 MW boiler tested

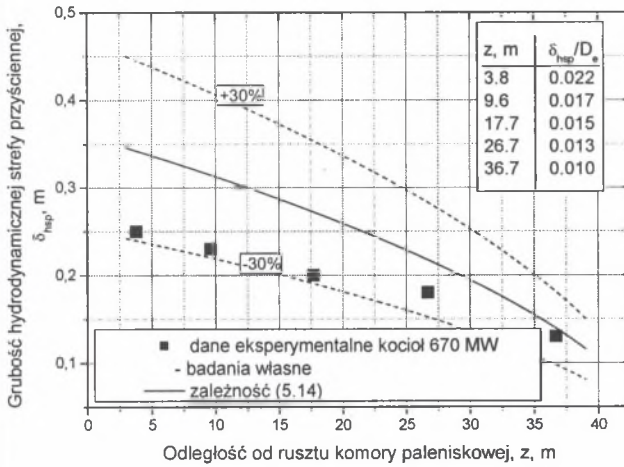
Jak widać na rysunku 5.25, w obu przypadkach, tj. w rdzeniu i strefie przyściennej, wartość średniej gęstości strumienia masy ziaren netto obniża się wraz ze wzrostem odległości od rusztu. Stwierdzić należy również, iż w górnej części komory paleniskowej intensywność wewnętrznej cyrkulacji ziaren jest zdecydowanie niższa niż w jej dolnej części. Uzyskane profile rozkładu gęstości strumienia masy ziaren netto są zgodne z wynikami uzyskanymi na kotle Chalmers [121], Orebro [121] czy Flesenburg [113]. Na rysunku 5.26 przedstawiono rozkład grubości hydrodynamicznej strefy przyściennej w funkcji odległości od rusztu komory paleniskowej badanego kotła 670 MW. Jak wskazują wyniki badań prezentowane na rysunku 5.26, grubość tej strefy dla danych warunków ciepło-przepływowych pracy kotła wyniosła od 0,13 m do 0,25 m, odpowiednio na wysokości dolnej krawędzi okna wlotowego do separatora oraz na granicy obszaru gęstego i obszaru rozrzedzonego. Dane eksperymentalne grubości hydrodynamicznej strefy przyściennej opisano zależnością opracowaną na podstawie danych literaturowych dotyczących kotłów o mocy: 12 MW, 72 MW, 109 MW, 165 MW, 226 MW oraz badanego kotła 670 MW w postaci zależności:

$$\delta_{hp}(z) = \left(2.276 \cdot \text{Re}_k^{-1.365} \cdot \left(\frac{H_k}{D_e} \right)^{0.29} \cdot \left(\frac{H_k - z}{H_k} \right)^{0.555} \right) D_e, \quad (5.14)$$

gdzie:

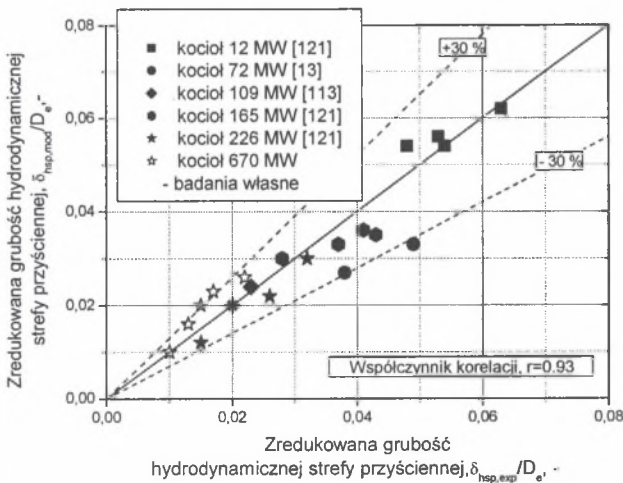
$$\text{Re}_k = \frac{U \cdot D_e \cdot \rho_g}{\mu}, \quad (5.15)$$

Zestawienie danych dotyczących kotła o mocy 670 MW oraz danych literaturowych kotłów w mniejszej skali technicznej w postaci zredukowanej grubości strefy przyściennej wyrażonej jako iloraz grubości tej strefy i średnicy hydraulicznej komory paleniskowej przedstawiono na rysunku 5.27.



Rys. 5.26. Grubość hydrodynamicznej strefy przyściennej w funkcji odległości od rusztu komory paleniskowej badanego kotła 670 MW

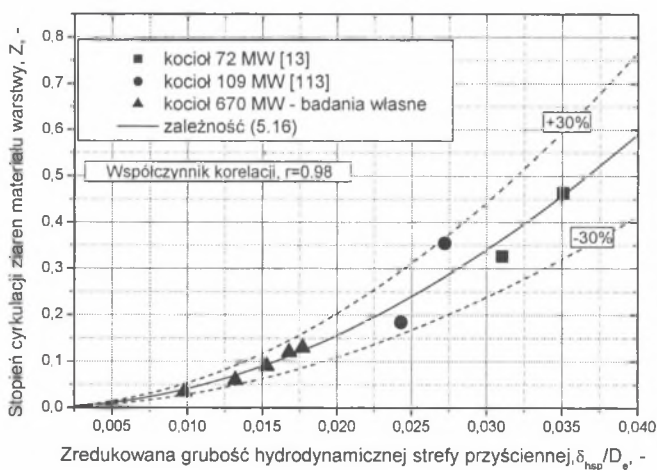
Fig. 5.26. Thickness of the hydrodynamic wall boundary layer as a function of the distance from the combustion chamber grid of the 670 MW boiler tested



Rys. 5.27. Zredukowana grubość strefy przyściennej: oś odciętych - badania eksperymentalne; oś rzędnych - zależność (5.14)

Fig. 5.27. Reduced wall boundary layer thickness: axis of abscissae - experimental tests; axis of ordinates - Relationship (5.14)

W pracy [120, 121] przedstawiono wyniki badań grubości hydrodynamicznej strefy przyściennej uzyskane na kotle o mocy 12 MW. Jej grubość wyniosła 0,1 m. W przypadku kotła 670 MW, który charakteryzuje się stosunkiem H_R/D_e równym 3,3, udział procentowy pola powierzchni strefy przyściennej w przekroju poziomym w stosunku do pola powierzchni całkowitego przekroju poziomego komory paleniskowej wyniósł od 5,4% do 7,9%, natomiast dla kotła o mocy 12 MW i H_R/D_e równym 8,8 udział procentowy pola powierzchni warstwy przyściennej w stosunku do pola powierzchni przekroju poziomego komory paleniskowej wyniósł 25. Porównanie to wskazuje na ponad 3-krotnie mniejszy udział powierzchni strefy przyściennej kotła o mocy 670 MW w porównaniu do jednostki o mocy 12 MW. Znaczną różnicę pomiędzy tymi jednostkami związaną z udziałem pola powierzchni tej strefy, przy porównywalnych prędkościach gazu, można wyjaśnić wzrostem średnicy D_e komory paleniskowej kotła dużej mocy. Wzrost odległość od osi komory paleniskowej do jej ścian w przekroju poziomym prowadził do wzrostu skuteczności separacji ziaren materiału warstwy, zwłaszcza ziaren grubych, i przyczynił się do zwiększenia strumienia masy unoszonych ziaren drobnych. Kolejnym zasadniczym parametrem charakteryzującym warunki pracy CWF, a oddziałującym między innymi na proces przepływu ciepła pomiędzy poszczególnymi obszarami CWF, co w konsekwencji determinuje rozkład temperatury materiału warstwy, jest stopień wewnętrznej cyrkulacji ziaren. Na rysunku 5.28 przedstawiono stopień cyrkulacji ziaren materiału warstwy w komorze paleniskowej dla badanego kotła dużej mocy w porównaniu z wynikami uzyskanymi na kotłach o wyższych wartościach stosunku H_R/D_e .



Rys. 5.28. Stopień cyrkulacji ziaren materiału warstwy w komorze paleniskowej w funkcji zredukowanej grubości hydrodynamicznej strefy przyściennej

Fig. 5.28. Rate of bed material particle circulation in the combustion chamber as a function of the reduced hydrodynamic wall boundary thickness

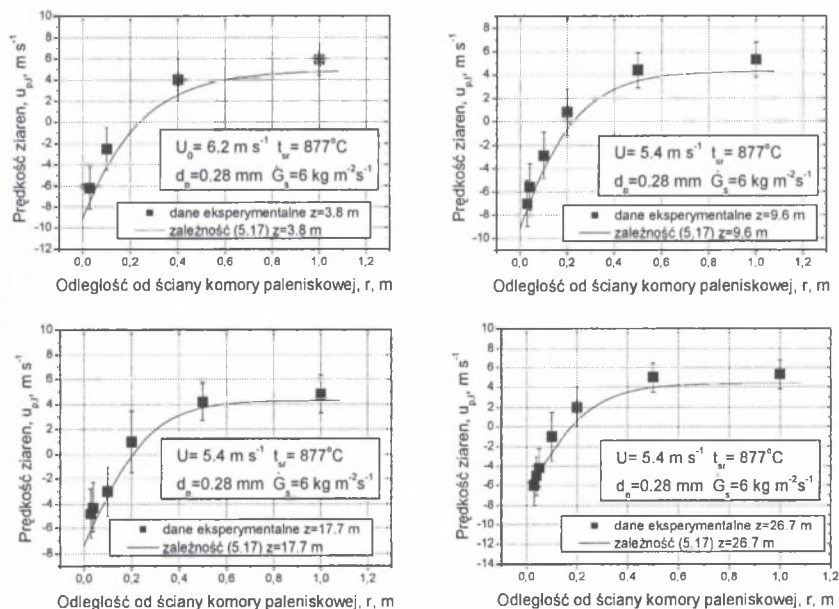
Stopień cyrkulacji zdefiniowano jako iloraz strumienia masy ziaren opadających i strumienia masy ziaren unoszonych dla danej odległości od rusztu komory paleniskowej. Wyniki badań uzyskanych na kotle 670 MW oraz dane uzyskane na kotłach mniejszych opisano zależnością:

$$Z(z) = 285.416 \cdot \left(\frac{\delta_{hsp}(z)}{D_e} \right)^{1.92} \quad (5.16)$$

Na podstawie przeprowadzonej analizy uzyskanych wyników badań należy stwierdzić, iż w przypadku kotła dużej mocy stopień cyrkulacji ziaren materiału warstwy w obszarze rozrzedzonym CWF jest znacznie niższy niż w przypadku kotłów charakteryzujących się wyższą wartością stosunku H_k/D_e . Niski stopień cyrkulacji wewnętrznej ziaren materiału warstwy ostatecznie prowadzi do obniżenia udziału procentowego pola powierzchni hydrodynamicznej strefy przysiennej w stosunku do całkowitego pola powierzchni przekroju poziomego komory paleniskowej.

5.5.3. Prędkość ziaren w CWF

Prędkość ziaren w warunkach cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej jest bardzo ważnym parametrem pozwalającym ocenić między innymi: czas pobytu ziaren w komorze paleniskowej [5], intensywność procesu konwekcyjnego przepływu ciepła pomiędzy materiałem warstwy a ścianami komory [14, 22], jak również ubytki erozyjne i szybkość zużycia zarówno elementów wymienników ciepła zanurzonych w warstwie, czy też powierzchni ścian [6]. Problematyka dotycząca pomiaru prędkości ziaren w kotle dużej mocy była prezentowana w pracy [93]. Na rysunku 5.29 przedstawiono wyniki pomiarów prędkości skupisk ziaren dla czterech badanych odległości od rusztu w obszarze rozrzedzonym CWF kotła 670 MW [32].



Rys. 5.29. Poziomy profil prędkości ziaren materiału warstwy dla czterech badanych odległości od rusztu kotła z CWF o mocy 670 MW

Fig. 5.29. Horizontal particle velocity profile for four tested distances from the grid of the 670 MW CFB boiler

Dane eksperymentalne, prezentowane na rysunku 5.29, uzyskano przy wykorzystaniu sondy pojemnościowej, natomiast profil poziomy opisano zależnością:

$$u_p(r, z) = \frac{\dot{G}_s(r, z)}{c_v(r, z) \cdot \rho_p} \quad (5.17)$$

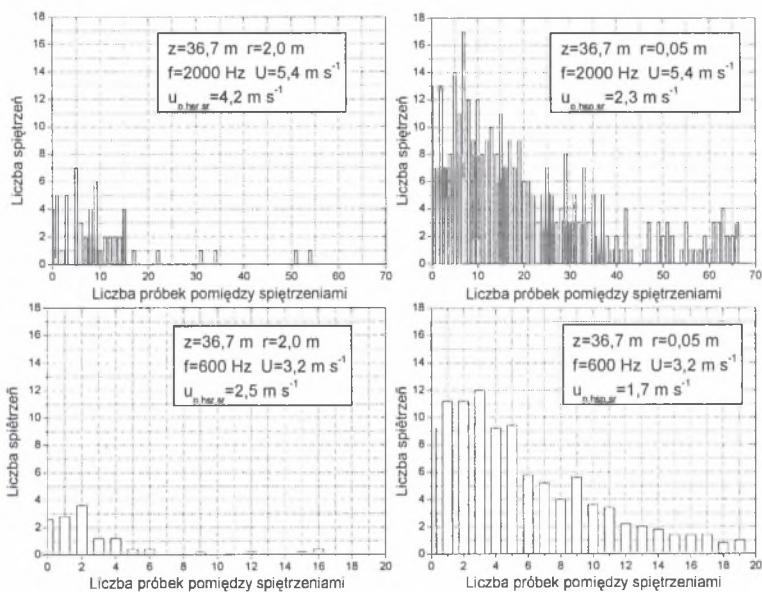
Wyniki badań przedstawione na rysunku 5.29 potwierdzają obecność płaskiego profilu prędkości ziaren w rdzeniu obszaru rozrzedzonego CWF kotła dużej mocy. W tabelicy 5.1 przedstawiono iloraz średniej prędkości ziaren dla hydrodynamicznej strefy rdzenia obszaru rozrzedzonego i prędkości gazu. Średnią prędkość skupisk ziaren obliczono zgodnie z następującą zależnością:

$$u_{p, hsr, sr} = \frac{\dot{G}_{s, hsr, sr}(z)}{c_{v, hsr, sr}(z) \cdot \rho_p} \quad (5.18)$$

Tablica 5.1
Porównanie średnich prędkości ziaren w rdzeniu obszaru rozrzedzonego

z, m	Średnia prędkość ziaren $u_{p, hsr, sr}$, $m s^{-1}$ – zależność (5.18)	Iloraz średniej prędkości ziaren i prędkości gazu, $u_{p, hsr, sr}/U$, -
3.8	4.8	0.77
9.6	4.2	0.78
17.7	4.3	0.80
26.7	4.3	0.80
36.7	4.3	0.80

Prędkość skupisk ziaren w rozpatrywanej strefie mieściła się w zakresie od 0.78 U do 0.80 U . Średnie prędkości skupisk ziaren w hydrodynamicznej strefie rdzenia, które obliczono przy wykorzystaniu zależności (5.18), były zgodne z wynikami eksperymentalnymi uzyskanymi sondą ciśnieniową. Na rysunku 5.30 przedstawiono wartości średniej prędkości ziaren materiału warstwy przy obciążeniu kotła 100% i 60%, przy wykorzystaniu sondy ciśnieniowej typu „L” [32]. Przy pełnym obciążeniu kotła średnia prędkość ziaren materiału warstwy unoszonych w górnej części komory paleniskowej wyniosła 4,2 $m s^{-1}$, tj. 0.78 U . W przypadku 60% obciążenia badanego kotła wartość średniej prędkości ziaren równa była 2,5 $m s^{-1}$, co również stanowiło 0.78 wartości prędkości gazu U . Autorzy pracy [121] prowadząc badania na kotle 12 MW ($H_k/D_e=8,8$) uzyskali prędkości ziaren w rdzeniu obszaru rozrzedzonego w zakresie od 0.47 U do 0.51 U . W badaniach przeprowadzonych na kotle Gardanne [11] o stosunku H_k/D_e wynoszącym 2,81 uzyskano średnie prędkości skupisk ziaren w hydrodynamicznej strefie rdzenia równe 0,90 wartości prędkości gazu U . Wzrost wartości ilorazu prędkości ziaren i prędkości gazu wraz z obniżeniem stosunku H_k/D_e analizowanych kotłów można tłumaczyć obniżeniem wewnętrznej cyrkulacji ziaren materiału warstwy wraz ze wzrostem gabarytów kotła, tak jak to prezentowano na rysunku 5.28. Analizowane kotły pracowały przy porównywalnych wartościach gęstości strumienia masy ziaren cyrkulujących w konturze zewnętrznym, tj. 5-10 $kg m^{-2} s^{-1}$. Na podstawie przeprowadzonej analizy rozkładu prędkości ziaren materiału warstwy można wnioskować, że wraz z obniżeniem wartości parametru H_k/D_e kotłów z CWF następuje wzrost intensywności transportu ziaren w hydrodynamicznej strefie rdzenia obszaru rozrzedzonego w kierunku wylotu z komory paleniskowej oraz obniżenie wymiany masy ziaren pomiędzy rdzeniem a strefą przysięnną.



Rys. 5.30. Rozkład prędkości ziaren materiału warstwy dla kotła o mocy 670 MW przy obciążeniu 100% i 60% - sonda ciśnieniowa typu „L”

Fig. 5.30. Distribution of particle velocities for the 670 MW boiler under a load of 100% and 60%, respectively - the „L”-type pressure probe

Oprócz tego, jak wskazują wyniki prezentowane w tabelicy 5.1, w rdzeniu obszaru rozrzedzonego, który charakteryzuje się bardzo niskim stężeniem objętościowym ziaren ($c_v=0.004$), można przyjąć prędkość poślizgu ziaren równą ich prędkości unoszenia. Dlatego też w celu określenia średniej prędkości ziaren unoszonych w hydrodynamicznej strefie rdzenia można wykorzystać następującą zależność:

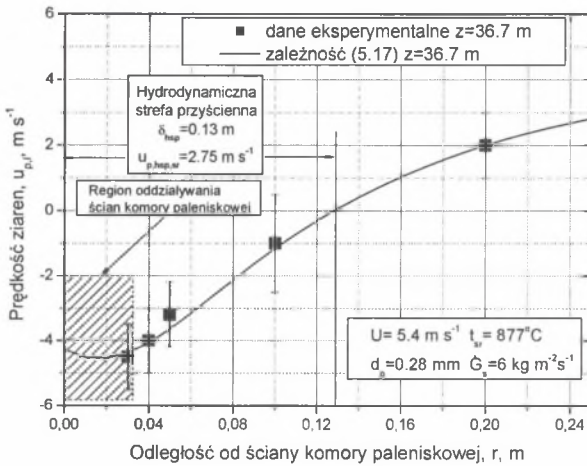
$$u_{p,hsr,sr} = \frac{U}{1 - c_{v,sr}} - u_s, \quad (5.19)$$

gdzie:

$$u_s = U_s, \quad (5.20)$$

Wyniki badań prezentowane na rysunku 5.29 wskazują także na opadanie ziaren w sąsiedztwie ścian komory, z lokalną prędkością osiągającą wartości w zakresie 4 - 9 m s⁻¹. Tak wysokie lokalne wartości prędkości ziaren obserwowano również w kotle 685 MW [11, 75, 117], gdzie wyniosły one od 6 do 7 m s⁻¹. Uzyskane wyniki badań prezentowane w pracy [90] podkreślają obecność zgodnego kierunku przepływu fazy gazowej z fazą stałą w hydrodynamicznej strefie przyściennej, co dodatkowo intensyfikuje wzrost prędkości opadających ziaren, w przeciwieństwie do wyników uzyskanych w skali laboratoryjnej i półtechnicznej [23, 78, 121]. W górnych regionach obszaru rozrzedzonego i w bliskim sąsiedztwie ścian komory badanego kotła, tak jak przedstawiono na rysunku 5.31, prędkość

opadających ziaren obniża się, wskazując znaczący udział wymiany pędu pomiędzy opadającymi ziarnami a ścianą komory paleniskowej.



Rys. 5.31. Rozkład prędkości ziaren materiału warstwy w funkcji odległości od ściany komory paleniskowej kotła 670 MW – z=36.7 m

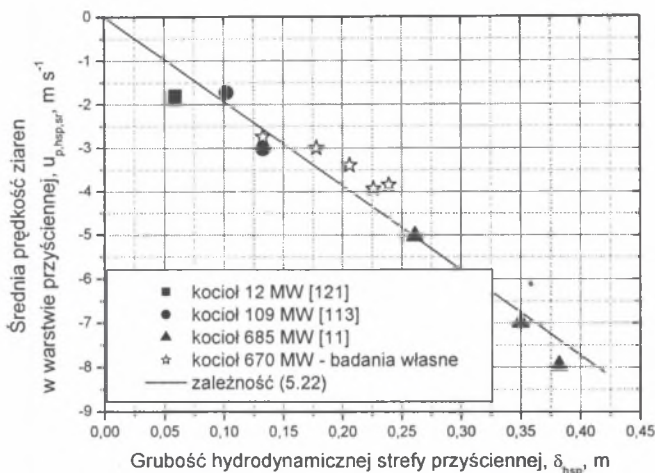
Fig. 5.31. Distribution of particle velocities as a function of the distance from the combustion chamber wall of the 670 MW boiler– z=36.7 m

Zbliżoną zależność obserwowano w kotle 12 MW [121], lecz w tym przypadku widoczna była ona wzdłuż całej wysokości komory paleniskowej. Wyniki badań dotyczące kotła 670 MW, prezentowane na rysunku 5.29, oraz wyniki badań uzyskane na kotle 685 MW [11] wskazują, iż opór wynikający z tarcia pomiędzy ziarnami w hydrodynamicznej strefie przyściennej a ścianą jest bardzo niski w przypadku kotłów o niskich wartościach H_k/D_e . Na rysunku 5.32 przedstawiono średnią prędkość ziaren materiału warstwy dla hydrodynamicznej strefy przyściennej w funkcji grubości tej strefy. Średnia prędkość ziaren w strefie przyściennej dla kotła 670 MW obliczona została zgodnie z poniższą zależnością:

$$u_{p,hsp,sr} = \frac{\dot{G}_{s,hsp,sr}(z)}{c_{v,hsp,sr}(z) \cdot \rho_p} \quad (5.21)$$

Przeprowadzone analizy pokazują, iż zgodnie z wynikami badań [26], w których autorzy wskazują na niezmienną wartość ilorazu grubości strefy przyściennej i prędkości ziaren w niej opadających, wraz ze wzrostem grubości hydrodynamicznej strefy przyściennej rośnie prędkość ziaren opadających w tej strefie. Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań własnych oraz danych literaturowych dotyczących kotłów w mniejszej skali technicznej opracowano zależność określającą wartość średniej prędkości ziaren materiału w strefie przyściennej w funkcji jej grubości zgodnie z równaniem:

$$u_{p,hsp,sr}(z) = -19.32 \cdot \delta_{hsp}(z) \quad (5.22)$$



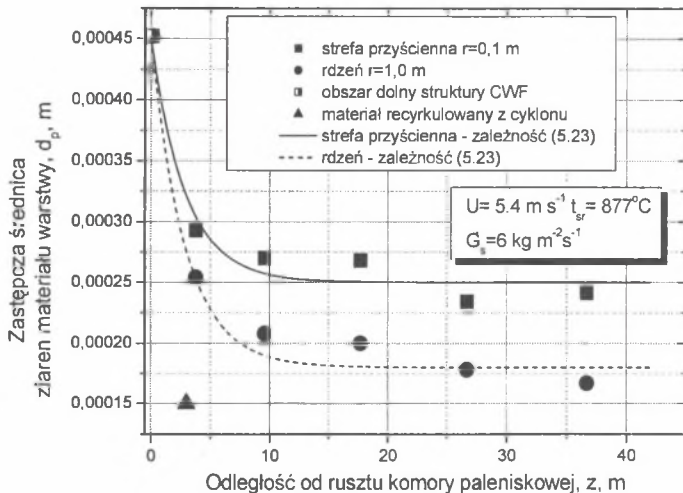
Rys. 5.32. Rozkład średniej prędkości ziaren materiału warstwy w strefie przyściennej obszaru rozrzedzonego w funkcji grubości strefy przyściennej

Fig. 5.32. Distribution of the average particle velocity in the dilute region wall boundary layer as a function of wall boundary layer thickness

5.6. Segregacja ziaren materiału warstwy w CWF

Wykorzystywane materiały sypkie w kotłach z cyrkulacyjną warstwą fluidalną charakteryzują się szerokim rozkładem ziarnowym [5]. Kiedy materiał warstwy poddany jest fluidyzacji, ziarna różniące się rozmiarem i gęstością mają tendencję do segregacji [110], co widoczne jest w postaci zmian ich stężeń wzdłuż wysokości warstwy fluidalnej, jak i w jej przekroju poziomym. W badaniach [3, 4, 5, 27, 69, 90, 100] zaobserwowano segregację grubych ziaren w dolnej części kolumny CWF przy niskich prędkościach gazu i niskich gęstościach strumienia masy cyrkulujących drobnych ziaren. Wzrost wartości jednego z tych parametrów lub obu prowadził do jednolitego rozkładu osiowego grubych ziaren wzdłuż wysokości warstwy. Efekt ten, jak wskazują badania [77], spowodowany był znacznym obniżeniem wartości prędkości unoszenia grubych ziaren wraz ze wzrostem oddziaływania na nie strumienia masy ziaren drobnych. Również w badaniach [65], które przeprowadzono w kotle z CWF o mocy 12 MW, uzyskano stan cyrkulacji grubych frakcji w warunkach prowadzenia fluidyzacji z prędkością przepływu gazu niższą od prędkości unoszenia grubych ziaren. Jak wskazują wyniki badań [56], gęstość i rozmiar ziaren wpływa na grubość hydrodynamicznej strefy przyściennej oraz kształt poziomego profilu strumienia masy ziaren materiału warstwy w reaktorze CWF. Wraz ze wzrostem gęstości ziaren autorzy pracy [56] uzyskali wzrost grubości strefy przyściennej oraz wartości strumienia masy ziaren w tym obszarze. Z kolei wzrost rozmiaru ziaren prowadził podczas fluidyzacji do formowania płaskiego poziomego profilu strumienia masy ziaren oraz obniżenia grubości hydrodynamicznej strefy przyściennej. Segregację ziaren paliwa i ziaren materiału inertnego w przekroju poziomym prowadzącą do akumulacji grubych ziaren w strefie przyściennej komory paleniskowej kotła z CWF zaobserwowano również w pracy [29]. Wyniki badań [3, 66] wskazują, iż

istotnym parametrem wpływającym na segregację ziaren materiału warstwy przy niskich wartościach gęstości strumienia masy cyrkulujących drobnych ziaren ($10\text{--}15 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) jest rozmiar reaktora CWF. Wraz ze wzrostem pola powierzchni przekroju poziomego kolumny CWF uzyskano wzrost stężenia ziaren materiału warstwy w dolnej części kolumny oraz wzrost ich stopnia segregacji. Można zatem stwierdzić, iż przebieg i intensywność segregacji uzależniona jest między innymi od: właściwości ziaren tworzących materiał warstwy, geometrii reaktora oraz warunków prowadzenia procesu fluidyzacji. Co więcej, jak wskazują wyniki badań prezentowanych w pracy [74, 89, 92], stopień segregacji ziaren paliwa będący efektem intensywności procesu mieszania w objętości CWF wpływa na emisję zanieczyszczeń. Rysunek 5.33 przedstawia rozkład zastępczej średnicy ziaren materiału warstwy w funkcji odległości od rusztu badanego kotła o mocy 670 MW.



