

Katarzyna SOBAŃSKA

# ANALIZA PARAMETRÓW PRZEPŁYWU CZĄSTEK STAŁYCH NA PRZYKŁADZIE PYŁU WĘGLOWEGO

**STRESZCZENIE** *W artykule przedstawiono główne parametry przepływu pyłu węglowego w pyłoprzewodach zasilających kotły energetyczne. Właściwe proporcje pomiędzy pyłem węglowym a powietrzem w głównej mierze decydują nie tylko o samym przepływie mieszaniny dwufazowej ale także o parametrach spalania w kotle energetycznym. Prędkość przepływu oraz koncentracja strumienia masy pyłu węglowego mają znaczny wpływ na sprawność energetyczną kotła oraz na jego wydajność.*

**Słowa kluczowe:** przepływ, pył węglowy, prędkość, koncentracja.

## 1. WSTĘP

---

Utrzymanie w każdych warunkach eksploatacji pyłoprzewodów właściwej proporcji między ilością pyłu węglowego i powietrza podawanego do każdego palnika kotła ma decydujące znaczenie w optymalizacji spalania w kotłach energetycznych.

---

**mgr inż. Katarzyna SOBAŃSKA**  
e-mail: k.sobanska@pollub.pl

Katedra Elektroniki, WEil,  
Politechnika Lubelska

Właściwy dobór współczynnika nadmiaru powietrza dla pojedynczego palnika (lub dla grupy palników), stwarza możliwość eliminacji zjawiska korozji niskotlenowej, pozwala istotnie ograniczyć generowanie tlenków azotu, zmniejsza ilość części palnych w popiele, pozwala na równomierny rozkład temperatur w kotle oraz zwiększa sprawność kotła [2]. Aby można było uzyskać w procesie spalania wymienione wyżej korzyści należy przyjrzeć się zjawisku transportu mieszaniny pyłu i powietrza i odpowiedzieć na pytanie, które parametry przepływu mają decydujące znaczenie na etapie zasilania kotła energetycznego na optymalne parametry spalania [3].

## 2. TRANSPORT PNEUMATYCZNY

---

Transportem pneumatycznym jest ruch cząsteczek surowców sypkich spowodowany ruchem cząsteczek gazu, najczęściej powietrza. Przepływ strumienia gazu wymuszony jest różnicą ciśnień wywołaną między poszczególnymi przekrojami przepływowymi w przewodzie transportowym. Wielkościami charakteryzującymi przepływ dwufazowy gaz-ciało stałe są: koncentracja i strumień fazy stałej, jej skład granulometryczny oraz prędkość przepływu fazy gazowej. Parametry te oddziałują na opory przepływu, a wraz z uwzględnieniem długości linii transportowej oraz jej konfiguracji wpływają na straty ciśnienia w przewodzie transportowym [3]. Koncentracja fazy stałej  $Y$  jest to jednostkowe masowe obciążenie strugi gazu nośnego przez transportowaną rozdrobnioną substancję stałą i wyrażana jest w kilogramach masy pyłu  $M_s$  do kilograma fazy nośnej  $M_v$  w próbce mieszaniny pyłowo gazowej [2]:

$$Y = \frac{M_s}{M_v} . \quad (1)$$

Koncentracja pyłu jest funkcją masy pyłu  $m$ . Strumień masy pyłu  $M_p$  wyznacza się ze stosunku koncentracji  $Y$  i masy gazu  $M_g$  [2]:



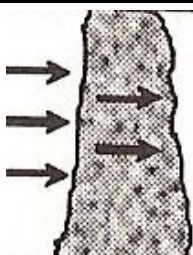
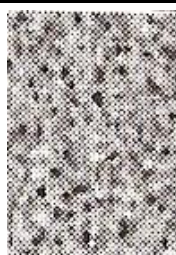

$$M_p = \frac{Y}{M_g} . \quad (2)$$

Transport pneumatyczny, ze względu na strukturę przepływu dzielimy na: transport przez unoszenie, transport warstwowy, transport porcjowy (impulsowy), transport przetłaczający i transport fluidalny. Jest to jedna z klasyfikacji

transportu pneumatycznego i została ona przedstawiona w tabeli 1 [3]. W zależności od rodzaju ciśnienia wyróżnia się dwa zasadnicze rodzaje transportu: transport nadciśnieniowy i podciśnieniowy.

