

Jan SZPYRKA

Stanisław BŁASZCZYŃSKI

BADANIA WPLYWU GEOMETRII CZĘŚCI STOŻKOWEJ HYDROCYKLONU  
WZBOGACAJĄCEGO W OŚRODKU WODNYM NA EFEKTYWNOŚĆ ROZDZIAŁU  
GĘSTOŚCIOWEGO MATERIAŁÓW DROBNOUZIARNIONYCH

Streszczenie. Badania w ramach przedstawionej pracy mają na celu podniesienie efektywności rozdziału gęstościowego materiałów drobno-uziarnionych. Koncentrują się głównie wokół wpływu geometrii części stożkowej hydrocyklonu, jako jednego z najistotniejszych elementów oddziałujących na przebieg procesu rozdziału, szczególnie w hydrocyklonach wzbogacających wyłączone w ośrodku wodnym.

## 1. WPROWADZENIE

Proces rozdziału gęstościowego w hydrocyklonach znajduje coraz powszechniejsze zastosowanie z uwagi na prostotę konstrukcji i obsługi oraz dużą wydajność jednostkową i wysoką skuteczność.

Ukazało się wiele publikacji na temat teoretycznych i praktycznych aspektów działania hydrocyklonów. Wpływ większości czynników konstrukcyjnych i technologicznych na parametry ich pracy został dokładnie opisany. Podstawy teoretyczne rozdziału zawieszin w hydrocyklonie również zostały przez wielu autorów przeanalizowane; stworzono kilkadziesiąt modeli matematycznych.

Niemniej można stwierdzić brak wnikliwych opracowań oceniających równoczesny wpływ szeregu parametrów geometrycznych i technologicznych hydrocyklonów wzbogacających w ośrodku wodnym na ostrość rozdziału gęstościowego mieszanin drobno-uziarnionych. Teoria procesu rozdziału gęstościowego oraz analiza istniejących rozwiązań konstrukcyjnych hydrocyklonów wzbogacających dały podstawę do wysunięcia tezy o istotnym wpływie geometrii części stożkowej hydrocyklonu na przebieg i efektywność rozdziału gęstościowego.

## 2. MECHANIZM GĘSTOŚCIOWEGO ROZDZIAŁU ZIARN W OŚRODKU WODNYM W HYDROCYKLONIE WZBOGACAJĄCYM

Nadawę hydrocyklonów stanowi hydromieszanka poli-dyspersyjna, wieloskładnikowa. Zadaniem hydrocyklonu jest rozdział zbioru ziarn według ich własności. Stwierdzenie to dotyczy zarówno klasyfikacji, jak i wzbogacania. W obu przypadkach podstawowym czynnikiem decydującym o skuteczności rozdziału są siły oddziaływające na ziarna lub zbiór ziarn znajdujący się w zawieszynie w hydrocyklonie.

Ruch ziarna w ośrodku wodnym wirującym wywołują dwie siły:

- 1) siła odśrodkowa

$$P = \frac{\pi d^3}{6} (\delta_s - \delta_o) \frac{v_t^2}{r}$$

powodująca przemieszczanie ziarna w kierunku ścian hydrocyklonu,

- 2) siła oporu ośrodka określana wzorem Newtona

$$P_w = \Psi \frac{\delta_c}{2} v_w^2 \frac{\pi d^2}{4}$$

skierowana w stronę osi hydrocyklonu,

gdzie:

- $\Psi$  - współczynnik oporu ośrodka będący funkcją liczby Reynoldsa,
- $v_w$  - prędkość względna ruchu ziarna w zawieszynie,
- $v_t$  - prędkość styczna ziarna.

Ogólną postać równania ruchu ziarna można wtedy, przy pominięciu siły ciężkości, przedstawić następująco:

$$m \frac{dv_w}{dt} = P_o - P_w,$$

czyli

$$\frac{dv_w}{dt} = \frac{\delta_s - \delta_c}{\delta_s} \frac{v_t^2}{r} - \frac{3}{4} \Psi \frac{\delta_o}{\delta_s} \cdot \frac{v_w^2}{d}.$$

Rozwinięcie powyższego równania jest bardzo skomplikowane z uwagi na to, że wartości  $\Psi$ ,  $v_t$  i  $v_w$  są funkcjami parametrów konstrukcyjnych i ruchowych oraz własności fizycznych zawieszyny.

