

Zbigniew BIS  
Władysław GAJEWSKI  
Waldemar MUSKAŁA

Instytut Maszyn Ciepłych  
Politechnika Częstochowska

## UNOSZENIE CZĄSTEK Z CIŚNIENIOWYCH PALENISK FLUIDYZACYJNYCH

Streszczenie. W pracy dokonano analizy teoretycznej unoszenia pyłu z ciśnieniowych palenisk fluidyzacyjnych. Na podstawie uproszczonego modelu ruchu cząstek jak również modelu spalania wyznaczono numerycznie wielkości unoszonych cząstek przy różnych ciśnieniach. Przeprowadzone badania doświadczalne pozwoliły dokonać weryfikacji przyjętego modelu.

### 1. WSTĘP

Ciśnieniowe paleniska fluidyzacyjne stanowią znaczny postęp w technice fluidalnego spalania paliw stałych w stosunku do palenisk pracujących przy ciśnieniu atmosferycznym.

Oprócz zalet spalania fluidalnego paleniska ciśnieniowe pozwalają kojarzyć pracę kotła z turbiną gazową, co stanowi zasadniczą przyczynę zainteresowania tą technologią wykorzystania paliw.

Zagadnienia unoszenia i startu niecałkowitego spalania w paleniskach są ciągle badane, a uzyskane wyniki są trudne do uogólnienia, ze względu na dużą liczbę parametrów mających wpływ na efekt końcowy. Jeszcze trudniejszym problemem jest badanie tych zagadnień w przypadku spalania paliw w paleniskach ciśnieniowych. Zmiana ciśnienia w palenisku jest bowiem realizowana łącznie ze zmianą innych podstawowych parametrów, głównie gęstości i lepkości, które mają wpływ na wartość prędkości fluidyzacji decydującej o charakterze zmian strumienia materiału unoszonego z warstwy jak również o zawartości części palnych unoszonych

w tym strumieniu.

W prowadzonych badaniach modelowych uwzględniających wpływ zmian ciśnienia na wielkość i charakter strumienia unoszonego z warstwy [ 1 ] [ 2 ], [ 3 ] otrzymane wyniki są niejednoznaczne i zależne od sposobu realizacji zmian ciśnienia w kolumnie fluidyzacyjnej. Zmiane ciśnienia w kolumnie można realizować zasadniczo trzema sposobami:

- zachowując niezmienną prędkość rzeczywista gazu w kolumnie ( $U_g = \text{idem}$ ).
- zachowując niezmienny stopień ekspansji warstwy ( $\frac{H}{H_0} = \text{idem}$ ),
- zachowując niezmienną wartość masowego strumienia gazu doprowadzonego do fluidyzacji ( $\dot{m}_g = \text{idem}$ ).

Porównywanie wyników badań może być prowadzone w przypadku zachowania takich samych warunków zmian ciśnienia w kolumnie.

Pierwsze dwa sposoby związane są z zachowaniem podobnych warunków przepływowych przy zmianie ciśnienia w kolumnie.

W przypadku prowadzenia procesu spalania węgla w warstwie zmiana ciśnienia w kolumnie prowadzona według pierwszych dwu warunków wiąże się ze zmianą obciążeń cieplnych, a więc ze zmianą warunków spalania i wymiany ciepła w warstwie.

W takim przypadku wydaje się być celowe przeprowadzenie badań przy różnych ciśnieniach z zachowaniem niezmiennych warunków spalania, tzn. udziałów powietrza i paliwa (niezmienna wartość współczynnika nadmiaru powietrza) oraz niezmiennych warunków temperaturowych, co związane jest z warunkiem niezmienności strumienia ciepła odbieranego z warstwy, jak również z warunkiem niezmienności cieplnego obciążenia komory paleniskowej.

Badaniom prowadzonym w takich warunkach poświęcono niniejszą pracę.