Rys. 5.33. Rozkład zastępczej średnicy ziaren materiału warstwy w funkcji odległości od rusztu komory paleniskowej dla badanego kotła z CWF o mocy 670 MW

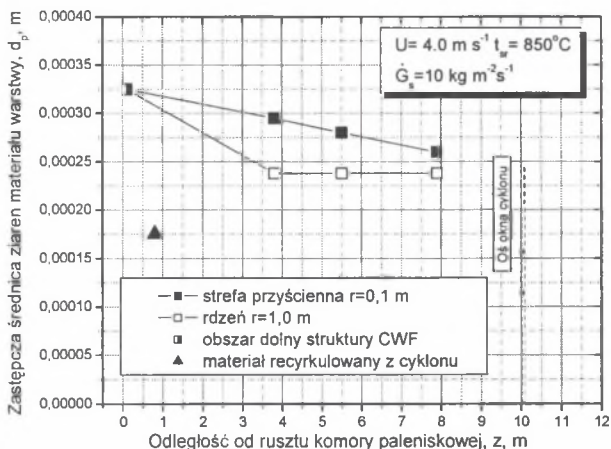
Fig. 5.33. Distribution of the effective material particle diameter as a function of the distance from the combustion chamber grid for the 670 MW CFB boiler tested

Dane przedstawione na rysunku 5.33, a uzyskane w wyniku przeprowadzonych analiz rozkładu ziarnowego próbek materiału warstwy pobranych przy wykorzystaniu sondy próbkującej, opisano poniższą formułą:

$$d_{p,hsp,hsr}(z) = d_{p,wk,hsp,hsr} + (d_{p,d} - d_{p,wk,hsp,hsr}) \cdot \exp\left(\frac{-z}{z_g}\right). \quad (5.23)$$

Jak widać na rysunku 5.33, w obszarze rozrzedzonym CWF widoczna jest znaczna segregacja ziaren w przekroju poziomym, jaki i przekroju pionowym komory paleniskowej. Największe różnice w wartości zastępczej średnicy ziaren materiału warstwy występują pomiędzy dolną a górną częścią komory paleniskowej, tj. pomiędzy obszarem gęstym a obszarem rozrzedzonym CWF. Uzyskane wyniki wskazują również na intensywny proces mieszania w dolnej części komory paleniskowej. Proces ten prowadzi do równomiernego rozkładu ziaren materiału

warstwy w przekroju poziomym w analizowanym obszarze. W górnej części komory paleniskowej w obszarze rozrzedzonym zaobserwowano segregację ziaren materiału warstwy w przekroju poziomym. Ziarna grube wykazywały tendencję do akumulacji w sąsiedztwie ścian komory paleniskowej, natomiast ziarna drobne zajmowały przestrzeń rdzenia obszaru rozrzedzonego. Uzyskane wyniki badań są zgodne z badaniami przeprowadzonymi w pracy [29] na kotle 12 MW oraz wynikami prezentowanymi w pracy [100]. Rozkład zastępczej średnicy ziaren materiału warstwy w funkcji odległości od rusztu komory paleniskowej dla kotła z CWF o mocy 12 MW przedstawiono na rysunku 5.34.



Rys. 5.34. Rozkład zastępczej średnicy ziaren materiału warstwy w funkcji odległości od rusztu komory paleniskowej dla kotła z CWF o mocy 12 MW

Fig. 5.34. Distribution of the effective bed material particle diameter as a function of the distance from the combustion chamber grid for the 12 MW CFB boiler

Przy zbliżonych warunkach przepływowych rozpatrywanych kotłów, o wartościach parametru H_w/D_e odpowiednio 3,3 i 8,8, w obszarze rozrzedzonym występuje porównywalny rozkład zastępczych średnic ziaren materiału warstwy wzdłuż wysokości komory paleniskowej. Różnica występuje w przypadku obszaru dolnego, gdzie zastępcza średnica ziaren dla kotła 670 MW jest większa (0,45 μm) niż dla kotła 12 MW (0,33 μm). Na dodatek obserwowana niższa wartość średnicy ziaren materiału recykulowanego (0,15 μm) w badanym kotle w porównaniu z kotłem Chalmers (0,18 μm) może wskazywać na wyższą skuteczność separacji cyklonu w przypadku kotła 670 MW. Efekt ten wskazuje na dużą rolę układu separacji ziaren w formowaniu struktury CWF w komorze paleniskowej kotła, co w konsekwencji będzie miało wpływ na jakość procesu spalania.

5.7. Podsumowanie

Uzyskane wyniki badań potwierdziły istnienie w objętości CWF kotła dużej mocy trzech charakterystycznych obszarów, tj. obszaru dolnego, obszaru gęstego, obszaru rozrzedzonego, różniących się między sobą stężeniem objętościowym ziaren materiału warstwy oraz częstotliwością dominującą pulsacji ciśnienia. Obszar dolny zlokalizowany bezpośrednio nad rusztem komory paleniskowej został określony jako burzliwa warstwa

pęcherzowa pracująca przy prędkościach gazu wyższych od prędkości unoszenia ziaren materiału warstwy. Dodatkowo zwiększenie gabarytów kotła z CWF prowadzi do znacznego obniżenia stężenia ziaren materiału warstwy w górnej części komory paleniskowej oraz do intensyfikacji procesu mieszania w jej dolnej części. Obecność silnego strumienia masy ziaren materiału warstwy opadającego w sąsiedztwie ścian komory paleniskowej oraz intensywny unos ziaren w kierunku wlotu do cyklonów potwierdziły istnienie struktury „rdzeń – strefa przyścienna” w obszarze rozrzedzonym cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej kotła dużej mocy. Wraz z obniżeniem stosunku H_k/D_e kotłów średnie stężenie objętościowe ziaren w rdzeniu rosło i dążyło do wartości średniego stężenia w poziomym przekroju CWF, natomiast średnie stężenie objętościowe ziaren w hydrodynamicznej strefie przyściennej ulegało obniżeniu i również dążyło do wartości średniego stężenia w poziomym przekroju CWF. Analiza wyników wskazuje również na obniżenie udziału pola powierzchni hydrodynamicznej strefy przyściennej wraz ze wzrostem mocy kotła. Grubość tej strefy jest zasadniczym parametrem wpływającym na wartość prędkości ziaren opadających w bliskim sąsiedztwie ścian komory paleniskowej. Jak wykazały przeprowadzone analizy, wzrost grubości hydrodynamicznej strefy przyściennej prowadzi do wzrostu prędkości opadania ziaren w bliskim sąsiedztwie ścian komory paleniskowej. Struktura CWF kotła dużej mocy charakteryzuje się również silną segregacją ziaren związaną z ich rozkładem ziarnowym pomiędzy dolną i górną częścią komory paleniskowej, jak również znaczną segregacją w przekroju poziomym komory paleniskowej, tj. pomiędzy strefą przyścienną i rdzeniem w obszarze rozrzedzonym.

Na podstawie uzyskanych wyników badań należy stwierdzić, iż w przypadku kotłów dużej mocy z CWF obszarem odpowiedzialnym za efektywność procesu spalania oraz wartość emisji zanieczyszczeń gazowych i stałych będzie obszar dolny i gęsty położony w dolnej części komory paleniskowej. Wyniki uzyskanych badań wskazują ponadto na znaczącą rolę układu separacji w formowaniu warunków przepływowych w komorze paleniskowej.

6. EMISJE ZANIECZYSZCZEŃ GAZOWYCH

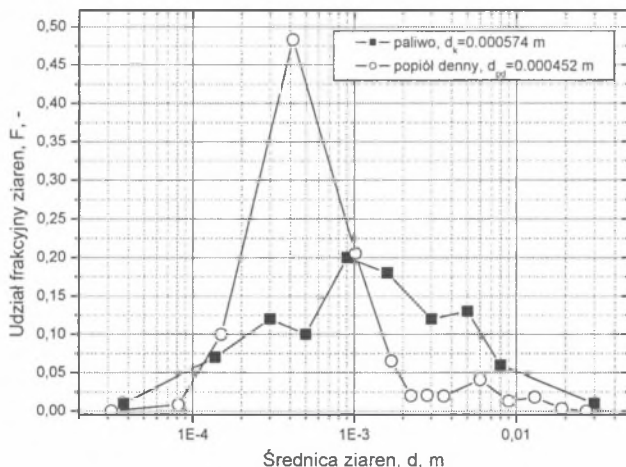
6.1. Wprowadzenie

Jednym z podstawowych problemów występujących podczas opracowywania modeli procesu spalania realizowanych w kotłach z cyrkulacyjną warstwą fluidalną jest brak wiedzy o przebiegu procesów tworzenia i redukcji zanieczyszczeń gazowych wewnątrz komory paleniskowej. Stan ten w głównej mierze spowodowany jest bardzo wysokim kosztem badań dużych kotłów stosowanych w energetyce zawodowej, jak również wysokim stopniem ich złożoności i trudności. Toteż ogólne charakterystyki wartości emisji zanieczyszczeń gazowych z procesu spalania w kotłach z CWF są znane jedynie na podstawie analiz zmian stężeń zanieczyszczeń gazowych mierzonych poza komorą paleniskową, tj. analizie końcowych wartości tych stężeń rejestrowanych przed kominem. Również zakres dostępnych w literaturze badań jest niewystarczający do przeprowadzenia całościowej analizy procesów ciepłno-przepływowych w komorze paleniskowej kotła, zwłaszcza dużej mocy. Analiza danych literaturowych dotyczących procesu spalania jest także bardzo trudna, a czasami wręcz niemożliwa ze względu na różnice konstrukcyjne pomiędzy badanymi kotłami w skali technicznej (małej i średniej). Dlatego też dostępne dane literaturowe nie pozwalają na szeroką analizę wpływu warunków ciepłno-przepływowych w komorze paleniskowej kotła dużej mocy z CWF na wartości emitowanych zanieczyszczeń.

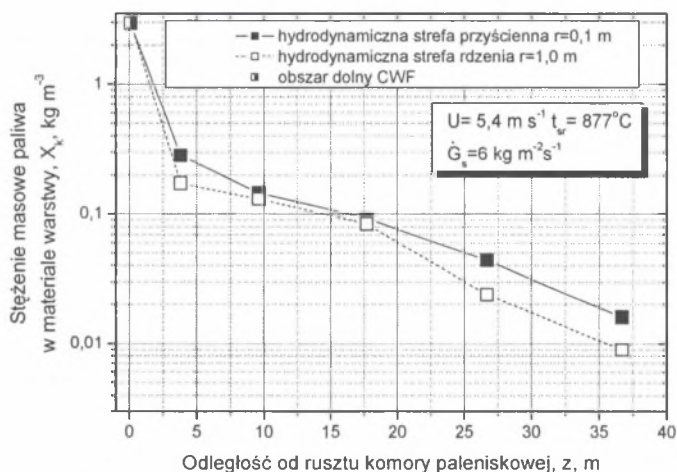
6.2. Rozkład paliwa w objętości CWF

Wprowadzenie paliwa w jakimkolwiek punkcie warstwy fluidalnej powoduje powstanie poziomych gradientów stężenia w wyniku naturalnego procesu mieszania ziaren materiału warstwy. Mieszanie fazy stałej jest bardzo szybkie, lecz jak przedstawiono w pracy [110], przy dużych rozmiarach warstwy mogą wystąpić znaczne poziome gradienty stężenia ziaren paliwa. Paliwo do komory paleniskowej w większości konstruowanych kotłów wprowadzane jest do obszaru położonego bezpośrednio nad burzliwą pęcherzową warstwą fluidalną poprzez kanały zsypane. Do obszaru tego wprowadzany jest również materiał recykulowany z separatora lub separatorów i układu nawrotu. Sposób zasilania badanego kotła 670 MW paliwem przedstawiono na rysunku 3.7. Wprowadzane ziarna do CWF przechodzą przez różne fazy: suszenie, uwalnianie części lotnych, zapłon oraz spalanie części lotnych i powstałego koksiku. Miejsce przebiegu tych procesów w objętości CWF odgrywa kluczową rolę w formowaniu pierwotnych produktów procesu spalania. Wpływ warunków pracy układu CWF na proces spalania ziaren paliwa prezentowano między innymi w pracy [19]. Dlatego też rozkład ziaren paliwa w strukturze CWF był bardzo ważnym rezultatem przeprowadzonych badań. Na rysunku 6.1 przedstawiono rozkład udziału frakcyjnego ziaren w paliwie i popiele dennym dla badanego kotła 670 MW. Jak widać na rysunku 6.1, drobne ziarna paliwa są natychmiast unoszone do obszaru rozrzedzonego, natomiast grube opadają do obszaru dolnego i obszaru gęstego. Należy jednak zauważyć, iż udział ziaren drobnych, tj. ziaren o średnicy poniżej 100 μm , wynosi tylko 7%, a więc dolna część komory paleniskowej jest obszarem, w którym zachodzi proces spalania przeważającej masy ziaren paliwa w strukturze CWF. Rysunek 6.2 przedstawia rozkład stężenia masowego ziaren paliwa w materiale warstwy w funkcji odległości od rusztu. Wyniki badań wskazują na intensywny proces redukcji średnicy ziaren paliwa w dolnej części komory paleniskowej, tj. w obrębie obszaru dolnego i gęstego. Jak można zaobserwować na rysunku 6.2, występuje tu znaczna segregacja

ziaren paliwa pomiędzy dolną i górną częścią komory paleniskowej, jak również segregacja ziaren w obszarze rozrzedzonym pomiędzy rdzeniem i strefą przysięnną.



Rys. 6.1. Udział frakcyjny ziaren dla paliwa i popiołu dennego badanego kotła 670 MW
Fig. 6.1. Particle fraction for the fuel and bottom ash of the 670 MW boiler tested

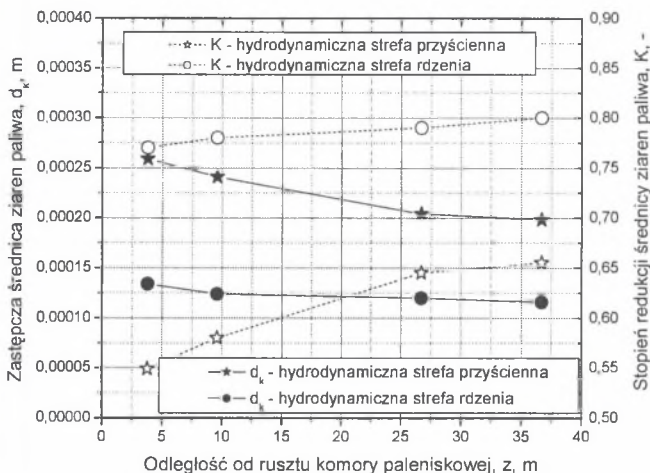


Rys. 6.2. Rozkład stężenia masowego paliwa w materiale warstwy w funkcji odległości od rusztu komory paleniskowej badanego kotła 670 MW

Fig. 6.2. Distribution of mass fuel concentration in the bed material as a function of the distance from the combustion chamber grid of the 670 MW boiler tested

Na rysunku 6.3 przedstawiono rozkład zastępczej średnicy ziaren paliwa oraz stopnia redukcji ziaren paliwa w funkcji odległości od rusztu komory paleniskowej badanego kotła. Analizując przedstawione wyniki badań na rysunku 6.3, należy stwierdzić, iż w strefie przysięennej obszaru gęstego stopień redukcji ziaren paliwa wyniósł 55%, wskazując tym samym na intensywny proces uwalniania części lotnych w tym regionie. W przypadku

głębszych obszarów, tj. poza strefą przyścienną, wartość tego wskaźnika wyniosła 77%, wskazując na intensywny proces fragmentacji ziaren paliwa (zarówno fragmentacji termicznej, jak i mechanicznej), potwierdzając tym samym intensywny proces mieszania w przekroju poziomym obszaru gęstego. Jak wskazują wyniki prezentowane na rysunku 6.3, w obszarze rozrzedzonym stopień redukcji ziaren paliwa wyniósł 10% i 3%, odpowiednio w strefie przyściennej i rdzeniu. Wyniki dotyczące obszaru rozrzedzonego wskazują na zdecydowanie mniej intensywny proces mieszania i wolny proces spalania ziaren paliwa w rdzeniu tego obszaru.

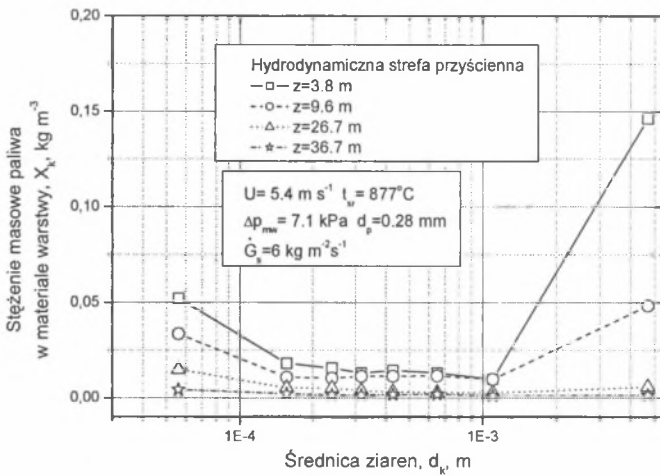


Rys. 6.3. Rozkład zastępczej średnicy ziaren paliwa oraz stopnia redukcji ziaren paliwa w funkcji odległości od rusztu komory paleniskowej badanego kotła 670 MW

Fig. 6.3. Distribution of the effective fuel particle diameter and fuel particle reduction rate as a function of the distance from the combustion chamber grid of the 670 MW boiler tested

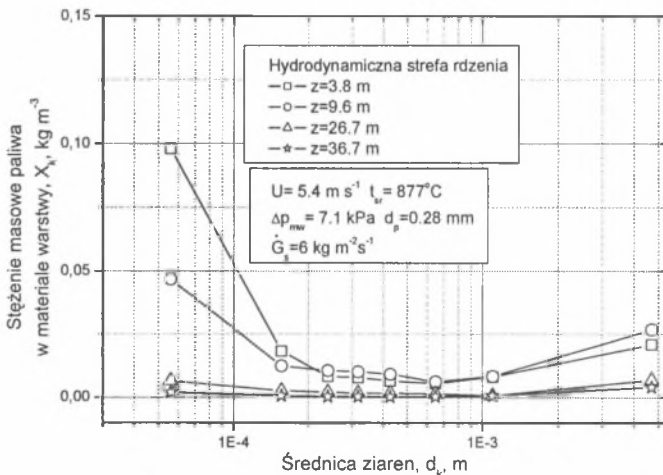
Na rysunku 6.4 i rysunku 6.5 przedstawiono rozkład stężenia masowego ziaren paliwa w materiale warstwy w funkcji średnicy ziaren paliwa dla badanego kotła o mocy 670 MW, odpowiednio dla strefy przyściennej i rdzenia obszaru rozrzedzonego struktury CWF. Na podstawie przedstawionych danych należy stwierdzić, iż ubytek masy ziaren paliwa najintensywniej zachodzi dla ziaren grubych w strefie przyściennej i ziaren drobnych w strefie rdzenia. Redukcja ziaren drobnych w rdzeniu jest przede wszystkim wynikiem procesu spalania, natomiast redukcja ziaren grubych w strefie przyściennej wynikiem procesu fragmentacji, który jest intensyfikowany przez wsteczny przepływ gazu w bliskim sąsiedztwie ścian komory paleniskowej oraz ciągłą wyminę masy ziaren pomiędzy rdzeniem i hydrodynamiczną strefą przyścienną. Niemniej jednak wraz ze wzrostem odległości od rusztu segregacja ziaren paliwa pomiędzy ziarnami grubymi i drobnymi zanika, czego efektem jest wyrównanie stężenia masowego ziaren paliwa w poszczególnych frakcjach ziaren w górnej części obszaru rozrzedzonego, zarówno w strefie przyściennej, jak i w rdzeniu. Przeprowadzone badania wskazują, iż proces mieszania ziaren paliwa w dolnej części komory paleniskowej w przypadku kotła dużej mocy zachodzi w całej objętości obszaru dolnego i gęstego, w przeciwieństwie do kotła małej mocy, w którym to, jak wskazują badania [51], rozpraszanie ziaren paliwa występowało jedynie na powierzchni obszaru gęstego. W przypadku kotłów dużych proces mieszania wymuszony poprzez opadanie ziaren w hydrodynamicznej strefie przyściennej jest intensywniejszy w porównaniu do kotła o

wyższym stosunku H_k/D_e . Efekt ten jest wynikiem wyższych prędkości ziaren opadających w tej strefie przyściennej oraz nachylenia ścian w dolnej części kotła, co nasila wewnętrzną cyrkulację ziaren w obszarze gęstym, a przez to sprzyja poprawie dyspersji paliwa. Analiza wyników wskazuje również, iż najbardziej lotne części są spalane w obszarze gęstym i dolnym objętości CWF.



Rys. 6.4. Rozkład stężenia masowego paliwa w materiale warstwy w funkcji średnicy ziaren paliwa dla badanego kotła 670 MW – strefa przyściennej obszaru rozrzedzonego

Fig. 6.4. Distribution of mass fuel concentration in the bed material as a function of the fuel particle diameter for the 670 MW boiler tested – the dilute region wall boundary layer



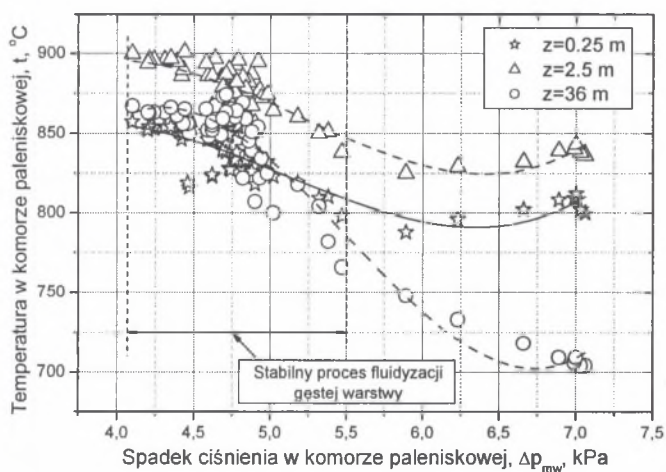
Rys. 6.5. Rozkład stężenia masowego paliwa w materiale warstwy w funkcji średnicy ziaren paliwa dla badanego kotła 670 MW – strefa rdzenia obszaru rozrzedzonego

Fig. 6.5. Distribution of mass fuel concentration in the bed material as a function of the fuel particle diameter for the 670 MW boiler tested – the dilute region core zone

Zatem można postawić tezę, iż warunki ciepłno-przepływowe w obszarze gęstym i obszarze dolnym CWF będą odgrywać kluczową rolę w formowaniu zanieczyszczeń gazowych i stałych w procesie spalania w komorze paleniskowej kotła dużej mocy.

6.3. Rozkład temperatury w kotle z CWF

Gdy analizuje się warunki pracy kotłów z warstwą fluidalną, bardzo ważnym zagadnieniem jest połączenie kontroli temperatury w komorze paleniskowej z pomiarami emisji zanieczyszczeń gazowych. Typowym zakresem temperatur panujących w kotle z CWF jest 750-950°C. Temperatury te wynikają z najkorzystniejszych warunków wiązania tlenków siarki oraz niskich emisji NO_x. Poniżej 750°C spalanie jest wolniejsze, maleje emisja tlenków siarki, lecz emisja CO i węglowodorów może wzrastać. Z drugiej strony ze względu na częste wykorzystywanie sorbentów wprowadzanych do komory paleniskowej w celu odsiarczenia spalin górna granica temperatury jest ograniczona skutecznością procesu wiązania siarki. Skuteczność odsiarczania znacznie maleje w wielu kotłach fluidalnych powyżej 850°C, a emisja NO_x rośnie wraz ze wzrostem temperatury. Bardzo ważnym problemem dla stabilnego procesu fluidyzacji, zwłaszcza w dolnej części komory paleniskowej, jest konieczność unikania tworzenia się aglomeratów. Na rysunku 6.6 przedstawiono wpływ masy materiału warstwy (wyrażonej jako ciśnienie materiału warstwy na poziomie rusztu) w komorze paleniskowej kotła 670 MW na temperaturę w obszarach: dolnym (z=0.25 m), gęstym (z=2.5 m) oraz rozrzedzonym (z=36 m) cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej.

