

Jan CZEPELAK, Kazimierz MROCZEK

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Politechnika Śląska, Gliwice

Damian TOMAS

Fabryka Kotłów RAFAKO S.A., Racibórz

BADANIA MODELLOWE SEPARATORÓW PYŁU DO PALNIKÓW NISKOEMISYJNYCH

Streszczenie. W pracy przeanalizowano warunki fizycznego modelowania rozdziału (separacji) pyłu, a na ich podstawie określono cechy geometryczne (skalę) i parametry solgazu w modelu urządzenia rozdzielającego. Opisano instalację badawczą i podano metodykę pomiarów. Przedstawiono wyniki pomiarów wpływu kąta ustawienia łopatek żaluzji i parametrów solgazu na rozdział pyłu i gazu w rozdzielaczu trójnikowym oraz określono optymalną nastawę żaluzji. Dla rozdzielacza kolanowego przedstawiono wyniki pomiarów wpływu promienia gięcia i usytuowania przegrody oraz parametrów solgazu na przebieg procesu separacji.

THE MODEL INVESTIGATION OF PULVERIZED COAL SEPARATORS FOR LOW NO_x BURNERS

Summary. The paper presents the conditions of the physical modelling of the pulverized coal separation. The test stand and methods of investigation have been described. The influence of the configuration of the blades as well as parameters of the two-phase mixture on coal and air separation has been shown. For the elbow-type separator the influence of the bend angle and partition positioning for various flow parameters has been described.

MODELLUNTERSUCHUNGEN DER KOHLENSTAUBVERTEILER FÜR DIE LOW NO_x-BRENNER

Zusammenfassung. Die Bedingungen der physikalischen Modellierung der Kohlenstaubverteilung wurden analysiert. Auf Grund der Versuche die Parameter der Mischung im Modell des Verteilers wurden

ermittelt. Der Prüfstand und die Untersuchungsmethode wurden beschrieben. Die Resultate der Messungen des Einflusses des Neigungswinkels der Schaufeln und der Parameter der Mischung im T-Verteiler wurden dargestellt. Für den Bogenverteiler ist der Einfluß von Biegenradius und der Blendelage als auch der Mischungsparameter dargestellt worden.

1. Wprowadzenie

W technice kotłowej stosowane są różne metody niskoemisyjnego spalania pyłu węglowego, prowadzące do ograniczenia powstawania tlenków azotu. Jedną z nich jest technologia organizacji spalania z wykorzystaniem strumienia solgazu o wysokiej i niskiej koncentracji pyłu. Jako wyjściowe rozdziały przyjmuje się dla gazu 50/50% natomiast dla pyłu ok. 70/30%. W celu rozdzielania strumienia solgazu na dwie strugi mieszaniny, bogatą i ubogą w pył, mają zastosowanie różnej konstrukcji urządzenia rozdzielające (separujące).

Rozdział mieszaniny pyłowo-powietrznej można realizować na kilka sposobów. Pierwszy polega na zabudowaniu urządzeń rozdzielających bezpośrednio przed palnikami, drugi na wykorzystaniu separacyjnego działania odsiewacza młynowego, jeszcze inny polega na organizacji rozdziału w samym palniku. Przy rozdziale strumienia bezpośrednio przed palnikami jako elementy separujące stosowane są asymetryczne zwężki (w przewodzie poziomym), kolana (w miejscu łączenia rurociągu pionowego z poziomym lub poziomego z pionowym oraz trójniki z żaluzjami (w przewodzie pionowym) itp.

Do badań wytypowano trójnik z wbudowaną żaluzją oraz kolano wraz z poziomą prostką, w której zainstalowano przegrodę w miejscu przejścia rurociągu pionowego w poziomy. Celem badań było określenie wpływu wybranych cech geometrycznych danej konstrukcji rozdzielacza (kąta ustawienia żaluzji, promienia gięcia kolana i usytuowania przegrody w prostce), natężenia przepływu (prędkości gazu) oraz koncentracji i granulacji pyłu na proces rozdziału pyłu i gazu.

Badania wykonano w ramach współpracy z przemysłem. Projekt i modele rozdzielaczy trójnikowego i kolanowego opracowano w RAFAKO.

W pracy przeanalizowano warunki fizycznego modelowania rozdziału (separacji) pyłu, a na ich podstawie określono cechy geometryczne (skalę) i parametry solgazu w modelu urządzenia rozdzielającego. Opisano instalację badawczą i podano metodykę pomiarów. Wykonano pomiary wpływu kąta ustawienia łopatek żaluzji i parametrów solgazu na rozdział pyłu i gazu rozdzielacza trójnikowego. Na tej podstawie określono optymalną nastawę żaluzji. Dla rozdzielacza kolanowego przeprowadzono pomiary wpływu promienia gięcia i usytuowania przegrody oraz parametrów solgazu na przebieg procesu separacji.

Wyniki opracowano w postaci wykresów. Przeprowadzono ich analizę i podano wnioski.

2. Założenia do badań

2.1. Modelowanie przepływu mieszanin dwuskładnikowych

W rozważaniach zjawisk w przepływach dwuskładnikowych zwykle wychodzi się z założeń ważnych jedynie dla czynników jednorodnych. Z tego powodu analizę teoretyczną przeprowadza się dla prostych przypadków przepływów. Dla urządzeń bardziej złożonych są konieczne bardzo rozbudowane modele matematyczne lub badania eksperymentalne. W większości przypadków muszą to być badania modelowe, ponieważ badania na obiekcie rzeczywistym są kosztowne i nie dają pełnych możliwości zmian cech konstrukcyjnych urządzenia, jak również jego parametrów pracy.

Podobieństwo zjawisk fizycznych w modelu i obiekcie zostanie zachowane wówczas, kiedy zostaną zachowane stosownie kryteria podobieństwa i warunki jednoznaczności [5]. Warunki jednoznaczności obejmują podobieństwo geometryczne, własności materiału ścianek kanałów i solidusu (liczba kształtu ϕ i polidispersji pyłu n) itp.

Z ogólnego równania ruchu cząstek pyłu w strumieniu gazu nośnego wynika, że pełne podobieństwo przepływu w geometrycznie podobnym modelu urządzenia rzeczywistego zachodzi wówczas, gdy zachowane są kryteria Frouda (Fr), uogólniona liczba Stokesa (StK) i liczba Eulera (Eu), określająca samomodelujący przepływ gazu transportującego.

