

Jerzy DUDA, Wojciech KALINOWSKI

Instytut Mineralnych Materiałów Budowlanych, Opole

## BADANIA SEPARACJI MATERIAŁÓW PYLASTYCH NA MODELOWYM SEPARATORZE DYNAMICZNYM

**Streszczenie.** W celu poprawy zdolności rozdzielczej separatora statycznego zainstalowano w komorze procesowej wirnik walcowy o regulowanej ilości obrotów. Przedmiotem referatu są wyniki badań modelowych takiej konstrukcji.

W charakterze jakościowego wskaźnika wykorzystano stopień doskonałości procesu, definowanego jako stosunek masy właściwie rozdzielonego materiału, tj drobnej frakcji w produkcie i grubej w nadziarnie, do masy nadawy separatora. Badania identyfikacyjne procesu wykonano na podstawie zasad planowego eksperymentu. Wyniki badań potwierdziły istnienie związku pomiędzy proporcjami koła wirnikowego, prędkością obrotową i prędkością unoszenia a przyjętym wskaźnikiem jakości procesu. Aproksymacja danych pomiarowych pozwoliła wyrazić zależność wskaźnika doskonałości procesu w funkcji modułów podobieństwa.

## RESEARCH OF THE DUST MATERIALS SEPARATION ON THE MODEL OF DYNAMIC SEPARATOR

**Summary.** In order to improve efficiency of the static separator the roller-rotor with adjusting rotation speed was installed. The final results of experiments on the separator model construction are presented in this paper. The result of the research is the relation between the effect of classification and similarity modules. This relation could be very useful in the phase of design.

### 1. Wprowadzenie

Instalacje młynowe z pneumatycznym transportem produktu przemiału są wyposażone na ogół w separatory statyczne. Urządzenia te działają na zasadzie bezwładnościowego wytrącania grubej frakcji z mieszaniny pyło-powietrznej poprzez zmianę prędkości i kierunku strugi. W układach młynów z mechanicznym odbiorem produktu instaluje się separatory dynamiczne, w których zewnątrz strumień powietrza separującego, odprowadzający gotowy produkt,

przeptywa przez układ palisad łopatkowych, nieruchomej i wirującej. W branży cement-wapno-gips pierwszy typ stosowany jest powszechnie w układach przygotowania surowca i węgla, drugi natomiast w przemiałach cementu.

Niewłaściwie pracujący separator niekorzystnie wpływa na pracę młyna. Żle odseparowane nadziarno, zawierające znaczny udział drobnych frakcji odpowiadających produktowi finalnemu, pogarsza pracę młyników, zwłaszcza w pierwszej komorze oraz zwiększa krotność obiegu materiału. Wywołuje to zmniejszenie wydajności młyna oraz powiększenie jednostkowego zużycia energii elektrycznej na przemiał.

W celu poprawy zdolności rozdzielczej separatora statycznego zaproponowano wyposażenie komory separacji w walcowy wirnik o regulowanej ilości obrotów. W ramach projektu badawczego 7S103 025 06 wykonano badania modelowe takiej konstrukcji. Przedmiotem niniejszego referatu jest przedstawienie wyników tej pracy.

## 2. Kryteria oceny procesu separacji

Do najczęściej stosowanych wielkości, umożliwiających dokonanie oceny jakości procesu separacji, należą:

- granica podziału,
- stopień podziału.
- zdolność rozdzielcza.

W praktyce ważnymi parametrami charakteryzującymi układy separacji są ponadto:

- wydajność,
- zapotrzebowanie na energię,
- zużycie czynników pomocniczych (woda, para, powietrze),
- kubatura urządzeń,
- trwałość i niezawodność eksploatacyjna.

Granica podziału określa średnicę ziarna, którego prawdopodobieństwo znalezienia się w grubej (nadziarno) lub drobnej (produkt) frakcji wynosi 50%. Ziarno to nosi nazwę ziarna granicznego.

Stopień podziału jest to stosunek masowy wybranej frakcji, na ogół drobnej w produkcji do ilości tej samej frakcji w nadawie separatora. Stopień podziału odnosi się do sumy frakcji

rozdzielonych wielkością ziarna granicznego, i to zarówno dla frakcji drobnej, jak i grubej. Równanie (1) podaje definicje dla obu takich przypadków.

$$\Sigma p = \frac{P \Sigma p_i}{Q \Sigma q_i} \quad \text{lub} \quad \Sigma p = \frac{N (1 - \Sigma n_i)}{Q (1 - \Sigma q_i)} \quad (1)$$

gdzie: P- strumień masowy produktu,

Q- strumień masowy nadawy,

N - strumień masowy nadziarna,

$p_i, q_i, n_i$ - udziały procentowe i-tych frakcji ziaren w produkcie, nadawie i nadziarnie  
odniesione odpowiednio do masy produktu, nadawy i nadziarna,

i - numer frakcji od 1 do frakcji zawierającej ziarno graniczne.

Zdolność rozdzielcza jest parametrem jakościowym, określającym ostrość rozdziału frakcji drobnych, o wymiarach mniejszych od ziarna granicznego od frakcji o wymiarach większych niż ziarno graniczne. Inaczej mówiąc, im mniej ziaren drobnych w nadziarnie i grubych w produkcie, tym wyższą zdolnością rozdzielczą charakteryzuje się separator. Idealny proces charakteryzuje się rozdzielczością, którą na wykresie krzywej rozdziału jest odcinek linii prostej, równoległej do osi rzędnych w punkcie odpowiadającym wymiarowi ziarna granicznego. Rzeczywisty proces przebiega z większym lub mniejszym odchyleniem od tej prostej. Umowną miarą zdolności rozdzielczej może być stosunek średnic ziaren, odpowiadających wybranym stopniom podziału, np. wskaźnik Lauera, lub wskaźnik  $J_1$ , w którym operuje się wielkościami ziaren odpowiadającym stopniom rozdziału 0.25 i 0.75

$$K = d_{75} / d_{25} \quad \text{lub} \quad J_1 = d_{25} / d_{75}$$

Parametry są związane ze stopniem pochylenia krzywej rozdziału na granicy podziału. Dla idealnego rozdziału wskaźniki te osiągają wartość 1.0. Dla bardzo złego dążą do 0 lub nieskończoności.