TABELA 1

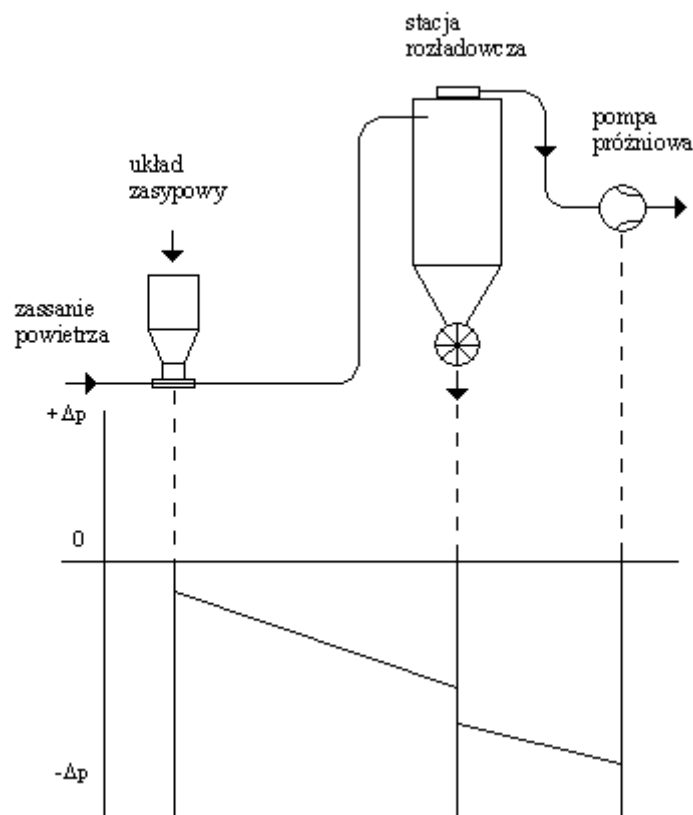
Systematyka transportu pneumatycznego ze względu na strukturę przepływu [1]

Rodzaj transportu	Transport przez unoszenie	Transport warstwowy	Transport porcjowany (impulsowy)	Transport przetłaczający	Transport fluidalny
Struktura przepływu					
	Unoszenie fazy stałej rozproszenie w strudze gazu	Unoszenie i ruch poślizgowy fazy stałej	Porcje materiału rozdzielone pęcherzami gazu	Przetłaczanie materiału strugą gazu	Materiał upłynniony w przewodach
Koncentracja fazy stałej	poniżej 5 kg/kg	10-50 kg/kg	30-100 kg/kg	do 500 kg/kg	30-250 kg/kg
	5-10 kg/kg				
	10-20 kg/kg				
Ciśnienie gazu nośnego	0,01-0,02 MPa	0,3-0,6 MPa	0,4-0,6 MPa	0,4-0,6 MPa	0,4-0,8 MPa
	do 0,08 MPa				
	0,3-0,6 MPa				
Prędkość gazu nośnego	15-30 m/s	4-15 m/s	3-10 m/s	0,5-5 m/s	< 26 m/s
Długość transportu	100 m	400 m	200 m	20 m	100 m
	200 m				
	400 m				

Transport przez unoszenie realizowany jest w sytuacji, gdy faza stała jest równomiernie rozproszona w objętości gazu, przy prędkości zwykle powyżej 20 m/s i tym większej im cząsteczki fazy stałej mają większą masę. Kierunek przepływu ziaren pyłu jest zgodny z kierunkiem przepływu gazu, ale prędkość ziaren pyłu jest mniejsza od prędkości gazu ze względu na różnicę mas cząstek fazy stałej i fazy gazowej. Transport warstwowy ma miejsce przy mniejszych prędkościach gazu nośnego. Następuje wtedy rozfrakcjonowanie fazy stałej