Ogólna liczba Stokesa ma postać:

$$StK = \frac{\rho_p w^k x^{k+1}}{c_o \eta^k l \rho^{1-k}} = idem, \quad k = idem \quad (2.1)$$

Wykładnik potęgowy k w wyrażeniu na współczynnik oporu cząstki ψ ,

$$\psi = \frac{c_o}{Re_x^k}, \quad Re_x = \frac{\rho(w-c)x}{\eta}, \quad c_o - stała, \quad (2.2)$$

przyjmuje wartość od 0 do 1 w zależności od charakteru opływu cząstki. Dla laminarnego opływu cząstki $k = 1$ i wtedy kryterium StK przybiera postać St , natomiast dla burzliwego ($k = 0$) postać K :

$$St = \frac{\rho_p w x^2}{l \eta}, \quad K = \frac{\rho_p x}{l \rho} \quad (2.3)$$

Oprócz wymienionych warunków należy utrzymać koncentrację pyłu w gazie (Y), stosunki prędkości i gęstości pyłu do gazu (c/w i ρ_p/ρ) w modelu takie same, jak w obiekcie przemysłowym.

Spełnienie wszystkich wymienionych kryteriów podobieństwa w modelu urządzenia, w którym przepływa mieszanina pyłowo-gazowa, nie jest możliwe z uwagi na ich sprzeczność. Podawany do palników kotłowych pył, w podstawowej swojej masie, zawiera cząstki drobne ($x < 100 \mu\text{m}$), dla których liczba Re_x w przepływie ustalonym nie przekracza wartości 1 (3). Przy modelowaniu przepływu w odpylaczach cyklonowych czy żaluzjowych [6], a więc urządzeniach o zbliżonym mechanizmie działania do rozdzielacza przedpalnikowego, stosowano kryteria podobieństwa Fr , St i Eu . Bliższa analiza zjawiska wraz z konkretnymi uwarunkowaniami technicznymi modelowania (pkt. 2.2) pozwoliły na uściślenie warunków badań.

2.2. Dobór parametrów modelu

W założeniach do realizacji badań przyjęto wykorzystanie istniejącego stanowiska młynowego [1] po jego odpowiedniej adaptacji (zmiana konfiguracji przewodów, modernizacja urządzenia do poboru próbek i układu odpylania – pkt. 3.1).

Na podstawie dostępnych badań odsiewaczy i rozdzielaczy [3], urządzeń o podobnym mechanizmie działania jak proponowany rozdzielacz, samomodelujący przepływ gazu zachodzi już przy $Re > 40\ 000$. Skala modelu rozdzielacza została dostosowana do wielkości istniejącej instalacji (min. części przewodów pyłowych) po sprawdzeniu wartości Re dla dolnej wartości prędkości gazu w modelu. Dokładną graniczną wartość Re , przy której Eu nie ulega zmianie, wyznaczono w badaniach wstępnych.

Gazem nośnym w instalacji modelowej jest mieszanina powietrza i spalin (ok. 10%) o temperaturze takiej samej jak w obiekcie. Skład gazu jest praktycznie zbliżony do powietrza.

Jako materiału cząstek pyłu modelowego użyto węgla kamiennego o właściwościach (stan analityczny):

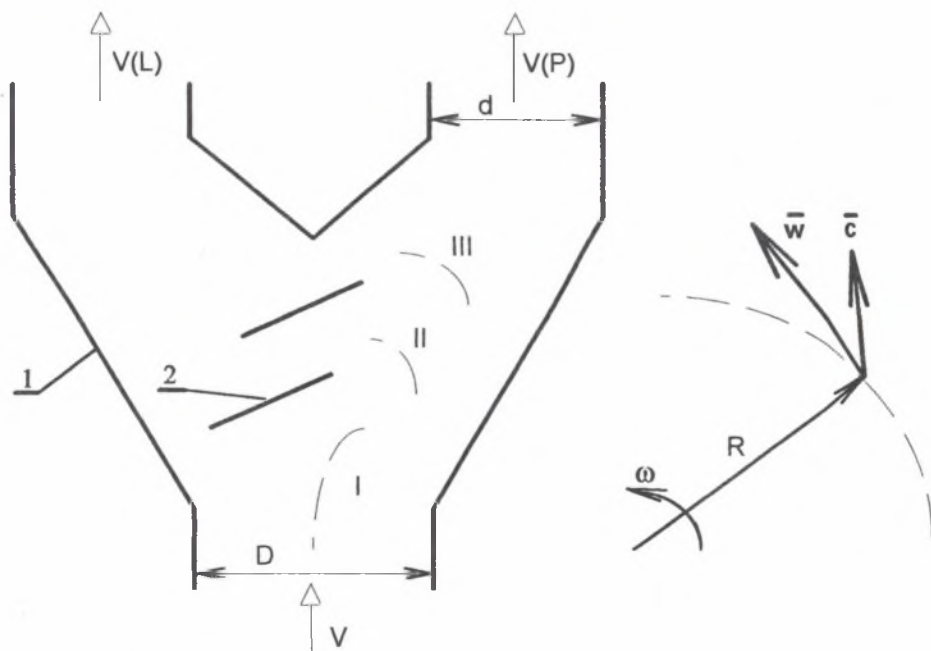
$$W^a = 2,4\%; \quad A^a = 24,1\%; \quad S^a = 1,1\%; \quad Q^{a_i} = 23,8 \text{ MJ/kg}; \quad \rho_w = 810 \text{ kg/m}^3$$

Ustalenie gęstości pyłu ogranicza wprawdzie możliwość szerszego modelowania zjawiska, jednak właściwości pyłu modelowego będą podobne do stosowanego w obiekcie. Z analizy równania ruchu pojedynczej cząstki pyłu pod działaniem sił oporu aerodynamicznego, ciężkości i bezwładności [2] wynika,

że na zachowanie się cząstki w niejednorodnym polu prędkości decydujący wpływ ma jej rozmiar x i kształt ϕ , a nie gęstość ρ_p . Mając to na uwadze, przy wyborze pyłu należy kierować się stosunkiem średnic x/x_0 (indeks „0” dotyczy obiektu) i liczbą kształtu, a więc wybierać pył z tego samego węgla i mielonego w młynach o tym samym mechanizmie działania.