Zdolność rozdzielczą separacji można wyrazić również w inny sposób. W teorii odpylaczy bezwładnościowych operuje się szeroko pojęciem przedziałowej skuteczności  $\eta_i$  odpylania i-tej klasy ziarnowej [1]. Jest to stosunek masy strumienia pyłu i-tej klasy oddzielonego w urządzeniu odpylającym do masy i-tej klasy wprowadzonego do odpylacza.

W praktyce przemysłowej charakterystykę separatora określa krzywa Trompa, zwana również krzywą -T [2,3,4,5]. Jeśli w opisie bieżącego punktu krzywej Trompa uwzględnić zależności definicyjne masowych udziałów procentowych ( $g_i, f_i$  - udziały masowe nadziarna i produktu drobnego) odniesione do strumienia nadawy oraz równanie bilansu masy separatora, to okaże się, że krzywa Trompa jest graficzną ilustracją przedziałowej sprawności, odniesioną do procesu separacji. Operowanie krzywą Trompa posiada ważną zaletę. Uniezależnia wartość wskaźnika od stopnia rozdrobnienia produktu. W rzeczywistości pomiar składu ziarnowego produktu jest zawsze obciążony, oprócz błędów pomiarowych, błędem wynikającym ze skuteczności odpylania urządzenia odbierającego produkt.

Przedstawiane dotychczas wskaźniki oceniają jakość procesu separacji w odniesieniu do jednego składnika bądź drobnego (frakcje ziarnowe odpowiadające rozdrobnieniu produktu), bądź grubego (frakcje ziarnowe odpowiadające rozdrobnieniu nadziarna).

Najpełniej proces separacji ocenia wskaźnik doskonałości procesu [6]. Obejmuje on obydwa strumienie materiału i określa stosunek masy właściwie rozdzielonego materiału (drobnej frakcji w produkcie oraz grubej frakcji w nadziarnie) do masy nadawy separatora.

Definicję wskaźnika doskonałości procesu przedstawia poniższe równanie:

$$w_d = \frac{P \sum_{i=1}^k p_i + N \sum_{i=k}^m n_i}{Q \sum_{i=1}^m q_i} \quad (2)$$

gdzie  $k$  - numer klasy ziarnowej zawierającej ziarno graniczne,  
 $m$  - ilość klas ziarnowych analizowanych próbek.

Uwzględniając w równaniu (2) zależności

$$\sum_{i=k}^m n_i = 1 - \sum_{i=1}^k n_i \quad \sum_{i=1}^m q_i = 1 \quad (3)$$

oraz równanie bilansu masowego  $i$ -tej frakcji

$$Q_i = N_i + P_i \quad (4)$$

to wskaźnik doskonałości procesu separacji da się przedstawić następująco

$$w_d = \frac{\sum_{i=1}^k q_i}{Q} + \frac{N}{Q} (1 - 2 \sum_{i=1}^k n_i) \quad (5)$$

Jak wynika z postaci powyższej zależności, wartość wskaźnika można określić bezpośrednio z pomiarów strumieni masowych i analizy ziarnowej nadawy i nadziarna. Podobnie jak dla krzywej Trompa, jest on niezależny od strumienia produktu przemiału. Zależność (5) wykorzystano do opisu jakości procesu separowania materiałów pylistych.

### 3. Wybór najistotniejszych czynników procesu separacji

Opis procesu rozseparowania materiałów pylistych w urządzeniach wirnikowych jest niezmiernie skomplikowany. Na cząstkę poruszającą się w kanałach separatora oddziałuje wiele sił: siły ciężenia, bezwładności, tarcia, unoszenia, siły Coriolisa, elektryczne, magnetyczne. Trudno uchwycić działania efektów przyściennych, wzajemnego oddziaływania cząstek (np. koagulacji cząstek) czy wpływu elementów konstrukcji. W takich przypadkach okazują się pomocne badania procesu na modelu fizycznym. Do uchwycenia najistotniejszych parametrów procesu wykorzystano niektóre zależności wynikające z teorii zjawiska oraz wnioski z badań i doświadczeń opisanych w literaturze tematu.[1,2,7,8,9,10] Najogólniej rzecz biorąc, parametry te mogą dotyczyć:

- właściwości fizycznych materiału separowanego,
- właściwości czynnika nośnego,
- właściwości konstrukcji.

Poniżej zestawiono parametry, które zdaniem autorów mają zasadnicze znaczenie dla procesu:

- $m_n$  - strumień masowy nadawy,
- $d_z$  - średnica zastępcza ziarna nadawy,
- $\rho_n$  - gęstość materiału nadawy,

- $\psi$  - współczynnik kształtu cząstek,  
 $m_g$  - strumień masowy gazu nośnego,  
 $T$  - temperatura gazu,  
 $\nu_g$  - lepkość kinematyczna gazu,  
 $\rho_g$  - gęstość gazu,  
 $D$  - średnica wirnika,  
 $D_k$  - średnica zewnętrzna komory separatora,  
 $r$  - promień rurociągu dolotowego,  
 $L$  - wysokość wirnika,  
 $s$  - szerokość łopatek wirnika,  
 $t$  - podziałka łopatek wirnika,  
 $\alpha$  - kąt nachylenia kierownic,  
 $\omega$  - prędkość obrotowa wirnika.

Jak wykazały badania modelowe separatora powietrznego typu Hosokawa Nauta [6], nie zaobserwowano wpływu zastępczej średnicy ziarna, określającej rozdrobnienie nadawy na stopień doskonałości procesu separacji. W przemyśle cwg występują produkty mineralne otrzymane z kamienia wapiennego (wapno, mąka surowcowa lub cement), rozdrabniane w podobny sposób, głównie przy zastosowaniu młynów kulowych. Tak rozdrabniany materiał charakteryzuje się stałym współczynnikiem sferyczności wynoszącym  $\psi = 0.63$ .