## 2. MODEL UNOSZENIA CZASTEK Z WARSTWY

W celu matematycznego opisu unoszenia czastek z warstwy fluidalnej wprowadzono fizyczny model wypalania czastek w warstwie oraz ruchu czastek w strefie nadwarstwowej z następującymi założeniami upraszczającymi:

- warstwa fluidalna złożona jest z kulistych czastek o średniej wielkości czastki  $d_p$ , odpowiadającej średniej wielkości czastek paliwa wprowadzanego do warstwy,
- z warstwy unoszone są wszystkie czastki, które osiągnęły w danych warunkach wielkość średnicy równej średnicy krytycznej, która w danych warunkach musi zostać uniesiona z warstwy,
- czastki zmniejszają swą średnicę równomiernie wypalając się (tzn. części palne znajdują się w zewnętrznej powłoce kulistej

cząstki), cząstki wypalają się według modelu kurczącego się rdzenia.

- o unoszeniu cząstek z warstwy decydują względy hydrodynamiczne oraz osiągnięta średnica cząstek na skutek ich wypalania.
- wszystkie zmiany wielkości zachodzą jedynie w kierunku wysokości kolumny (współrzędna z).

Do opisu hydrodynamiki ruchu cząstek w strefie nadwarstwowej zastosowano następujący układ równań:

- równanie ciągłości fazy gazowej:

$$\frac{d}{dz} (\epsilon \cdot \rho_g \cdot u_g) = 0, \quad (1)$$

- równanie ciągłości fazy stałej:

$$\frac{d}{dz} [(1 - \epsilon) \cdot \rho_s \cdot v_s] = 0 \quad (2)$$

- równanie impulsów dla fazy gazowej i stałej:

$$(1 - \epsilon) \cdot \rho_s \cdot v_s \frac{d v_s}{dz} + \epsilon \cdot \rho_g \cdot \frac{d u_g}{dz} + g [\rho_s (1 - \epsilon) - \rho_g \cdot \epsilon] = - \left[ \frac{d p}{dz} + f_w \right], \quad (3)$$

- równanie energii dla gazu i materiału sypkiego:

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dz} (u_g - v_s)^2 + \frac{3}{4} C_D \cdot \left( \frac{\rho_g}{\rho_s} \right) \frac{(u_g - v_s)^2}{d_s} \cdot \epsilon^{-2,00} = g, \quad (4)$$

gdzie:

- z - współrzędna wzdłuż wysokości kolumny,
- $\epsilon$  - porowatość warstwy,
- $\rho_g$  - gęstość gazu,
- $\rho_s$  - gęstość materiału warstwy,
- $u_g$  - prędkość gazu,
- $v_s$  - prędkość cząstek stałych warstwy,
- p - ciśnienie w kolumnie,
- $f_w$  - współczynnik oporu cząstek i gazu (strata ciśnienia na skutek oporu),

$$f_w = 4 \cdot (f_g + f_s) / D, \quad (5)$$

gdzie:

- $f_g$  - współczynnik strat ciśnienia spowodowany tarciem gazu o ścianki aparatu

według [ 4 ]

$$f_g = 3.922 \cdot 10^{-6} \cdot u_g^{-1.798} \quad (6)$$

$f_g$  - współczynnik strat ciśnienia spowodowany tarciami cząstek o ścianki aparatu według [ 4 ]

$$f_s = \frac{1}{2} \cdot \tau_w \cdot \rho_g \cdot (1 - \epsilon) \cdot v_w^2, \quad (7)$$

$$\tau_w = 0.206 \cdot v_w^{-1.22}, \quad (7a)$$

D - średnica aparatu (kolumny fluidalnej),

$C_D$  - współczynnik oporu aerodynamicznego cząstki omywanej gazem

dla  $Re < 1000$

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 \cdot Re^{0.687}), \quad (8)$$

dla  $Re \geq 1000$

$$C_D = 0.44$$

Re - liczba Reynoldsa wg równania

$$Re = \frac{\epsilon \cdot \rho_g \cdot d_w (u_g - v_w)}{\eta_g} \quad (9)$$

Prowadząc analizę zależności  $\frac{d\epsilon}{dz} = 0$  przy założeniu, że strumień cząstek transportowanych posiada porowatość bliska jedności ( $\epsilon = 0.9999$ ), wyznaczono wartości średnicy krytycznej cząstek unoszonych z warstwy.