Ogólnie rozdzielacz (w formie trójkąta lub kolana) jest urządzeniem, które ma za zadanie rozdzielić strumień solgazu na dwie strugi o znacznie różniącej się koncentracji pyłu. Założono równy rozdział gazu, natomiast udział pyłu w jednym przewodzie powinien być ok. dwa razy większy niż w drugim. Oprócz tego granulacja pyłu w przewodzie o niskiej koncentracji powinna być drobniejsza. Powyższe wymagania starano się zrealizować przy wykorzystaniu separacyjnego charakteru działania żaluzji zabudowanej w trójkącie (rys. 1) oraz kolana i odcinka prostki z odpowiednio usytuowaną przegrodą (rys. 2). Cechy geometryczne rozdzielacza trójkątkowego i średni przebieg trajektorii gazu przedstawiono na poniższym schemacie.

W czasie przepływu przez rozdzielacz strumień solgazu wstępnie jest odchylony w prawo (strefa I), a następnie kolejno jego pewne części zmieniają



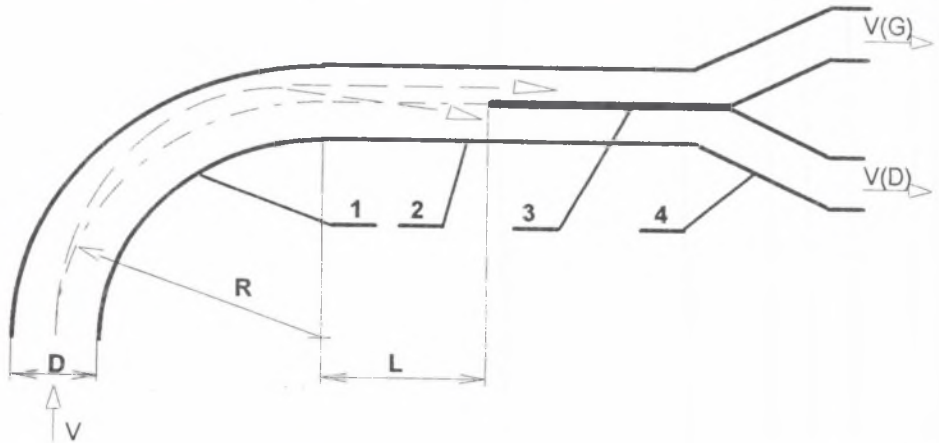
Rys. 1. Schemat przepływu solgazu przez rozdzielacz trójkątkowy: 1 – trójkąt, 2 – łopatką żaluzji, $\bar{w} = \omega \times R$ – prędkość gazu, \bar{c} – prędkość cząstek pyłu

Fig. 1. Scheme of the two-phase flow in T-type separator, 1 – separator, 2 – blade, $\bar{w} = \omega \times R$ – gas velocity, \bar{c} – dust particle velocity

kierunek ruchu (strefy II, III) i przez żaluzje wpływają do przewodu lewego. Na skutek sukcesywnego odpływu maleje prędkość solgazu na wejściu do kolejnych stref. Podstawowym zjawiskiem do zamodelowania jest rozdział pyłu na prawą (P) i lewą (L) gałąź rurociągu. Z danych geometrycznych rozdzielacza i parametrów solgazu wynika, że o stopniu rozdziału decydować będzie wartość sił bezwładności i oporu ruchu cząstek pyłu w poszczególnych strefach. Z szacunkowych obliczeń wynika, że wartość siły bezwładności na łukach trajektorii gazu (rys. 1) może kilkadziesiąt razy przekroczyć wartość siły grawitacji. O ile opływ cząstek na wejściu i wyjściu z rozdzielacza będzie laminarny, to w obszarze przepływu po łukach pewna część cząstek wejdzie w zakres przejściowy.

Na podstawie równań ruchu solgazu po torze krzywoliniowym przy upraszczającym przyjęciu, że gaz wiruje ze stałą prędkością kątową ω , wykonano obliczenia prędkości cząstek dla różnych ich średnic w wybranych strefach rozdzielacza. Z obliczeń wynika, że względna prędkość cząstki (względem gazu) przekracza wartości graniczne dla opływu laminarnego dla znacznej części rozmiarów pyłu. O ilości pyłu dostającego się do przewodu lewego będzie decydować udział cząstek bardzo drobnych, dla których warunki ruchu względnego będą laminarne. Pomimo że pewien udział cząstek dostających się do przewodu prawego (głównie wyrzuconych z toru gazu) będzie w obszarze przejściowym, nie powinno to zasadniczo zmienić stopnia rozdziału pyłu, a jedynie nieco zmienić proporcje w oporach obu ramion rozdzielacza.

Podobne zjawiska występują w czasie przepływu przez kolano, którego ideę działania ilustruje rys. 2. W tym przypadku, oprócz sił bezwładności i oporu, może wystąpić większe oddziaływanie siły grawitacji cząstek.



Rys. 2. Schemat przepływu solgazu przez rozdzielacz kolanowy: 1 – kolano, 2 – prostka, 3 – przegroda, 4 – trójnik rozdzielający na górny (G) i dolny (D) przewód

Fig. 2. Scheme of the two-phase flow in elbow-type separator: 1 – elbow, 2 – tube, 3 – partition, 4 – T-element dividing the flow for upper (G) and lower (D) channel

Zgodnie z powyższymi wyjaśnieniami i ustaleniami w pkt. 2.1, w laminarnym obszarze opływu cząstek, z kryterium St rozmiar pyłu modelowego wyniesie:

$$x = x_0 \sqrt{\frac{\rho_{po}}{\rho_p} \frac{\rho}{\rho_0} \frac{v}{v_0} \sqrt{\frac{D}{D_0}}} \quad (2.4)$$

Aby ocenić wpływ pewnych nieścisłości założeń do modelowania należałoby w badaniach zastosować 2 – 3 różne granulacje pyłu, w tym drobniejszą, obliczoną z kryterium StK dla opływu przejściowego przy założeniu $k = 0,5$:

$$x = x_0 \sqrt[3]{\frac{\rho_{po}}{\rho_p} \frac{\rho}{\rho_0} \frac{v}{v_0} \sqrt{\frac{D}{D_0}}} \quad (2.5)$$

Na podstawie [8], podobieństwo przepływu mieszaniny gazu z pyłem polidispersyjnym występuje, jeżeli oprócz wymienionych warunków, bezwymiarowe charakterystyki pyłu w modelu i obiekcie będą takie same (indeks „0” dotyczy obiektu):

$$R_x = f\left(\frac{x}{x_m}\right) = f\left(\frac{x_0}{x_{m_0}}\right) \quad (2.6)$$

gdzie:

- R_x – masowa pozostałość cząstek na sicie rozmiaru x ,
- x_m – charakterystyczny rozmiar ziarna pyłu (np. średni, maksymalny itp.).