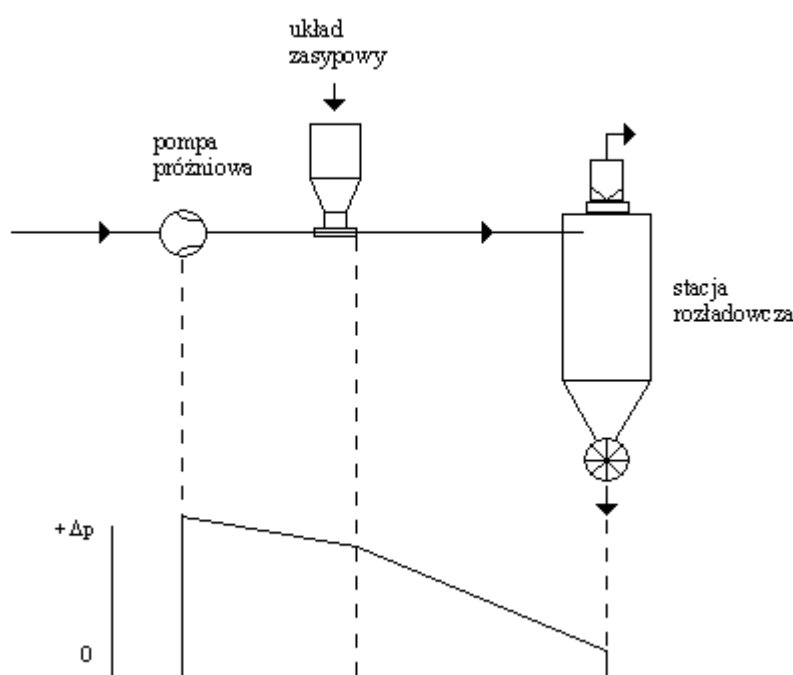
i mniejsze cząsteczki unoszone są w strudze gazu, a cząstki o większej masie przesuwają się ruchem ślizgowym po dnie przewodu, co powoduje wzrost oporów przepływu na skutek tarcia i w związku z tym wymagane jest większe ciśnienie gazu. W transporcie porcjowanym następuje wyraźny rozdział faz wzdłuż osi przewodu ze względu na transport materiałów trudno upłynniających się (materiał wilgotny lub porcje w postaci korków rozdzielonych pęcherzami gazowymi). Transport przetłaczający występuje przy bardzo wysokiej koncentracji, gdy ziarna pyłu cały czas stykają się ze sobą, tworząc w całym przekroju i na całej długości przewodu porowatą strukturę przetłoczoną strugą gazu nośnego o małej prędkości. Transport fluidalny jest wykorzystywany przy materiałach łatwo upłynniających się (suchych, lekkich i silnie rozdrobnionych). Faza stała zajmuje znaczną część przewodu, a ziarna pyłu zderzają się ze sobą i ze ścianami przewodu na skutek, czego przemieszczają się w sposób chaotyczny zachowując jednak główny kierunek ruchu wyznaczony przez przepływ gazu [3].

Transport podciśnieniowy (ssący) został przedstawiony na rysunku 1. W skład układu wchodzi pompa próżniowa, która zazwyczaj znajduje się na końcu układu, a zassanie powietrza jest na początku układu. W przemyśle, w zależności od potrzeb oraz rodzaju surowca transportowanego, jako układ zasypowy



Rys. 1. Schemat instalacji transportu podciśnieniowego i rozkład ciśnień w rurociągu

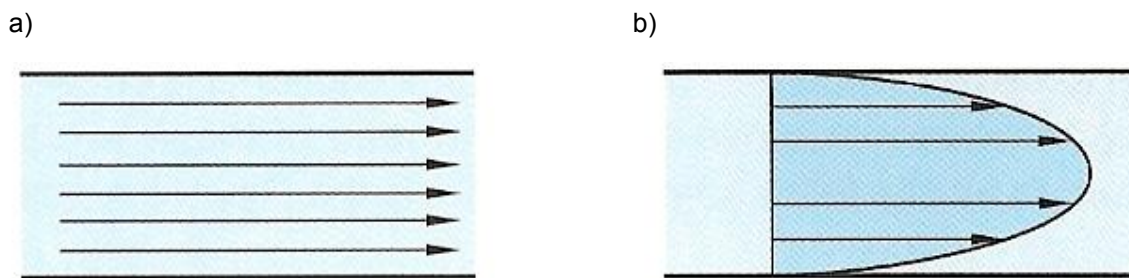
może być: inżektor, ssawa lub zasilacz śluzowy [6]. Dużą zaletą transportu podciśnieniowego jest zasysanie do środka powietrza w przypadku nieuszczelnienia układu. Ten rodzaj transportu stosowany jest z reguły w instalacjach o stosunkowo niedużych odległościach. Transport nadciśnieniowy (tłoczący) przedstawia rysunek 2. Źródło powietrza, którym może być np. dmuchawa znajduje się na początku instalacji, a filtr na końcu. Surowiec dostarczany jest podajnikiem ślimakowym bądź też zasilaczem śluzowym i tłoczony jest do stacji rozładkowej [6].