Średnica zewnętrzna separatora  $D_k$ , promień króćca wlotowego  $r$ , oraz wymiar wewnętrznej komory separacji (w przybliżeniu równy średnicy wirnika  $D$ ) są ze sobą silnie związane.

Jak wynika z zestawienia charakterystyk separatorów statycznych, produkowanych przez PZBM [4], proporcje te są stałe dla niemal całej oferty produkcyjnej i wynoszą  $D/D_k = 0.81 - 0.82$  (z wyjątkiem dwóch najmniejszych urządzeń w typoszeregu 45.45, oraz 45.46).

Wymiar króćca wlotowego w stosunku do średnicy separatora  $D_k$  zachowuje również stałą zależność  $D_k/2r = 2.50 - 2.66$ . Aby zmniejszyć wymiarowość modelu, ilość parametrów konstrukcyjnych ograniczono do nowo wprowadzonego elementu. Wykorzystano średnicę  $D$  oraz wysokość wirnika  $L$ .

Do prób separowania wykorzystano powietrze z otoczenia. Odpowiada to znacznej części praktycznych realizacji (wszystkie przemiały cementu), a przy tym eliminuje potrzebę rozbudowy stanowiska. Przy takich założeniach ilość zmiennych parametrów procesu została ograniczona do siedmiu:

$m_n$  - masowy strumień nadawy,

$\rho_n$  - gęstość materiału nadawy,

$m_g$  - masowy strumień powietrza,

$D$  - średnica wirnika separatora,

$L$  - wysokość czynna wirnika,

$\alpha$  - kąt nachylenia łopatek kierownicy,

$\omega$  - prędkość obrotowa wirnika separatora.

Jako wyjście modelu przyjęto wydajność separacji  $Q = f(m_n, \rho_n, m_g, D, L, \alpha, \omega)$ , traktowaną jako strumień poprawnie rozdzielonej nadawy.

W celu określenia kryteriów podobieństwa zestawiono wymiary wszystkich parametrów wejściowych i wyjść z obiektu. Zgodnie z zasadami analizy wymiarowej przyjęto bazę oraz skontrolowano, czy jej składowe są niezależne liniowo. Jako zmienne niezależne przyjęto  $\rho_n, m_n, D, \alpha$ . Pozostałe parametry procesu wyrażono jako funkcje przyjętej bazy.

$$- m_g = f(\rho_n, m_n, D, \alpha) = \phi_1 \rho_n^a m_n^b D^c \alpha^d$$

$$\phi_1 = m_g / m_n \quad (6)$$

$$- L = f(\rho_n, m_n, D, \alpha) = \phi_2 \rho_n^a m_n^b D^c \alpha^d$$

$$\phi_2 = L / D \quad (7)$$

$$- \omega = f(\rho_n, m_n, D, \alpha) = \phi_3 \rho_n^a m_n^b D^c \alpha^d$$

$$\phi_3 = \omega \rho_n D^3 / m_n \alpha \quad (8)$$

Uzyskano 3 moduły podobieństwa wyrażające

- koncentrację pyłu,

- proporcje koła wirnikowego,

- stosunek prędkości obwodowej koła wirnikowego do prędkości wznoszenia gazu w przekroju poprzecznym separatora.

Funkcję opisującą wyjście modelu wyrażono w przyjętej bazie wymiarowej.

$$- Q = fl(\phi_1, \phi_3) \rho_n^a m_n^b D^c \alpha^d$$

$$Q = fl(\phi_1, \phi_3) m_n$$

$$Q/m_n = fl(\phi_1, \phi_3) \quad (9)$$

Tak określona wydajność separacji oznacza udział poprawnie rozseparowanego materiału w stosunku do całkowitej nadawy separatora. Zgodnie z przyjętą definicją tak określona sprawność procesu odpowiada wskaźnikowi doskonałości