Przy doborze granulacji pyłu, charakterystyczny rozmiar x_m przyjęto na podstawie rozkładu Rosina–Rammlera–Sperlinga–Benneta. Jest to rozmiar ziarna (oczka sita), dla którego pozostałość sitowa wynosi $R_{x_m} = 100/e = 36,8\%$.

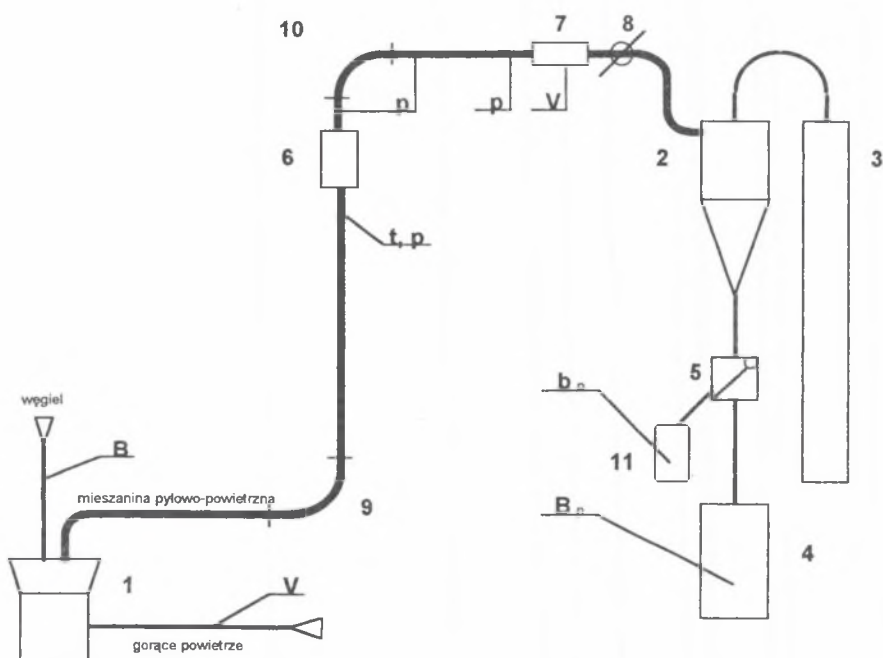
Ponieważ rozkład statystyczny pyłu węglowego podlega prawu RRSB, jego parametry rozkładu można określić za pomocą wielkości x_m i liczby polidispersji n . Wartości te wyznacza się znając pozostałości na dwóch różnych sitach, np. $88 \mu\text{m}$ i $200 \mu\text{m}$ (R_{90} i R_{200}) na podstawie prawa rozkładu:

$$\frac{100}{R_x} = \exp\left(\frac{x}{x_m}\right)^n \quad (2.7)$$

3. Metoda badań

3.1. Stanowisko doświadczalne

Do badań rozdzielaczy zaadaptowano istniejące w Instytucie stanowisko doświadczalne z młynem średniobieżnym [1]. Istotne elementy stanowiska pokazano na rys. 3. Mieszanina pyłowo-powietrzna (solgaz) wyprowadzona jest z młyna rurociągiem o średnicy wewnętrznej $D = 100$ mm. Konfigurację przewodów pyłowych dostosowano do ich przebiegu w instalacji rzeczywistej. Badany rozdzielacz **6** zainstalowano na końcu odcinka pionowego o długości ok. $28D$. Za rozdzielaczem zabudowano dwa równoległe przewody (prawy i lewy, patrząc w kierunku układu odpylania) o średnicy wewnętrznej



Rys. 3. Schemat instalacji doświadczalnej i miejsce usytuowania punktów pomiarowych: 1 – młyn, 2 – cyklony, 3 – filtry workowe, 4 – zbiorniki pyłu, 5 – kłapa kierująca pył, 6 – badany rozdzielacz, 7 – zwężka pomiarowa, 8 – przepustnica, 9 – kolano pion–pion, 10 – kolana pion–poziom, 11 – pojemnik do poboru próbek pyłu; Punkty pomiarowe: p, t – pomiar nadciśnienia statycznego, temperatury; V – pomiar strumienia gazu; B, B_p – pomiar strumieni węgla, pyłu; b_p – pobór próbek pyłu

Fig. 3. Test stand and measurement points

$d = 69$ mm każdy. Na odcinkach poziomych tych przewodów zainstalowano klasyczne zwężki Venturiego 7 do pomiaru strumienia gazu i przepustnice 8 do regulacji oporów przepływu poszczególnych nitek rurociągu. Odseparowany w cyklonach pył, za pomocą klap kierujących 5, może być doprowadzony do zbiornika pyłu 4 lub do naczynia do poboru próbek 11. Należy zaznaczyć, że prawa i lewa nitka mieszaniny pyłowo-powietrznej są od siebie całkowicie oddzielone, począwszy od rozdzielacza aż do zbiornika pyłu włącznie. Przy pomiarach rozdzielacza kolanowego (po zdemontowaniu rozdzielacza trójkątnego 6) w miejsce kolan 10 zabudowano badany rozdzielacz (schemat – rys. 2).

3.2. Metodyka pomiarów

Z uwagi na stosunkowo długie przewody pyłowe w instalacji doświadczalnej za badanym rozdzielaczem, a tym samym relatywnie duże ich opory przepływu, w celu zamodelowania oporów sieci rzeczywistej, za pomocą przepustnic utrzymywano takie same nadciśnienie statyczne p_l w wybranych punktach obu nitek rurociągu. W ten sposób starano się zasymulować przemysłowe warunki pracy rozdzielacza, w których odległości od rozdzielacza do komory paleniskowej są stosunkowo małe. W większości pomiarów utrzymywano takie same ciśnienia statyczne przed zwężkami pomiarowymi 7.

Wartość strumienia pyłu B_p określano na podstawie masy pyłu odseparowanej w cyklonie i w filtrach tkaninowych w znanym czasie. Średnia sprawność cyklonów wynosiła ok. 98%.

Strumienie pyłu po rozdziale (w prawej i lewej nitce rurociągu B_p^P, B_p^L), a także ich gwarantację określano na podstawie analizy próbek b_p^P, b_p^L pobieranych w czasie kilku minut. Dokładność tej metody sprawdzano z wynikami uzyskanymi na podstawie ważenia całości pyłu z lewego i prawego zbiornika pyłowego w znanym czasie pomiaru.

Strumień gazu w lewej nitce V^L obliczano na podstawie mierzonego spadku ciśnienia w konfuzorze klasycznej zwężki Venturiego. Przy stosunkowo niskiej koncentracji pyłu w tym przewodzie, dokładność tej metody jest zadowalająca. Całkowity strumień gazu V (przed młynem) mierzono kryzą ISA z przytarczowym pomiarem ciśnienia.