W modelu spalania pojedynczych cząstek założono, że ubytek masy wypalającej się cząstki jest równomierny w całej jej objętości, a więc można założyć, że:

$$\frac{\dot{m}_u}{\dot{m}_z} = \left( \frac{d_{kr}}{d_w} \right)^3, \quad (10)$$

gdzie:

$d_{kr}$  - krytyczna wielkość średnic cząstek kulistych, dla których warunki hydrodynamiczne panujące w warstwie powodują jej unoszenie,

$d_w$  - średnica cząstek węgla wprowadzonych do warstwy,

$\dot{m}_u$  - strumień cząstek wynoszonych z warstwy,

$\dot{m}_z$  - strumień paliwa wprowadzany do warstwy.

Numeryczna analiza zagadnienia polegała na wyznaczeniu takiej średnicy cząstek unoszonych z warstwy, by model odpowiadał wynikom badań.

Dalsza analiza polega na prześledzeniu wpływu ciśnienia oraz wielkości cząstek na względny strumień unoszonego z warstwy materiału.

### 3. WYNIKI BADAŃ ORAZ ICH ANALIZA

Badania doświadczalne przeprowadzono w instalacji laboratoryjnej o mocy cieplnej 8 - 10 kW.

Palenisko stanowi rura kwarcowa o średnicy wewnętrznej 0,096 m i całkowitej wysokości czynnej  $H = 0,34$  m.

Wysokość warstwy w stanie spoczynku wynosiła  $H_0 = 0,1$  m.

Paliwo do paleniska dozowano z dwu dozowników talerzowych, których wylot znajdował się na poziomie nieruchomej warstwy (0,1 m nad dnem sitowym).

Spaliny opuszczające kolektor reaktora przechodziły do cyklonu, pozostawiając tam uniesiony z warstwy materiał oraz poprzez filtr po uprzednim ich schłodzeniu. Uniesiony w czasie badań procesu materiał zebrany w cyklonach i filtrach ważono i oznaczano w nim zawartość części palnych. Masę uniesionego z warstwy materiału pobierano każdorazowo w ciągu 600 s trwania procesu w warunkach ustalonych. Pomiary przeprowadzono przy niezmiennych następujących parametrach:

- mocy cieplnej paleniska (strumień dostarczonego powietrza i paliwa),
- temperatury warstwy,
- stężeniu  $O_2$  w spalinach (współczynnika nadmiaru powietrza),
- wysokości warstwy.

Parametrami zmiennymi było ciśnienie bezwzględne w kolumnie zmieniane w zakresie 100 - 600 kPa.

Badania przeprowadzono także stosując cztery wąskie frakcje węgla jako paliwa, a mianowicie 0,15 - 0,385; 0,385 - 0,5; 0,5 - 0,75; 0,75 - 1,02 mm oraz spreparowano mieszaninę tych frakcji w równym stosunku wagowym (1 : 1 : 1 : 1).