Rys. 2. Schemat instalacji transportu nadciśnieniowego i rozkład ciśnienia w rurociągu

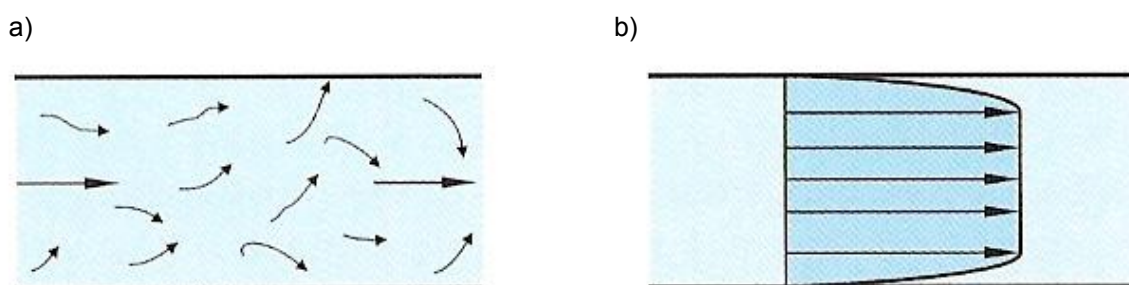
### 3. RODZAJE PRZEPŁYWÓW

W przepływie laminarnym cząsteczki medium nie przemieszczają się między sobą a jedynie elementy medium poruszają się w równoległych ślizgających się po sobie warstwach. Prędkość cząstek przy ścianie jest równa zero, ponieważ w warstwie przyściennej występuje tarcie. W środku rury występuje minimalne zwolnienie wymuszone. Profil prędkości w obu miejscach (przy ścianie i na środku rury) jest równy i stabilny. Na rysunku 3 przedstawiono przepływ laminarny oraz profil prędkości [1].

**Rys. 3.**

a) przepływ laminarny, b) profil prędkości

W przepływie turbulentnym następuje intensywne mieszanie się cząstek, co powoduje trwałe zaburzenia pola prędkości. Oprócz ruchu głównego (w kierunku przepływu), występują fluktuacje parametrów hydrodynamicznych (prędkości, ciśnienia). Przyspieszające cząstki poruszają się w sposób przypadkowy i wzajemnie znacznie na siebie oddziałują w całej objętości. Efektem wzajemnego oddziaływania poruszających się cząstek jest spadek prędkości cząstek, które poruszały się z większą prędkością oraz wzrost prędkości cząstek, które poruszały się z mniejszą prędkością. W rezultacie w centrum rury większość cząstek porusza się prawie ze stałą prędkością. Im bliżej ściany znajdują się cząsteczki tym większy zachodzi efekt tarcia. W tym miejscu prędkość zmienia się gwałtownie wraz ze zmianą pozycji w efekcie czego pojawia się warstwa graniczna. W niektórych przypadkach warstwa graniczna może być dość cienka a w innych może być do połowy średnicy rury. Wraz ze wzrostem prędkości, warstwa graniczna staje się cieńsza i profil wygładza się. Taka sytuacja wpływa na poprawę pomiaru przepływu. Przepływ turbulentny przedstawia rysunek 4 [1].

**Rys. 4.**

a) przepływ turbulentny, b) profil prędkości

Kryterium decydującym o rodzaju ruchu jest bezwymiarowa liczba Reynoldsa utworzona z parametrów, które mają wpływ na charakter przepływu ( $R_e$ ).

Ta liczba pozwala scharakteryzować przepływ w przewodzie o przekroju kołowym i wyrażana jest zależnością:

$$R_e = \frac{vd}{\nu}, \quad (3)$$

gdzie:

- $v$  – prędkość średnia w przekroju,
- $d$  – średnica przekroju,
- $\nu$  – kinematyczny współczynnik lepkości cieczy [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ], odczytywany z tablic na podstawie temperatury cieczy.