Temperatury czynnika przed i za młynem oraz przed rozdzielaczem mierzono przy użyciu termometrów rtęciowych, a dodatkowo czujnikami termoelektrycznymi NiCr-Ni. Nadciśnienia i spadki ciśnień w poszczególnych punktach instalacji mierzono za pomocą mikromanometrów Recknagla (małe wartości spadków) lub manometrów U-rurkowych wypełnionych alkoholem.

Określono następujące własności pyłu:

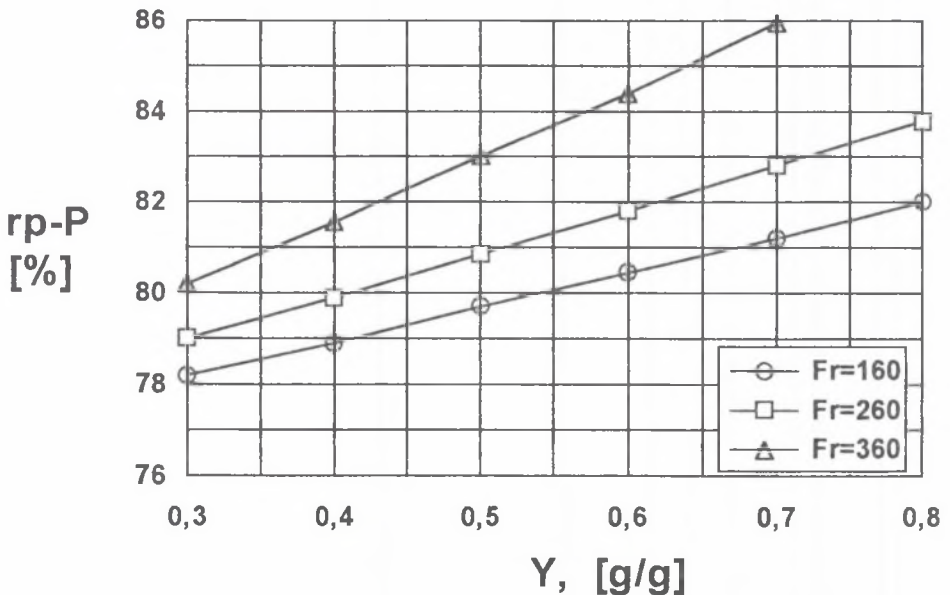
- pozostałości na sitach 88, 120 i 200 μm odpowiednio $R_{90}, R_{120},$ i R_{200} (w drugiej fazie pomiarów dodatkowo 40, 60, 75 μm – R_{40}, R_{60} i R_{75})
- gęstość właściwą węgla (pyłu) ρ_p , wilgoć całkowitą pyłu W_p .

Temperaturę czynnika transportującego przed rozdzielaczem utrzymywano w granicach 100 – 120°C. Ganulację pyłu w zakresie $R_{90} = 7 - 15$ (23)%, regulowano za pomocą łopatek regulacyjnych odsiewacza młyna.

4. Wyniki pomiarów rozdzielacza trójkątnego

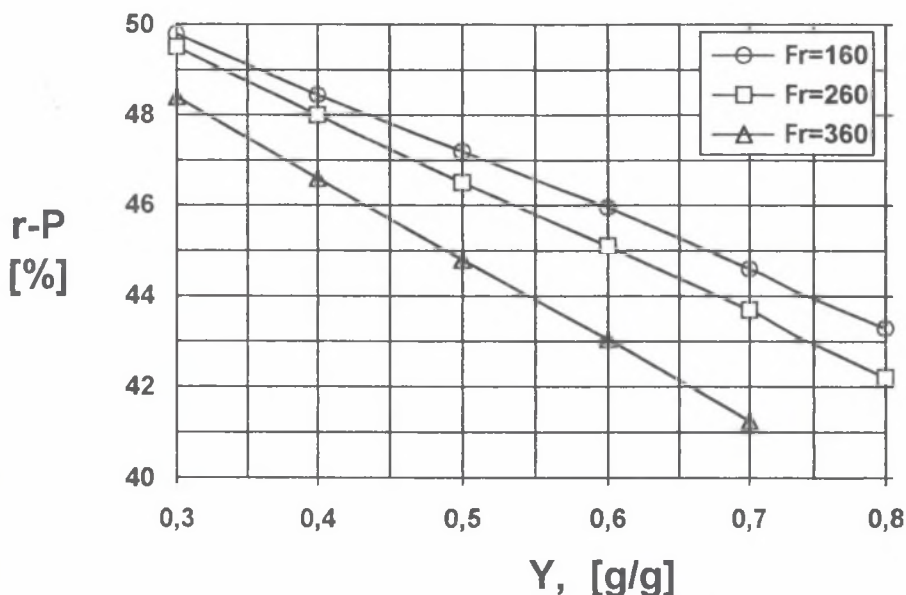
4.1. Wpływ parametrów przepływowych

Badania wpływu parametrów przepływowych wykonano w szerokim zakresie dla kąta pochylenia łopatek żaluzji $\varphi = 30^\circ$. Z przeprowadzonych obliczeń numerycznych wynikało, że jest to kąt optymalny. Przepływ gazu odbywał się w obszarze samomodelującym. Opracowane wyniki badań przedstawiono graficznie na rysunkach 4 i 5 w postaci zależności masowego udziału pyłu i powietrza w prawej nitce rurociągu (P) od koncentracji Y oraz prędkości w nawlocie do rozdzielacza (wyrażonej przez liczbę Fr).



Rys. 4. Zależność masowego udziału pyłu w przewodzie prawym (r_p^P) od koncentracji na wlocie do rozdzielacza (Y), przy różnych prędkościach powietrza (Fr)

Fig.4. The dependance of the mass fraction of the coal dust in the right channel (r_p^P) on the input-concentration of the separator (Y) for various air flow velocities (Fr)



Rys. 5. Zależności masowego udziału powietrza w przewodzie prawym (r^P) od koncentracji na wlocie do rozdzielacza (Y), przy różnych prędkościach powietrza (Fr)

Fig. 5. The dependance of the mass fraction of the air in the right channel (r^P) on the input-concentration of the separator (Y) for various air flow velocities (Fr)

Wzrost koncentracji na wlocie do rozdzielacza powoduje wzrost masowego udziału pyłu w przewodzie prawym (r_p^P), a jednocześnie spadek masowego udziału powietrza (r^P) w tym przewodzie. Podobnie, przy stałej koncentracji, wzrost liczby Frouda powoduje ten sam skutek. Dla typowych warunków pracy pyłoprzewodów (wartości liczby $Fr \sim 150$ i koncentracja $Y \sim 0,5$) masowy udział pyłu w przewodzie o dużej koncentracji osiąga wartość 83%, a powietrza 47%. Badania wykazały, że przyjęty kąt pochylenia łopatek nie okazał się optymalny.