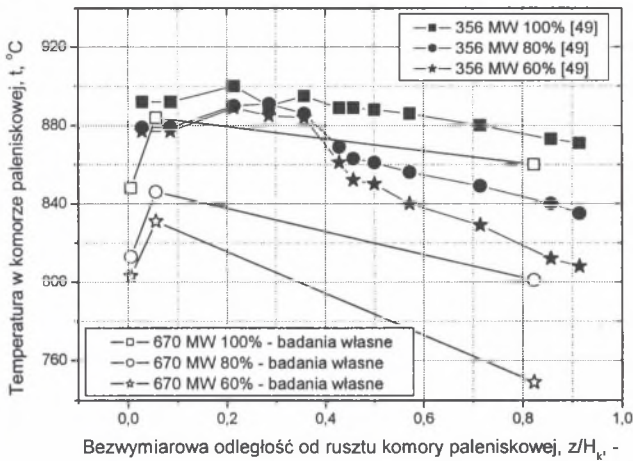


Rys. 6.6. Rozkład temperatury w obszarze CWF w funkcji spadku ciśnienia w komorze paleniskowej badanego kotła 670 MW

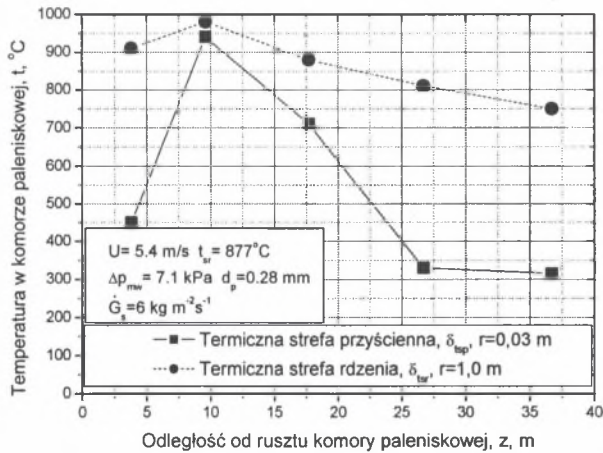
Fig. 6.6. Distribution of temperature in the CFB region as a function of bed material pressure drop for the 670 MW boiler tested

Jak można zaobserwować na rysunku 6.6, stabilna praca kotła charakteryzowała się wartościami ciśnienia w zakresie od 4 kPa do 5,5 kPa. Powyżej 5,5 kPa temperatura w komorze paleniskowej niebezpiecznie obniżała się poniżej założonego konstrukcyjnie minimalnego poziomu 816°C. Dalszy wzrost masy materiału warstwy w komorze

paleniskowej, tj. wzrost ciśnienia powyżej 6,5 kPa, prowadził do wzrostu temperatury, co wskazywało na zapoczątkowanie procesu aglomeracji ziaren i w konsekwencji defluidyzację warstwy. Efekt ten został również potwierdzony w badaniach przeprowadzonych na kotle o mocy 40 MW [41, 42] oraz na kotle o mocy 1.1 GW z ciśnieniową warstwą fluidalną [49], w których stwierdzono, iż rozkład temperatury oraz właściwości fizykochemiczne materiału warstwy wpływały decydująco na proces tworzenia się aglomeratów w dolnej części komory paleniskowej. Zbrylanie ziaren rozpoczyna się przeważnie na małych aglomeratach, tworzonych przez stopiony materiał warstwy fluidalnej. Aglomeraty takie mogą rosnąć bardzo szybko, szczególnie gdy zanika fluidyzacja. Problem ten może występować zwłaszcza w czasie pracy kotła przy niskich prędkościach gazu i niewystarczającym rozdziale gazu w obszarze dolnym i gęstym CWF. Zakładając, że dla danego kotła rozmieszczenie powierzchni wymiany ciepła, punkty wprowadzenia paliwa i sorbentu oraz właściwości fizykochemiczne sorbentu i paliwa nie ulegają zmianie w trakcie pracy kotła, to na przepływ ciepła, który kształtuje rozkład temperatury w komorze paleniskowej, w zasadniczy sposób będzie miała wpływ masa materiału warstwy cyrkulująca zarówno w objętości komory paleniskowej, jak również pomiędzy komorą paleniskową oraz układem nawrotu. Co więcej, rozkład temperatury w warstwie fluidalnej, a co za tym idzie, i emisje zanieczyszczeń gazowych i stałych z procesu spalania, kontrolowane mogą być poprzez: rozdział powietrza pierwotnego i wtórnego, rozdział paliwa, prędkość gazu oraz zewnętrzny stopień cyrkulacji ziaren materiału warstwy. Innym rozwiązaniem jest zmienność współczynnika przejmowania ciepła w komorze paleniskowej poprzez kontrolę strumienia masy i temperatury materiału recyrkulowanego w zewnętrznym wymienniku ciepła umiejscowionym pomiędzy separatorem a komorą paleniskową, tak jak jest to realizowane między innymi na kotłach typu COMPACT [72]. Są to typowe wymienniki ciepła pracujące przy prędkościach fluidyzacji w zakresie 0.5-1.5 m s⁻¹. Należy więc stwierdzić, że jednorodność temperatury w strukturze CWF jest wynikiem procesów cieplno-przepływowych zachodzących wewnątrz komory paleniskowej, jak i również pracy układu nawrotu i separatora ziaren. Istnieją jednak czynniki, poprzez które temperatura ta może być niejednolita. Jednym z nich jest obniżenie prędkości gazu w komorze paleniskowej wraz z obniżeniem obciążenia cieplnego kotła. Przykład taki przedstawiono na rysunku 6.7. Stan ten bezpośrednio prowadzi do obniżenia cyrkulacji ziaren w komorze paleniskowej, jak i pomiędzy komorą paleniskową a układem nawrotu, czego konsekwencją jest obniżenie przepływu ciepła pomiędzy poszczególnymi obszarami CWF, a tym samym powstawanie nierównomierności rozkładu temperatury. Przykładowo na wyjściu z komory paleniskowej temperatura jest zredukowana do poziomu poniżej 760°C przy 60% obciążeniu cieplnym kotła. Przy warunkach zredukowanego obciążenia czas przebywania ziaren, profil temperatury w strukturze CWF zmieniają się, co z kolei może prowadzić do zmian stężeń zanieczyszczeń gazowych i stałych. Kolejnym przykładem nierównomiernego profilu temperatury w strukturze CWF są dane przedstawione na rysunku 6.8 [90], a dotyczące pomiarów na kotle o mocy 670 MW przy pełnym obciążeniu cieplnym oraz przy wykorzystaniu sondy pomiarowej scharakteryzowanej w rozdziale 4.2. Pionowy profil temperatury wskazuje, iż proces mieszania ziaren materiału warstwy był niewystarczający do osiągnięcia wyrównanego profilu temperatury wzdłuż wysokości komory paleniskowej. Przepływ wydzielanego ciepła z dolnej części komory paleniskowej, powyżej miejsca wprowadzenia powietrza wtórnego, w kierunku powierzchni wymiany ciepła w górnej części komory paleniskowej był zbyt niski. Wyniki przedstawione na rysunku 6.8 wskazują, iż w strukturze CWF kotła dużej mocy mogą wystąpić znaczne gradienty temperatury zwłaszcza w obszarze powyżej wprowadzenia powietrza wtórnego, tj. obszarze rozrzedzonym charakteryzującym się słabym procesem mieszania fazy gazowej i niskim stężeniem objętościowym ziaren materiału warstwy.



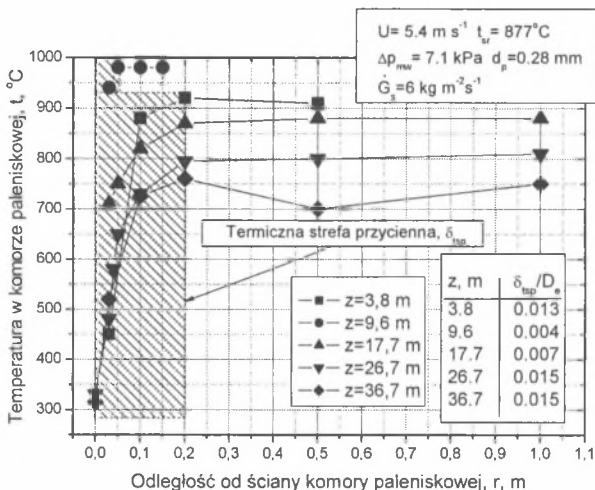
Rys. 6.7. Rozkład temperatury w komorze paleniskowej w funkcji odległości od rusztu
 Fig. 6.7. Distribution of temperature in the combustion chamber as a function of the distance from the grid



Rys. 6.8. Rozkład temperatury w komorze paleniskowej w funkcji odległości od rusztu
 Fig. 6.8. Distribution of temperature in the combustion chamber as a function of the distance from the grid

Na podstawie przedstawionych wyników badań prezentowanych na rysunku 6.8 należy stwierdzić, iż najwyższe temperatury w komorze paleniskowej występują na wysokości 9,6 m, co wskazuje, że jest to górna granica oddziaływania powietrza wtórnego na proces spalania. Powyżej tego poziomu, tj. jednej czwartej wysokości komory paleniskowej, obserwowany był spadek temperatury. Na rysunku 6.9 przedstawiono profil poziomy temperatury w obszarze rozrzedzonym struktury CWF dla pięciu badanych wysokości od rusztu w funkcji odległości od ściany komory paleniskowej kotła 670 MW [32]. Uzyskane

wyniki badań wskazują na porównywalne poziome profile temperatury dla każdej z badanych odległości od rusztu komory paleniskowej. Na rysunku 6.9 zaobserwować można również obecność termicznej strefy przyściennej o grubości około 0,2 m, która charakteryzuje się znacznym poziomym gradientem temperatury w bliskim sąsiedztwie ścian. W przypadku obszaru położonego poza termiczną strefą przyścianą wyniki badań wskazują na niezmienną wartość temperatury (płaski profil). Jedynie w przypadku obszaru położonego na wysokości wlotu do cyklonów, tj. 36,7 m, występuje lokalne minimum wartości temperatury w odległości 0,5 m od ściany. Efekt ten można wytłumaczyć obecnością w tym rejonie pomiarowym powierzchni wymiany ciepła tzw. ścian skrzydłowych.



Rys. 6.9. Poziomy profil temperatury materiału warstwy w komorze paleniskowej dla badanych odległości od rusztu

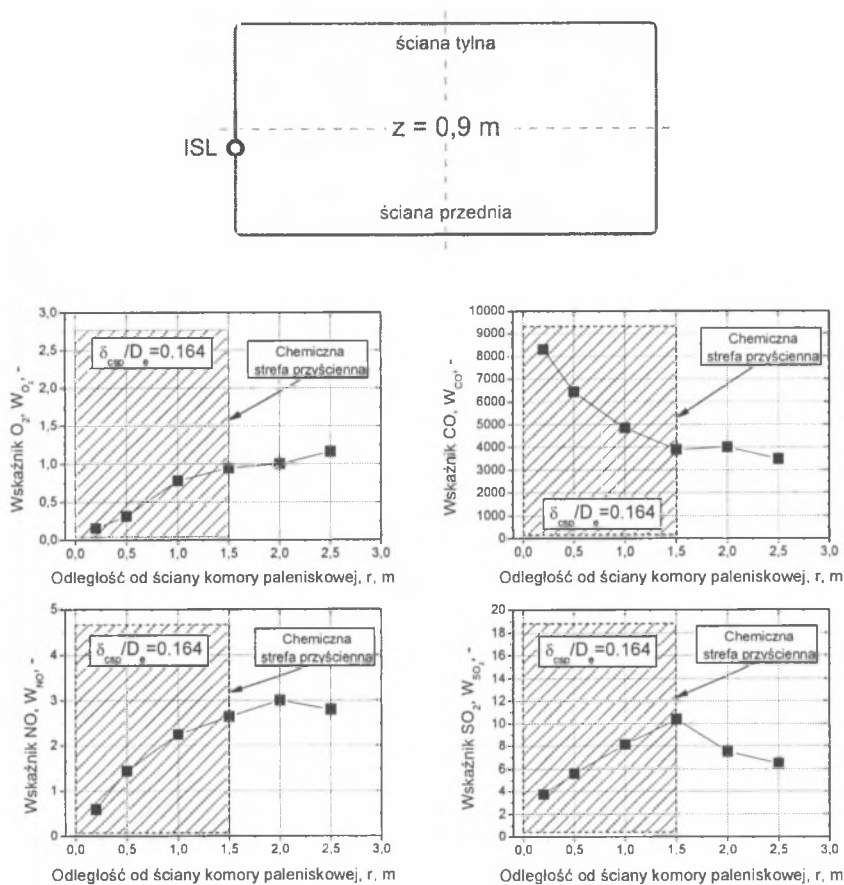
Fig. 6.9. Horizontal profile of temperature in the combustion chamber for the tested distances from the grid

6.4. Rozkład stężeń zanieczyszczeń gazowych w komorze paleniskowej

W celu określenia rozkładu stężeń składników gazu w komorze paleniskowej badanego kotła o mocy 670 MW wykorzystano porty pomiarowe prezentowane na rysunku 3.3a. Metodę badań zawarto w rozdziale 4.3.3 oraz pracy [98]. Lokalne wartości stężeń CO pozwoliły na ocenę przebiegu procesu spalania i określenie miejsca uwalniania części lotnych. Pomiarów lokalnych wartości stężenia O_2 wskazały na rozkład utleniacza w komorze paleniskowej, natomiast rozkłady stężeń NO i SO_2 posłużyły do określenia miejsca pierwotnego powstawania i redukcji tych zanieczyszczeń gazowych. W trakcie prowadzonych pomiarów utrzymywano niezmiennie obciążenie cieplne kotła wynoszące 100% poprzez kontrolę strumienia masy podawanego paliwa oraz strumienia objętości powietrza przy zachowaniu niezmiennego rozdziału pomiędzy powietrzem pierwotnym a wtórnym. Każdy z ośmiu punktów wprowadzenia paliwa został równomiernie obciążony, tj. po 12,5% całkowitego strumienia masy paliwa. Rozmieszczenie punktów wprowadzenia: paliwa, materiału recykulowanego oraz powietrza wtórnego przedstawiono na rysunku 3.6. Warunki prowadzenia badań przedstawiono na rysunku 3.8. W celu przeprowadzenia analizy

porównawczej wyników badań stężenia poszczególnych składników fazy gazowej wyrażono je jako wskaźniki, które zdefiniowano zgodnie z równaniem 4.17.

Na rysunku 6.10 przedstawiono rozkład lokalnej wartości wskaźników: NO, CO, O₂ i SO₂ w odległości 0,9 m od rusztu komory paleniskowej, tj. w obrębie obszaru gęstego CWF i bezpośrednio nad punktami wprowadzenia paliwa.

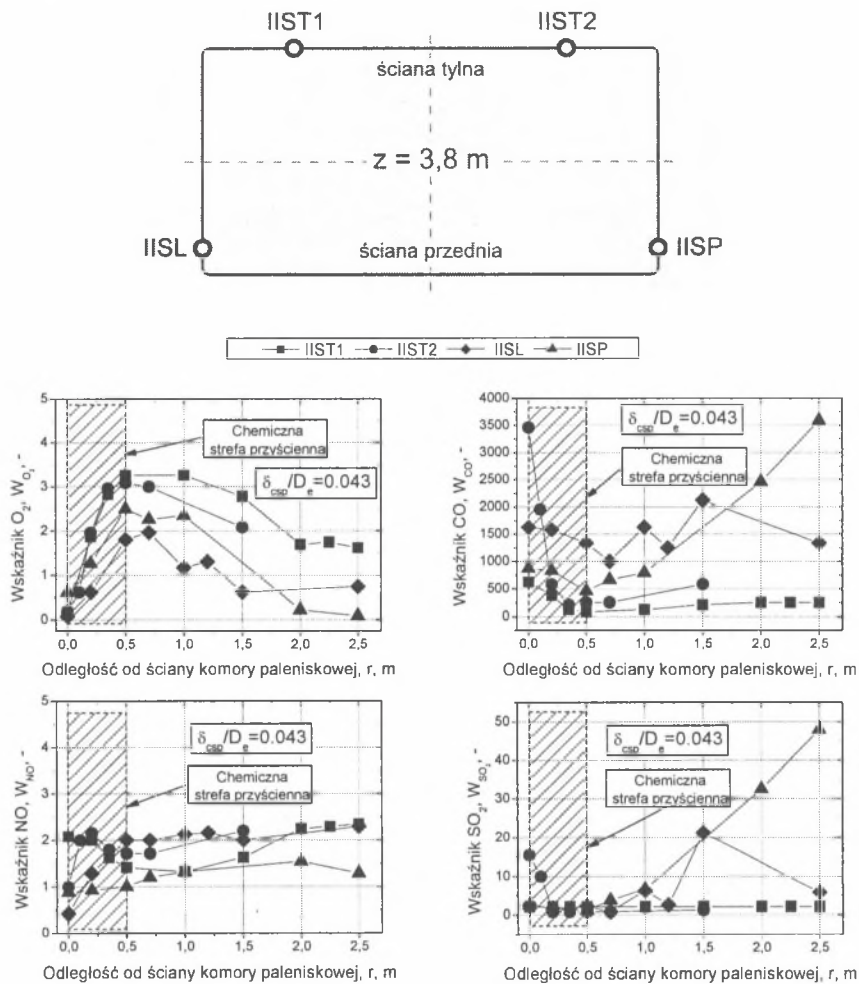


Rys. 6.10. Rozkład lokalnego wskaźnika: NO, CO, O₂ i SO₂ w odległości 0,9 m od rusztu komory paleniskowej

Fig. 6.10. Distribution of the local index of NO, CO, O₂ and SO₂ at a distance of 0.9 m from the combustion chamber grid

Prezentowane wyniki na rysunku 6.10 wyraźnie wskazują na obecność obszaru przyściennego, chemicznej strefy przyścienną δ_{ch} , o grubości 1,5 m. W obszarze tym wskaźniki O₂ i NO są dużo niższe od stężenia CO. W obszarze przyściennym wysokie stężenie CO wpływa korzystnie na redukcję powstającego NO. Wysokie stężenie NO i SO₂ poza obszarem przyściennym wskazuje, że wymienione zanieczyszczenia powstają głównie w dolnej części komory paleniskowej. Na rysunku 6.11 przedstawiono rozkład wskaźników: NO, CO, O₂ i SO₂ w odległości 3,8 m od rusztu komory paleniskowej, tj. na granicy obszaru

gęstego i obszaru rozrzedzonego CWF oraz bezpośrednio powyżej drugiego poziomu powietrza wtórnego.

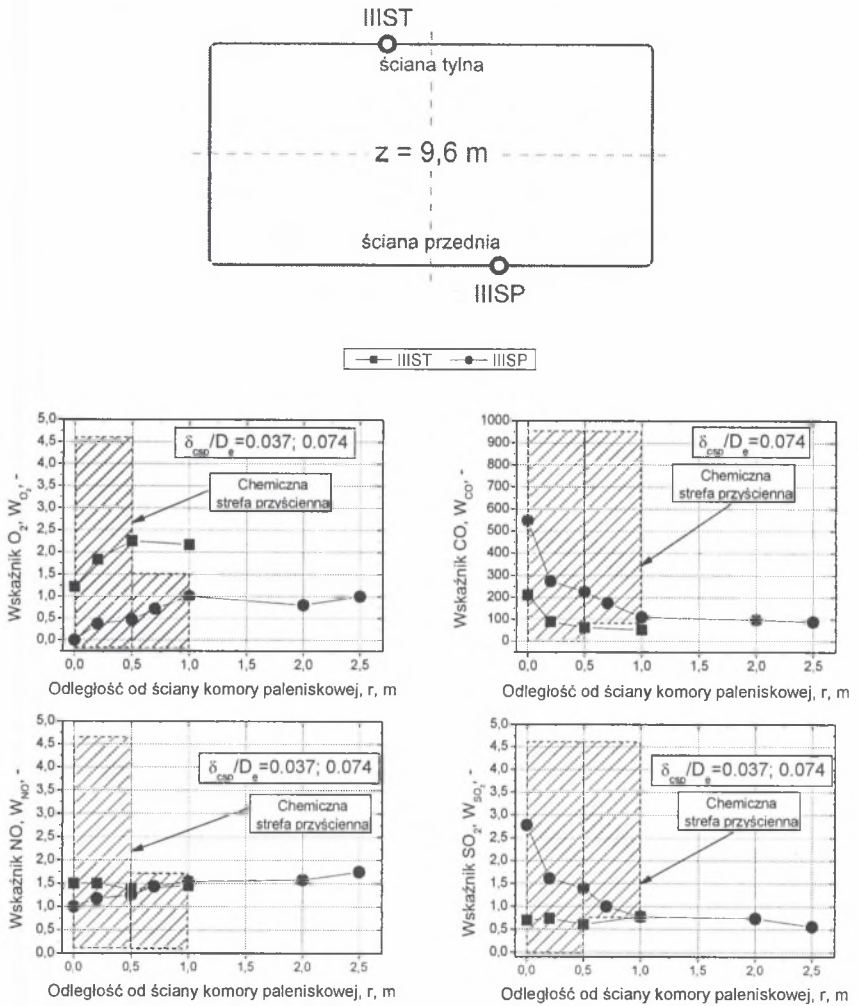


Rys. 6.11. Rozkład lokalnego wskaźnika: NO , CO , O_2 i SO_2 w odległości 3,8 m od rusztu komory paleniskowej

Fig. 6.11. Distribution of the local index of NO , CO , O_2 and SO_2 at a distance of 3.8 m from the combustion chamber grid

Chemiczna strefa przyścienna o grubości 0,5 m również i w tym przypadku jest dostrzegalna. Charakteryzuje się ona niskim stężeniem O_2 i wysokim stężeniem CO . Poza strefą przyścienną widoczny jest wpływ powietrza wtórnego. Wskaźnik stężenia tlenu rośnie do wartości ponad 3 i następnie wraz ze wzrostem odległości od ściany komory paleniskowej maleje do wartości 0,1. Jak widać na rysunku 6.11, wskaźnik NO jest niski, czego efektem jest redukcyjny wpływ CO . Wartość wskaźnika CO wyniosła od 1 do 2. Należy nadto

stwierdzić, iż głębokość penetracji powietrza wtórnego wyniosła tylko 2 m. Na rysunku 6.12 przedstawiono rozkład lokalnego wskaźnika: NO, CO, O₂ i SO₂ w odległości 9,6 m od rusztu komory paleniskowej, tj. w obszarze rozrzedzonym CWF.

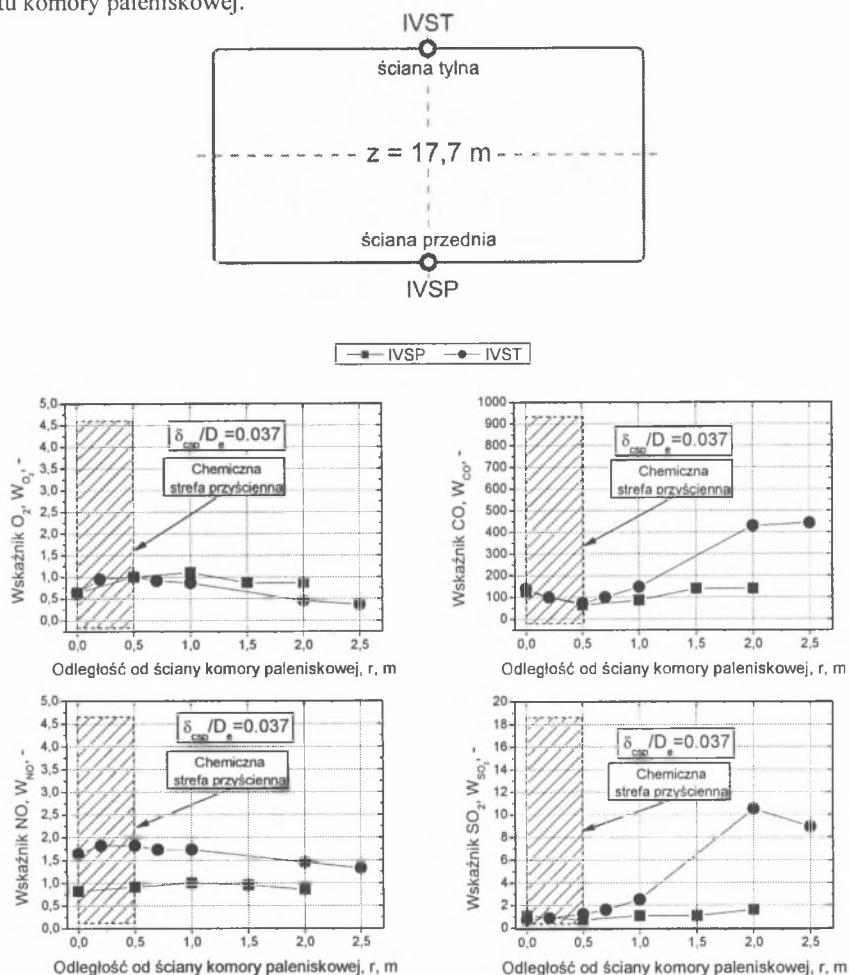


Rys. 6.12. Rozkład lokalnego wskaźnika: NO, CO, O₂ i SO₂ w odległości 9,6 m od rusztu komory paleniskowej

Fig. 6.12. Distribution of the local index of NO, CO, O₂ and SO₂ at a distance of 9.6 m from the combustion chamber grid

Uzyskane wyniki wskazują na obecność chemicznej strefy przysściennej o grubości 0,5 m na ścianie tylnej w przypadku rozkładów stężenia O₂ i CO. Analizując ścianę przednią komory paleniskowej stwierdzamy, że grubość tej strefy wyniosła około 1 m. Wysoki wskaźnik CO na ścianie przedniej wskazuje na nadal biegnący proces utleniania tego składnika gazu. Efekt ten potwierdza niska wartość stężenia tlenu w rozpatrywanej części

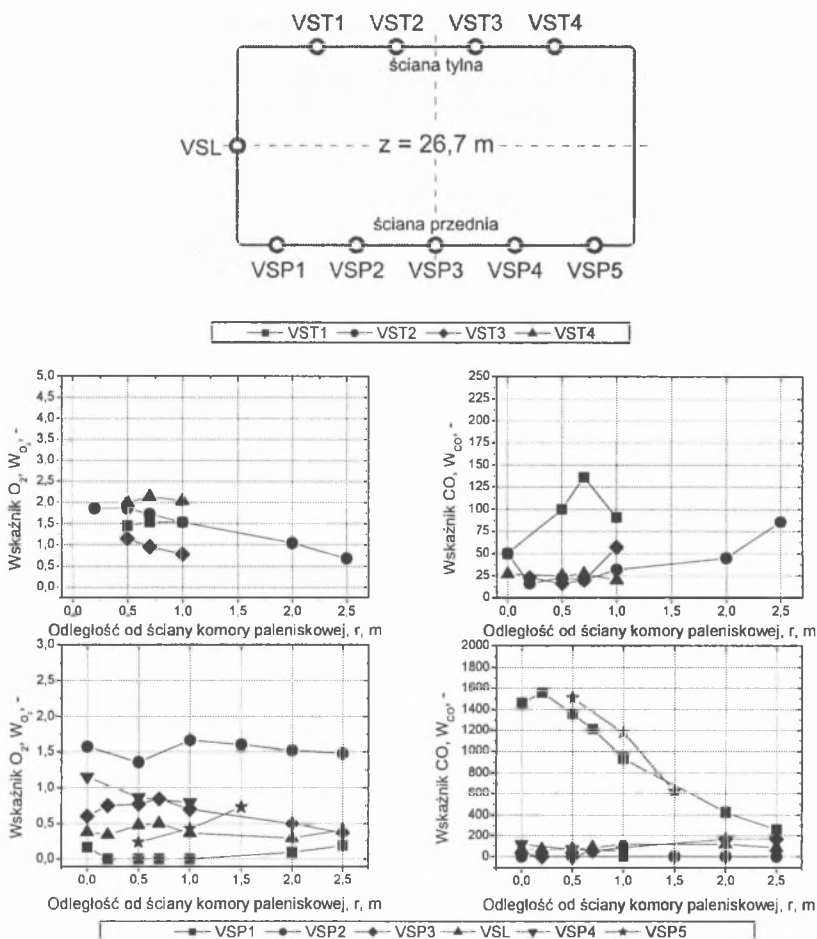
komory paleniskowej. Zdecydowane wyższe stężenie tlenu na ścianie tylnej kotła w porównaniu ze ścianą przednią można wyjaśnić dobrym wymieszaniem paliwa, materiału warstwy i powietrza wprowadzanych do komory paleniskowej poprzez układ nawrotu (zewnętrzna cyrkulacja), co w konsekwencji prowadzi do wprowadzenia ziaren paliwa w głębsze obszary warstwy fluidalnej, praktycznie z pominięciem hydrodynamicznej strefy przyściennej. Jak wynika z rysunku 6.12, dla ściany przedniej i tylnej poza obszarem przyściennym występuje końcowy etap procesu wiązania siarki i wskaźnik stężenia SO_2 przyjmuje wartości równe 1, podczas gdy redukcja NO jest jeszcze nie zakończona w porównaniu do stężenia uzyskanego na wejściu do komina (wskaźnik powyżej 1). Na rysunku 6.13 przedstawiono rozkład lokalnego wskaźnika: NO , CO , O_2 i SO_2 w odległości 17,7 m od rusztu komory paleniskowej.