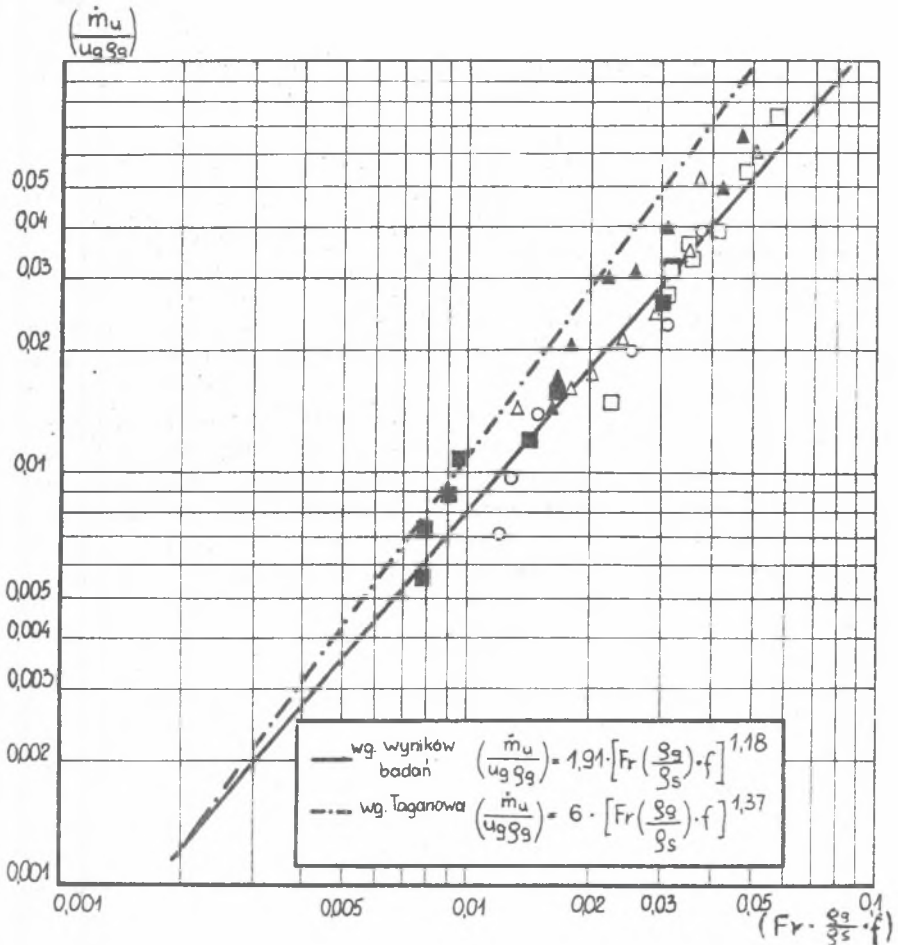
Wszystkie badania przeprowadzono utrzymując temperaturę na poziomie 1123 K, co można było osiągnąć przy zachowaniu obciążenia cieplnego przekroju poprzecznego kolumny fludyzacyjnej  $1,1 \text{ MW/m}^2$ .

Strumienie paliwa i powietrza korygowano w czasie badań utrzymując zawartość  $[O_2]$  w spalinach na poziomie 4,3 %, co odpowiadało współczynniki nadmiaru powietrza  $\lambda \approx 1,25$ .

Badania wykonano na węglu o składzie chemicznym: c = 60,2% ; o = 7,5% ;

$n = 1.0\%$  ;  $h = 4.5$  ;  $w = 4.6\%$  ;  $p = 18\%$  ;  $s = 4.2\%$  .

Porównanie wyników badań uzyskanych z doświadczenia z wynikami innych autorów dla palenisk pracujących pod ciśnieniem atmosferycznym przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Porównanie wyników doświadczeń z danymi literatutowymi uzyskanymi dla kolumn pracujących przy ciśnieniu atmosferycznym

Fig. 1. Comparison of experimental data with bibliographical information for reactors operating at atmospheric pressure

W zaproponowanym modelu wielkością, która nie zamykała w jednoznaczny sposób układu równań, jest wielkość średnicy cząstek, która przyjęto wyznaczać jako krytyczną średnicę cząstek, odpowiadająca prędkości unoszenia (transportu) z warstwy w warunkach panujących w czasie badań. Wielkość tę wyznaczono w oparciu o przyjęty model wypalania się cząstek do średnicy krytycznej (model kurczącego się rdzenia)

Jak wynika z obliczeń numerycznych wielkości cząstek unoszonych z warstwy ze zmianą ciśnienia, dla założonej temperatury procesu (1123 K) są mniejsze aniżeli wynika to z obliczeń skorygowanych wynikami badań. Porównanie wielkości cząstek (obliczonej teoretycznie wg przyjętego modelu) z wartością wielkości skorygowanych wynikami doświadczeń przedstawiono na rys.2.

Analiza zmian wielkości cząstek ze zmianą ciśnienia wykazuje, że przyjęty model wypalania oraz unoszenia cząstek z warstwy nie odpowiada ilościowo wynikom doświadczeń, wg których większe aniżeli obliczeniowe wielkości cząstek są wynoszone z warstwy. Ma to swe uzasadnienie w przyjętych założeniach upraszczających. Jak wynika z analizy doświadczeń, model wypalania cząstek zgodny z zasadą kurczącego się rdzenia jest słuszny w przypadku najdrobniejszych cząstek, natomiast ilościowo odbiega od rzeczywistości w przypadku spalania cząstek większych (powyżej 400  $\mu\text{m}$ ).