Siły działające na ziarno powodują jego przemieszczanie bądź to w kierunku osi hydrocyklonu, bądź w kierunku jego ścian. Ziarno, dla którego siły odśrodkowa i oporu ośrodka równoważą się, krąży po określonym stałym promieniu. Kelsall określa go jako promień równowagi [5]. Analiza zmiany

wielkości promienia równowagi dla danego ziarna na różnych wysokościach części stożkowej pozwala na wyznaczenie powierzchni równowagi ziarna krążącego w hydrocyklonie. Powierzchnia ta według Kelsalla w przybliżeniu ma kształt stożkowy. Rozdział strugi na dwa strumienie (w stronę wylewu i w stronę przelewu) odbywa się wzdłuż zerowej powierzchni prędkości osiowych. W związku z tym teoretycznie biorąc, wszystkie ziarna, których powierzchnia równowagi krążenia znajduje się wewnątrz powierzchni zerowych prędkości osiowych, znajdują się w przelewie, natomiast ziarna o powierzchni równowagi krążenia umieszczonej na zewnątrz powierzchni zerowych prędkości osiowych, kierowane będą do wylewu hydrocyklonu.

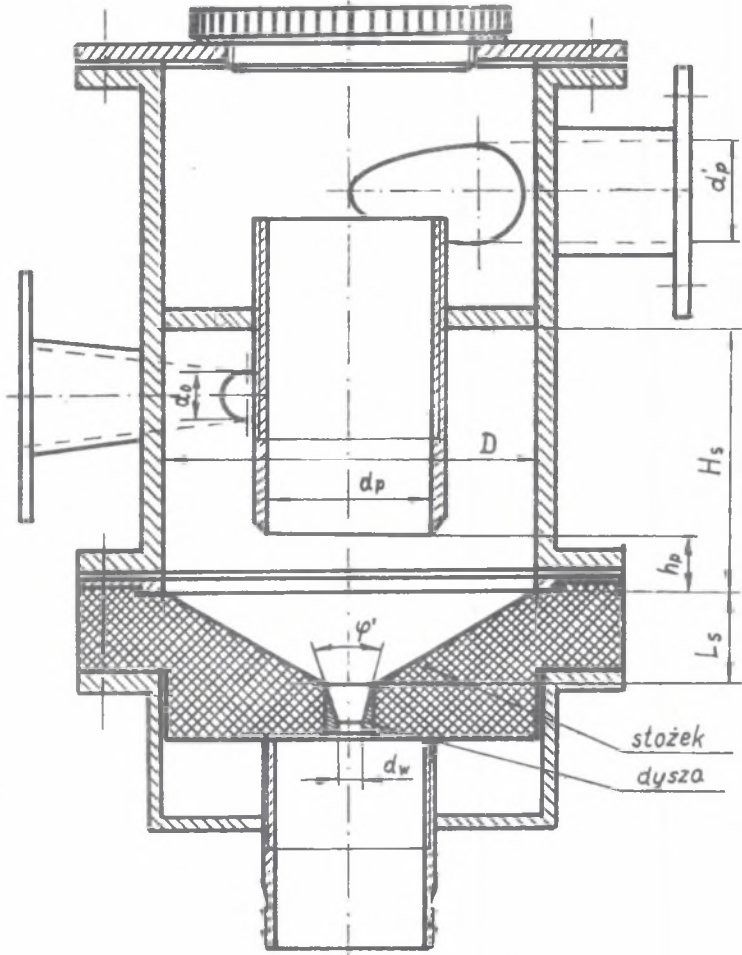
W przypadku hydromieszanki poli-dyspersyjnej monoskładnikowej rozdział ziarn (klasyfikacja) w zasadzie przebiega zgodnie z przedstawioną powyżej teorią. Sytuacja komplikuje się w procesie rozdziału gęstościowego hydromieszanki poli-dyspersyjnej wieloskładnikowej. Rozumowanie powyższe nie uwzględnia bowiem wzajemnego oddziaływania ziarn płynących w strumieniu zawieszonych.