Liczba  $R_e$  jest to liczba podobieństwa charakteryzująca zjawisko mechaniczne zachodzące głównie pod wpływem sił tarcia wewnętrznego, równa jest stosunkowi sił bezwładności do sił tarcia wewnętrznego występujących w badanym zjawisku, np. przepływie cieczy.

Krytyczna wartość liczby Reynoldsa dla przewodów o przekroju kołowym wynosi  $R_{ekryt} = 2320$ . Wartość ta rozgranicza przepływ laminarny od turbulentnego:

- $R_e < 2320$  – ruch laminarny,
- $R_e > 2320$  – ruch burzliwy.

Przejście ruchu laminarnego w turbulentny następuje wskutek utraty stateczności ruchu laminarnego. Zaburzenia będące przyczyną pulsacji występują zawsze w czasie przepływu. Zaburzenia i utrata stateczności następuje w obszarach przyściennych, skąd rozprzestrzeniają się na cały obszar przepływu powodując jego przekształcanie w ruch burzliwy [5].

## 4. PRZEPLÝW PYŁU WĘGLOWEGO

---

Zjawisko transportu pneumatycznego pyłu węglowego w pyłoprzewodach jest zjawiskiem trudnym i złożonym do opisanie. Jednakże w literaturze spotyka się wiele analitycznych opisów tego zjawiska, m.in. klasyczne modele obliczeniowe Wezera, Uspienskiego, Bartha, Welschofa, Papaia, Graczyka, Teisseyre'a czy Piątkiewicza [1]. Modele te były tworzone przy założeniu wielu uproszczeń w opisie bardzo złożonego zjawiska, jakim jest przepływ medium dwufazowego. Transport pyłu węglowego traktowany jest jako transport mieszaniny cząstek stałych w strudze powietrza. Bardzo duże znaczenie ma utrzymanie stałej prędkości przepływu, co prowadzi do zachowania równomiernego rozkładu cząstek fazy stałej i zapobiega odkładaniu się tych cząstek na dnie pyłoprzewodu. Zwiększenie prę-

kości zapobiega odkładaniu się pyłu węglowego na dnie rurociągu czy też za kolanami, ale prowadzi do wzrostu intensywności erozji, co pociąga za sobą wzrost kosztów transportu. Należy, więc dążyć do takiej sytuacji, aby przy możliwie najmniejszych prędkościach nie pojawiało się zatkanie instalacji. Monitorowanie przepływu pod kątem wartości jego prędkości oraz profilu daje możliwość szybkiej regulacji strumieniem powietrza prowadząc do zmiany prędkości przepływu i jego profilu. Znając fizyczne podstawy ruchu, zależności między prędkością przepływu a zużyciem rurociągu i parametrami w komorze spalania, można na podstawie pomiarów wprowadzić elementy sterujące, które w odpowiedni sposób dostosują parametry gazu będącego nośnikiem cząstek pyłu węglowego. Jednakże nie tylko prędkość jest ważnym parametrem służącym do opisu zjawiska przepływu medium dwufazowego. Bardzo duże znaczenie ma koncentracja cząstek ciał stałych w pyłoprzewodzie. Wykorzystując technikę ultradźwiękową można w sposób bezinwazyjny dokonywać pomiarów rozłożenia pyłu węglowego wewnątrz rury. Informacje, które są uzyskiwane z takich pomiarów mogą służyć nie tylko do poznania zjawiska, jakim jest transport mieszaniny dwufazowej, ale mogą również być wykorzystane do procesu sterowania.

Pomiary w miejscu, gdzie przepływ może osiągać wartości krytyczne (osiadanie pyłu na dnie przewodu) pozwala na ciągłą kontrolę przepływu i na zmiany parametrów wejściowych tak, aby uzyskać optymalne wyniki.