4.2. Wpływ granulacji pyłu na rozdział

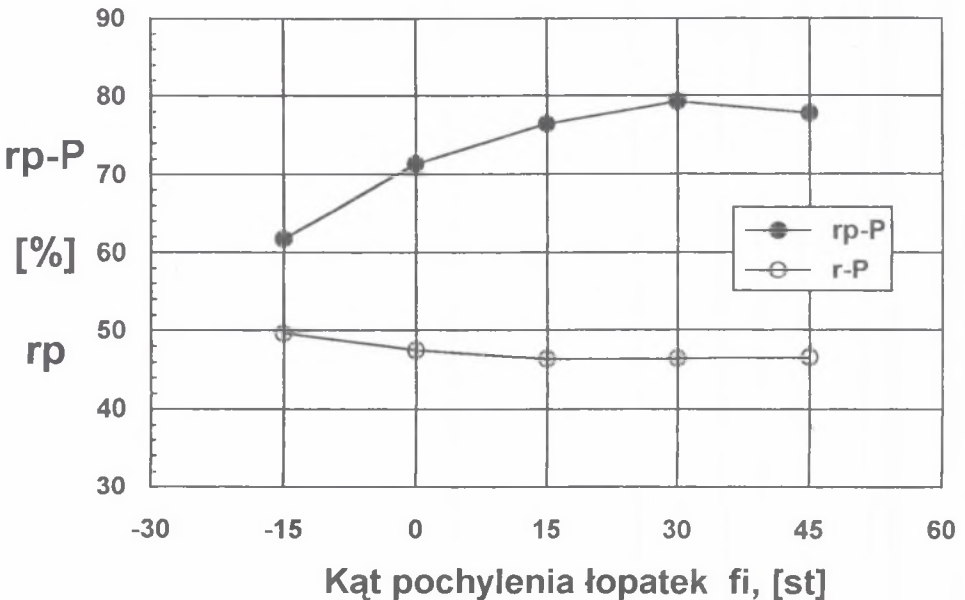
Pszczegółne serie pomiarów rozdzielacza wykonane zostały przy użyciu pyłu o różnej granulacji. Pozostałość na sicie R_{90} zawierała się w granicach 7,0 – 24%, a na sicie R_{200} odpowiednio 0,3 – 1,4%. Jest to zakres znacznie szerszy od wynikającego z modelowania i przyjęto go w celach poznawczych.

Na podstawie analizy wyników przeprowadzonych pomiarów można stwierdzić, że im grubszy pył doprowadzany jest do rozdzielacza, tym więcej pyłu trafia do części prawej, ale równocześnie płynie tam mniej powietrza. Zgodne to jest z rozważaniami przedstawionymi w pkt. 2.

4.3. Wpływ kąta pochylenia łopatek rozdzielacza

Badania wykonano w szerokim zakresie zmian kąta; $\varphi = -15^\circ \div 45^\circ$ i przy stałych wartościach koncentracji oraz liczb Fr i Re . Granulacja pyłu była stała, a pozostałości na sicie $88 \mu\text{m}$ wynosiły $R_{90} = 10,5\%$, natomiast na sicie $200 \mu\text{m} - R_{200} = 0,2\%$.

Na podstawie graficznych zależności $r_p, r = f(\varphi)$ przedstawionych na rys. 6 można stwierdzić, że położenie łopatek kierujących żaluzji ma istotne znaczenie dla masowego rozdziału pyłu na oba odgałęzienia rozdzielacza. W zakresie zmian kąta φ w granicach $-15^\circ \div 25^\circ$ oddziaływanie to jest dużo większe niż w zakresie $25^\circ \div 45^\circ$, gdzie wpływ kąta jest niewielki, a udziały powietrza w obu nitkach pozostają praktycznie niezmiennie.



Rys. 6. Zależność masowego udziału pyłu (r_p^P) i powietrza (r^P) w przewodzie prawym od kąta pochylenia łopatek rozdzielacza (φ)

Fig. 6. The dependance of the mass fraction of the coal dust (r_p^P) and air (r^P) in the right channel on the blade angle in the separator (φ)

Zmiana kąta ustawienia żaluzji od -15° do 30° powoduje zwiększenie się udziału pyłu w przewodzie prawnym (P) z 62 do 80%, przy czym udział powietrza w tym odgałęzieniu obniża się tylko o ok. 4 pkt. (z ~ 50 do 46,4%).

Interesujący jest wpływ kąta φ na granulację pyłu w obu rozgałęzieniach. Dla kąta $\varphi \approx -3^\circ$ granulacja pyłu w obu odgałęzieniach jest taka sama. Przy kątach $\varphi < -3^\circ$ pył przechodzący do prawego odgałęzienia jest drobniejszy niż pył przechodzący do lewego odgałęzienia. Odwrotna tendencja występuje dla $\varphi > -3^\circ$.

5. Wyniki pomiarów rozdzielacza kolanowego

Pomiary wykonano dla trzech kolan o różnym promieniu gięcia:

- kolano segmentowe o promieniu gięcia $R = 150$ mm,
- kolano gładkie o promieniu gięcia $R = 250$ mm,
- kolano gładkie o promieniu gięcia $R = 600$ mm,

przy czym dla każdego z nich przy kilku położeniach przegrody rozdzielającej strumień solgazu na dwie strugi płynących górną (G) i dolną (D) nitką rurociągu (rys. 2).

Zakres zmian parametrów przepływowych zawarty był w przedziałach:

- koncentracja pyłu na wlocie $Y = 0,39 \div 0,63$ g/g,
- liczba Frouda (prędkość gazu) $Fr = 100 \div 270$,
- granulacja pyłu (pozostałość na sicie $88 \mu\text{m}$) $R_{90} = 6 \div 14\%$.