$$Q/m_n = w_d \quad (10)$$

$$w_d = fl(\phi_1, \phi_3) \quad (11)$$

#### 4. Opis stanowiska doświadczalnego

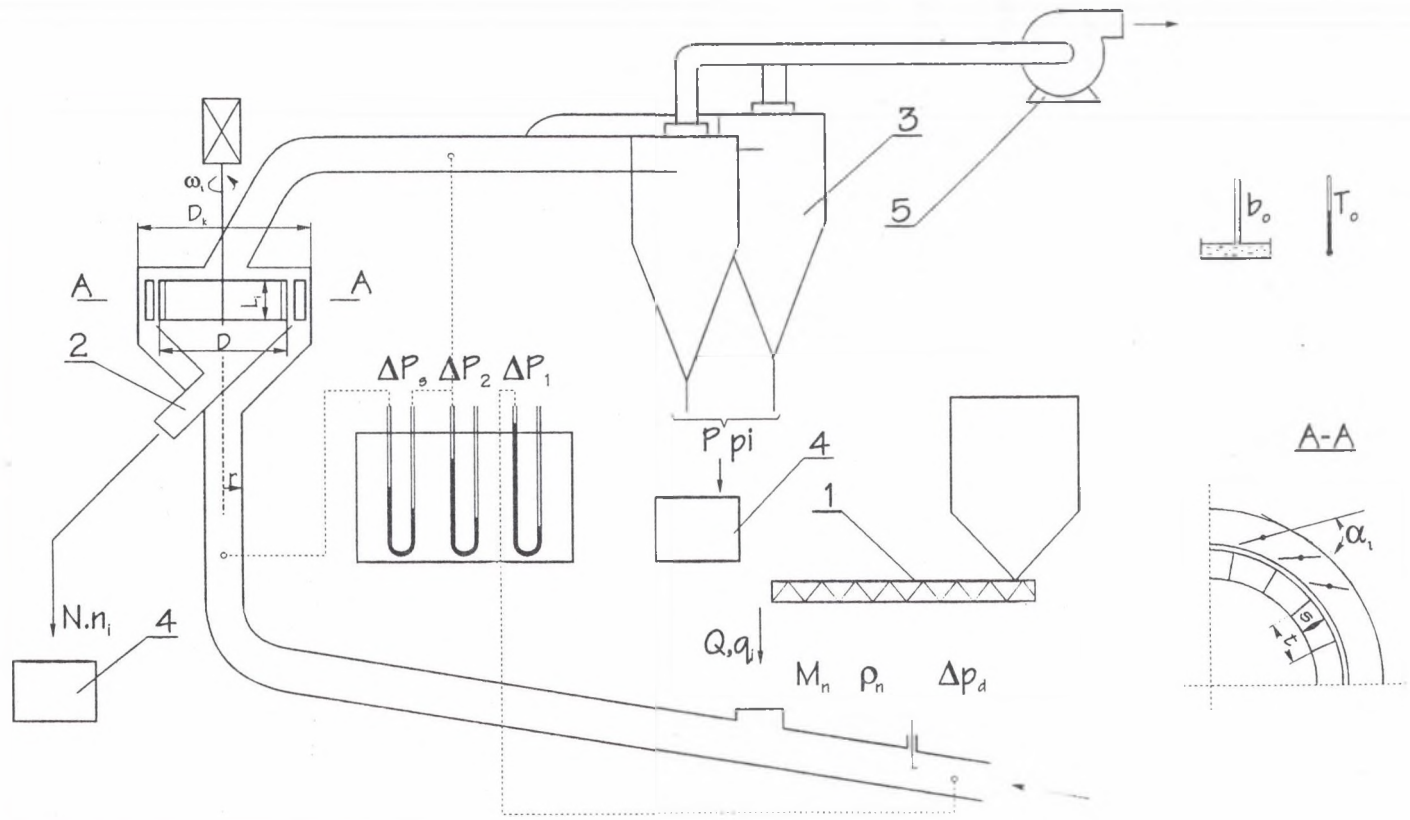
Stanowisko doświadczalne do badań procesu separacji materiałów pylistych składa się z :

- modelowego separatora - 2,
- układu dozowania materiału -1,
- cyklonów odbierających produkt drobny - 3 ,
- wentylatora wyciągowego - 5.

Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 1.

Dozownik ślimakowy (1), o znanej charakterystyce wprowadza określoną partię pyłu w strumień powietrza transportującego materiał do komory separacji (2). W klasyfikatorze następuje rozdzielanie podanego materiału na dwie frakcje - drobną (produkt) i grubą (naziarno). Produkt drobny po przejściu przez koło separatora oddzielany jest od gazów nośnych w cyklonach odpylających (3), naziarno zaś usuwane jest bezpośrednio z komory na zewnątrz. Odbiór obu produktów procesu rozseparowywania trafia do szczelnych pojemników (4).





Rys. 1. Schemat stanowiska doświadczalnego  
 Fig. 1. The research stand scheme

Stanowisko badawcze zaprojektowano i wykonano w ten sposób, aby w maksymalnym stopniu wykorzystać istniejące w Instytucie instalacje doświadczalne oraz zastosować elementy typowe, dostępne na rynku. Zakres zmian parametrów :

- masowe natężenie przepływu materiału - regulacja prędkości obrotowej ślimaka dozującego ( tyrystorowy układ regulacji ) w zakresie 0.083 - 0.380 kg/s,
- masowe natężenie przepływu powietrza - zmiana położenia przepustnicy wentylatora w zakresie 0 - 2500 m<sup>3</sup>/h,
- prędkość obrotowa wirnika - regulacja częstotliwości prądu trójfazowego (falownik) w zakresie 0 - 850 obr/min,
- kąta napływu strumienia pyło-powietrznego na wirnik modelu separatora poprzez zmianę kąta obrotu łopatek kierownic w zakresie 0 - 75 °,
- wysokość koła wirnikowego - przesuwanie pierścienia ograniczającego czynną wysokość koła oraz kierownic wyrażone krotnością modułu podstawowego w zakresie 1- 4.

Parametry procesu są określane w następujący sposób :

- wydajność układu dozownika - pomiar masy i czasu dozowania pyłu,
- strumień masowy produktu oraz nadziarna - pomiar mas odniesiony do czasu dozowania,
- natężenie przepływu powietrza - pomiar prędkości za pomocą sondy Prandtla,
- prędkość obrotowa wirnika - pomiar tachometrem,
- stopień rozdrobnienia materiału - analizy ziarnowe na znormalizowanych sitach wg DIN oraz dla wielkości ziaren mniejszych od 200  $\mu$ m granulometr laserowy typu LAU.

Przed przystąpieniem do pomiarów sprawdzono poprawność działania poszczególnych elementów instalacji, przeprowadzono cechowanie układu dozowania oraz wykonano charakterystykę wirnika .

## 5. Sporządzenie planu eksperymentu

Eksperyment wstępny wykazał, że równanie wskaźnika doskonałości procesu ma charakter nieliniowy. Dla identyfikacji tej klasy modeli wymagany jest eksperyment przeprowadzany na trzech poziomach [11]. Planowanie trzypoziomowe jest dogodnie dla małej liczby zmiennych.

Ustalenie wymiarowości zadania jednoznacznie określa niezbędną ilość eksperymentów dla pełnej identyfikacji badanych procesów. Jak wynika z opisu stanowiska badawczego, proces

ma charakter potokowy, co oznacza, że materiał po przejściu przez komorę separatora zostaje usunięty. Pozwala to, co prawda, zachować niezmienny skład granulometryczny nadawy, gdyż produkt zatrzymany w cyklonach odpylających nie wraca do procesu, ale wymaga dużych ilości materiału doświadczalnego. Można podać dla przykładu, że w fazie rozruchu i wstępnych badań zużyto ponad 200 kg surowca. Badania pilotowe (eksperyment wstępny) wymagały przygotowania ok. 150 kg nadawy. Aby zmniejszyć ilość prób, zdecydowano się na plan kompozycyjny.