Jakościowo model ten opisuje problem wypalania i unoszenia cząstek poprawnie.

Nie uwzględnia jednak erozji oraz pęknięcia cząstek, jak również faktu, że części palne i balast są rozłożone w palcejszej się cząstce nierównomiernie.

Na rys.3 przedstawiono wyniki badań w konfrontacji z wynikami numerycznej analizy problemu z uwzględnieniem skorygowanych wielkości krytycznej średnicy cząstek.

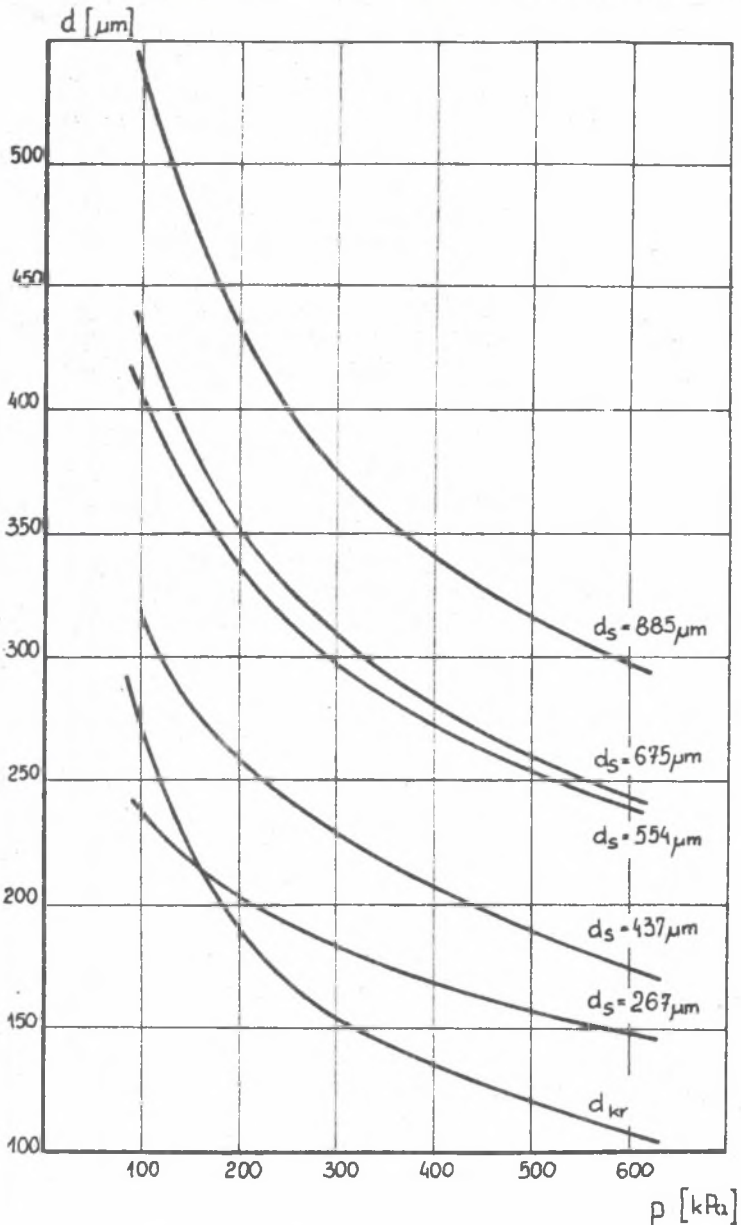
W warunkach badań korelację średnicy przeprowadzono wg empirycznych zależności:

$$d_{kr} = (0.37 + 1810 \cdot d_m) \cdot \exp(-0.276 \cdot \frac{p}{p_0}) \cdot d_{kr \text{ obl}}, \quad [\text{m}] \quad (16)$$

gdzie:

$$d_{kr \text{ obl}} = 286 \cdot 10^{-6} \exp(-0.176 \cdot \frac{p}{p_0}) \cdot \quad [\text{m}] \quad (16a)$$