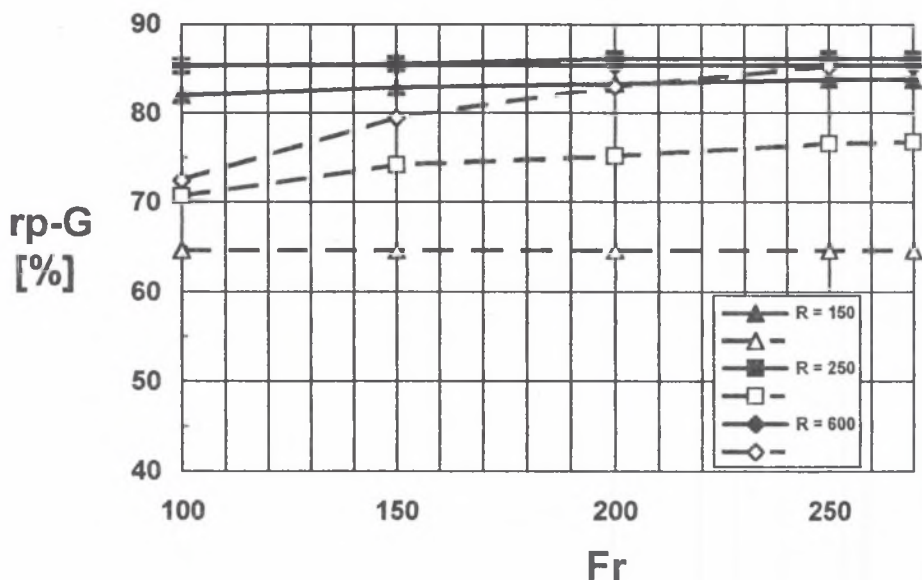
Samomodelujący przepływ gazu występował przy $Re > 50000$.

5.1. Wpływ geometrii na proces rozdziału pyłu i powietrza

Badane rozdzielacze pod względem geometrii różnią się promieniem gięcia oraz położeniem punktu, w którym następuje trwałe oddzielenie od siebie strugi płynącej górną częścią kolana od strugi płynącej częścią dolną.

Porównanie przebadanych układów pozwala na stwierdzenie, że wielkość promienia gięcia w zakresie $150 \div 600$ mm nie ma większego wpływu na rozdział pyłu (rys. 7 – linie ciągłe). Przy usytuowaniu przegrody bezpośrednio z kolaniem, masowy udział pyłu w części górnej (r_p^G) kształtuje się na poziomie $83 \div 86\%$. Różnica występuje w rozdziale powietrza (r_G), który zmienia się w przedziale $33 \div 41\%$.

Wpływ położenia punktu rozdziału przebadano w zakresie $L/D = 0 \div 10$. Usytuowanie przegrody (L), tj. punktu, w którym następuje trwałe oddzielenie od siebie strug ma podstawowe znaczenie dla procesu rozdziału pyłu. Jakościowy wpływ odległości przegrody (L/D) i promienia kolana (R) na rozdział pyłu, dla wybranej liczby $Fr = 150$, zilustrowano na rys. 8. W miarę oddalania się linii rozdziału od wylotu kolana, udział cząstek pyłu w części



Rys. 7. Zależność masowego udziału pyłu w przewodzie górnym (r_p^G) od liczby Frouda na wlocie do kolana (Fr). Porównanie badanych kolan

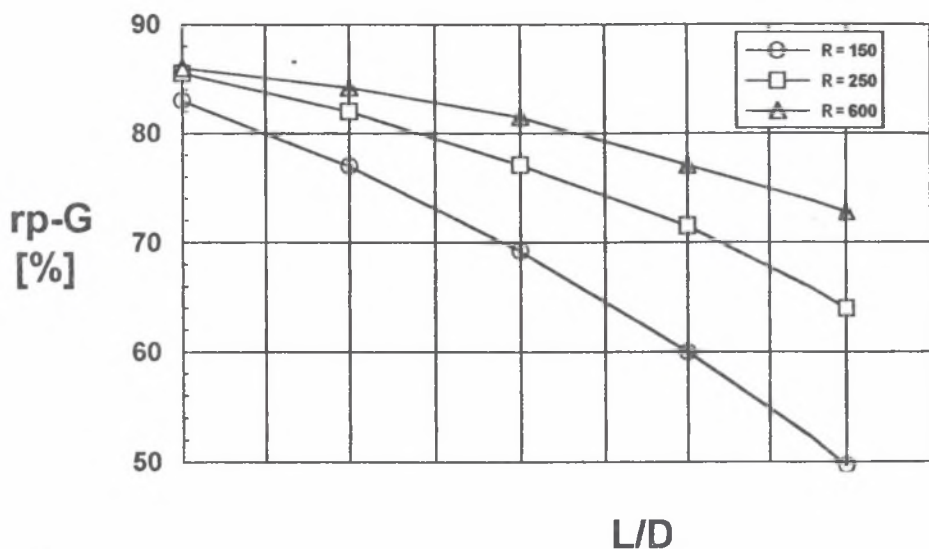
Fig. 7. The dependence of the mass of the coal dust in the upper channel (r_p^G) on the Froude-number in the elbow input (Fr). The comparison of the investigated elbow-type separators

górną ulega zmniejszeniu na skutek ich grawitacyjnego opadania. Większy wpływ odległości przegrody występuje w przypadku kolana o mniejszym promieniu gięcia. Masowy udział pyłu w części górnej z wartości 83% maleje do 65%. Rozdział powietrza jest mało podatny na miejsce ustawienia przegrody.

W celu wyrównania udziałów powietrza w obu nitkach rurociągu, w dalszych badaniach tego typu rozdzielacza należałoby zastosować kryzy dławiące (lub w inny sposób symulować dodatkowy opór w przewodzie o niskiej koncentracji). Zastosowanie elementu dławiącego pozwoli na uzyskanie podobnego stopnia rozdziału co w rozdzielaczu trójkątnym.

5.2. Wpływ prędkości solgazu na rozdział pyłu i powietrza

Wpływ prędkości solgazu na wlocie do kolana (wyrażoną przez liczbę Frouda) na efekt rozdziału można prześledzić na rys. 7. Przy rozdziale solgazu bezpośrednio za kolaniem nie stwierdzono praktycznie zależności masowego



Rys. 8. Zależność masowego udziału pyłu w przewodzie górnym (r_p^G) od odległości przegrody od wylotu kolana (L/D). $Fr=150$

Fig. 8. The dependance of the mass of the coal dust in the high channel (r_p^G) on the distance of division behind the elbow output (L/D). $Fr = 150$

udziału pyłu od prędkości. Zmiana stopnia rozdziału pojawia się po odsunięciu przegrody rozdzielającej strugi, przy czym największy wpływ prędkości występuje dla kolana o dużym promieniu gięcia. Przykładowo dla kolana $R = 600$ i przesunięciu linii rozdziału na odległość $L = 6D$ udział pyłu w przewodzie górnym r_p^G zwiększa się z 70 do 85% w przebadanym zakresie prędkości. Uwidacznia się tu wpływ promienia kolana na długość drogi opadania cząstek. Pewną zależność od prędkości wykazuje także stopień rozdziału powietrza. Przeprowadzone próby zmiany granulacji pyłu nie wykazały istotnych zmian w procesie rozdziału pyłu i gazu.