Dla przypadku trzech zmiennych, przy jednym eksperymencie centralnym plan doświadczeń wymagał wykonania

$$2^3 + 2 \times 3 + 1 = 15 \text{ prób.}$$

Tabela 5.1

Numer eksperymentu	zmiennie standaryzowane		
	$t_1$	$t_2$	$t_3$
1	+1	+1	+1
2	+1	+1	-1
3	+1	-1	-1
4	-1	+1	+1
5	+1	-1	+1
6	-1	+1	-1
7	-1	-1	+1
8	-1	-1	-1
9	0	0	0
10	-1.215	0	0
11	+1.215	0	0
12	0	-1.215	0
13	0	+1.215	0
14	0	0	-1.215
15	0	0	+1.215

Wartość ramienia gwiazdowego, zapewniającego ortogonalność planu, dla tego przypadku wynosi

$$a = \sqrt{2(8+6+1)-2^2} = 1.215$$

Plan eksperymentu w postaci zmiennych standaryzowanych przedstawiono w tabeli 5.1

## 6. Metodyka prowadzenia badań

Odważoną porcję nadawy ( ok. 10 kg ) wsypywano do zasobnika podajnika. Uruchamiano napędy wentylatora wyciągowego oraz wirnika separatora. Po ustaleniu poziomu podciśnienia w układzie uruchamiano układ dozowania. Notowano wskazania aparatury pomiarowej zainstalowanej na stanowisku ( rys 1). Po zakończeniu próby ważono ilość wytrąconego nadziarna oraz pobierano próbki do analiz granulometrycznych. W każdej próbie separacji wykonywano niezależnie dwie analizy, a wynik uśredniano. W czasie wykonywania analiz sitowych odsiewano frakcje < 200  $\mu\text{m}$ , które poddawano analizie na granulometrze laserowym LAU. Wyniki pomiarów granulacji nadawy i nadziarna stanowiły podstawę do sporządzania krzywych ziarnowych oraz obliczeń wskaźnika doskonałości procesu ( rów. 9). Wielkość ziarna granicznego odczytywano z krzywej sprawności frakcyjnej separatora. Jako materiał do badań zastosowano kamień wapienny z przemysłowej instalacji przemiału surowca.

W tabeli 6.1 przedstawiono wyniki analizy granulometrycznej nadziarna oraz produktu przemiału tzw. mąki surowcowej oraz mieszaniny tych składników, stanowiącej nadawę do świadczalnego separatora.

Tabela 6.1

Fracje ziarnowe	Nadziarno			Mąka surowcowa			Nadawa separatora		
	1	2	śred.	1	2	śred.	1	2	śred.
[ $\mu\text{m}$ ]	[ % ]	[ % ]	[ % ]	[ % ]	[ % ]	[ % ]	[ % ]	[ % ]	[ % ]
500 - 1200	17.7	17.7	17.7	-	-	-	5.3	5.3	5.3
385 - 500	1.0	1.1	1.0	-	-	-	0.4	0.2	0.3
250 - 385	17.7	18.5	18.1	0.8	0.6	0.7	7.2	7.0	7.1
200 - 250	15.3	15.9	15.6	2.0	2.2	2.1	7.8	7.6	7.7
136 - 200	2.4	2.4	2.4	0.5	0.6	0.5	0.5	0.6	0.5
92 - 136	2.6	2.5	2.6	3.1	3.5	3.3	2.7	3.2	2.9
52 - 92	4.0	3.8	3.9	11.3	11.7	11.5	8.6	9.7	9.2
20 - 52	4.5	4.4	4.5	8.2	7.7	8.0	5.8	6.5	6.1
20 - 1	7.1	6.8	6.9	16.8	14.6	15.7	12.1	12.1	12.1
0 - 11	27.7	26.9	27.3	57.3	59.1	58.2	49.6	47.8	48.8

Zakładając dopuszczalny zakres zmian wielkości wejściowych, wynikający z charakterystyki technicznej modelu, właściwości mediów biorących udział w procesie oraz wniosków z eksperymentu wstępnego określono dopuszczalne zakresy zmian modułów podobieństwa.

$$\begin{aligned}
 -\phi_1 &= 1.410 - 2.570 \\
 -\phi_2 &= 0.23 - 0.64 \\
 -\phi_3 &= 1.886 - 94.723
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Techniczna realizacja zasadniczego eksperymentu, zapewniająca założoną planem zmienność modułów podobieństwa oraz odpowiadające im parametry fizyczne procesu zestawiono w tabeli 6.2.

Tabela 6.2

	$\phi_1 = m_g/m_n$	$\phi_2 = L/D$	$\phi_3 = \omega \rho_n^3/m_n \alpha$	$m_n$	$m_g$	L	$\omega$	$\alpha$
[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ kg/s ]	[ kg/s ]	[ m ]	[ rd/s ]	[ rd ]
1	2.467	0.600	86 509	0.2639	0.6510	0.264	50.6	0.5236
2	2.467	0.600	10 101	0.2639	0.6510	0.264	17.7	1.5708
3	2.467	0.263	10 101	0.2639	0.6510	0.116	17.7	1.5708
4	1.513	0.600	86 509	0.3502	0.5299	0.264	44.8	0.3489
5	2.467	0.263	86 509	0.2639	0.6510	0.116	50.6	0.5236
6	1.513	0.600	10 101	0.3750	0.5674	0.264	25.2	1.5708
7	1.513	0.263	86 509	0.3502	0.5299	0.116	44.8	0.3489
8	1.513	0.263	10 101	0.3750	0.5674	0.116	25.2	1.5708
9	1.988	0.432	48 305	0.3194	0.6347	0.190	51.3	0.7854
10	1.410	0.432	48 305	0.3750	0.5287	0.190	40.1	0.5236
11	2.570	0.432	48 305	0.2639	0.6782	0.190	28.3	0.5236
12	1.988	0.227	48 305	0.3194	0.6347	0.100	51.3	0.7854
13	1.988	0.636	48 305	0.2665	0.5299	0.280	37.3	0.6847
14	1.988	0.432	1 886	0.3750	0.7455	0.190	4.7	1.5708
15	1.988	0.432	94 723	0.2665	0.5299	0.190	37.3	0.3489

Wyniki pomiarów składu granulometrycznego nadawy separatora i nadziarna uzyskanego w doświadczeniu dały podstawę do obliczeń wartości wskaźnika doskonałości.