### 3. UKŁAD POMIAROWY

---

Do badań został stworzony obiekt, który dalej będzie nazywany rurą. Przekrój poprzeczny badanego obszaru został podzielony na 256 pikseli w układzie 16 na 16 pikseli. Na zewnętrznych krawędziach rury zostały umieszczone przetworniki ultradźwiękowe, na każdej krawędzi rury umieszczonych jest 7 przetworników ultradźwiękowych, które pracują jako nadajniki i odbiorniki. Każdy nadajnik wysyła sygnały, które odbierają wszystkie czujniki odbiorcze. Pobudzenie jednego nadajnika i zebranie danych z wszystkich odbiorników, nazywa się projekcją, natomiast pełny cykl pobudzeń wszystkich nadajników ultradźwiękowych wraz z uzyskaniem danych ze wszystkich odbiorników, nazywa się skanem obiektu. Rejestrowane czasy przejścia sygnału od nadajników do odbiorników są różne ze względu na różną odległość przetworników, dodatkowo pojawiają się jeszcze różnice w opóźnieniach czasowych pochodzące od badanego środowiska wprowadzonego do badanego ośrodka [4].

Strumień pyłu węglowego nie zachowuje jednakowej koncentracji cząstek stałych na całej długości pyłoprzewodu. Za kolanami formuje się w postaci zwartej



strugi, w której jest skoncentrowane od 1/2 do 2/3 całej masy pyłu. Zjawiskiem niepożądanym, które również może mieć miejsce w przewodzie transportowym jest zablokowanie obszaru w rozdzielaczu na skutek zagęszczenia cząstek przy przepływie turbulentnym [2]. Biorąc to pod uwagę, należy tak dobrać odpowiedni stosunek ilości powietrza i podawanego paliwa aby zoptymalizować koncentrację strumienia pyłu węglowego w pyłoprzewodzie. Wykorzystując przetworniki ultradźwiękowe można zaobserwować koncentrację cząstek stałych w przekroju poprzecznym rury. Na rysunku 6a została przedstawiona koncentracja strugi wewnątrz przewodu, a na rysunku 6.b osiadanie pyłu węglowego na dnie rurociągu. W obu przypadkach został przedstawiony w dwóch rzutach obiekt rzeczywisty oraz jego odwzorowanie uzyskane z pomiarów w zależności od liczby wartości osobliwych kolejno dla 25, 35 i 45 wartości osobliwych. Zmiany wartości osobliwych od najmniejszej do największej w odwzorowaniu obrazu obiektu powodują pojawienie się obiektu i jego zanikanie.