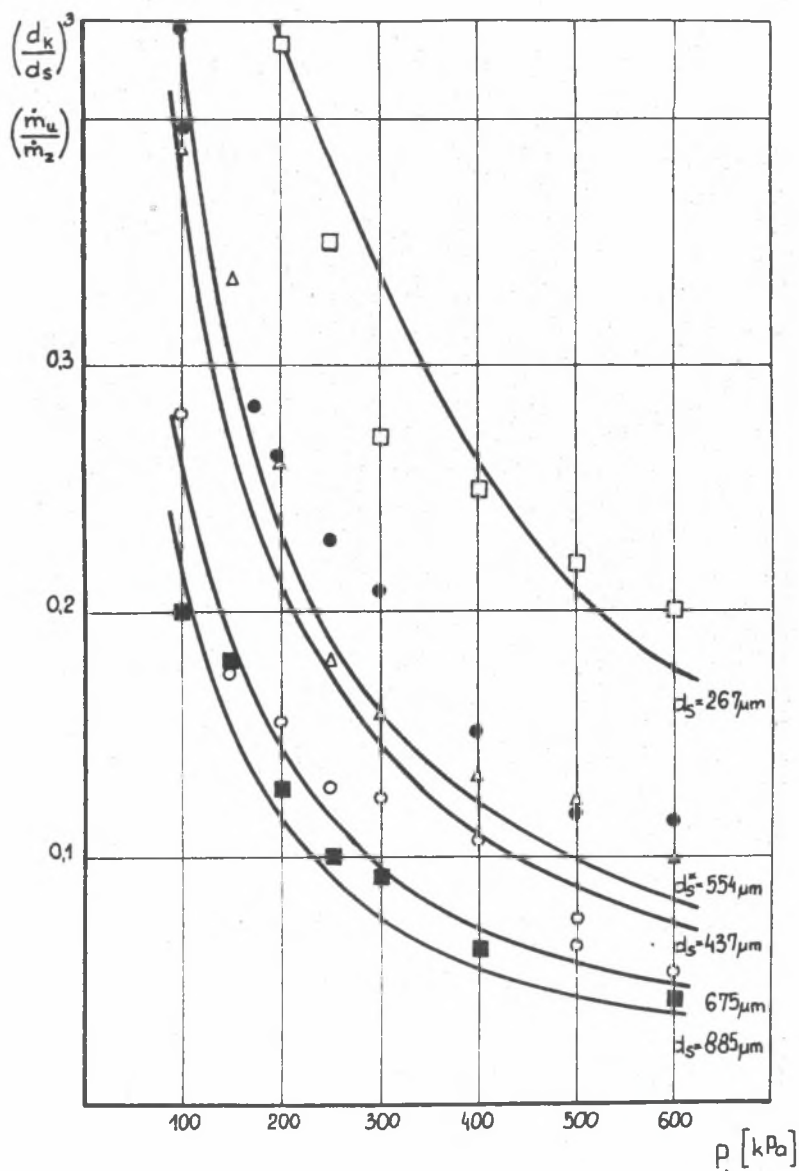
Przeprowadzona analiza numeryczna i doświadczalna procesu spalania i unoszenia cząstek z ciśnieniowych palenisk fluidyzacyjnych nie zamyka w pełni zagadnienia, lecz w znacznym stopniu uzupełnia wiedzę na ten temat i może służyć do oceny pracy palenisk fluidyzacyjnych pracujących pod ciśnieniem wyższym do atmosferycznego.



Rys. 2. Zmiana krytycznej średnicy cząstek unoszonych z warstwy w zależności od ciśnienia w kolumnie oraz wielkości cząstek paliwa zasilającego warstwę ( $d_{kr}$  - teoretyczna zmiana wielkości cząstek unoszonych ze zmianą ciśnienia)

Fig. 2. Change of critical diameter of fines elutriated from the bed versus pressure in the reactor and size of particles fed to the bed ( $d_{kr}$  - theoretical change of fine sizes elutriated with pressure change)





Rys. 3. Porównanie wyników badań z wynikami numerycznych obliczeń

Fig. 3. Comparison of experimental data with numerical calculations

## WNIOSKI

Przeprowadzona analiza zagadnienia jak również wyniki doświadczeń pozwalają sformułować następujące uogólnienia:

- Badanie palenisk fluidyzacyjnych jest celowe i porównywalne w przypadku przeprowadzania zmian ciśnienia w niezmiennych warunkach spalania (niezmienne temperatury, obciążenia cieplne).  
W takich warunkach wzrost ciśnienia w paleniskach związany jest z obniżeniem strumienia uniesionego z warstwy materiału sypkiego oraz zawartych w nim części palnych.
- Wpływ ciśnienia na strumień uniesionego materiału z warstwy w głównej mierze przejawia się w zmianie gęstości i prędkości gazu. Istnieje jednak dodatkowy wpływ ciśnienia, obniżający unos, na wielkość współczynnika oporu ziaren w warstwie, o czym świadczy porównanie wyników badań w ciśnieniowym palenisku fluidyzacyjnym z wynikami uzyskanymi w aparatach pracujących przy ciśnieniu atmosferycznym.
- Zaproponowany model unoszenia czastek z warstwy oraz model wypalania ziaren w warstwie winien być korygowany wynikami doświadczeń. W warunkach przeprowadzonych badań w niniejszej pracy podano równania korygujące wielkość krytycznej średnicy czastek unoszonych z warstwy.

## LITERATURA

- [1] ALTSZULIER W.S., SIECZIENOW G.P.: "Processy w kipiarszczim słoje pod dawlieniem". Moskwa 1963 .
- [2] DONSI G., MASSIMILLA L., MICCIO M.: "Carbon fines production and elutration from the bed of a fluidized Coal combustor", Combustion and Fame Nr 41, 1981 .
- [3] KUNI D., LEVEBSPIEL O.: "Fluidization Engineering" John Willey, New York 1969 .
- [4] CAPES C.E., NAKAMURA K.: "Vertical pneumatic conveying on experimental study with particles in the intermediate and turbulent flow regimes", The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol.51,1973.

## УНОС ЧАСТИЦ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА ИЗ ТОПОК С КИПЯЩИМ СЛОЕМ РАБОТАЮЩИХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

### Резюме

В работе представлено теоретический анализ и результаты экспериментальных исследований топок с кипящим слоем работающих под давлением.

Топки с кипящим слоем работающие под давлением являются новейшим шагом в технике псевдоожиженного сжигания твердого топлива в сравнении с топками работающими под атмосферном давлением. Кроме положительных черт псевдоожиженного сжигания под атмосферном давлением топки с КС под повышенном давлением могут работать с газовой турбиной, что является их основной чертой в технологии использования топлива.

Разработанный теоретический анализ на основании уравнений гидродинамики потока газа и частиц позволяет определять зависимость критического диаметра уносимых частиц а также их относительного потока от давления в колонке, а также средней скорости газа. На основании принятых упрощений проведено численный анализ уравнений моделирующих принятую систему.

Проведенные экспериментальные исследования, а также их численная проверка позволила сформулировать регрессионное уравнение приведенного диаметра уносимых частиц от давления в установке. Уравнение является справедливым в области давлений до 600 кПа. Проведенный теоретический анализ и экспериментальная проверка является дальнейшим шагом в понятии гидродинамики топок с КС работающих под давлением.

## ELUTRIATION OF SOLIDS FROM PRESSURISED FLUIDIZED BED COMBUSTORS

### Summary

Theoretical analysis and experimental results on pressurised fluidized bed combustors (PFBC) are presented. PFBC represents a more advanced technique of coal combustion in comparison with the atmospheric pressurised fluidized bed (AFBC). PFBC retains all advantages exhibited by AFBC and has the potential of being incorporated into combined gas/steam cycles for power generation. Such schemes offer high efficiency of coal utilization.

The theoretical analysis presented in this paper is based on the equations of gas and solids hydrodynamics of two phase flow. It permits to describe the distributions of the diameter of particles elutriated from fluidized bed and their relative particle flux as the functions of pressure in the column and average velocity of fluidized gas. Based on a simplified

assumption the numerical analysis of the system of equations modeling this problem can be presented. Experimental investigations and their analysis with numerical calculations permits to formulate the regression equation describing the corrected dependence of diameter elutriated particles from a fluidized bed as a function of pressure in the column. Presented equation can be used for the values of pressure in the columns up to 600 kPa.

The theoretical analysis and the experimental verification of problem presented in this paper give a significant advance in hydrodynamics of PFBC.