Rys. 6.13. Rozkład lokalnego wskaźnika: NO , CO , O_2 i SO_2 w odległości 17,7 m od rusztu komory paleniskowej

Fig. 6.13. Distribution of the local index of NO , CO , O_2 and SO_2 at a distance of 17.7 m from the combustion chamber grid

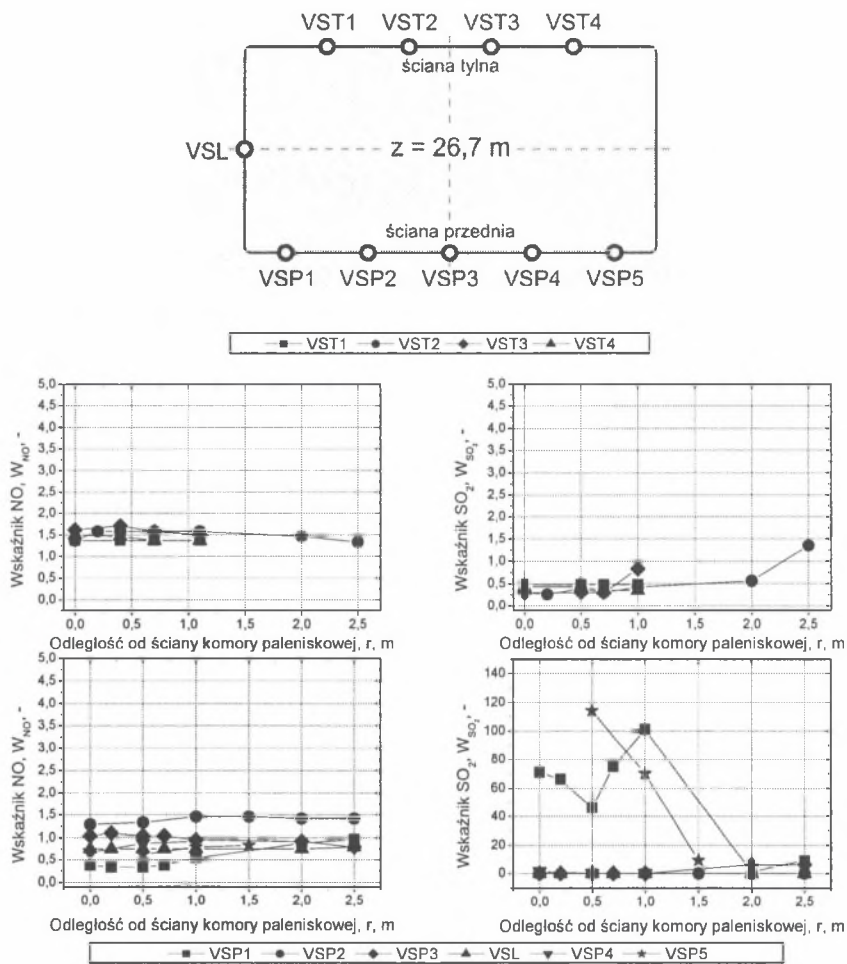
Analizując stężenie O_2 i CO prezentowane na rysunku 6.13, nadal widzimy chemiczną strefę przysścienną o grubości 0,5 m. W porównaniu do poprzedniego poziomu pomiarowego występuje również różnica wskaźników O_2 i CO pomiędzy ścianą przednią i tylną jako wynik biegnącego równocześnie procesu mieszania i procesu spalania. Na wysokości 17,7 m nadal widoczny jest proces redukcji NO. Na rysunku 6.14 przedstawiono wartości lokalnych wskaźników stężeń CO i O_2 w odległości 26,7 m od rusztu komory paleniskowej.



Rys. 6.14. Rozkład lokalnego wskaźnika O_2 i CO w odległości 26,7 m od rusztu komory paleniskowej
Fig. 6.14. Distribution of the local index of O_2 and CO at a distance of 26.7 m from the combustion chamber grid

Jak wskazują uzyskane wyniki, stężenie O_2 i CO jest ciągle znacznie niższe na ścianie przedniej w porównaniu do ściany tylnej. Średnia wartość wskaźnika tlenu na ścianie przedniej wynosi około 0,5, natomiast na ścianie tylnej około 1,5. W przeciwieństwie do O_2 , stężenia CO w pobliżu ściany przedniej są wyższe niż w sąsiedztwie ściany tylnej. Natomiast różnice pomiędzy stężeniem O_2 i CO pomiędzy punktami pomiarowymi po tej samej stronie komory paleniskowej mogą być wynikiem lokalnego efektu punktowego wprowadzenia

paliwa do komory paleniskowej, a więc słabego procesu bocznego mieszania paliwa i materiału inertnego warstwy w obszarze rozrzedzonym CWF. Na rysunku 6.15 przedstawiono rozkład wskaźników stężeń NO i SO₂ w odległości 26,7 m od rusztu komory paleniskowej.

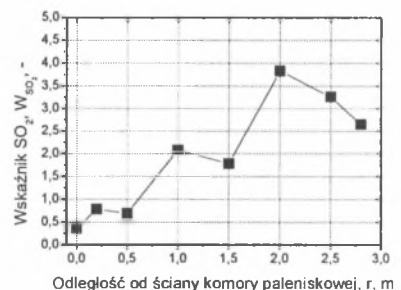
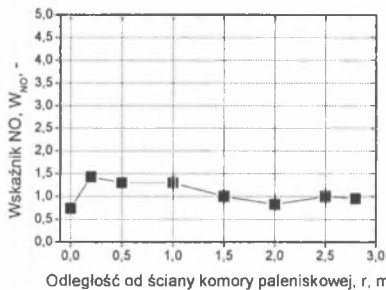
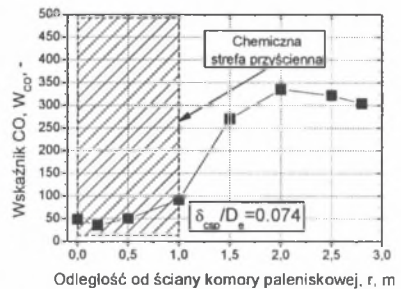
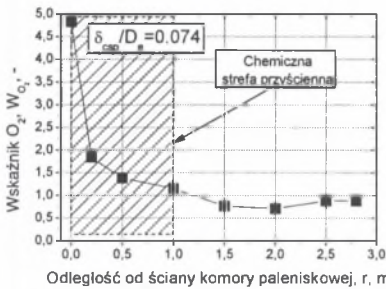
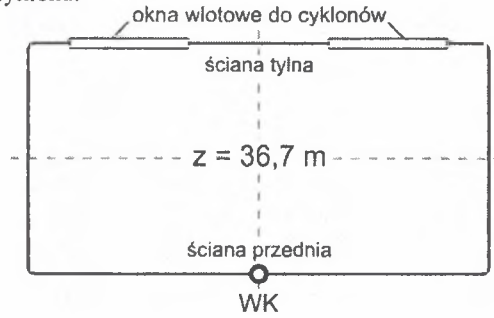


Rys. 6.15. Rozkład lokalnego wskaźnika NO i SO₂ w odległości 26,7 m od rusztu komory paleniskowej

Fig. 6.15. Distribution of the local index of NO and SO₂ at a distance of 26.7 m from the combustion chamber grid

W sąsiedztwie ściany przedniej stężenie NO jest poniżej wartości uzyskanej przed kominem, natomiast w pobliżu ściany tylnej wartość stężenia NO jest wyższa. Identyczna sytuacja występuje w przypadku stężenia SO₂. Wartość średnia stężenia NO i SO₂ osiąga poziom stężenia końcowego z procesu spalania, natomiast jak widać na rysunku 6.14, stężenie CO jest jeszcze dość wysokie. Na rysunku 6.16 przedstawiono rozkład wskaźników

stężeń: NO, CO, O₂ i SO₂ w odległości 36,7 m od rusztu komory paleniskowej, tj. na wysokości wlotu do cyklonu.

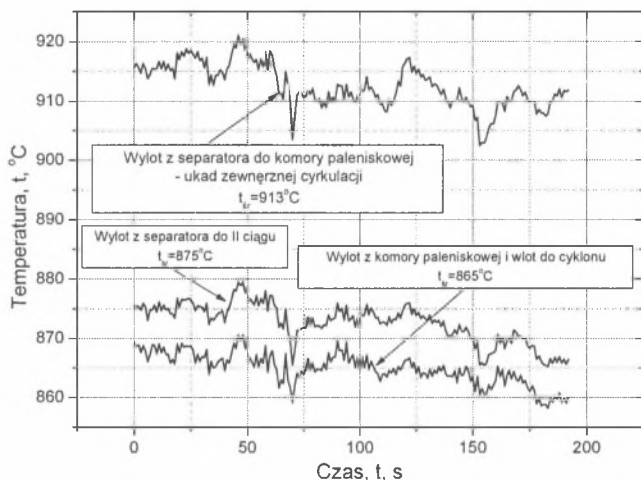


Rys. 6.16. Rozkład lokalnego wskaźnika: NO, CO, O₂ i SO₂ w odległości 36,7 m od rusztu komory paleniskowej

Fig. 6.16. Distribution of the local index of NO, CO, O₂ and SO₂ at a distance of 36,7 m from the combustion chamber grid

Wskaźnik tlenu w rdzeniu obszaru rozrzedzonego wynosi około 1 i stężenie tlenu jest porównywalne ze stężeniem w II ciągu kotła. Stężenie NO osiąga poziom stężenia na wejściu do kominia, wskazując na zakończenie procesu redukcji tlenków azotu. Stężenie SO₂ i CO jest jednak nadal zbyt wysokie, co można tłumaczyć możliwością kontynuacji procesu odsiarczania i procesu dopalania tlenu węgla w obrębie cyklonów analizowanego kotła. Stan ten potwierdzić może rozkład temperatury na wlocie i wylocie z cyklonów badanego kotła, który został przedstawiony na rysunku 6.17. Jak widać na rysunku 6.17, średnia temperatura na

wylocie z cyklonu w kierunku II ciągu kotła jest o 10 stopni wyższa niż w przypadku wlotu do cyklonu. Lucat w swych badaniach [55] przedstawił, że stężenie tlenu wzdłuż cyklonu zmieniało się od 4.8% na wlocie do 3.1% na wyjściu, co świadczyło o przebiegu procesu spalania w tym obszarze kotła. Również w badaniach na kotle Chatman o mocy 72 MW [13] wykazano znaczną redukcję stężenia CO w obszarze cyklonu, jak i również niewielkie obniżenie stężenia NO_x i SO_2 . To dowodzić może dużego znaczenia cyklonu jako części kotła biorącego udział w procesie spalania.



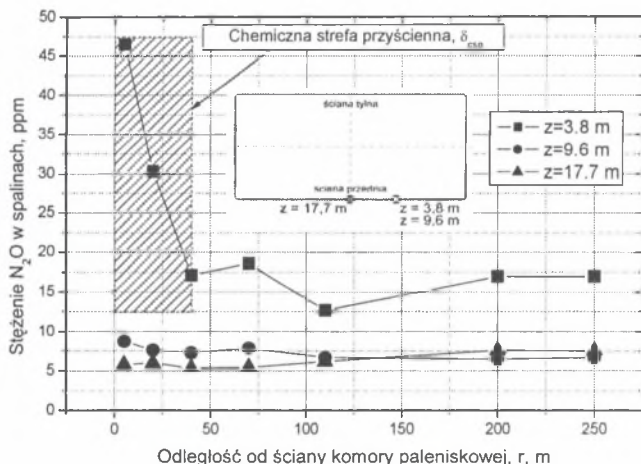
Rys. 6.17. Rozkład temperatury w cyklonie dla badanego kotła 670 MW

Fig. 6.17. Distribution of temperature in the cyclone for the 670 MW boiler tested

Na podstawie przeprowadzonych badań należy stwierdzić obecność chemicznej strefy przyściennej o grubości 0,5-1,5 m w odniesieniu do rozkładu stężeń składników gazu w komorze paleniskowej kotła o mocy 670 MW. Zauważono znaczne różnice stężeń składników gazu pomiędzy obszarem położonym przy ścianie tylnej i ścianie przedniej komory paleniskowej. Stężenia O_2 i NO są niższe, natomiast CO jest wyższe w sąsiedztwie ściany przedniej niż w przypadku otoczenia ściany tylnej. Efekty te są bezpośrednio związane z intensywnym procesem mieszania i transportu ziaren paliwa z materiałem warstwy w głąb komory paleniskowej w otoczeniu ściany tylnej, gdzie paliwo wprowadzane jest wraz z materiałem recykulowanym z układu nawrotu. W przypadku ściany przedniej paliwo wprowadzane jest bezpośrednio do komory paleniskowej. Należy również podkreślić, iż punkty podawania paliwa umiejscowione na ścianie tylnej są w stanie wprowadzić znacznie więcej paliwa niż punkty umiejscowione na ścianie przedniej, co w konsekwencji może zrównoważyć nierównomierny rozkład stężeń składników gazu pomiędzy ścianą przednią i tylną. Słaby proces mieszania fazy gazowej w obszarze rozrzedzonym CWF powodujący nierównomierny rozkład składników gazu w przekroju poziomym komory paleniskowej obserwowano również w badaniach na kotle Chatman o mocy 72 MW [13] oraz w badaniach na kotle Chalmers o mocy 12 MW [51]. W pracach tych stwierdzono, że przepływ poszczególnych składników fazy gazowej w kierunku wlotu do cyklonu można scharakteryzować jako przepływ „świecowy”. Uzyskane wyniki badań na kotle 670 MW potwierdzają silny wpływ rozdziału paliwa w dolnej części komory paleniskowej oraz procesu uwalniania części lotnych w sąsiedztwie punktów wprowadzenia paliwa na procesy powstawania i redukcji zanieczyszczeń gazowych. Dlatego też zmiana warunków cieplno-

przepływowych w dolnej części komory paleniskowej, np. rozproszania powietrza pierwotnego i wtórnego czy rozdziału paliwa, bezpośrednio wpłynąć będzie na procesy redukcji zanieczyszczeń gazowych zachodzące w jej górnej części.

Jak przedstawiono w rozdziale 6.2, ponad 90% ziaren paliwa spalane jest w obszarze gęstym i obszarze dolnym CWF. W obszarze gęstym dominuje również uwalnianie części lotnych, co potwierdza uzyskany profil CO na rysunku 6.10. Pierwotne formowanie NO następuje również w obszarze gęstym, głównie w jego głębi, gdzie przebiega znacząca część procesu spalania ziaren paliwa. Powoduje to wysoką zawartość NO w dolnej części komory paleniskowej. W trakcie przepływu gazu wzdłuż wysokości komory paleniskowej stężenie NO maleje w wyniku biegnących reakcji rozpadu, szczególnie reakcje redukcji NO na ziarnach koksiku i w obecności CO powinny dominować nad reakcjami tworzenia NO, powodując ostatecznie obniżenie stężenia NO na wyjściu z komory paleniskowej. Również chemiczna strefa przyścienna jest regionem o działaniu redukcyjnym w stosunku do NO. Wyższe stężenia ziaren materiału warstwy i ziaren koksiku w stosunku do rdzenia i niższa temperatura w sąsiedztwie ścian komory paleniskowej tworzą obszar o niskim stężeniu tlenu co zwiększa reakcje redukcji NO. Profil stężenia tlenu wskazuje, że powietrze wtórne, wprowadzane do komory paleniskowej na wysokości 2.9 m, jest wymieszane ze spalinami na wysokości około 10 m od rusztu komory paleniskowej. Co więcej, pęd strumienia masy powietrza wtórnego, mimo znacznych prędkości wylotowych z dysz (prędkość na wylocie z dyszy $\sim 20 \text{ m s}^{-1}$) i skierowaniu ich wylotów w dół, był niedostateczny dla penetracji w głąb obszaru gęstego CWF. Na rysunku 6.18 i rysunku 6.19 przedstawiono rozkład stężenia N_2O dla kilku badanych poziomów w funkcji odległości od ściany komory paleniskowej.

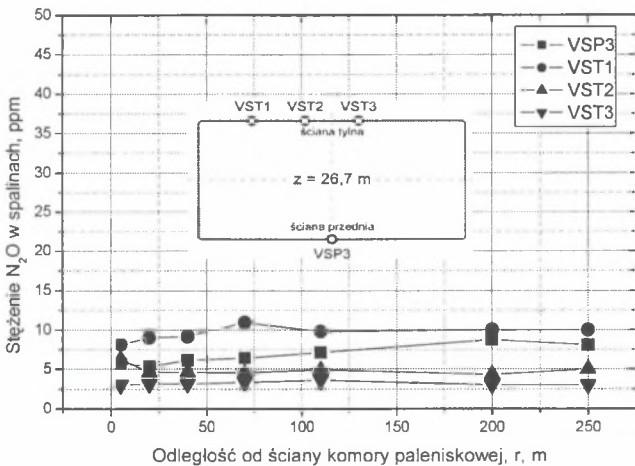


Rys. 6.18. Rozkład lokalnego stężenia N_2O w funkcji odległości od ściany komory paleniskowej dla: $z=3.8 \text{ m}$, $z=9.6 \text{ m}$, $z=17.7 \text{ m}$

Fig. 6.18. Distribution of local N_2O concentration as a function of the distance from the combustion chamber wall for: $z=3.8 \text{ m}$, $z=9.6 \text{ m}$, $z=17.7 \text{ m}$

Z danych tych wynika, że w przypadku N_2O pierwotny obszar tworzenia tego składnika fazy gazowej to również obszar gęsty CWF, z dominującym znaczeniem strefy przyściennej, tj. regionu zlokalizowanego w bliskim sąsiedztwie punktów wprowadzenia paliwa i uwalniania części lotnych. Rozważając profil N_2O i NO wzdłuż wysokości komory paleniskowej, w przeciwieństwie do wyników badań uzyskanych na kotle 12 MW prezen-

wanych w pracy [51], widzimy, że zachowanie się tych składników gazu nie różni się między sobą. Wraz ze wzrostem odległości od rusztu uzyskano obniżenie stężenia N_2O i NO w spalinach. Różnica pomiędzy wymienionymi kotłami może wynikać z różnic w spalonym paliwie, tj. węgiel brunatny w przypadku kotła 670 MW i węgiel kamienny w przypadku kotła Chalmers. Jak prezentowano w pracy [43], im młodszy węgiel jest spalany, tym tempo wydzielania z części lotnych szybko utleniających się związków azotowych (HCN , NH_3) bardziej rośnie. Dlatego też w przypadku spalania węgla brunatnego, w przeciwieństwie do węgla kamiennego, istnieje możliwość intensywnego powstawania zarówno NO i N_2O już w dolnej części komory paleniskowej. Dane dostępne z kotłów małej mocy [13, 51] są jakościowo podobne do uzyskanych w badaniach kotła 670 MW (poza profilem N_2O), ale ściśle porównanie jest trudne z powodu różnic w paliwie, rozkładu ziarnowego paliwa i materiału warstwy. Oprócz tego rozkłady stężeń ziaren materiału warstwy i koksiku są rzadko dostępne w badaniach literaturowych.

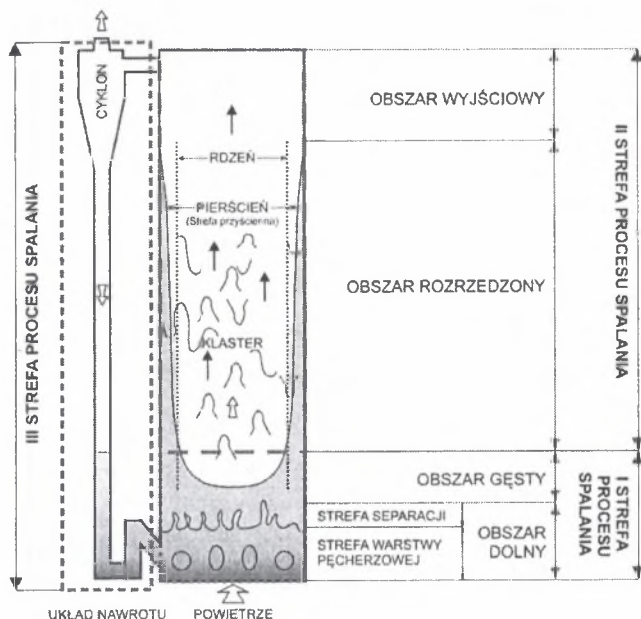


Rys. 6.19. Rozkład lokalnego stężenia N_2O w funkcji odległości od ściany komory paleniskowej dla $z=26.7$ m

Fig. 6.19. Distribution of local N_2O concentration as a function of the distance from the combustion chamber wall for $z=26.7$ m

Na podstawie uzyskanych wyników badań i ich analizy należy stwierdzić obecność w strukturze CWF trzech charakterystycznych stref związanych z procesem spalania. Rozmieszczenie tych stref przedstawiono na rysunku 6.20. Pierwsza z nich to strefa o charakterze redukcyjnym, obejmuje obszar dolny i obszar gęsty CWF. Uzyskane wyniki badań wskazują na znaczący wpływ tej strefy na pierwotne tworzenie się zanieczyszczeń gazowych w procesie spalania. Strefa ta charakteryzuje się dobrymi warunkami mieszania zarówno materiału warstwy jak i gazu. Stan ten wynika głównie ze znacznego stężenia ziaren materiału warstwy i dobrych warunków fluidyzacji uzyskanych przez równomierny rozdział powietrza pierwotnego. Druga strefa to obszar pokrywający się z obszarem rozrzedzonym CWF, gdzie należy wyróżnić chemiczną strefę przysięnną o charakterze redukcyjnym oraz rdzeń wskazujący na progres całego procesu spalania. Uzyskane wyniki badań wskazują, że strefa ta to obszar, jak wykazują wyniki badań przedstawione w rozdziale 6.2, wolnego procesu mieszania składników fazy gazowej w przeciwieństwie do kotłów z CWF charakteryzujących się wyższym stosunkiem H_K/D_e . Dodatkowo głębokość penetracji

powietrza wtórnego w przypadku kotła 670 MW wyniosła tylko $0.18 D_e$. Wartość ta była niższa od obserwowanych głębokości wprowadzenia powietrza wtórnego w kotle 12 MW [51]. Efekt niewystarczającego mieszania składników fazy gazowej potwierdzają również nie zakończone procesy utleniania CO i redukcji SO_2 na wysokości wlotu do separatora badanego kotła. Trzecia strefa procesu spalania to obszar separatora. Obecność tej strefy dowodzi, że funkcja separatora nie ogranicza się tylko do oddzielania ziaren materiału warstwy ze strumienia gaz-ziarna, ale również stanowi on obszar CWF, w którym przebiegają procesy redukcji zanieczyszczeń gazowych, tj. utlenianie CO i wiązanie SO_2 .



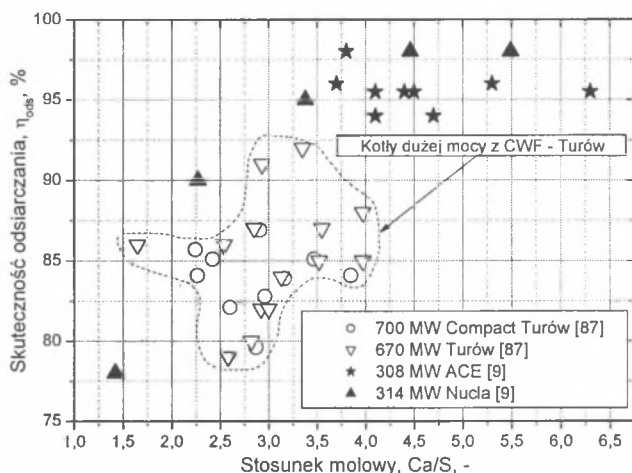
Rys. 6.20. Charakterystyczne obszary procesu spalania w strukturze CWF
 Fig. 6.20. Characteristic regions of the combustion process in the CFB structure

6.5. Wpływ warunków ciepłno-przepływowych w komorze paleniskowej na stężenia zanieczyszczeń gazowych

6.5.1. Efektywność wykorzystania sorbentu

Jedną z głównych zalet spalania w warstwie fluidalnej jest możliwość uzyskania wysokich skuteczności wiązania tlenków siarki, powyżej 80%, przy niskich stosunkach molowych wapnia wprowadzonego w sorbencie i siarki zawartej w paliwie. Osiągnięcie niskiej wartości tego stosunku jest uzasadnione z ekonomicznego punktu widzenia, który jest związany z możliwością redukcji kosztów zakupu kamienia wapiennego oraz obniżenia kosztów utylizacji powstałego produktu z procesu odsiarczania. Przeprowadzono wiele porównań między różnymi sorbentami dla warunków pracy cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej i pomimo iż nie została znaleziona ogólna zależność pomiędzy składem chemicznym lub

strukturą porów i zdolnością siarczanowania, relacja między geologicznym wiekiem i zdolnością siarczanowania, jak przedstawiono w badaniach [107], jest oczywista. Na rysunku 6.21 przedstawiono rozkład skuteczności odsiarczania w funkcji stosunku molowego Ca/S dla kotłów średniej i dużej mocy.