## 4. PODSUMOWANIE

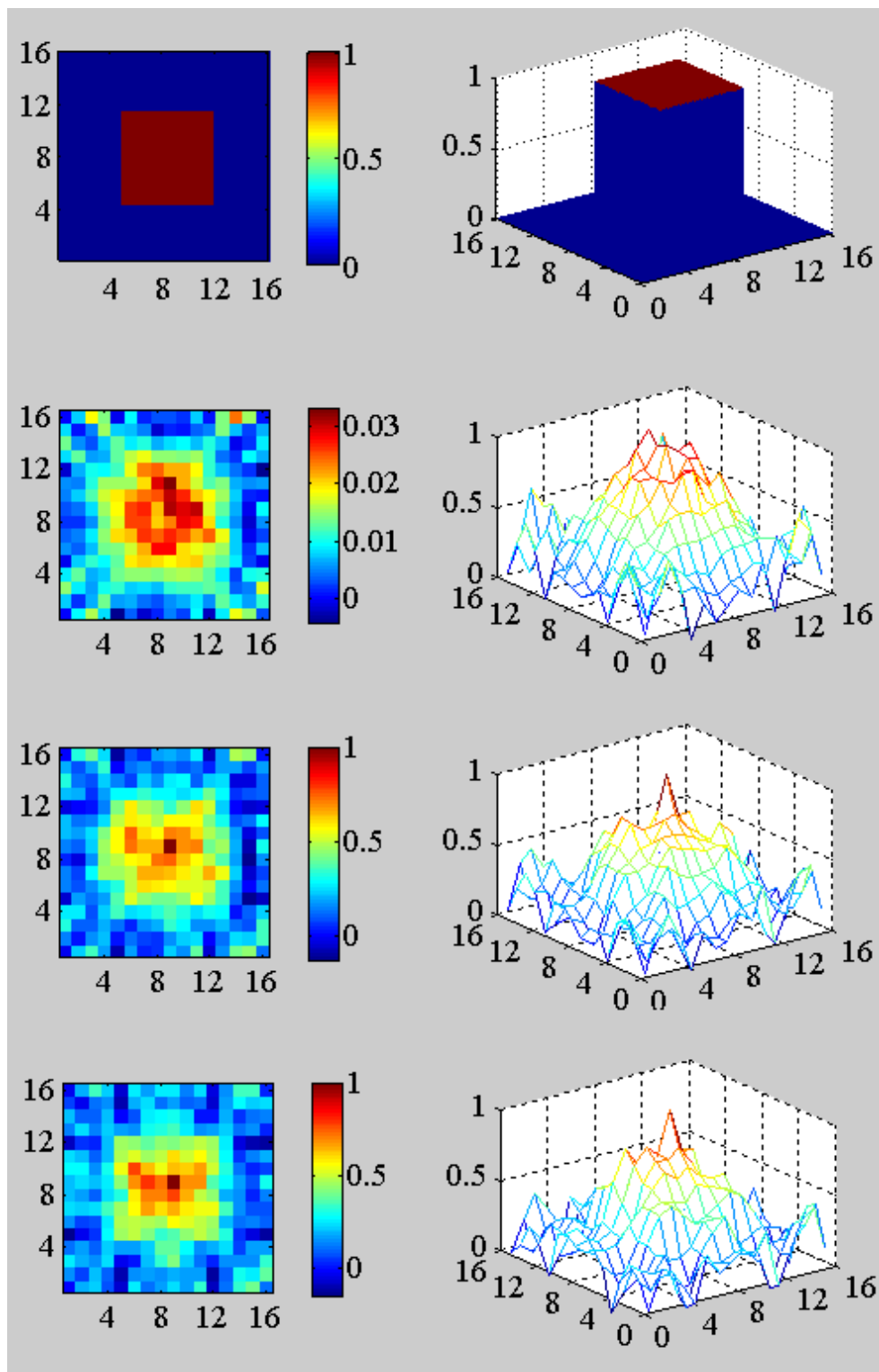
---

Koncentracja pyłu węglowego w pyłoprzewodzie w znaczny sposób decyduje o charakterze przepływu i o pracy kotła energetycznego. Cząsteczki stałe w ruchu turbulentnym zmieniają swoje położenie w przekroju poprzecznym rury w zależności od przebiegu pyłoprzewodu. Poznanie rozkładu cząsteczek wewnątrz rury pozwala na zmniejszenie a nawet całkowite wyeliminowanie negatywnych skutków wywołanych przepływem turbulentnym wewnątrz pyłoprzewodu.