## 7. Wyniki badań eksperymentu zasadniczego

W wyniku przeprowadzonych doświadczeń uzyskano wartości wyjść z obiektu dla ustalonej planem kombinacji parametrów wejściowych. Dla aproksymacji tej klasy funkcji przyjęto równanie drugiego stopnia typu

$$y = k_0 t_0 + k_1 t_1 + k_2 t_2 + k_3 t_3 + k_{11} t_1^2 + k_{22} t_2^2 + k_{33} t_3^2 + k_{12} t_1 t_2 + k_{13} t_1 t_3 + k_{23} t_2 t_3 \quad (13)$$

gdzie  $t_0$  - fikcyjna zmienna przy wyrazie wolnym,

$t_1, t_2, t_3$  - zmienne odpowiadające standaryzowanym wielkościom zmiennych planowego eksperymentu ( tab. 5.1 ).

Do wyznaczenia nieznanego wektora współczynników równania (13) korzystano z zależności

$$\mathbf{k} = (\mathbf{T}^T \mathbf{T})^{-1} \mathbf{T}^T \mathbf{y} \quad (14)$$

dla której wartości składowe wektora  $\mathbf{y}$  obliczono z badań doświadczalnych.  $\mathbf{T}$  przedstawia macierz eksperymentu

	$t_0$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_1^2$	$t_2^2$	$t_3^2$	$t_1 t_2$	$t_1 t_3$	$t_2 t_3$
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1
	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1
	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1
	1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1
	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1
	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1
$\mathbf{T} =$	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	-1.215	0	0	1.476	0	0	0	0	0
	1	1.215	0	0	1.476	0	0	0	0	0
	1	0	-1.215	0	0	1.476	0	0	0	0
	1	0	1.215	0	0	1.476	0	0	0	0
	1	0	0	-1.215	0	0	1.476	0	0	0
	1	0	0	-1.215	0	0	1.476	0	0	0

Przy wykorzystaniu metody najmniejszych kwadratów określono wartości współczynników regresji. W wyniku obliczeń otrzymano wektor  $\mathbf{k}$ , który pokazuje rów. (16)

$$\begin{aligned}
 & 0.8402 \\
 & 0.0612 \\
 & -0.0340 \\
 & 0.0043 \\
 \mathbf{k} = & 0.0138 \\
 & -0.0104 \\
 & -0.0104 \\
 & -0.0050 \\
 & 0.0175 \\
 & -0.0325
 \end{aligned} \tag{16}$$

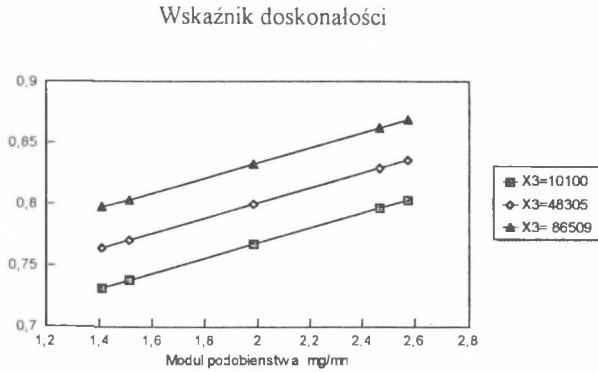
Równanie aproksymujące ( $R=0.92$ ), po odrzuceniu członów o wartościach testowych leżących poniżej krytycznych i przejściu do zmiennych naturalnych, uzyskało postać

$$\begin{aligned}
 y = & 0.836 + 0.0612 \left( \frac{x_1 - 1.988}{0.477} \right) - 0.0341 \left( \frac{x_2 - 0.432}{0.168} \right) - 0.0325 \left( \frac{x_2 - 0.432}{0.168} \right) \left( \frac{x_3 - 48\,305}{38\,204} \right) = \\
 = & 0.5630 + 0.0612 x_1 + 0.2787 x_2 + 2,19 \cdot 10^{-6} x_3 - 5,06 \cdot 10^{-6} x_2 x_3
 \end{aligned} \tag{17}$$

Po podstawieniu niezmienników podobieństwa otrzymano ostateczny kształt równania opisującego wartość wskaźnika doskonałości procesu w funkcji parametrów wejściowych.

$$w_d = 0.5630 + 0.0612 \frac{m_g}{m_n} + 0.2787 \frac{L}{D} + 2.19 \cdot 10^{-6} \frac{\omega \rho D^3}{m_n \alpha} - 5.06 \cdot 10^{-6} \frac{\omega \rho L D^2}{m_n \alpha} \tag{18}$$

Uzyskana postać zależności wykazuje dominujący wpływ członów liniowych. W zakresie przeprowadzonych badań wskaźnik doskonałości wahał się w granicach 0.7 - 0.9. Wpływ poszczególnych modułów przedstawiono na wykresach.