Rys. 6.21. Rozkład skuteczności odsiarczania w funkcji Ca/S dla kotłów z CWF małej i dużej mocy
 Fig. 6.21. Distribution of desulfurization efficiency as a function of Ca/S for small- and large-power CFB boilers

Analizując wyniki przedstawione na rysunku 6.21 należy stwierdzić, iż niezależnie od kotła dla danej wartości stosunku molowego Ca/S uzyskiwano różne skuteczności wiązania tlenków siarki. Co więcej, w przypadku kotłów średniej mocy uzyskiwano wyższe skuteczności odsiarczania niż dla kotłów dużych. Należy się więc zastanowić, jak ważnym parametrem siarczanowania jest reaktywność sorbentu w stosunku do warunków cieplno-przepływowych w kotle w „skali technicznej”. W tym celu na kotle o mocy 670 MW przeprowadzono badania procesu odsiarczania przy wykorzystaniu dwóch sorbentów, których charakterystyczne właściwości fizykochemiczne przedstawiono w tabelicy 6.1.

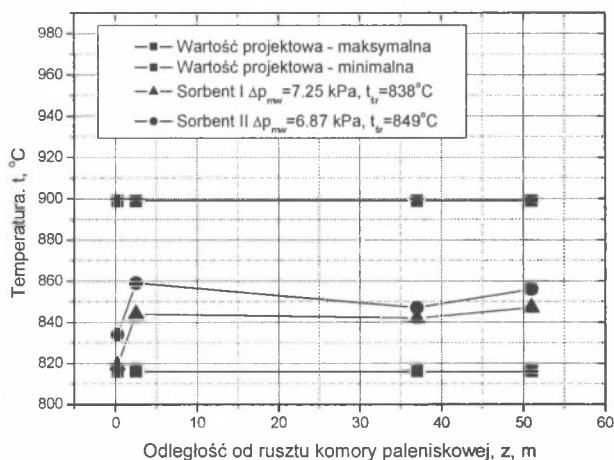
Tablica 6.1

Charakterystyka sorbentów w badaniach na kotle 670 MW

Sorbent	RI, -	$d_{p, sor}$, μm	M, MPa
I	2,80	24	39
II	2,43	27	36

Sorbenty te charakteryzowały się porównywalnymi wskaźnikami reaktywności oraz zastępczymi średnicami ziaren. Należy jednak zaznaczyć, że sorbent B miał niższą wytrzymałość na ściskanie niż sorbent I. W trakcie realizacji badań utrzymywano niezmienny poziom stężenia SO_2 w spalinach ($330 \text{ mg m}_n^{-3} \pm 10 \text{ mg m}_n^{-3}$) poprzez zmiany strumienia masy sorbentu wprowadzanego do komory paleniskowej. W przeprowadzonych badaniach z sorbentem II uzyskano porównywalne skuteczności odsiarczania, co z sorbentem I, ale przy 55% redukcji stosunku molowego Ca/S. Również stopień wykorzystania sorbentu wzrósł z wartości $0.14 \text{ kg S kg}^{-1} \text{ Ca}$ do wartości $0.27 \text{ kg S kg}^{-1} \text{ Ca}$, odpowiednio dla sorbentu I i sorbentu II. Ocenę stosunku molowego Ca/S, skuteczności odsiarczania oraz zużycia podanego sorbentu przeprowadzono na podstawie bilansu wapnia, siarki i popiołu w kotle

fluidalnym przy wykorzystaniu zależności zawartych w pracy [64, 108, 109]. Na rysunku 6.22 przedstawiono rozkład temperatury w komorze paleniskowej w trakcie przeprowadzonych badań.



Rys. 6.22. Rozkład temperatury w komorze paleniskowej w funkcji odległości od rusztu w trakcie badań z sorbentem I oraz sorbentem II

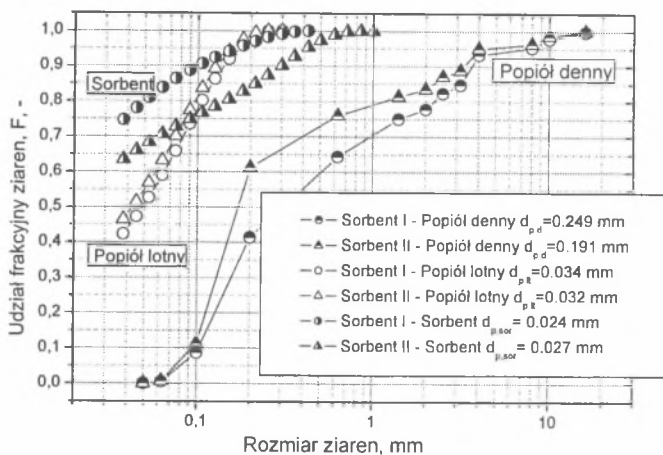
Fig. 6.22. Distribution of temperature in the combustion chamber as a function of the distance from the grid during the tests with sorbent I and sorbent II

Jak widać na rysunku 6.22, w przypadku sorbentu II uzyskano wyższą temperaturę w komorze paleniskowej, co mogło być efektem niższego zapotrzebowania ciepła na proces kalcynacji CaCO_3 . Oczywiście, jak przedstawiono w tablicy 6.2, wzrost temperatury mógł prowadzić do wzrostu stężenia tlenków azotu w spalinach wylotowych i jednocześnie obniżenia stężenia tlenku węgla. Jak wskazują rozkłady ziarnowe materiałów sypkich wprowadzanych i wyprowadzanych z komory paleniskowej w trakcie badań, rysunek 6.23, sorbent II był bardziej podatny na fragmentację w komorze paleniskowej, niż sorbent I. Efekt ten pozwolił na wzrost udziału masowego bardziej reaktywnych drobnych frakcji sorbentu II w objętości CWF. Stan ten potwierdza obniżenie zastępczej średnicy ziaren popiołu dennego w czasie badań z sorbentem II, jak również wzrost udziału popiołu lotnego z 42% do 45% (tablica 6.2) unoszonego z komory paleniskowej. Wzrost unosu ziaren materiału warstwy z obszaru gęstego CWF pozwolił na zwiększenie ich stężenia w obszarze rozrzedzonym, a tym samym poprawę warunków mieszania w górnej części komory paleniskowej. Oczywiście, obniżenie czasu pobytu drobniejszych ziaren sorbentu w obszarze komory paleniskowej było rekompensowane przez wysoką krotność recykulacji tych ziaren w konturze zewnętrznym kotła.

Tablica 6.2

Wyniki badań procesu odsiarczania na kotle 670 MW

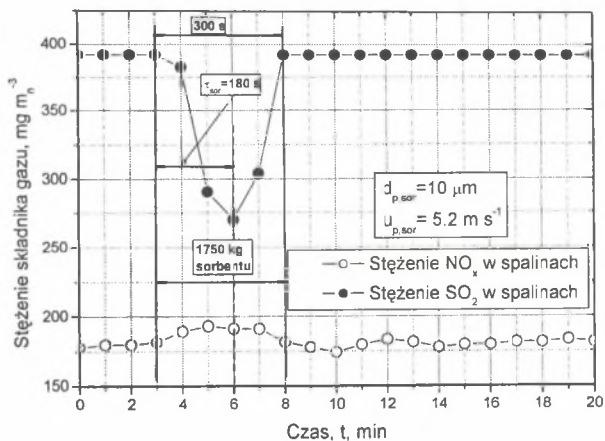
Sorbent	Ca/S, mol Ca mol ⁻¹ S	S/Ca, kg S kg ⁻¹ Ca	η_{ods} , -	X_i , %	X_d , %	$[\text{SO}_2]$, mg m ⁻³	$[\text{NO}_x]$, mg m ⁻³	$[\text{CO}]$, mg m ⁻³
I	3,28	0,14	0,80	42	58	330	206	41
II	1,82	0,27	0,83	45	55	326	219	26



Rys. 6.23. Rozkłady ziarnowe: sorbentu I, sorbentu II, popiołu dennego i popiołu lotnego w badaniach procesu odsiarczania na kotle 670 MW

Fig. 6.23. Size distributions of sorbent I, sorbent II, bottom ash and fly-ash in the desulfurization process tests on the 670 MW boiler

Na rysunku 6.24 przedstawiono rozkład stężenia SO_2 i NO_x w spalinach wylotowych w funkcji czasu dla badanego kotła 670 MW po impulsowym wprowadzeniu do komory paleniskowej 1750 kg sorbentu.



Rys. 6.24. Rozkład stężenia SO_2 i NO_x w spalinach wylotowych w funkcji czasu dla badanego kotła 670 MW – impulsowe wprowadzenie sorbentu do komory paleniskowej

Fig. 6.24. Distribution of SO_2 and NO_x concentrations in the exhaust combustion-gas as a function of time for the 670 MW boiler tested – pulse sorbent feeding to the combustion chamber

Badanie to pozwoliło na określenie czasu pobytu ziaren sorbentu w układzie CWF, tj. komora paleniskowa-układ nawrotu, na podstawie rozkładu stężenia SO_2 i poniższej zależności:

$$(KR)_{sor} = \frac{\tau_{sor} \cdot U_{p,sor}}{\bar{z}_e - \bar{z}_{wg}} \quad (6.1)$$

Uzyskana krotność recyrkulacji ziaren sorbentu wyniosła 27 i była porównywalna z krotnością recyrkulacji ziaren materiału inertnego, tj. 28. Wartość ta potwierdziła wysoką skuteczność separacji ziaren zarówno sorbentu I i sorbentu II oraz ich niski unos do II ciągu kotła. Dlatego też główną przyczyną wyższego stopnia wykorzystania sorbentu II była jego zdecydowanie większa podatność na fragmentację zwłaszcza w obszarze gęstym CWF, co świadczy o dużym znaczeniu tego regionu na proces powstawania i redukcji zanieczyszczeń gazowych. Możliwości poprawy skuteczności suchego odsiarczania spalin poprzez mikronizację sorbentu prezentowano również w pracy [70]. Podobne zależności opisano także w pracy [51], w której to przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych na kotłach z cyrkulacyjną warstwą fluidalną o mocach 40 MW i 165 MW oraz stanowisku laboratoryjnym. W badaniach tych w procesie odsiarczania wykorzystano dwa rodzaje kamieni wapiennych o średnicy ziaren 0,7 mm każdy. Pierwszy z nich był porowaty, reaktywny i krystaliczny, natomiast drugi niskoreaktywny. W reaktorze laboratoryjnym uzyskano sprawność procesu odsiarczania na poziomie odpowiednio 37% i 9%. W przypadku badań zrealizowanych na kotłach sprawność odsiarczania wyniosła 40-45% dla reaktywnego kamienia wapiennego i 28% dla kamienia niskoreaktywnego. Jednym z wyjaśnień znacznego wzrostu skuteczności wykorzystania sorbentów, zwłaszcza sorbentu niskoreaktywnego, była intensywna fragmentacja jego ziaren w objętości CWF badanych kotłów. Częsty brak potwierdzenia uzyskanych w warunkach laboratoryjnych aktywności sorbentów w badaniach przeprowadzonych na jednostkach półtechnicznych sygnalizowano również w pracy [110].

Należy więc stwierdzić, iż efektywność wykorzystania sorbentu w warunkach cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej zależy od wielu złożonych i często powiązanych ze sobą parametrów. Oprócz rodzaju kamienia wapiennego, jego właściwości fizykochemicznych określanych w testach laboratoryjnych, np. wskaźnika reaktywności, należy wziąć pod uwagę wpływ warunków cieplno-przepływowych w objętości CWF danego kotła na:

- termiczną fragmentację sorbentu na drobne reaktywne ziarna,
- zużycie w procesie ścierania kamienia wapiennego i produktów odsiarczania, które determinuje możliwość mechanicznego rozpadu dla eksponowania świeżych nie przereagowanych powierzchni tlenku wapnia,

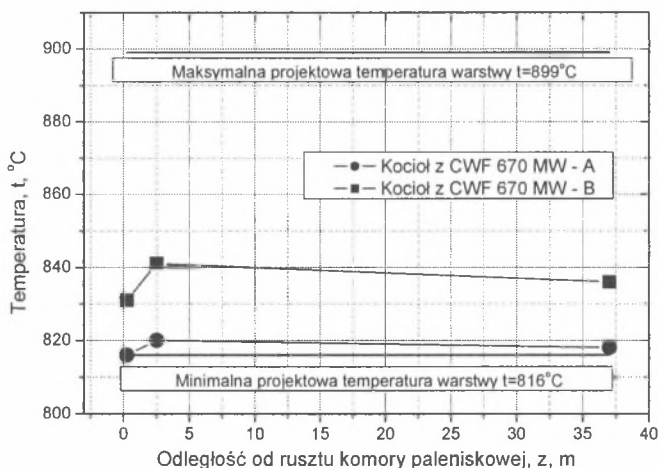
które z kolei są determinowane między innymi przez:

- rozdział powietrza i paliwa, wpływający na czas kontaktu sorbentu z SO₂ oraz czas pobytu w strefie redukcyjnej bądź utleniającej,
- skuteczność separacji cyklonu, której wzrost prowadzi do intensyfikacji recyrkulacji drobnych ziaren sorbentu i poprawy procesu odsiarczania w komorze paleniskowej.

6.5.2. Rozprowadzenie powietrza pierwotnego w objętości CWF

W układzie cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej na proces wzajemnego mieszania się ziaren paliwa i strumieni powietrza w dolnej części komory paleniskowej nakłada się również proces lokalnego mieszania ziaren materiału inertnego, zwłaszcza w przypadku komory paleniskowej w dużej skali technicznej. Jak przedstawiono w rozdziale 5.4.2 i rozdziale 6.3, dysze powietrza pierwotnego wpływają bezpośrednio na warunki przepływowe w dolnej części komory paleniskowej kotła z CWF. Nierównomierny rozdział powietrza powoduje, że pewne obszary kotła są słabiej fluidyzowane. Mniej efektywnie zachodzą w nich także procesy przepływu ciepła oraz mieszania pomiędzy ziarnami materiału warstwy. Obszary

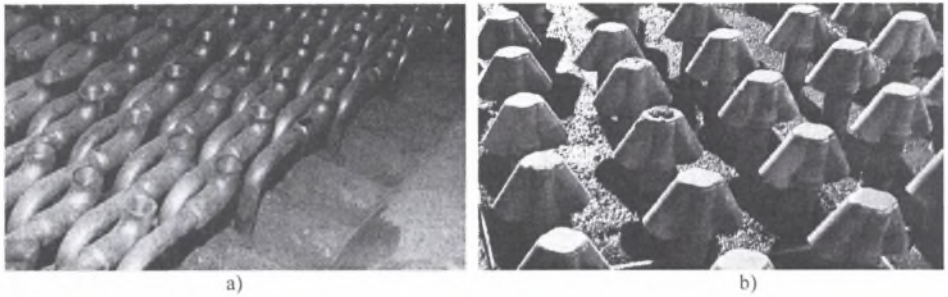
lepiej fluidyzowane (tzn. te, do których dopływa więcej gazu) mają nadmiar tlenu, inne zaś jego niedomiar. W miejscach o dużym stężeniu tlenu następuje szybki proces spalania, ale intensywny przepływ ciepła i wymiana masy powoduje w nich niewielki wzrost temperatury. Z kolei w obszarach słabo fluidyzowanych temperatura wzrasta, gdyż odbiór ciepła ze spalnego paliwa jest zbyt niski na skutek utrudnionego mieszania. Stan ten przyczynia się do nierównomierności rozkładu temperatury w komorze paleniskowej kotła. Na rysunku 6.25 przedstawiono rozkład temperatury wzdłuż wysokości komory paleniskowej dla dwóch badanych kotłów o mocy 670 MW.



Rys. 6.25. Rozkład temperatury wzdłuż wysokości komory paleniskowej dla dwóch badanych kotłów o mocy 670 MW

Fig. 6.25. Distribution of temperature along the combustion chamber height for two 670 MW boilers tested

Kotły w trakcie badań pracowały w porównywalnych warunkach ruchowych, a zasadnicza różnica konstrukcyjna pomiędzy nimi polegała na wyposażeniu ich w różniące się między sobą dysze powietrza pierwotnego. W przypadku kotła A ruszt powietrza pierwotnego wyposażony był w dysze zwane świńskimi ogonkami, natomiast w przypadku kotła B w dysze zwane strzałkami. Fotografie dysz przedstawiono na rysunku 6.26. Jak przedstawiono na rysunku 6.25, zmiana rozprzodzenia powietrza pierwotnego w dolnej części komory paleniskowej w zasadniczy sposób wpłynęła na intensywność procesu spalania i rozkład temperatury wzdłuż wysokości CWF. Bezpośrednim efektem różnic warunków cieplno-przepływowych w obydwu badanych kotłach były odmienne wartości uzyskanych stężeń: CO, SO₂ i NO_x. Wyniki badań przedstawiono w tabelicy 6.3. Reasumując należy stwierdzić, że dla dwóch porównywalnych jednostek kotłowych, zasilanych takim samym paliwem (pod względem jakościowym) oraz pracujących przy tych samych obciążeniach cieplnych, czynnikiem różnicującym ilość emitowanych tlenków azotu jest konstrukcja dysz powietrznych. Kocioł wyposażony w dysze typu „świński ogonek”, wykazał znacznie mniejszą emisję tego gazu w porównaniu z kotłem wyposażonym w dysze typu „strzałka”. W celu potwierdzenia przyjętego założenia wpływu konstrukcji dyszy na emisję tlenków azotu przeprowadzono symulacje numeryczne rozkładu temperatury w dolnej części komory paleniskowej.



Rys. 6.26. Fotografie dysz powietrza pierwotnego w kotłach 670 MW w Elektrowni Turów: a) dysza typu „świński ogonek”, b) dysza typu „strzałka”

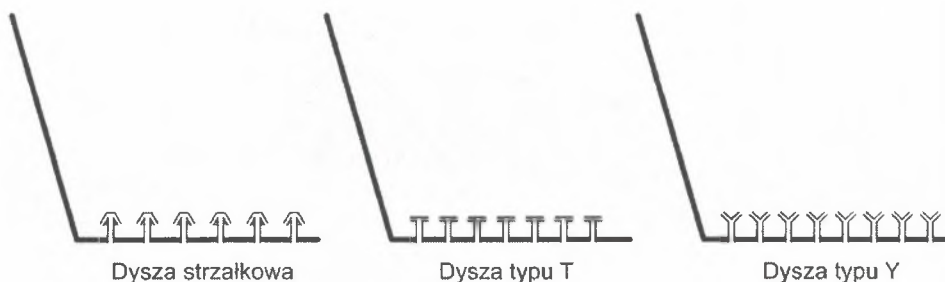
Fig. 6.26. Photographs of primary air nozzles in the 670 MW boilers in the Turów Power Plant: a) a „pigtail” nozzle, b) an „arrowhead” nozzle

Tablica 6.3

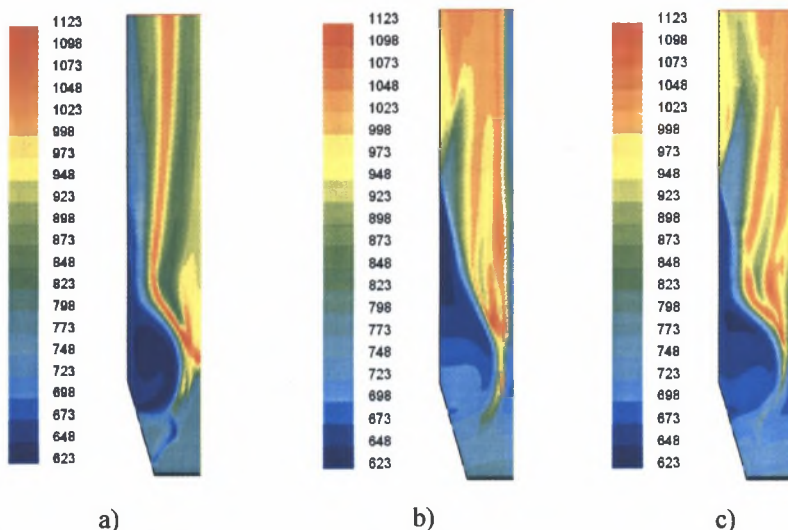
Wyniki badań kotłów z CWF o mocy 670 MW z odmiennymi konstrukcjami dysz powietrza pierwotnego

Wyszczególnienie	Jednostki	670 MW - A	670 MW - B
\dot{Q}	MW	627	627
$[SO_x]$	$mg\ m_n^{-3}$ (6% O_2)	345	363
$[NO_x]$	$mg\ m_n^{-3}$ (6% O_2)	152	238
$[CO]$	$mg\ m_n^{-3}$ (6% O_2)	8	3
Ca/S	$mol\ Ca\ mol^{-1}\ S$	2,6	2,6
λ	-	1,2	1,2
Δp_{mw}	Pa	7490	7520

Obliczenia numeryczne wykonano zakładając sposób podawania paliwa zgodny z modelem PDF, tj. bez wstępnego mieszania (ang. *Non-premixed PDF combustion model*). Model ten zakłada dostarczenie paliwa oraz utleniacza w postaci dwóch oddzielnych strumieni. W obliczeniach wykorzystano preprocesor GAMBIT 2.0.0 oraz procesor i postprocesor FLUENT 6.1.18. Wyniki tych analiz przedstawiono w pracy [58]. Do realizacji tego zadania wybrano trzy konstrukcje dysz, pokazanych na rysunku 6.27, które zamontowane zostały na dystrybutorze w tych samych miejscach, miały identyczne pola przekroju otworów wlotowych i wylotowych oraz pracowały z tymi samymi strumieniami objętości powietrza. Na rysunku 6.28 pokazano pola temperatur wygenerowane w konturze komory paleniskowej dla dyszy strzałkowej (rys. 6.27a), dyszy typu „T” (rys. 6.27b) oraz dyszy typu „Y”. Z porównania poszczególnych rysunków wynika jednoznacznie, że ukształtowanie pola temperatur ma ścisły związek ze sposobem rozdziału powietrza pierwotnego nad rusztem, tj. w obszarze dolnym CWF. Stąd profil temperatur, jaki tworzy się w objętości wewnętrznej kotła, w znacznym stopniu zależy od konstrukcji dyszy.



Rys. 6.27. Konstrukcje dysz poddane analizie numerycznej
 Fig. 6.27. Nozzle designs subjected to numerical analysis

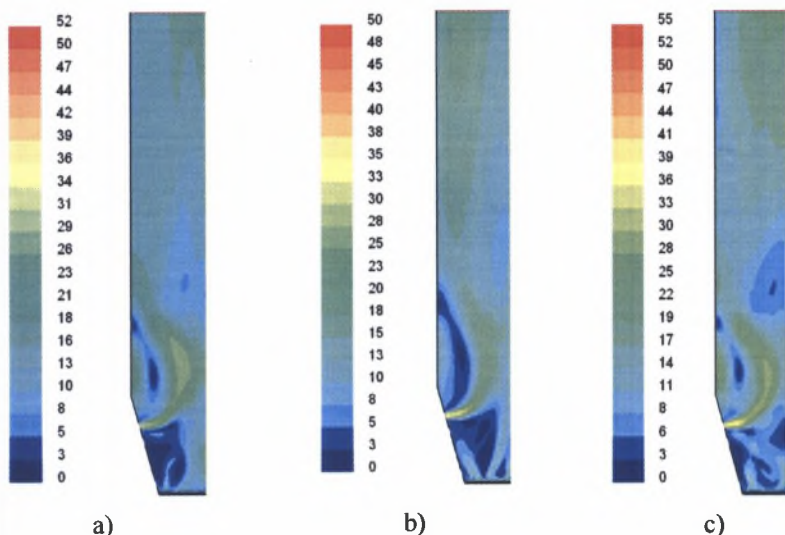


Rys. 6.28. Pola temperatur wygenerowane dla różnych konstrukcji dysz powietrznych: a) dysza strzałkowa, b) dysza typu „T”, c) dysza typu „Y”

Fig. 6.28. Temperature fields generated for different air nozzle designs: a) an arrowhead nozzle, b) a „T”-type nozzle, c) a „Y”-type nozzle

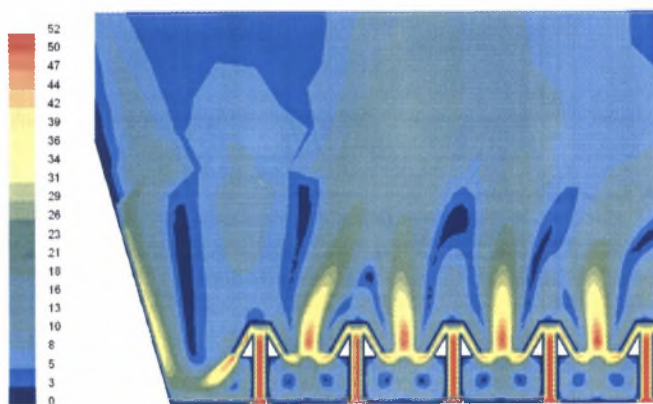
Na rysunku 6.29 pokazano warstwiczne pola prędkości wygenerowane w przekroju wzdłużnym komory paleniskowej kotła dla różnych konstrukcji dysz zainstalowanych na dystrybutorze powietrza. Z rysunku 6.29 wynika, że choć w porównaniu z wymiarami komory paleniskowej dysza jest bardzo mała, to jej geometria w znacznym stopniu wpływa na ukształtowanie pola prędkości w objętości wewnętrznej kotła. Równomierność rozkładu powietrza w przekroju poprzecznym komory paleniskowej kotła jest między innymi efektem zmian zachodzących w objętości wewnętrznej dysz powietrznych. Na rysunkach 6.30-6.32 zaprezentowano pola prędkości ukształtowane w objętościach wewnętrznych odpowiednio: dyszy strzałkowej, dyszy typu „T” oraz dyszy typu „Y”. Z analizy wynika, że kształtowanie się pola prędkości w dolnej części komory spalania wynika w szczególności ze sposobu ukształtowania ramion wylotowych dysz powietrznych względem kanału wlotowego. Jak wynika z badań zaprezentowanych w pracy [50], wpływ ten uwydatnia się szczególnie wówczas, gdy strumień powietrza przepływający w objętości wewnętrznej dyszy podlega znacznym zmianom kierunku. Przypadek taki jest charakterystyczny dla strzałkowej dyszy

powietrznej, dla której w przekroju poprzecznym ramion wylotowych kształtuje się niejednorodny profil prędkości, widoczny na rysunku 6.30.