Wnioski

W ramach pracy wykonano badania dwóch typów rozdzielaczy - trójkątkowego z zabudowaną żaluzją oraz rozdzielaczy kolanowych. Rozwiązanie konstrukcyjne rozdzielacza (separatora) trójkątkowego pozwala na stosunkowo proste osiągnięcie zakładanych wartości rozdziału solgazu na dwie strugi, o udziałach powietrza ~50/50% oraz pyłu ~70/30%, przez odpowiednie ustawienie kąta pochylenia żaluzji. Dla zadanej wersji rozdzielacza trójkątkowego żądany stopień rozdziału uzyskuje się przy poziomym ustawieniu łopatek żaluzji ($\varphi = 0^\circ$). Można przypuszczać, że omówiona konstrukcja rozdzielacza będzie podatna na erozję.

Rozdział solgazu w separatorach kolanowych uzyskuje się przez trwałe rozdzielenie strug za pomocą przegrody umieszczonej w prostce w odpowiedniej odległości za kolanem.

Pomiary rozdzielaczy kolanowych wykazały możliwość osiągnięcia rozdziału pyłu na żądanym poziomie, natomiast wystąpiło większe zróżnicowanie strumieni gazu w obu przewodach, tj. ~40/60% (w przewodzie o dużej koncentracji pyłu popłynię ok. 40% powietrza). W celu wyrównania udziału powietrza w obu odgałęzieniach niezbędne jest zainstalowanie kryzy dławiącej w przewodzie o niskiej koncentracji. Do wykorzystania w praktyce najodpowiedniejsze są kolana o małym promieniu gięcia. Dla tych konfiguracji rozdział pyłu nie zależy od koncentracji i prędkości gazu, a przegroda rozdzielająca ustawiona jest stosunkowo blisko kolana, co zapewnia zwartą konstrukcję urządzenia. Wadą kolana o małym promieniu są większe opory przepływu solgazu.

Z uwagi na niemożliwość zamodelowania wszystkich zjawisk występujących w procesie rozdziału (separacji) osiągnięte wyniki mogą być obarczone pewnym błędem. Z tego względu, po zabudowaniu urządzeń przed palnikami na obiekcie, należałoby przeprowadzić pomiary sprawdzające i ewentualnie dokonać korekty założeń do badań.

Wykaz ważniejszych oznaczeń

- c – prędkość cząstek pyłu
- D – średnica przewodu na wlocie do rozdzielacza
- d – średnica przewodów wylotowych rozdzielacza
- g – przyspieszenie ziemskie
- L – wysokość rozdzielacza, odległość przegrody od kolana
- n – liczba polidispersji pyłu
- r, r_p – masowy rozdział powietrza, pyłu
- R_x – masowa pozostałość na sicie o rozmiarze oczka x
- x – rozmiar cząstek pyłu
- x_m – charakterystyczny rozmiar ziarna

- V – strumień gazu
w – prędkość gazu
Y – koncentracja
 Δp – spadek ciśnienia
 η – lepkość dynamiczna
 φ – kąt pochylenia łopatek kierujących (żałuzji)
 ρ – gęstość gazu

Indeksy górne

- P – dotyczy prawej nitki rozdzielacza
L – dotyczy lewej nitki rozdzielacza
G – dotyczy górnej nitki rozdzielacza
D – dotyczy dolnej nitki rozdzielacza

Indeksy dolne

- o – dotyczy obiektu
p – dotyczy pyłu

Liczby kryterialne

- Eu – liczba Eulera
Fr – liczba Frouda
Re – liczba Reynoldsa
StK – ogólna liczba Stokesa

Literatura

1. Czepiel J., Mroczek K.: Badania modelowe wpływu prędkości kątowej i średnicy kul na wydajność młyna pierścieniowo-kulowego. Materiały II konferencji naukowo-technicznej „Budowa i eksploatacja młynów do przemiału węgla”. Rydzyna 1988.
2. Gołąbek J.: Badania aerodynamiczne rozdzielaczy pyłu węgla kamiennego. Opracowanie CBKK, Tarnowskie Góry 1984.
3. Gołąbek J.: Metrologiczne i aerodynamiczne własności pierścieniowej, trójsygnalowej zwężki Venturiego przy przepływie solgazu. Praca doktorska, Gliwice 1979.
4. Hoadley D., Gołąbek J.: Osiadanie pyłu węglowego w rurociągach poziomych instalacji. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Energetyka z. 120. Gliwice 1994.
4. Kutateladze S. S.: Modelirowanie ciepłenergetycznego oborudowania. Energija, Moskwa 1966.
5. Świrski J.: Badania modelowe separatora pyłu węglowego. Prace Instytutu Energetyki. z. 3, Warszawa 1979.

6. Zierep J.: Kryteria podobieństwa i zasady modelowania w mechanice płynów. PWN, Warszawa 1978.
7. Zwieriew N. I.: Modelirowanie dwiżenija polidispersnoj pyli. Tiejłoe-nergietika nr 7, 1957.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Edward Kostowski

Wpłynęło do Redakcji: 10. 10. 1996 r.

Abstract

The paper presents the conditions of the physical modelling of the pulverized coal separation. The aim of the separators is to divide the flow of the two-phase mixture in two streams: with high and low concentration of the coal. Separators of this kind can be used in low-Nox-burners. The test stand and methods of investigation have been described. T-type and elbow-type separators have been tested. As optimum parameters of the separation the proportions 70/30% for the coal dust and 50/50% for the air have been assumed. For the T-type separator the influence of the configuration of the blades as well as parameters of the two-phase mixture on coal and air separation has been shown. For the elbow-type separator the influence of the bend angle and partition positioning for various flow parameters has been described.

In the T-type separator the effectiveness of the coal separation depends on the angle of blades and to a low degree on the velocity and concentration of the mixture. The influence of this parameters on the air separation is small.

The best results in elbow-type separators have been find by elbows with the small bend angle. The efectiveness of the coal separation is not depending on the velocity and concentration of the mixture. The air separation is ca. 40/60%.