Rys.2. Wpływ stosunku masowych strumieni na stopień doskonałości procesu  
Fig.2. Influence of ratio of mass streams on effect of classification

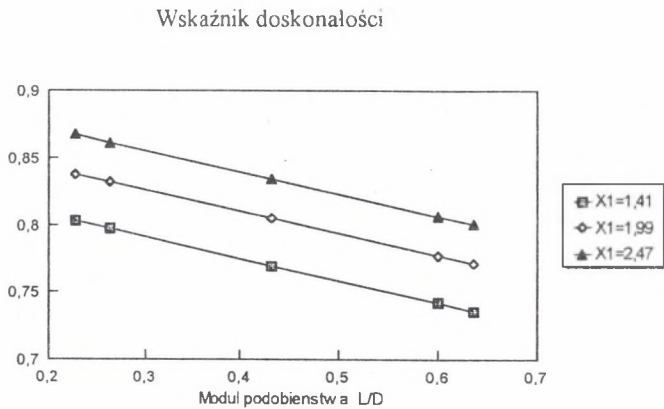
Stosunek masowych strumieni gazu i pyłu wprowadzonego do separatora jest odwrotnością koncentracji fazy stałej. Jak wynika z rys.2, wartość wskaźnika, a tym samym i jakość rozdzielania frakcji ziarnowych pyłu rośnie ze zmniejszającą się koncentracją pyłu oraz rosnącymi wartościami modułu  $\phi_3$ . Wykres sporządzono dla  $\phi_2 = 0.4318$ . Podobny przebieg zależności uzyskano dla pozostałych wysokości wirnika. Bardziej złożony charakter zmian obserwuje się badając wpływ pozostałych modułów. Na rys.3 i 4 przedstawiono wpływ wysokości wirnika na wskaźnik doskonałości procesu.



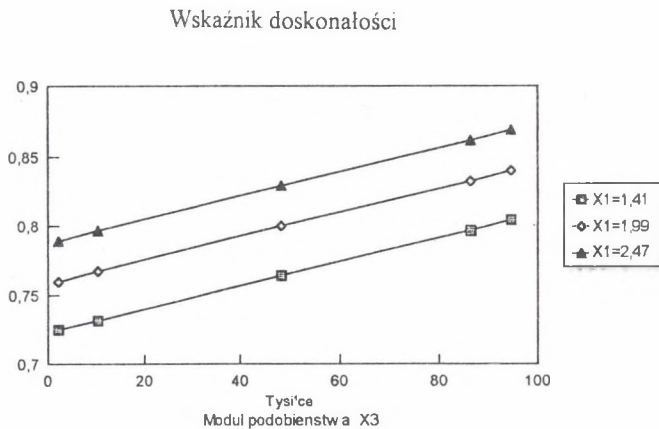
Rys.3. Wpływ proporcji wirnika na stopień doskonałości procesu  $\phi_3 = 10/100$   
Fig.3. Influence of rotor proportion on effect of classification  $\phi_3 = 10/100$



Wykres na rys.3 wykazuje wzrost wskaźnika doskonałości procesu ze zwiększającą się wysokością wirnika. Rysunek ten sporządzono dla  $\phi_3 = 10\ 100$ . Dla zwiększających się wartości modułu  $\phi_3$  ulega zmianie przebieg tych funkcji. Na rys.4 pokazano tę samą zależność dla  $\phi_3 = 86\ 509$ .



Rys.4. Wpływ proporcji wirnika na stopień doskonałości procesu  $\phi_3 = 86\ 509$   
 Fig.4. Influence of rotor proportion on effect of classification  $\phi_3=86\ 509$

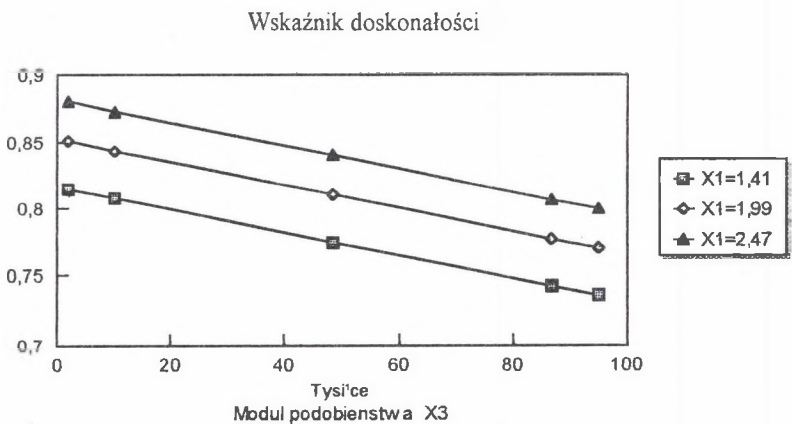


Rys.5. Wpływ modułu  $\phi_3 = \omega \rho_n D^3 / m_n \alpha$  na jakość procesu separacji pyłu.  $\phi_2 = 0.263$   
 Fig.5. Influence of module  $\phi_3=\omega \rho_n D^3 / m_n \alpha$  on separation quality of dust  $\phi_2= 0.263$

Dla  $\phi_3$  mniejszych od wartości tego modułu dla punktu centralnego sprawność procesu rośnie przy rosnącej wysokości wirnika. Dla wartości  $\phi_3$  większych obserwuje się spadek wskaźnika doskonałości. Podobny charakter zmian obserwuje się przy badaniu wpływu trzeciego niezmiennika podobieństwa  $\phi_3$ .

Rys. 5 odnosi się do wybranych wartości koncentracji pyłu. Identyczne przebiegi uzyskano dla pozostałych wartości modułów  $\phi_1$ . We wszystkich przypadkach uzyskuje się wyższe wartości wskaźnika doskonałości procesu przy niższych koncentracjach pyłu. Na rys.6 przedstawiono tę samą zależność dla  $L/D = 0.6$ .

Przy stałym stopniu otwarcia palisady łopatkowej kierownic można przyjąć, że zmiany modułu  $\phi_3$  wynikają ze zmian prędkości obrotowej wirnika.