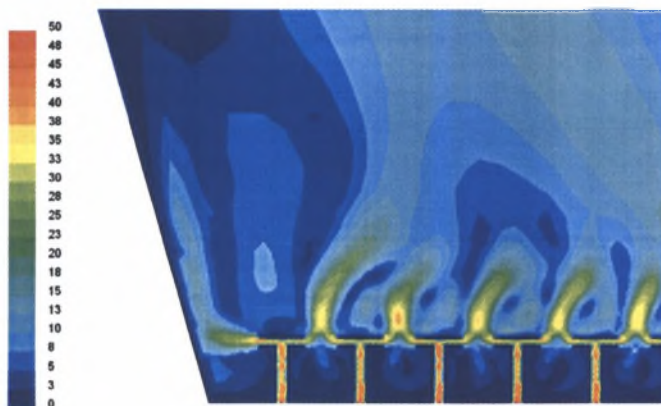
Rys. 6.29. Warstwowe pola prędkości wygenerowane w komorze paleniskowej kotła dla: a) dyszy strzałkowej, b) dyszy typu „T”, c) dyszy typu „Y”

Fig. 6.29. Contour-line velocity fields generated in the boiler combustion chamber for: a) the arrow-head nozzle, b) the „T”-type nozzle, c) the „Y”-type nozzle

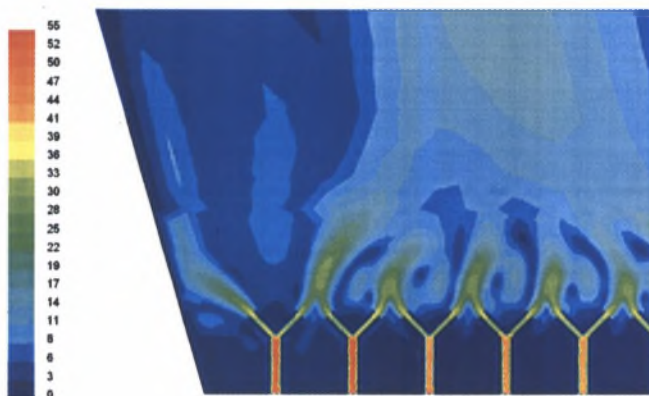


Rys. 6.30. Pole prędkości powietrza kształtujące się w otoczeniu strzałkowej dyszy powietrznej

Fig. 6.30. Air velocity field developing in the vicinity of the arrowhead air nozzle



Rys. 6.31. Pole prędkości powietrza kształtujące się w otoczeniu dyszy powietrznej typu „T”
 Fig. 6.31. Air velocity field developing in the vicinity of the „T”-type nozzle



Rys. 6.32. Pole prędkości powietrza kształtujące się w otoczeniu dyszy powietrznej typu „Y”
 Fig. 6.32. Air velocity field developing in the vicinity of the „Y”-type nozzle

6.5.3. Stopniowanie powietrza i rozdział paliwa

Na podstawie przeprowadzonych badań na kotle o mocy 670 MW założono, że zmiana warunków ciepłno-przepływowych w dolnej części komory paleniskowej bezpośrednio lub pośrednio wpływać będzie zarówno na efektywność procesu spalania, jak i wartości emisji zanieczyszczeń gazowych. W celu potwierdzenia przyjętego założenia przeprowadzono cztery serie badań. Zestawienie warunków badań zawarto w tablicy 6.4, natomiast rozmieszczenie punktów podawania paliwa przedstawiono na rysunku 3.7. Seria I polegała na przeprowadzeniu badań w warunkach standardowych, które opisano w rozdziale 3. W trakcie II serii badań zmieniono rozdział paliwa pomiędzy poszczególnymi punktami zasilającymi komorę paleniskową. Badania wpływu stopniowania powietrza pierwotnego i

wtórnego realizowano w serii III, natomiast analizę oddziaływania częściowego obciążenia kotła na emisję zanieczyszczeń dokonano w IV serii badawczej.

Tablica 6.4
Warunki pracy kotła 670 MW podczas badań oddziaływania obszaru gęstego na emisję zanieczyszczeń gazowych

Wyszczególnienie	Seria I	Seria II	Seria III	Seria IV
\dot{Q} , MW	670	670	670	400
Udział powietrza pierwotnego, %	60	60	70	60
Udział powietrza wtórnego, %	40	40	30	40
Rozdział paliwa, %				
P1	12,5	10	12,5	12,5
P2	12,5	10	12,5	12,5
P3	12,5	15	12,5	12,5
P4	12,5	15	12,5	12,5
T1	25	20	25	25
T2	25	30	25	25

W badaniach wykorzystano pięć portów pomiarowych zlokalizowanych na ścianie przedniej, w odległości 26,7 m od rusztu. Rozmieszczenie portów przedstawiono na rysunku 6.33.



Rys.6.33. Rozmieszczenie portów pomiarowych w trakcie badań wpływu stopniowania powietrza i rozdziału paliwa na emisję zanieczyszczeń gazowych kotła 670 MW

Fig.6.33. Arrangement of measurement ports during the testing of the effect of air staging and fuel distribution on the emission of gaseous pollutants of the 670 MW boiler

Jednostkowe emisje uzyskane w trakcie analizy wyników obliczono z następujących zależności:

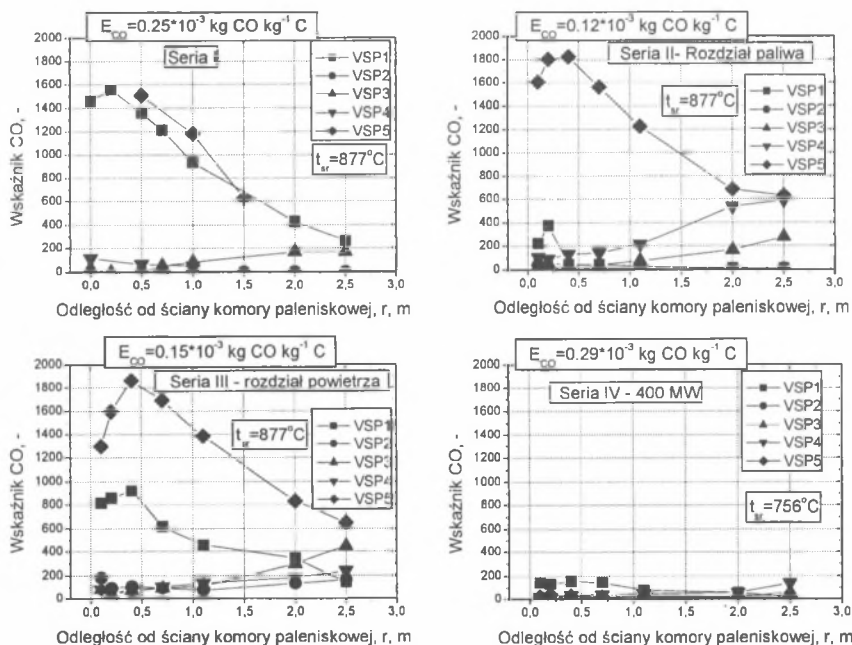
$$E_{CO} = \frac{[CO] \cdot V_{ss}}{c \cdot 10^6}, \quad (6.2)$$

$$E_{NO} = \frac{[NO] \cdot V_{ss}}{n \cdot 10^6}, \quad (6.3)$$

$$E_{SO_2} = \frac{[SO_2] \cdot V_{ss}}{s \cdot 10^6}, \quad (6.4)$$

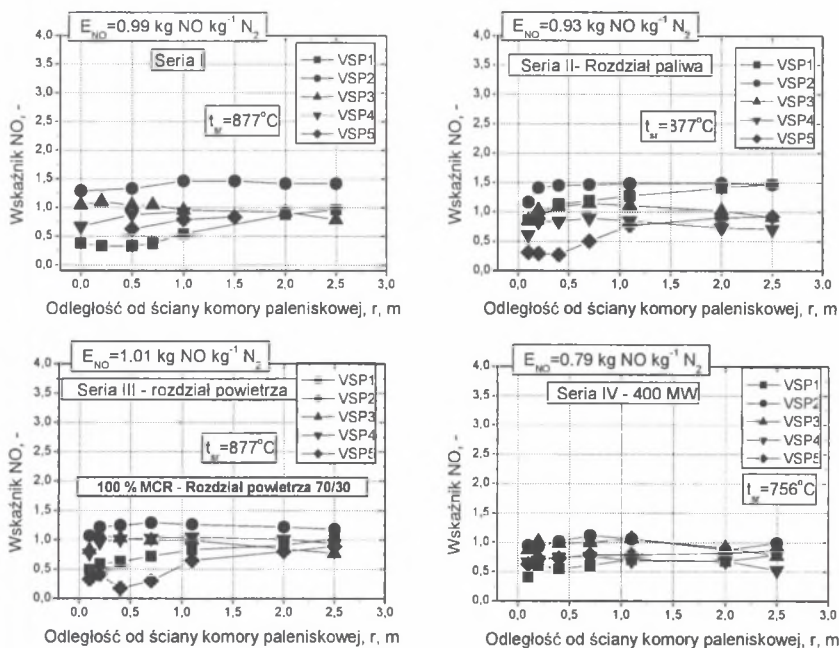
Na rysunku 6.34 przedstawiono rozkład wskaźnika CO w funkcji odległości od ściany komory paleniskowej dla zmiennych warunków cieplno-przepływowch. Jak widać na rysunku 6.34, wzrost stężenia tlenu w obszarze gęstym struktury CWF spowodował redukcję

jednostkowej emisji tego składnika gazu na wysokości wlotu do cyklonu o 40%. Korzystniejsze warunki dla procesu spalania uzyskano w wyniku poprawy warunków mieszania ziaren paliwa z materiałem inertnym i utleniaczem. Pozwoliły one na obniżenie emisji jednostkowej CO o 52%. W wyniku dłuższego czasu pobytu produktów spalania w komorze paleniskowej przy 60% obciążeniu cieplnym kotła obserwowano równomierny rozdział CO w objętości obszaru rozrzedzonego. Niemniej jednak z powodu niższej temperatury w komorze paleniskowej jednostkowa emisja tego składnika gazu była wyższa w porównaniu do standardowej pracy kotła. Na rysunku 6.35 przedstawiono rozkład wskaźnika NO w funkcji odległości od ściany komory paleniskowej dla zmiennych warunków cieplno-przepływowych kotła 670 MW. Jak widać na rysunku 6.35, parametrem powodującym ograniczenie emisji NO był rozdział paliwa, dzięki któremu uzyskano 6% redukcję emisji tego składnika gazu. Obniżenie temperatury w komorze paleniskowej przy 60% obciążeniu cieplnym również pozwoliło na ograniczenie konwersji N do NO. Zauważono także, że zmiana stopniowania powietrza pierwotnego i wtórnego w przypadku komory paleniskowej kotła dużej mocy nie prowadzi do gwałtownych zmian stężenia NO, czego należało się spodziewać wzorem kotłów w mniejszej skali czy stanowisk laboratoryjnych. Montat w swej pracy [62] analizując stany nieustalone spalania ziaren węgla w kotle z CWF również zaobserwował, że zmiany w stopniowaniu powietrza pierwotnego i wtórnego wpływają w mniejszym stopniu na jakość procesu spalania niż zmiany rozdziału paliwa.



Rys. 6.34. Rozkład wskaźnika CO w funkcji odległości od ściany komory paleniskowej dla zmiennych warunków cieplno-przepływowych kotła 670 MW

Fig. 6.34. Distribution of the CO index as a function of the distance from the combustion chamber wall for variable thermal and flow conditions of the 670 MW boiler

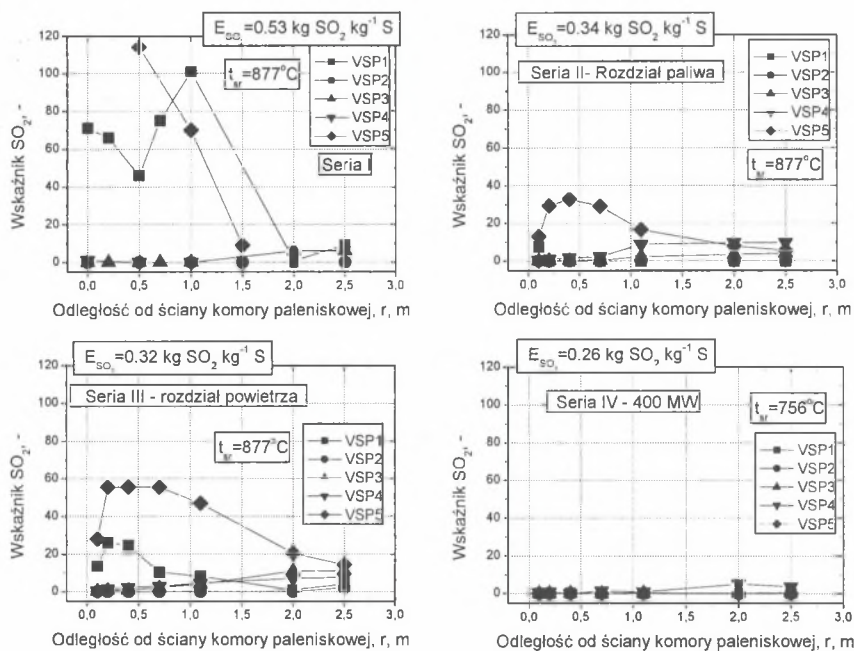


Rys. 6.35. Rozkład wskaźnika NO w funkcji odległości od ściany komory paleniskowej dla zmiennych warunków cieplno-przepływowych kotła 670 MW

Fig. 6.35. Distribution of the NO index as a function of the distance from the wall for variable thermal and flow conditions of the 670 MW boiler

Należy zatem stwierdzić, iż wpływ stopniowania powietrza na emisję tlenków azotu w kotle dużej mocy jest mniej intensywny w porównaniu do kotłów małej mocy. Efekt ten należy tłumaczyć niewystarczającą penetracją powietrza wtórnego w głąb objętości CWF dla kotłów w dużej skali technicznej. Na rysunku 6.36 przedstawiono rozkład wskaźnika SO₂ w funkcji odległości od ściany komory paleniskowej dla zmiennych warunków cieplno-przepływowych kotła 670 MW. Zmiana warunków rozdziału paliwa, rozdziału powietrza, jak również obniżenie obciążenia cieplnego w znacznym stopniu obniżyło emisję SO₂ w porównaniu do warunków standardowych pracy kotła. Wyniki badań prezentowane na rysunku 6.36 wskazują, że korzystne warunki dla procesu odsiarczania panowały przy 70% udziale powietrza pierwotnego, tj. gdy warunki w dolnej części komory paleniskowej były silniej utleniające niż przy jego 60% udziale. W przypadku zmiany rozdziału powietrza uzyskano 40% redukcję emisji SO₂. Pomimo iż całkowity stosunek nadmiaru powietrza ma wartość powyżej jedności, to ziarna sorbentu okresowo mogą znajdować się w obszarach o warunkach redukcyjnych, na przykład w obszarze gęstym CWF, a następnie w wyniku wewnętrznej cyrkulacji ziaren materiału warstwy ich położenie może ulec zmianie na obszar o charakterze utleniającym, np. na obszar rozrzedzony. Porównywalny efekt obniżenia emisji dwutlenku siarki, tj. 36% redukcja jego emisji, zaobserwowano również w serii pomiarowej, w której zmieniono rozdział paliwa. Dodatkowo korzyść z drugiej serii badań analizowanego kotła to równoczesne obniżenie emisji NO o 6%, tak jak to przedstawiono na rysunku 6.35, oraz maksymalna redukcja CO, jak prezentowano na rysunku 6.34. Analizując z kolei

uzyskany efekt obniżenia emisji SO_2 wraz z redukcją obciążenia cieplnego, należy wyjaśnić go jako wynik wydłużenia czasu pobytu ziaren sorbentu w CWF będący konsekwencją niższej prędkości gazu w komorze paleniskowej.

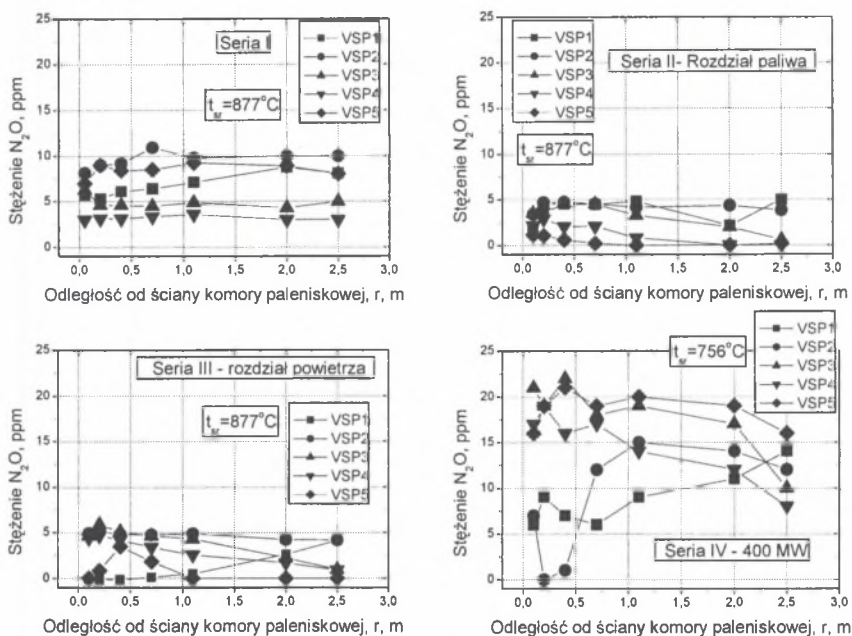


Rys. 6.36. Rozkład wskaźnika SO_2 w funkcji odległości od ściany komory paleniskowej dla zmiennych warunków cieplno-przepływowych kotła 670 MW

Fig. 6.36. Distribution of the SO_2 index as a function of the distance from the wall for variable thermal and flow conditions of the 670 MW boiler

Na rysunku 6.37 przedstawiono rozkład stężenia N_2O w funkcji odległości od ściany komory paleniskowej dla zmiennych warunków cieplno-przepływowych kotła 670 MW. Również w przypadku podtlenu azotu, jak widać na rysunku 6.37, zmiana warunków cieplno-przepływowych w dolnej części komory paleniskowej bezpośrednio wpływała na emisję tego zanieczyszczenia gazowego. Widoczny jest kluczowy wpływ zarówno rozdziału paliwa, jak i stopniowania powietrza pierwotnego i wtórnego. Zmiana tych parametrów pozwoliła na ograniczenie stężenia N_2O w spalinach wylotowych z poziomu 10 mg m^{-3} do 5 mg m^{-3} . W przeciwieństwie do emisji NO obniżenie obciążenia cieplnego kotła doprowadziło do znacznej dysproporcji stężenia tego składnika gazu w przekroju poziomym komory paleniskowej oraz wzrostu emisji z procesu spalania do poziomu 15 mg m^{-3} . Niemniej jednak nawet i w tym przypadku uzyskane stężenia należy uznać za niskie.

Na podstawie przeprowadzonych badań należy stwierdzić, iż zmiana warunków cieplno-przepływowych w obszarze dolnym i obszarze gęstym CWF odgrywała kluczową rolę w formowaniu zanieczyszczeń gazowych z procesu spalania w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej.



Rys. 6.37. Rozkład stężenia N_2O w funkcji odległości od ściany komory paleniskowej dla zmiennych warunków cieplno-przepływowych kotła 670 MW

Fig. 6.37. Distribution of the N_2O concentration as a function of the distance from the wall for variable thermal and flow conditions of the 670 MW boiler

6.6. Wpływ skuteczności separacji cyklonu na emisję zanieczyszczeń

Krotność cyrkulacji materiału sypkiego w układzie cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej jest jednym z ważnych parametrów w kształtowaniu równomiernego rozkładu temperatury wzdłuż wysokości komory spalania. Parametr ten można zdefiniować zgodnie z poniższą zależnością:

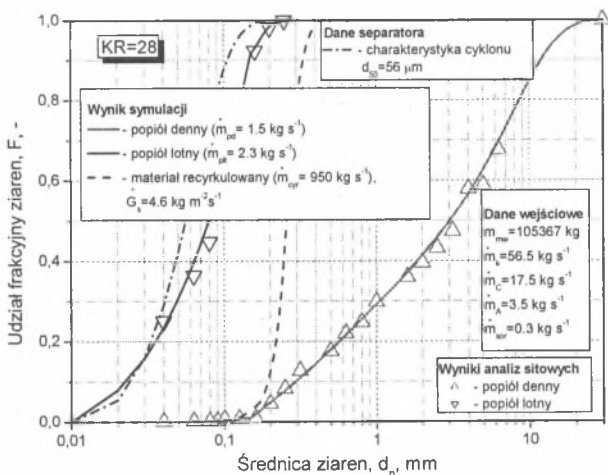
$$KR = \frac{\dot{m}_{cyr}}{\dot{m}_k} \quad (6.5)$$

Strumień materiału recykulowanego do komory paleniskowej poprzez separator i układ nawrotu spełnia również wiele innych ważnych funkcji, wśród których zasadnicze to:

- odbiór ciepła z dolnej części komory paleniskowej w celu utrzymania temperatury w tej strefie na poziomie $850^\circ C$,

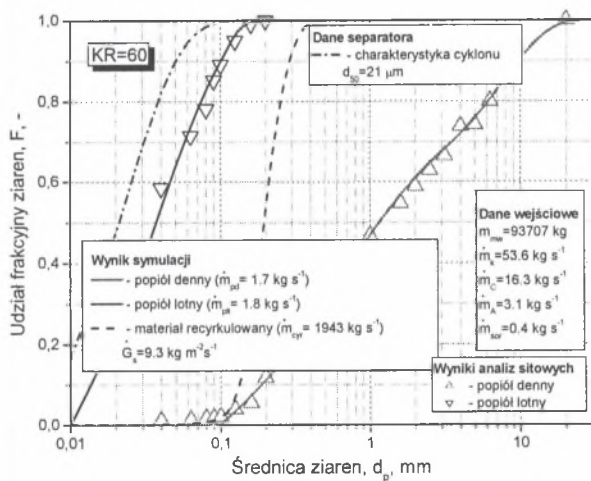
- pośrednictwo w przepływie ciepła do powierzchni ogrzewalnych zlokalizowanych w komorze paleniskowej oraz pomiędzy poszczególnymi obszarami CWF,
- wpływ na proces mieszania się gazu i ziaren, co prowadzi także do wzrostu czasu pobytu obu faz w komorze paleniskowej.

Zadaniem układu separator/nawrót ziaren jest utrzymanie w kotle z CWF odpowiedniej masy materiału sypkiego oraz odpowiedniego rozkładu ziarnowego wymaganego dla właściwej pracy kotła. Większa masa materiału cyrkulującego w kotle i drobniejsze ziarna poprawiają przepływ ciepła oraz stopień wykorzystania sorbentu do odsiarczania spalin, tak jak to przedstawiono w rozdziale 6.5.1. Dla określonej masy materiału sypkiego, prędkości fluidyzacji oraz geometrii komory, średnia średnica ziaren cyrkulujących w kotle jest zależna od charakterystyki rozkładu ziarnowego, właściwości fizykochemicznych ziaren (popiołu i sorbentu) oraz skuteczności separacji w separatorze. Masa materiału w komorze spalania określona na podstawie spadku ciśnienia stanowi pewien kompromis pomiędzy warunkami procesowym układu CWF a mocą wentylatora podmuchowego i wynika z bilansu masy materiałów sypkich podawanych do i odprowadzanych z kotła. O ile inne warunki pozostaną niezmiennie, zwiększenie masy materiału cyrkulującego odbije się na wzroście straty materiału sypkiego odprowadzonego lub uniesionego poza komorę spalania. W takim przypadku do komory należy podawać materiał sypki w celu utrzymania odpowiedniej jakości warstwy fluidalnej. Wysoka skuteczność separacji cyklonu zapewni odpowiednią wartość krotności cyrkulacji, która wpływa na utrzymanie w komorze paleniskowej kotła cyrkulacyjnego wyrównanego profilu temperatury. Należy zaznaczyć, że dotychczas powszechnie zaniebdywano ten wpływ, sądząc że skuteczność separacji w separatorze ma wpływ jedynie na stratę niecałkowitego spalania. Wpływ krotności cyrkulacji na rozkład temperatury w komorze paleniskowej potwierdziły badania przeprowadzone na kotle o mocy 670 MW. Na rysunkach 6.38 i 6.39 przedstawiono rozkłady ziarnowe: popiołu lotnego, popiołu dennego, cyrkulującego materiału sypkiego oraz przedziałowej skuteczności separacji uzyskane podczas badań przeprowadzonych przy krotności cyrkulacji wynoszącej 28 oraz 60. Wyniki analiz prezentowane na rysunku 6.38 oraz rysunku 6.39 opracowano opierając się na bilansie populacji zawartym w pracach [7, 8]. Wzrost skuteczności separacji ziaren prowadził zarówno do wzrostu strumienia masy materiału warstwy cyrkulującego w konturze zewnętrznym, jak i do wzrostu udziału masowego frakcji drobnych zawracanych do komory paleniskowej, co z kolei doprowadziło do obniżenia średnicy d_{50} z 56 μm do 21 μm , odpowiednio dla KR=28 i KR=60. Jak przedstawiono na rysunkach 6.40 i 6.41, wzrost udziału frakcji drobnych w materiale recyrkulowanym do komory paleniskowej zwiększył transport ziaren z obszaru gęstego do obszaru rozrzedzonego. Zmiana krotności cyrkulacji ziaren spowodowała również, jak przedstawiono na rysunkach 6.42 i 6.43, wzrost gęstości strumienia masy ziaren oraz prędkości ziaren zarówno w hydrodynamicznej strefie przyściennej, jak i hydrodynamicznej strefie rdzenia. W konsekwencji, tak jak przedstawiono na rysunku 6.44, uzyskano wyrównanie profilu pionowego temperatury w komorze paleniskowej dla KR=60. Na rysunku 6.45 przedstawiono emisje zanieczyszczeń: CO, SO₂, NO i pyłu kotła 670 MW w warunkach przeprowadzonych badań. Jak widać na rysunku 6.45, wyrównanie profilu temperatury, co powinno być cechą szczególną procesu spalania w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej, w znacznym stopniu obniżyło emisje: CO o 71%, NO_x o 19% i SO₂ o 41%. Intensyfikację procesu przepływu ciepła pomiędzy obszarem gęstym i obszarem rozrzedzonym CWF w wyniku poprawy skuteczności separacji uzyskano również na kotle Gardanne o mocy 685 MW [50]. Wyniki prezentowane w pracy [53], a dotyczące kotła z CWF o mocy 570 MW, również potwierdzają możliwość uzyskania równomiernego profilu temperatury wzdłuż wysokości komory paleniskowej oraz ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych poprzez wzrost krotności cyrkulacji.