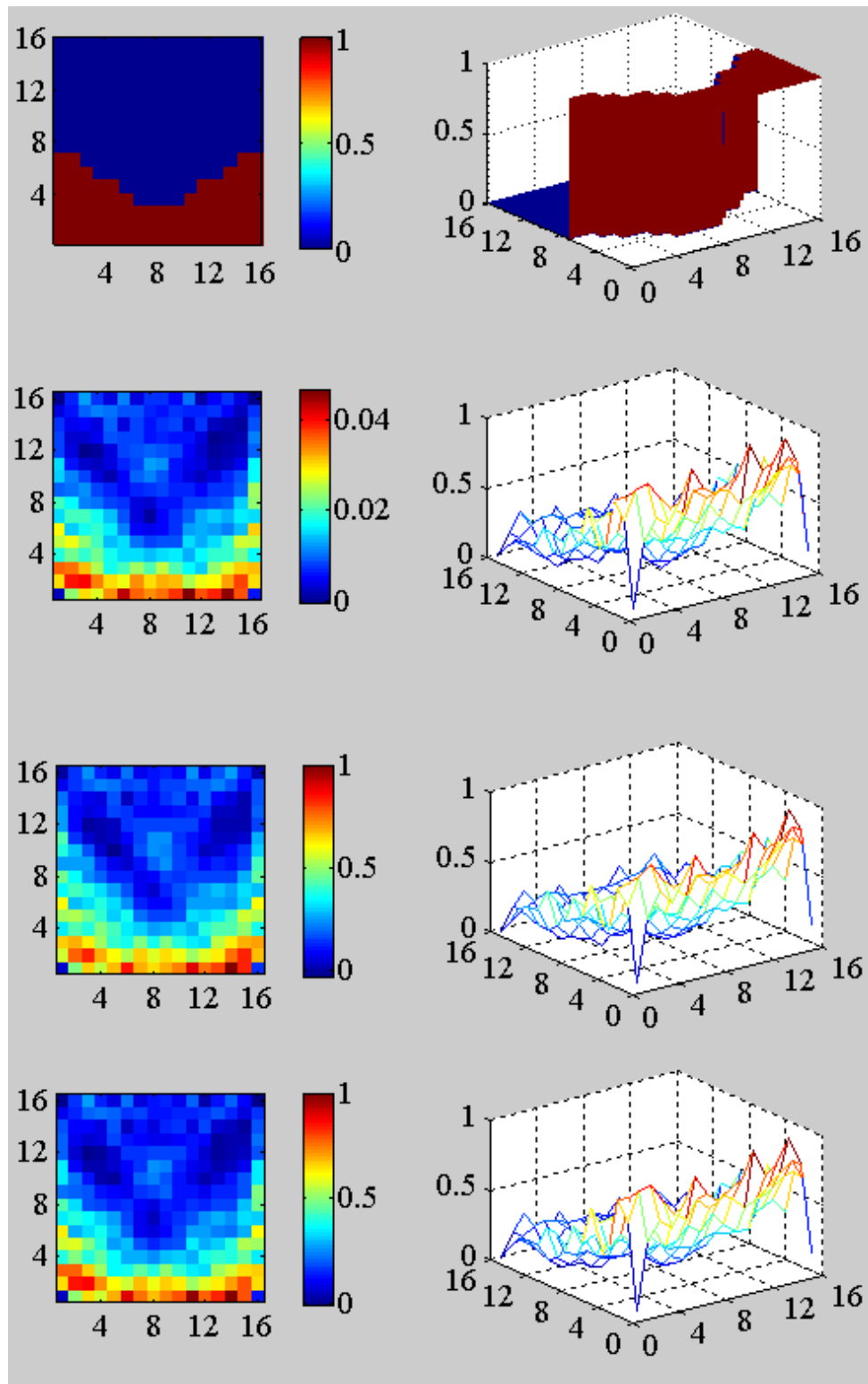
## LITERATURA

1. Endress + Hauser, Flow Handbook, 2nd Edition 2004, completely revised.
2. Mazur M., Teisseyre M.: Pomiar koncentracji i strumienia masy pyłu węglowego podawanego do palników kotłów energetycznych, Rok 1999, Rocznik 1, Nr 39 PAN – Katowice PL ISSN 0208-9386.
3. Mazur M., Teisseyre M.: Zasilanie palników pyłowych kotła energetycznego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008
4. Polkowski K., Sikora J., Wojcik W.: Monitorowanie przepływu pyłu węglowego w energetycznych przewodach rurowych instalacji energetycznych z wykorzystaniem tomografii komputerowej, Przegląd Elektrotechniczny w druku.
5. Pronobis M.: Modernizacja kotłów energetycznych, WNT 2002.
6. Żelazo A.: Transport pneumatyczny surowców sypkich, Rynek Chemiczny Nr 2/2005.

*Rękopis dostarczono dnia 19.10.2010 r.*



a) koncentracja strugi w środku przewodu, obiekt rzeczywisty i odwzorowanie uzyskane z badań, w zależności od liczby wartości osobliwych kolejno dla 25, 35 i 45 wartości osobliwych



b) koncentracja strugi na dnie przewodu, obiekt rzeczywisty i odwzorowanie uzyskane z badań, w zależności od liczby wartości osobliwych kolejno dla 25, 35 i 45 wartości osobliwych

Rys. 6. Skan obiektu w badanym obszarze

ANALYSIS OF PARTICULATE  
FLOW PARAMETERS  
ON THE EXAMPLE OF COAL DUST

Katarzyna SOBAŃSKA

**ABSTRACT** *This paper presents the main parameters of the flow of pulverized coal in pulverised coal duct. The right balance between pulverized coal and air determine not only the two-phase mixture flow but also the characteristics of combustion process in the power boiler. The flow rate and particle concentration of the coal dust has a significant impact on the power boiler efficiency.*

---

**Mgr inż. Katarzyna SOBAŃSKA** ukończyła studia na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej w 2004r. W 2005 roku została zatrudniona na stanowisku asystenta w Katedrze Elektroniki Politechniki Lubelskiej. Prowadzi zajęcia z sieci komputerowych, sieci IP i programowania niskopoziomowego. W działalności naukowo-badawczej Katarzyna Sobańska zajmuje się prędkością przepływu oraz parametrami określającymi charakter przepływu mieszaniny dwufazowej.