Rys. 6. Wpływ modułu  $\phi_3 = \omega \rho_n D^3 / m_n \alpha$  na jakość procesu separacji pyłu,  $\phi_2 = 0.6$

Fig. 6. Influence of module  $\phi_3 = \omega \rho_n D^3 / m_n \alpha$  on separation quality of dust  $\phi_2 = 0.6$

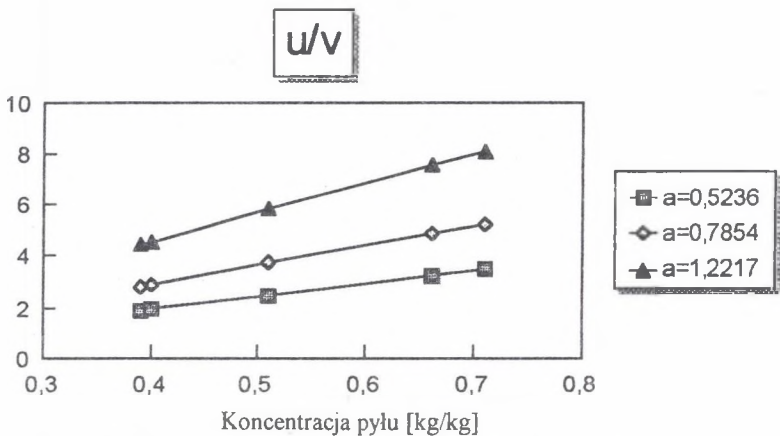
Charakter zmian przedstawiony na wykresach (rys.2-6) wskazuje na istnienie ekstremum funkcji  $w_d = f(\phi_1, \phi_2, \phi_3)$ . Wskaźnik  $w_d$  dla  $\phi_1$  osiąga ekstremalne wartości na granicach przedziału. Pozostałe moduły podobieństwa osiągają optymalne wartości

$$\phi_2 = 0.4330$$

$$\phi_3 = 55\ 079$$

Z tego wynika, że dla badanej konstrukcji istnieją optymalne proporcje  $L/D$  wirnika. Zbyt wysokie koło otwiera nadmierny przekrój dla przepływających w instalacji gazów, powodując nadmierne wytrącenie prędkości. W takim przypadku dominują elementy separacji statycznej i zmniejsza się wpływ oddziaływania dynamicznego wirnika.

Dla konstrukcji optymalnej moduł  $\phi_3$  określa jednoznaczny związek pomiędzy prędkością obwodową wirnika  $u$  a prędkością unoszenia gazów  $v$ . Oznacza to, że dla określonej wydajności separatora istnieje optymalna prędkość obrotowa wirnika i odwrotnie dla określonej prędkości obrotowej wirnika istnieje optymalna wydajność. Dla określonej koncentracji pyłu i różnego stopnia otwarcia kierownic zależność tę przedstawia rys. 7.



Rys. 7. Stosunek prędkości obwodowej i prędkości unoszenia dla konstrukcji optymalnej  
Fig. 7. The ratio of circular speed and vertical speed for optimal construction

## 8. Podsumowanie

Badania separacji materiału pylistego przeprowadzono na modelu separatora statycznego wyposażonego w wirnik walcowy. Identyfikacja procesu wykonana na podstawie planowanego eksperymentu dostarczyła danych do obliczeń nieznanymi współczynnikami równania aproksymacyjnego. Równanie wskaźnika doskonałości, określającego jakość procesu, ma charakter nieliniowy, choć dla badanej konstrukcji zauważa się dominujący wpływ liniowy modułów podobieństwa. Stwierdzono, że jakość procesu wzrasta ze zmniejszającą się koncentracją pyłu, niezależnie od pozostałych parametrów procesu. Dla wirników o  $L/D$  mniejszych od 0,433 obserwuje się wzrost jakości procesu przy rosnącej prędkości obrotowej wirnika, niezależnie od stopnia otwarcia kierownic separatora.

Przedstawione wyniki mogą służyć do obliczeń separatorów dynamicznych, wyposażonych w wirnik walcowy o konstrukcji komory separacji podobnej do badanego modelu.

## LITERATURA

1. P.Kabsch: Odpylanie i odpylacze. WNT, Warszawa 1992.
2. U.Eberl: Model simulacije zracnega klasiranja. Rudarsko-Metalurski Zbornik Letnik 40 St 1-2 Ljubljana 1993.
3. F.W.Mayer: Die Trennscharfe von Sichtern. Zement Kalk Gips H.6 1966.
4. Mayer: Allgemeine Grundlagen der T-Kurven. Aufbereitungs-Technik Nr 8/1967 - 440.
5. F.W.Mayer: Allgemeine Grundlagen der T-Kurven. T.2 Kritik der Kennwerte der T-Kurven. Aufbereitungs-Technik 12/1967 S.673-678.
6. J.Holdanowicz: Mathematische Beschreibung des Windsichtungsprozesses mit dem Rotorklassierer des Typs Hosokawa Nauta. Aufbereitungs-Technik 7/1985 S.426-432.
7. K.Budinsky: Rotierender Zentrifugalabscheider mit kontinuierlicher Staubableitung. Staub Reinhaltung der Luft. Nr 9/1970 S.366 - 370.
8. K.Budinsky: Die Bewegung der festen Teilchen im Drehstrommungsentstauber. Staub Reinhaltung der Luft Nr 3/1972 S.87-91.
9. R.Koch: Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej. Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1979.
10. M Mazur, M. Teisseyre: Podstawy teorii i konstrukcji urządzeń odpylających. Politechnika Wroclawska, Wrocław 1977.
11. Mańczak: Technika planowania eksperymentu. WNT, Warszawa.

Recenzent: Dr inż. Lucjusz Anders

Wpłynęło do Redakcji 2.10.1996 r.

**Abstract**

In order to improve efficiency of the static separator the roller-rotor with adjusting rotation speed was installed. The final results of experiments on the separator model construction are presented in this paper.

As an indicator of separation quality the effect of classification, which is defined as a mass ratio of proper classified material (fine size in the product and coarse in oversize material) to the separator feed, was assumed. Identification research of the process have been based on the rules of planned experiment. The result of the research is the relation between the effect of classification and similarity modulus. This relation could be very useful in the phase of design.