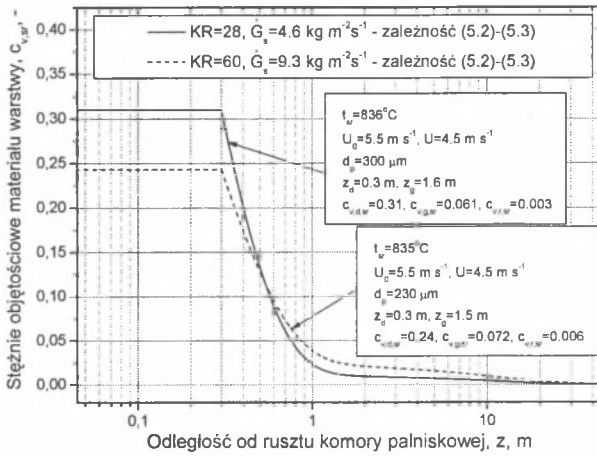
Rys. 6.38. Zestawienie rozkładów ziarnowych popiołów lotnego, dennego, cyrkulującego materiału sypkiego oraz przedziałowej skuteczności separacji dla kotła 670 MW – KR=28

Fig. 6.38. Size distributions of fly-ash, bottom ash, circulating material and the limit separation efficiency for the 670 MW boiler – KR=28

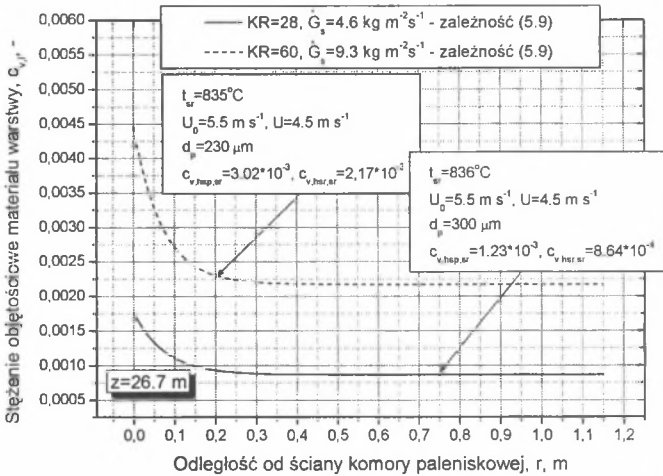


Rys. 6.39. Zestawienie rozkładów ziarnowych popiołów lotnego, dennego, cyrkulującego materiału sypkiego oraz przedziałowej skuteczności separacji dla kotła 670 MW – KR=60

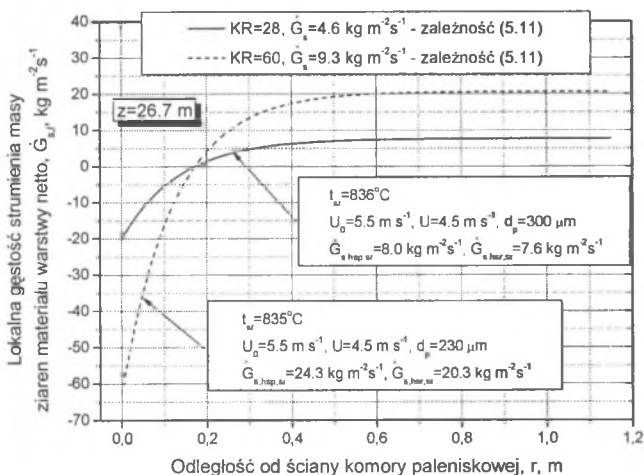
Fig. 6.39. Size distributions of fly-ash, bottom ash, circulating material and the limit separation efficiency for the 670 MW boiler – KR=60



Rys. 6.40. Rozkład stężenia objętościowego ziaren w funkcji odległości od rusztu komory paleniskowej kotła 670 MW
 Fig. 6.40. Distribution of solids volume concentration as a function of the distance from the combustion chamber grid of the 670 MW boiler

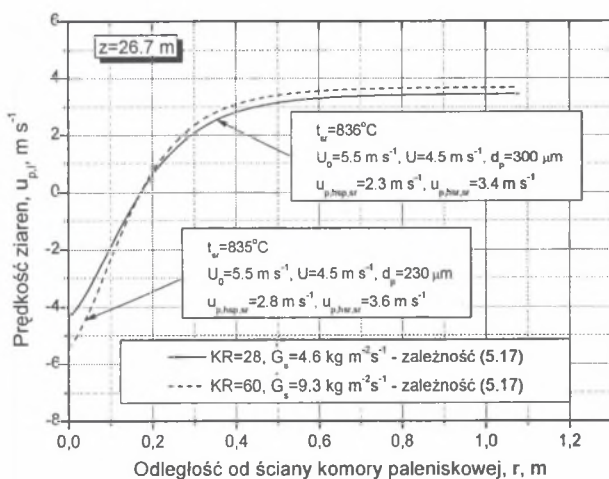


Rys. 6.41. Rozkład stężenia objętościowego ziaren w funkcji odległości od ściany komory paleniskowej kotła 670 MW
 Fig. 6.41. Distribution of solids volume concentration as a function of the distance from the combustion chamber wall of the 670 MW boiler



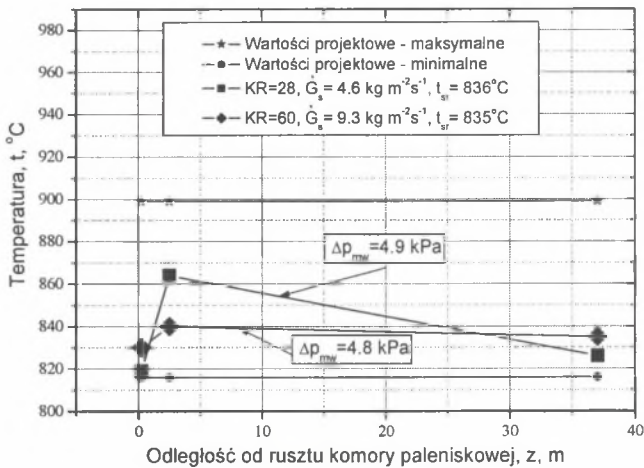
Rys. 6.42. Rozkład gęstości strumienia masy ziaren w funkcji odległości od ściany komory paleniskowej kotła 670 MW

Fig. 6.42. Distribution of solids mass flux density as a function of the distance from the combustion chamber wall of the 670 MW boiler

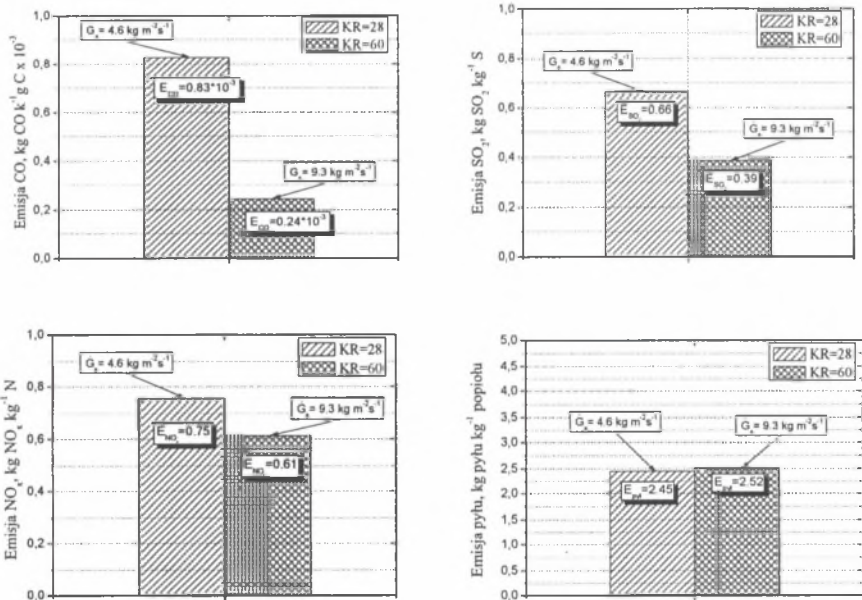


Rys. 6.43. Rozkład prędkości ziaren materiału warstwy w funkcji odległości od ściany komory paleniskowej kotła 670 MW

Fig. 6.43. Distribution of bed material particle velocity as a function of the distance from the combustion chamber wall of the 670 MW boiler



Rys. 6.44. Rozkład temperatury w komorze paleniskowej badanego kotła 670 MW
 Fig. 6.44. Distribution of temperature in the combustion chamber of the 670 MW boiler tested



Rys. 6.45. Emisje zanieczyszczeń: CO, SO₂, NO i pyłu kotła 670 MW
 Fig. 6.45. Emissions of CO, SO₂ and NO pollutants and dust from the 670 MW boiler

Przedstawione wyniki badań własnych uzyskanych na kotle 670 MW oraz dane literaturowe z kotłów średniej i dużej mocy wskazują, że zwiększenie krotności cyrkulacji ziaren materiału warstwy prowadzić będzie do intensyfikacji przepływu ciepła pomiędzy

dolną i górną częścią komory paleniskowej i w konsekwencji do równomiernego rozkładu temperatury wzdłuż wysokości komory paleniskowej. Z kolei optymalizacja tego parametru pozwala na: prowadzenie efektywnego procesu utleniania CO w górnej części komory paleniskowej, wzrost sprawności odsiarczania poprzez dłuższy czas pobytu ziaren sorbentu w układzie CWF oraz ograniczenie stężenia NO_x poprzez wyrównanie profilu temperatury w strukturze CWF.

6.7. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, iż w kotle z cyrkulacyjną warstwą fluidalną można wyróżnić trzy strefy procesu spalania. Pierwsza strefa, charakteryzująca się warunkami redukcyjnymi, pokrywa się z obszarem dolnym i obszarem gęstym CWF. Druga strefa umiejscowiona jest w obrębie obszaru rozrzedzonego, przy czym w bliskim sąsiedztwie ścian panują warunki redukcyjne, natomiast w rdzeniu występują warunki silnie utleniające. Przeprowadzone analizy wyników badań stężeń zanieczyszczeń gazowych wskazują na obecność trzeciej strefy zlokalizowanej w obrębie cyklonów badanego kotła. Pierwotne produkty procesu spalania powstają głównie w obszarze dolnym i gęstym CWF, tj. w obszarze umiejscowionym poniżej poziomu wprowadzenia powietrza wtórnego. Natomiast procesy redukcji: NO_x , wiązania SO_2 i dopalania powstałego CO przebiegają w obszarze rozrzedzonym CWF, tj. w górnej części komory paleniskowej. W trzeciej strefie procesu spalania, tj. w objętości cyklonów, nadal przebiega proces utleniania CO, jak również należy założyć możliwość kontynuacji procesu odsiarczania. Przeprowadzone badania wskazują, iż w komorach paleniskowych kotłów dużej mocy w obszarze rozrzedzonym występuje znaczna dysproporcja poszczególnych składników fazy gazowej, a więc proces mieszania gazu jest słaby, a jego charakter przepływu można określić jako „świecowy”. Z grupy analizowanych składników gazowych w komorze paleniskowej jedynie tlenki azotu oraz podtlenek azotu ulegają redukcji w obrębie drugiej strefy i ich stężenia na wyjściu z komory paleniskowej są porównywalne ze stężeniami na wejściu do komin. Zgodnie z przyjętymi założeniami uzyskano potwierdzenie silnego wpływu zmian warunków cieplno-przepływowych w obszarze gęstym CWF na ostateczną emisję zanieczyszczeń z procesu spalania. Co więcej, należy podkreślić, iż poza stopniowaniem powietrza pierwotnego i powietrza wtórnego, na wartość stężeń zanieczyszczeń, a zwłaszcza na stężenie NO, ma wpływ jakość fluidyzacji w dolnej części komory paleniskowej, tj. rozdział powietrza pierwotnego bezpośrednio nad rusztem. Dlatego też konstrukcja dysz powietrza pierwotnego i konstrukcja rusztu odgrywa znaczącą rolę nie tylko w procesie przesypywania się materiału warstwy z komory paleniskowej do skrzyń powietrza pierwotnego, ale również wnosi ważny wkład w inicjowanie przebiegu procesu spalania. Kolejnym kluczowym elementem konstrukcyjnym kotła oddziałującym na warunki cieplno-przepływowe w komorze paleniskowej, a tym samym również na wartość emisji zanieczyszczeń gazowych, jest skuteczność separacji cyklonu. Wzrost wartości tego parametru prowadzi do poprawy przepływu ciepła między poszczególnymi obszarami CWF, wyrównania profilu temperatury w komorze paleniskowej i w konsekwencji redukcji emisji: CO, NO_x i SO_2 . Należy jednak pamiętać, że wymagane jest, aby układ odprowadzenia popiołu dennego z komory paleniskowej był w stanie utrzymać niezmienny bilans materiałów sypkich wprowadzanych i wyprowadzanych z kotła.

7. WNIOSKI

Przeprowadzone badania eksperymentalne i analiza ich wyników potwierdziły słuszność postawionych tez, tzn. pozwoliły potwierdzić wpływ gabarytów kotła na warunki pracy struktury cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej, jak również wykazać bezpośrednie oddziaływanie struktury CWF na stężenia zanieczyszczeń powstających podczas procesu spalania realizowanego w jej objętości.

Zasadnicze wnioski wynikające z realizacji zadań postawionych w pracy sformułowano następująco:

- Cyrkulacyjna warstwa fluidalna kotła dużej mocy charakteryzuje się obecnością trzech obszarów, tj. obszaru dolnego, obszaru gęstego oraz obszaru rozrzedzonego, które różnią się między sobą średnim stężeniem ziaren materiału warstwy.
- Uzyskane profile gęstości strumienia masy ziaren, prędkości ziaren oraz zaobserwowana segregacja ziaren materiału warstwy w przekroju poziomym komory paleniskowej kotła dużej mocy wykazują na strukturę rdzeń-strefa przyścienna w obszarze rozrzedzonym CWF.
- Wraz ze wzrostem gabarytów kotła z CWF następuje obniżenie stężenia ziaren materiału warstwy w obszarze rozrzedzonym.
- Redukcja stosunku H_k/D_e prowadzi do obniżenia udziału pola powierzchni hydrodynamicznej strefy przyściennej w przekroju poziomym obszaru rozrzedzonego CWF kotła w dużej skali technicznej.
- Wzrost gabarytów kotła z CWF prowadzi do obniżenia wewnętrznej cyrkulacji ziaren w obszarze rozrzedzonym, wskazując tym samym na intensywny proces unoszenia ziaren materiału warstwy w kierunku wylotu z komory paleniskowej.
- Cyrkulacyjna warstwa fluidalna w kotle dużej mocy charakteryzuje się obecnością trzech stref procesu spalania, tj. strefą I redukcyjną w granicach obszaru dolnego i gęstego, strefą II utleniająco-redukcyjną w granicach obszaru rozrzedzonego oraz strefą III utleniającą w obszarze cyklonu.
- Obszar dolny i gęsty CWF kotła dużej mocy cechuje intensywny proces uwalniania i spalania części lotnych oraz proces pierwotnego formowania: CO, SO₂, NO, N₂O.
- Zaobserwowany wolny proces mieszania gazu w obszarze rozrzedzonym CWF kotła dużej mocy prowadzi do obecności silnej dysproporcji składników fazy gazowej w górnej części komory paleniskowej kotła w dużej skali technicznej.
- Struktura CWF kotła dużej mocy charakteryzuje się obecnością chemicznej strefy przyściennej wzdłuż wysokości komory paleniskowej o grubości 0,5-1,5 m w odniesieniu do rozkładu stężeń składników fazy gazowej.
- Wzrost krotności cyrkulacji ziaren materiału warstwy pomiędzy komorą paleniskową a układem nawrotu prowadzi do wyrównania profilu temperatury wzdłuż wysokości komory paleniskowej oraz redukcji emisji: CO, NO_x, N₂O oraz SO₂.
- Kontrola warunków ciepno-przepływowych w I strefie, tj. w obrębie obszaru dolnego i gęstego CWF oraz krotności cyrkulacji odgrywa zasadniczą rolę w formowaniu emisji zanieczyszczeń z procesu spalania.

LITERATURA

1. Azzi M., Turlier P., Large J.F., Bernard J.R.: *Use of a momentum probe and a ammadenisometry to study local properties of fast fluidized beds*, Circulating Fluidized Bed Technology 1991, 3, 189-194.
2. Badyda K., Lewandowski J., Miller A., Skowroński P., i inni.: *Proekologiczne technologie dla rekonstrukcji i modernizacji elektrowni i elektrociepłowni*. Izba Gospodarcza Energetyki i Ochrony Środowiska, Warszawa 2000.
3. Bai D., Nakagawa N., Shibuya E., Kinoshita H., Kato K.: *Axial distribution on solids holdup in binary solids circulating fluidized beds*. Journal of Chemical Engineering of Japan 1994, 27, 271-275.
4. Bi H., Jiang P., Jean R., Fan L.S.: *Coarse-particle effects in a multi-solids circulating fluidized bed for catalytic reactions*. Chemical Engineering Science 1992, 47, 3113-3124.
5. Bis Z.: *Fluidyzacja cyrkulacyjna mieszanin polidispersyjnych*. Monografie Politechniki Częstochowskiej, nr 63, Częstochowa 1999.
6. Bis Z., Gajewski W., Krzywański J., Leszczyński J.: *Erosion in Circulating Fluidized Bed*. Proceedings of 5th International Conference on CFB, MSD 8, Beijing, Chiny, 1996.
7. Bis Z., Gajewski W., Leszczyński J.: *Numeryczna analiza wpływu rozkładów ziarnowych materiałów sypkich na aerodynamikę komory paleniskowej kotła z cyrkulacyjną warstwą fluidalną*. Konferencja Problemy Badawcze Energetyki Ciepłej, Warszawa 1997.
8. Bis Z., Gajewski W., Leszczyński J.: *Symulacja komputerowa aerodynamiki binarnych warstw fluidalnych*. XIII Krajowa Konferencja Mechaniki Płynów, Częstochowa-Kokotek 1998.
9. Brereton C.: *Combustion performance*. Circulating Fluidized Bed (edited by Grace J., Avidan A., Knowlton T.), Blackie Academic & Professional Press, London 1997, 369-416.
10. Brown R.C., Brue E.: *Resolving dynamical features of fluidized beds from pressure fluctuations*. Powder Technology 2001, 119, 68-80.
11. Caloz Y., Reh C., Cahen R., Evrard R. and Piedfer O.: *Local solids velocities and their fluctuations in CFB units of different sizes*. CFB Technology VI, J. Werther, Ed., Dechema, Frankfurt 1999, 849-854.
12. Chmielniak T. J.: *Technologie energetyczne*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004.
13. Couturier M., Doucette B., Stevens D., Poolpol S., Razbin V.: *Temperature, gas concentration and solids mass flux profile within a large CFB combustors*. Proceedings of the 11th International Conference on Fluidized Bed Combustion, Edited by Anthony E.J. ASME, Montreal 1991.
14. Crhen J., C.: *Heat Transfer*. Handbook of Fluidization and Fluid-Particles Systems, Edited by Wen-Ching Yang, Marcel Dekker, Inc. New York – Basel 2002.

15. Europejska Współpraca w dziedzinie Akredytacji. *Wyrażanie niepewności pomiaru przy wzorcowaniu*. DOKUMENT EA-4/02, 1999.
16. Fan L.T, Hiraoka W.P, Walawender W.P.: *Pressure fluctuations in a fluidized bed*, AIChE – American Institute of Chemical Engineers, New York 1981, 27, 388-396.
17. Fodemski T.R. i inni.: *Pomiary cieplne – część I*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001, 274-292.
18. Friedman M. A., Heller T. J., Boyd T. J. *Operational Data from 110 MW_e Nucla CFB*, Proceedings of the International Conference on Fluidized Bed Combustion, Montreal 1991, I, pp. 381-390.
19. Gajewski W.: *Termodynamika heterogenicznego spalania fluidalnego*. Materiały XIX Zjazdu Termodynamików, Sopot 2005.
20. Glicksman L.R., Mcandrews G.: *The Effect of Bed Width on the Hydrodynamics of Large Particle Fluidized beds*. Powder Technology 1985, 42, 159-167.
21. Główny Urząd Miar.: *Wyrażanie niepewności pomiaru – Przewodnik*. Zakład Metrologii Ogólnej Głównego Urzędu Miar, Warszawa 1999.
22. Golriz M. R., Grace J. R.: *Predicting heat transfer in large-scale CFB boilers*. Proceedings of the 7th International Conference on Circulating Fluidized Beds, Niagara Falls, Ontario, Canada 2002, 121-128.
23. Griffith E. and Louge M.Y.: *The Scaling of Cluster Velocity at the Wall of Circulating Fluidized Bed Risers*. Chemical Engineering Science 1998, 53, 2475-2477.
24. Haider, A., and Levenspiel, O.: *Drag coefficient and terminal velocity of spherical and non spherical particles*, Powder Technology 1989, 58, 63-70.
25. Hartge E., Renesner D., Werther J.: *Solids concentration and velocity patterns in circulating fluidized beds*. Circulating Fluidized Bed Technology II (edited by Basu P., Large J.F., Pergamon Press, Oxford 1988, 165-180.
26. Hartge E.-U., Werther J., Wiesendorf V.: *The influence of scale on solids flow and solids concentration at the wall of a CFB combustor*. Proceedings of the 7th International Conference on Circulating Fluidized Beds, Niagara Falls, Ontario, Canada 2002, 325-332.
27. Hirschberg B., Werther J., Delebarre A., Koniuta A.: *Mixing and segregation of solids in a circulating fluidized bed*, Fluidization VIII Conference, Tours, France 1995, 769-776.
28. Horio M.: *Hydrodynamics*. Circulating Fluidized Bed (edited by Grace J., Avidan A., Knowlton T.), Blackie Academic & Professional Press, London 1997, 21-85.
29. Johnsson F., Breitholtz C., Leckner B.: *Solids segregation in a CFB boiler furnace*. Fluidization IX, eds. Fan L-S and Knowlton T., Engineering Foundation, New York 1998, 757-764.
30. Johnsson F., Leckner B.: *Vertical distribution of solids in a CFB furnace*. Proc. 13th Int. Conf. Fluidized Bed Combustion, ed. K.J. Heinschel, ASME, New York 1995, 671-679.

31. Johnsson F., Leckner B., Hartge E.U., Werther J., Sekret R., Nowak W., Noskiewicz P., Ochodek T., and others: *An experimental study of in-furnace processes and dynamic behavior of a 235 MW_e CFB boiler*. VGB PowerTech 2004, No. 3, 1-10.
32. Johnsson F., Leckner B., Hartge E.U., Werther J., Sekret R., Nowak W., Noskiewicz P., Ochodek T., and others: *Final Report, Processes in large-scale circulating fluidized bed combustors*. Project funded by the European Community under the "Energy, Environment and Sustainable Development" Programme, ENK5-CT 1999-00005, Brussels 2003.
33. Johnsson F., Leckner B., Hartge E.U., Werther J., Sekret R., Nowak W., Noskiewicz P., Ochodek T., and others: *In-furnace processes in a 235 MW_e CFB boiler*. Proceedings of the 7th International Conference on Circulating Fluidized Bed, Niagara Falls, Ontario, Canada 2002, 607-614.
34. Johnsson F., Leckner B., Hartge E.U., Werther J., Sekret R., Nowak W., Noskiewicz P., Ochodek T., and others: *An experimental study of in-furnace processes and dynamic behavior of a 235 MW_e CFB boiler*. VGB Conference "Power Plants in Competition – Technology, Operation and Environment, Cologne 2003.
35. Johnsson F., Svensson A., Andersson S., Leckner B.: *Fluidization regimes in boilers*. Fluidization VIII, Tours 1995, 14-19.
36. Johnsson F., Svensson A., Leckner B.: *Fluidization Regimes in Circulating Fluidized Bed Boilers*. In Fluidization VII, eds. Potter O.P. and Nicklin D. J., Engineering Foundation Conference, Brisbane 1992, 471-478.
37. Johnsson F., Zijerveld R.C., Leckner B.: *Air-plenum pressure fluctuations in a circulating fluidized bed boiler*, Proc. 2nd European Conference On CFB, eds. Olazar M., San José M.J., University of Basque Press Service, Bilbao 1997, 223-230.
38. Kabza Z., Kostyrko K.: *Metrologia*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2003/2004.
39. Kobyłecki R., Bis Z., Sekret R., Nowak W., i inni: *Doświadczenia eksploatacyjne nadkrytycznego kotła z ciśnieniową warstwą fluidalną pracującego w KARITA w Japonii*. Problemy Badawcze Energetyki Ciepłej, Politechnika Warszawska, Prace Naukowe, z. 23, Warszawa 2003, 207-214.
40. Kobyłecki R., Sekret R., Bis Z., Nowak W.: *Getting rid of Dioxins in fly ash using fluidized bed technology*. The 8th Polish-Danish Workshop on Biomass for Energy, Starbienino 2003, 53-60.
41. Kobyłecki R., Sekret R., Klajny T., Nowak W.: *Operating experience on bubbling fluidized bed boiler burning biomass fuels*. The 8th Polish-Danish Workshop on Biomass for Energy, Starbienino 2003, 61-65.
42. Kobyłecki R., Sekret R., Nowak W., Bis Z., Psik R.: *Biomass-Fired boiler at Ostoleka Power Station, Poland – Operating Experiences*. Twenty-First Annual International Pittsburgh Coal Conference. Osaka, Japan 2004.
43. Kordylewski W.: *Niskoemisyjne techniki spalania w energetyce*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.

44. Kruczek S.: *Kotły – Konstrukcje i obliczenia*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.
45. Kruse M., Werther J.: *2D gas and solids flow prediction in circulating fluidized beds based on suction probe and pressure profile measurements*. Chemical Engineering and Processing 1995, 34, 185-203.
46. Kuni D., Levenspiel O.: *Fluidization and mapping of regimes*. Fluidization Engineering (edited by Kunii D., Levenspiel O.), II edition, Butterworth-Heinemann, Stoneham 1991, 85-88.
47. Kuni D., Levenspiel O.: *Fluidization and mapping of regimes*, Fluidization Engineering (edited by Kunii D., Levenspiel O.), II edition, Butterworth-Heinemann, Stoneham 1991, 77-78.
48. Kuni D., Levenspiel O.: *High-Velocity Fluidization*. Fluidization Engineering (edited by Kunii D., Levenspiel O.), II edition, Butterworth-Heinemann, Stoneham 1991, 195-206.
49. Lafanechere L., Jestin L. *Study of circulating fluidized behaviour in order to scale it up to 600 MW_e*. Proceedings of the 13th International Conference on Fluidized Bed Combustion, ed. K. J. Heinschel, Vol. 2, pp. 971-980, ASME, New York 1995.
50. Lafanechere L., Jestin L., Bursi J. M., Roulet V., Dimaggio T.: *Operating behaviour and flexibility of circulating fluidized bed boiler*. Proceedings of the 5th International Conference on Circulating Fluidized Beds, Beijing, China, 1996, 474-480.
51. Leckner B. *Fluidized bed combustion: mixing and pollutant limitation*. Progress in Energy and Combustion Science 1998, Vol. 24, pp. 31-61.
52. Leckner B., Golriz M.R., Zhang W., Andersson B.A., Johnsson F.: *Boundary layers –first measurements in the 12 MW CFB research plant at Chalmers University*. in: E.J. Anthony (Ed.), Proceeding 11th International Conference Fluidized Bed Combustion, ASME, New York 1991, 771–776.
53. Lee J.-M., Kim J.-S., Kim S.-M., Kim J.-J., Song K.-K.: *Combustion characteristics of korean anthracite in the 200 MW_e Tonghae CFB Combustor*. The Third Asia-Pacific Conference on Combustion, Seoul, Korea 2001, 1-4.
54. Lim K.S., Zhu J.X., Grace J.R.: *Hydrodynamics of gas-solids fluidization*. Int. J. Multiphase Flow, vol. 21, 141-193, 1995.
55. Lucat P., Morin J.-X., Semedard J.-Cl., Jaud P., Joos E. and Masniere P.: *Utility type CFB Boilers; 250 MW_e and beyond*. Proceedings of the 12th International Conference on Fluidized Bed Combustion, Volume 1, ASME, New York 1993, 9-15.
56. Mastellone M.L., Arena U.: *The effect of particle size and density on solids distribution along the riser of a circulating fluidized bed*. Chemical Engineering Science 1999, 54, 5383-5391.
57. Melwin R.H., Friedman M.A. and Divillo, R.J.: *Summary of test program at ACE Cogeneration Company's 108 MW_e CFB*. Proceedings of the 12th International Conference on Fluidized Bed Combustion, Volume 1, ASME, New York 1993, 511-520.

58. Mirek P., Sekret R., Nowak W.: *Analiza numeryczna wpływu ukształtowania dyszy powietrznej na emisję tlenków azotu z komory paleniskowej kotła fluidalnego*. Fluidalne spalanie węgla w energetyce, Złotniki Lubańskie 2005.
59. Mirek P., Mirek J., Sekret R., Nowak W.: *Nozzles in CFB boilers*. Circulating Fluidized Bed Technology VIII, International Academic Publishers, World Publishing Corporation, ed. Kefa Cen 2005, 877-883.
60. Mirek P., Nowak W., Bis Z., Andrzejczyk M.: *Badanie dysz powietrznych dla kotłów z cyrkulacyjną warstwą fluidalną*, Gospodarka Paliwami i Energią 2004, 2.
61. Monceaux L., Azzi M., Molodtsov Y., Large J.F.: *Particle mass flux profiles and flow regime characterization in a pilot-scale fast fluidized bed unit*. Fluidization 5, edited by Ostergard K., Sorensen A., Engineering Foundation, New York 1986, 337-344.
62. Montatnt D., Fauquet P., Lafanechere L., Bursi J.: *Two phase 1D annular model of a CFB boiler furnace*. ASME, Proceedings of the 14th International Conference on Fluidize Bed Combustion, Vol. 2, 1023-1032, New York 1997.
63. Muskała W.: *Globalna analiza cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej typu BCWF na potrzeby systemu czystej produkcji energii*. Monografie Politechniki Częstochowskiej, 75, Częstochowa 2001.
64. Muskała W., Nowak W., Sekret R., Arkadiusz Szymanek.: *Rozdział popiołu w kotłach z cyrkulacyjną warstwą fluidalną*. Prace IMiUE Politechniki Śląskiej, IX Konferencja Kotłowa, Gliwice 2002, 353-371.
65. Na Y., Yan G., Sun X., Cui P., He J., Karlsson M., Leckner B.: *Large and small particles in CWF combustors*. Preprints of the 5th International Conference on Circulating Fluidized Beds, Beijing 1996, 194-200.
66. Nakagawa N., Bai D., Shibuya E., Kinoshita H., Takarada T., Kato K.: *Segregation of particles in binary solids circulating fluidized beds*. Journal of Chemical Engineering of Japan 1994, 27, 194-198.
67. Nowak W.: *Comprehensive Study of Circulating Fluidized Bed*. Technical University of Częstochowa Monograph No 9, Częstochowa 1989.
68. Nowak W., Matsuda H., Win K.K., Hasatani M.: *Density and Pressure Fluctuations in CFB and MSFB*. Proceedings 5th Symposium on Circulating Fluidized Beds, Tokyo 1992, 211-218.
69. Nowak W., Mineo H., Yamazaki R., Yoshida K.: *Behavior of particles in a circulating fluidized bed of a mixture of two different sized particles*. Circulating Fluidized Bed Technology III. (Edited by Basu P., Horio M., Hasatani M.) 1990 Proceedings of the Third International Conference on Circulating Fluidized Beds, Nagoya, Japan, 219-224.
70. Nowak W., Muskała W., Szymanek A., Sekret R.: *Możliwości poprawy skuteczności suchego odsiarczania spalin poprzez mikronizację sorbentu*. V Międzynarodowe Sympozjum Zintegrowane Systemy Zapobiegania Emisji Zanieczyszczeń, Międzyzdroje 1997, 201-208.
71. Nowak W., Sekret R.: *Fluidized bed combustion of cellulose industry wastes*. Paliwa z Odpadów 2001, tom III, 271-277.

72. Nowak W., Sekret R., Bis Z., Jabłoński J., Walkowiak R., Iwan J., Westerlund K.: *Starting up the third phase of the Turow repowering project – first operating experience with a 260 MW_e Foster Wheeler second-generation CFB boiler*. VGB-Workshop Operating Experience with Fluidised Bed Firing Systems, Berlin, Germany, 2004.
73. Nowak W., Sekret R., Bis Z., Pisarek J., Szymanek A.: *Procesy ciepłno-przepływowe oraz emisje zanieczyszczeń w kotłach fluidalnych dużej mocy*. III Sympozjum Energia 2002, Neustift 2002, 47-74.
74. Nowak W., Sekret R.: *Emisje zanieczyszczeń gazowych w procesie fluidalnego spalania węgla brunatnego i biomasy*. Gospodarka Paliwami i Energią 2002, 2, 7-14.
75. Nowak W., Sekret R.: *Wykorzystanie biomasy w procesie fluidalnego spalania węgla*. Gospodarka Paliwami i Energią 2001, 8, 2-9.
76. Nowak W., Sekret R.: *Technologie energetyczne spalania biomasy z możliwością utylizacji odpadów komunalnych*. V Sympozjum Energia, 41-58, Val Gardena, Włochy 2004.
77. Nowak W., Win k. K., Matsuda H., Hasatani M., Bis Z., Krzywański J., Gajewski W.: *Transport Velocity of Coarse Particles in Multi-Solid Fluidized Bed*. Chemical Engineering, Japan 1995, 28, 5, 535-540.
78. Noymer P.D. and Glicksman L.R.: *Descent Engineering Science* 2000, 55, 5283-5289.
79. Pronobis M.: *Modernizacja kotłów energetycznych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
80. Rhodes M.: *Modeling the flow structure of upward-flowing gas-solid suspensions*. Powder Technology 1990, 60, 27-38.
81. Rhodes M.J., Laussmann P.: *A simple non - isokinetic sampling probe for dense suspensions*. Powder Technology 1992, 70, 141-151.
82. Rhodes M.J., Laussmann P., Villain F., Geldart D.: *Measurement of radial and axial flux variations in the riser of a circulating fluidized bed*. in: P. Basu, J.F. Large (Eds.), *Circulating Fluidized Bed Technology II*, Pergamon, Oxford 1998, 155-164.
83. Sekret R.: *Rozkład stężenia ziaren i pulsacje ciśnienia w komorze paleniskowej kotła z cyrkulacyjną warstwą fluidalną dużej mocy*. Gospodarka Paliwami i Energią 2003, 9, 10-16.
84. Sekret R.: *Segregacja ziaren w strukturze cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej kotła o mocy 670 MW_e*. Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów 2004, nr 1, 1-9.
85. Sekret R., Kobyłecki R., Nowak W.: *Rozkład ziaren w strukturze cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej kotła o mocy 670 MW_e*. Problemy Badawcze Energetyki Ciepłej, Politechnika Warszawska, Prace Naukowe z. 23, Warszawa 2003, 317-326.
86. Sekret R., Mirek P., Nowak W.: *In-situ measurements of two-phase flow behaviour in a large-scale fluidized bed boiler*. The fourth International Conference on Transport Phenomena in Multiphase Systems, Heat-2005, Gdansk 2005.

87. Sekret R., Mirek P., Nowak W., Jabłoński J., Walkowiak R.: *Operational experiences of a 262 MW_e COMPACT circulating fluidized bed boiler at Turow Power Station*. Circulating Fluidized Bed Technology VIII, International Academic Publishers, World Publishing Corporation, ed. Kefa Cen 2005, 1002-1008.
88. Sekret R., Nowak W.: *Badania grubości warstwy przyściennej w komorze paleniskowej kotła z cyrkulacyjną warstwą fluidalną o mocy 670 MW_e*. Problemy Badawcze Energetyki Ciepłej, Politechnika Warszawska, Prace Naukowe, z. 202, Warszawa 2003, 201-210.
89. Sekret R., Nowak W.: *Badania procesu fluidalnego spalania mieszanki kory drzewnej i węgla brunatnego*. VIII Zjazd Termodynamików, Prace Naukowe-Konferencje, z. 22, Politechnika Warszawska, Warszawa 2002, 1075-1084.
90. Sekret R., Nowak W.: *Badania zachowania się ziaren w układzie cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej*. VIII Międzynarodowa Konferencja, Transport Pneumatyczny 2002, Politechnika Śląska, Gliwice 2002, 268-275.
91. Sekret R., Nowak W.: *Emisje zanieczyszczeń gazowych z kotłów dużej mocy z cyrkulacyjną warstwą fluidalną*. Fluidalne spalanie węgla w energetyce. Złotniki Lubańskie 2004, 242-252.
92. Sekret R., Nowak W.: *Impact of biomass on: CO, SO₂, NO_x emissions from CFB combustion of brown coal*. Proceedings of the 6th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Vol. I, Estoril, Lisbon, Portugal, 2002.
93. Sekret R., Nowak W.: *Rozkład prędkości i stężeń ziaren materiału warstwy oraz temperatury w komorze paleniskowej kotła z CWF w dużej skali technicznej*. Fluidalne spalanie węgla w energetyce. Złotniki Lubańskie 2004, 253-2262.
94. Sekret R., Nowak W.: *Segregacja ziaren w strukturze cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej kotła w dużej skali technicznej*. Inżynieria Chemiczna i Procesowa 2004, 25, 2283-2290.
95. Sekret R., Nowak W.: *Struktura cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej kotła w dużej skali technicznej*. Inżynieria Chemiczna i Procesowa 2004, 25, 2291-2298.
96. Sekret R., Nowak W., Bis Z., Czakiert T., Andrzejczyk M.: *Procesy ciepłoprzepływowe w kotłach fluidalnych dużej mocy*. Prace IMiUE Politechniki Śląskiej, IX Konferencja Kotłowa, Gliwice 2004, 331-352.
97. Sekret R., Nowak W., Bis Z., Łaskawiec J., Jabłoński J., Walkowiak R.: *Operation Experience of Large-Scale Circulating Fluidized Bed Boilers with Brown Coal*. Twenty-First Annual International Pittsburgh Coal Conference. Osaka, Japan, 2004.
98. Sekret R., Nowak W., Hartge E.-U., Werther J.: *Distribution of gas concentration in a furnace of large-scale CFB boiler*, Archivum Combustionis, PAN, Komitet Termodynamiki i Spalania, Warszawa 2005, in press.
99. Sekret R., Nowak W., Jabłoński J., Walkowiak R.: *Analiza emisji zanieczyszczeń z kotła CWF Compact o mocy 260 MW_e*. Pol-Emis 2004, Praca zbiorowa, Emisje-Zagrożenia-Ochrona Powietrza, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004, 253-260.

100. Sekret R., Nowak W.: *Segregacja ziaren paliwa w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej*. Inżynieria Chemiczna i Procesowa 2002, 23, 229-244.
101. Senior R., Brereton C.: *Modeling of circulating fluidized bed solids flow and distribution*. Chemical Engineering Science 1992, 47, 281-296.
102. Skubis T.: *Opracowanie wyników pomiarów - Przykłady*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
103. Smolders K., Baeyens J.: *Gas fluidized beds operating at high velocities: a critical review of occurring regimes*. Powder Technology 2001, 119, 269-291.
104. Sternaus J., Johnsson F., Leckner B., Palchonok G.J.: *Gas and solids flow in circulating fluidized beds – discussion on turbulence*. Chemical Engineering Science 1999, 54, 5377-5382.
105. Sternaus J., Johnsson F., Leckner B.: *Gas mixing in circulating fluidized bed risers*, Chemical Engineering Science 2000, 55, 129-148.
106. Svensson A., Johnsson F., Leckner B.: *Fluid - dynamics of the Bottom Bed of Circulating Fluidized Bed Boilers*. Proceeding 12th International Conference On Fluidized Bed Combustion, eds. Rubow L. N. and Commonwealth, ASME 1993, San Diego, California, 887-897.
107. Szymanek A.: *Wiek geologiczny warunkujący własności sorpcyjne*. Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów 2005, Vol. 39, nr 1, 7-11.
108. Szymanek A., Nowak W., Sekret R., Muskała W.: *Bilans wapnia w kotłach fluidalnych*. II Krajowa Konferencja Użytkowników Kotłów CFB, Podlesice 2002.
109. Szymanek A., Sekret R., Muskała W., Nowak W.: *Bilans wapnia w kotłach fluidalnych*. Gospodarka Paliwami i Energią 2003, nr 8, 18-21.
110. Tomeczek J.: *Spalanie węgla*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Skrypty uczelniane nr 1667, Gliwice 1992.
111. Van Der Schaaf J., Johnsson F., Schouten J.C., Van Den Bleek C.M.: *Fourier analysis of nonlinear pressure fluctuations in gas-solids flow in CFB risers – Observing solids structures and gas/particle turbulence*. Chemical Engineering Science 1999, 54, 5541-5546.
112. Wandrasz J., Zieliński J.: *Procesy fluidalne utylizacji odpadów*. Komisja Ochrony Środowiska Człowieka Regionów Przemysłowych, Polska Akademia Nauk, Wrocław 1984.
113. Werdermann, C. C.: *Feststoffbewegung und Wärmeübergang in zirkulierenden Wirbelschichten von Kohlekraftwerken*. Dr. Thesis, Technische Universität Hamburg-Harburg, Verlag Shaker, Aachen 1992.
114. Werther J., Hartge E.-U., Kruse M.: *Gas mixing and Interphase Mass Transfer in the Circulating Fluidized Bed*. Fluidization VII, Potte E. and Nicklin D.J., Eds., Engineering Foundation, New York 1992, 257-264.
115. Werther J.: *Measurements techniques in fluidized bed*, Powder Technology 1999, 102, 15-36.

116. Wiesendorf V., Hartge, E-U., Werther J., Sternéus, J., Johnsson, F., Leckner, B.: *The CFB Boiler in Gardanne – an Experimental Investigation of its Bottom Zone*. Proceedings 15th Internationale Conference Fluidized Bed Combustion, ASME, Svannah 1999.
117. Wiesendorf V., Werther J.: *Capacitance probes for solids volume concentration and velocity measurements in industrial fluidized bed reactor.*, Powder Technology 2000, 110, 143-157.
118. Zarzycki R., Fuzowski K., Stelmachowski M.: *Obliczenia symulacyjne dwufazowego przepływu gaz-ciało stałe w kolumnie kotła z cyrkulacyjną warstwą fluidalną. Fluidalne spalanie węgla w energetyce*. Złotniki Lubańskie 2004, 197-206.
119. Zhang W., Johnsson F.: *Fluid dynamic boundary layers in circulating fluidized bed boilers*. Report A91-193, ISSN 0281-0034, Department of Energy Conversion, Chalmers University of Technology, Geteborg 1991.
120. Zhang W., Johnsson F., Leckner B.: *Momentum probe and sampling probe for measurement of particle flow properties in CFB boilers*. Chemical Engineering Science 1997, 52, 497-509.
121. Zhang W., Johnsson F., Leckner B.: *Fluid dynamic boundary layers in CFB boilers*. Chemical Engineering Science 1995, Vol. 50, 2, 201-210.
122. Zijerveld R., Johnsson F., Marzocchella A., Schouten J., Van Den Blek C.M.: *Fluidization regimes and transitions from fixed bed to dilute transport flow*. Powder Technology 1998, 95, 185-204.

WARUNKI CIEPLNO-PRZEPIYWOWE I EMISJE ZANIECZYSZCZEŃ W KOTŁACH Z CYRKULACYJNĄ WARSTWĄ FLUIDALNĄ DUŻEJ MOCY

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych i rozważania analityczne na temat warunków ciepłno-przepływowych i emisji zanieczyszczeń gazowych kotłów z cyrkulacyjną warstwą fluidalną (CWF) dużej mocy. Badania eksperymentalne zrealizowano na dwóch kotłach o mocy 670 MW i jednym kotle o mocy 700 MW. W przeprowadzonej analizie uwzględniono również wyniki badań prezentowanych w literaturze przedmiotu, a dotyczące kotłów z CWF o mocach od 12 MW do 1.1 GW. W celu realizacji badań w płetwach ścian membranowych komory paleniskowej jednego z kotłów o mocy 670 MW wykonano 52 porty pomiarowe. Pierwszą część pracy poświęcono charakterystyce technik pomiarowych wykorzystanych w badaniach eksperymentalnych. W celu określenia warunków pracy CWF do wnętrza komory paleniskowej badanego kotła wprowadzano następujące sondy: sondę do poboru gazu, sondę do poboru ziaren materiału warstwy, sondy do pomiaru ciśnienia, sondę pojemnościową oraz sondę do pomiaru temperatury. W kolejnej części pracy dotyczącej warunków hydrodynamicznych w komorze paleniskowej kotła z CWF dużej mocy poruszono następujące zagadnienia: pulsacje ciśnienia materiału warstwy, rozkład stężenia objętościowego ziaren, rozkład gęstości strumienia masy ziaren cyrkulujących w komorze paleniskowej, rozkład prędkości skupisk ziaren oraz segregację ziaren. Przeprowadzone analizy uzyskanych wyników badań pozwoliły na określenie struktury CWF w komorze paleniskowej kotła w dużej skali technicznej. Szczególną uwagę zwrócono na wpływ konstrukcji rusztu na warunki pracy dolnej części komory paleniskowej. Zaobserwowano, że w przypadku kotłów z CWF w dużej skali technicznej występują znaczne pionowe i poziome gradienty ciśnienia w obszarze rusztu powietrza pierwotnego prowadzące z jednej strony do wdmuchiwania materiału warstwy do kanałów wylotowych dyszy i ewentualnie przesypu do skrzyni powietrznej, a z drugiej strony do niejednorodnej fluidyzacji obszaru dolnego. Stwierdzono również obecność silnego strumienia masy ziaren materiału warstwy opadającego w sąsiedztwie ścian komory paleniskowej oraz ich intensywny unos w kierunku wlotu do cyklonów w pozostałej części CWF. Potwierdzono tym samym istnienie struktury „rdzeń – strefa przyścienna” w obszarze rozrzedzonym kotła z cyrkulacyjną warstwą fluidalną dużej mocy. Analiza wyników wykazała dodatkowo obniżenie udziału pola powierzchni strefy przyściennej w przekroju poziomym komory paleniskowej wraz ze wzrostem skali technicznej kotłów. Efekt ten był wynikiem obniżenia wewnętrznej cyrkulacji ziaren w obszarze rozrzedzonym wraz z ze wzrostem gabarytów komory paleniskowej. Zaobserwowano ponadto wzrost prędkości ziaren opadających w sąsiedztwie ścian komory paleniskowej wraz ze zwiększeniem grubości hydrodynamicznej strefy przyściennej. W dalszej części pracy przeprowadzono analizę rozkładu: O_2 , CO , SO_2 , NO i N_2O w objętości cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej oraz przedstawiono wpływ warunków ciepłno-przepływowych na emisję zanieczyszczeń powstających w procesie spalania. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, iż głównym obszarem tworzenia się zanieczyszczeń gazowych jest dolna część komory paleniskowej, tj. obszar dolny i gęsty, natomiast procesy ich redukcji przebiegają intensywnie w górnej części komory paleniskowej, tj. w obszarze rozrzedzonym CWF. Optymalizacja warunków ciepłno-przepływowych w dolnej części komory paleniskowej przeprowadzona poprzez zmianę udziału powietrza pierwotnego i wtór-

nego oraz zmianę rozdziału paliwa, jak również zwiększenie krotności cyrkulacji ziaren materiału warstwy pomiędzy komorą paleniskową a układem nawrotu, wykazała redukcję emisji: CO o 71%, SO₂ o 41% i NO o 19% w odniesieniu do standardowych warunków pracy badanego kotła. Dlatego też wyniki badań potwierdziły tezę o wpływie gabarytów komory paleniskowej na strukturę cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej oraz tezę o minimalizacji emisji zanieczyszczeń z procesu spalania realizowanego w kotle dużej mocy wraz z odpowiednią organizacją warunków cieplno-przepływowych w strukturze cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej.

THERMAL AND FLOW CONDITIONS AND POLLUTANT EMISSIONS IN LARGE-SCALE CIRCULATING FLUIDIZED BED BOILERS

Abstract

The article presents the results of experimental tests and analytical studies on the thermal and flow conditions and gaseous pollutant emissions of large-power circulating fluidized bed (CFB) boilers. The experimental tests were carried out on two 670 MW boiler and one 700 MW boiler. The performed analysis included also the results of studies reported in literature, concerning CFB boilers of powers ranging from 12 MW to 1.1 GW. In the combustion chamber of one of the 670 MW boilers, 52 measurement ports were made in the membrane wall fins. The first part of the study was devoted to the characterization of the measurement techniques used in experimental tests. In order to determine the CFB operating conditions, the following probes were introduced into the combustion chamber of the boiler tested: a gas sampling probe, a bed material particle sampling probe, a pressure probe, a capacitive probe and a temperature measuring probe. The subsequent part of the study, which concerns the hydrodynamic conditions in the combustion chamber of a large-scale CFB boiler, addresses the following problems: bed material pressure fluctuations, the distribution of solids volume concentration, the distribution of solids mass flux density, the distribution of particle cluster velocities, and the segregation of particles. The performed analyses of the obtained testing results allowed the determination of the CFB structure in the combustion chamber of the large technical-scale boiler. Particular consideration was given to the effect of grid design on the operation conditions of the bottom combustion chamber part. It was also observed that for large technical-scale CFB boilers considerable vertical and horizontal pressure gradients occurred in the primary air grid region leading, on the one hand, to a blowing of the bed material into the nozzle outlet channels and possibly to its backflow to the windbox and, on the other hand, to a non-uniform fluidization of the lower region. The presence of a strong bed material particle mass flux was also found, which was falling in the vicinity of the combustion chamber walls, and an intensive carrying over of bed material particles towards the cyclone inlet in the other CFB part. Thus, the "core – wall boundary layer" structure was confirmed to exist in the dilute circulating fluidized bed region of the large-power boiler. The analysis of the results showed also a reduction of the share of wall boundary layer surface area in the combustion chamber horizontal section with increasing technical scale of CFB boilers. This effect was a result of the reduction of internal particle circulation within the dilute region with increasing combustion chamber overall dimensions. Moreover, an increase in the velocity of particles falling down in the vicinity of the combustion chamber walls with the increase in hydrodynamic wall boundary layer thickness was observed. The further part of the study includes the analysis of O₂, CO, SO₂, NO and N₂O distribution within the circulating fluidized bed space and presents the effect of thermal and flow conditions on the emission of pollutants forming in the combustion process. It has been found from the obtained testing results that the main region of gaseous pollutant formation is the bottom part of the combustion chamber, i.e. the bottom and dense region, while the gaseous pollutant reduction processes proceed in the upper combustion chamber part, that is in the dilute region. The optimization of the thermal and flow conditions in the bottom combustion chamber part by changing the primary and secondary air share and changing the fuel distribution, as well as increasing the bed material particle circulation between the combustion chamber and the recycle system, showed a reduction in the emissions

of CO by 71%, SO₂ by 41% and NO by 19% compared to the standard operation conditions of the boiler tested. Thus, the testing results have confirmed the claim about the influence of combustion chamber overall dimensions on the circulating fluidized bed structure, as well as the claim about the minimization of pollutant emissions from the combustion process carried out in a large-power boiler with the appropriate arrangement of thermal and flow conditions in the circulating fluidized bed structure.

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice
<http://loki.polsl.pl/wydawnictwo>

Sprzedaż i Marketing

tel. (032) 237-18-48
wydawnictwo_mark@polsl.pl

Nakład 150+50 egz. Ark. wyd. 11. Ark. druk. 7,5

Fotokopie, druk i oprawę wykonano w UKiP sc, *J&D Gębka*,
Gliwice, ul. Pszczyńska 44, tel./fax 231-87-09