Pod wpływem działania siły odśrodkowej ziarna cięższe oddalają się od osi wirowania i skupiają się w strefie przyściennej części cylindrycznej, w wyniku czego tworzy się niejednorodna zawieszina o podwyższonej gęstości w zewnętrznych warstwach wirującego strumienia. W części stożkowej następuje dalsza znaczna koncentracja ziarn w strefie przyściennej, spowodowana zmniejszeniem się "objętości" komory roboczej (promień wodzący strumienia cieczy stale skraca się). W takich warunkach, w dolnej strefie stożka, w pobliżu dyszy wylewowej, tworzy się silnie zagęszczony ośrodek samorodny, tzw. płynne łoże, o własnościach cieczy ciężkiej zawieszinowej. Istnieniem tego ośrodka tłumaczy się zjawisko rozdziału gęstościowego w hydrocyklonach wzbogacających z ośrodkiem wodnym. Przebiegają w nim bowiem procesy podobne do zachodzących w hydrocyklonach wzbogacających konwencjonalnych, pracujących z cieczą ciężką zawieszinową. Ziarna o ciężarze niższym wypierane są z "płynnego łoża" w kierunku osi krążenia i porywane przez prądy wypływające do przelewu. Grubość samorodnego ośrodka wyznacza się odległością między otworem wylewowym a dolną granicą wznoszącego się strumienia cieczy.

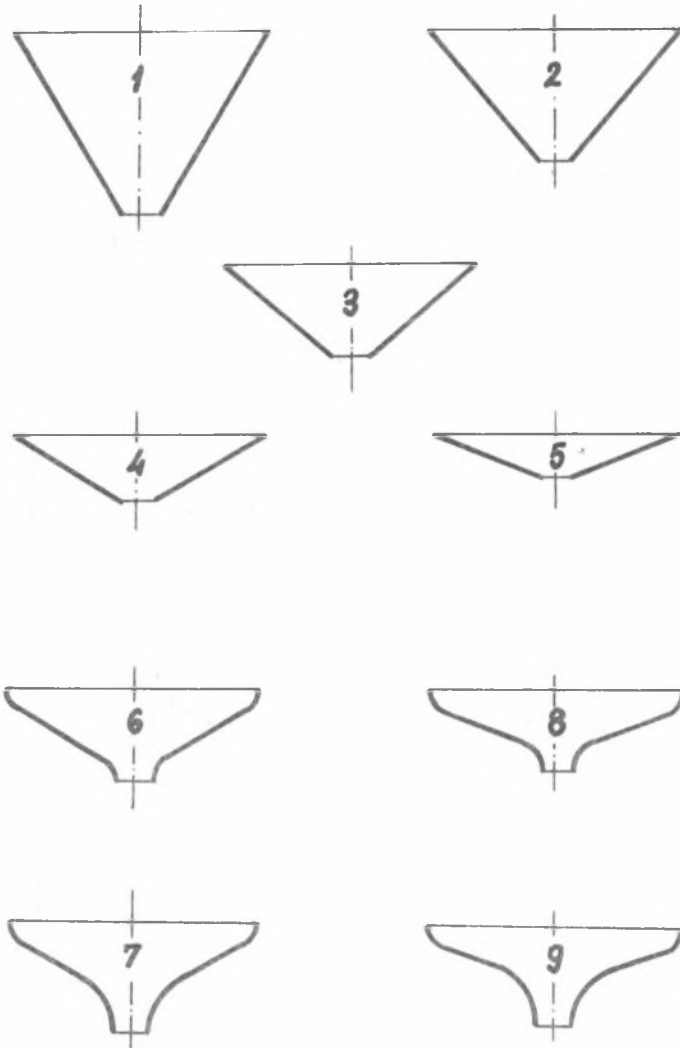
Na podstawie wieloletnich badań stwierdzono, że decydujący wpływ na jakość i stopień rozluźnienia płynnego łoża ma kształt części stożkowej. Stąd zaleca się stosowanie stożków krótkich, o dużych kątach zbieżności.

### 3. APARATURA I CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁU

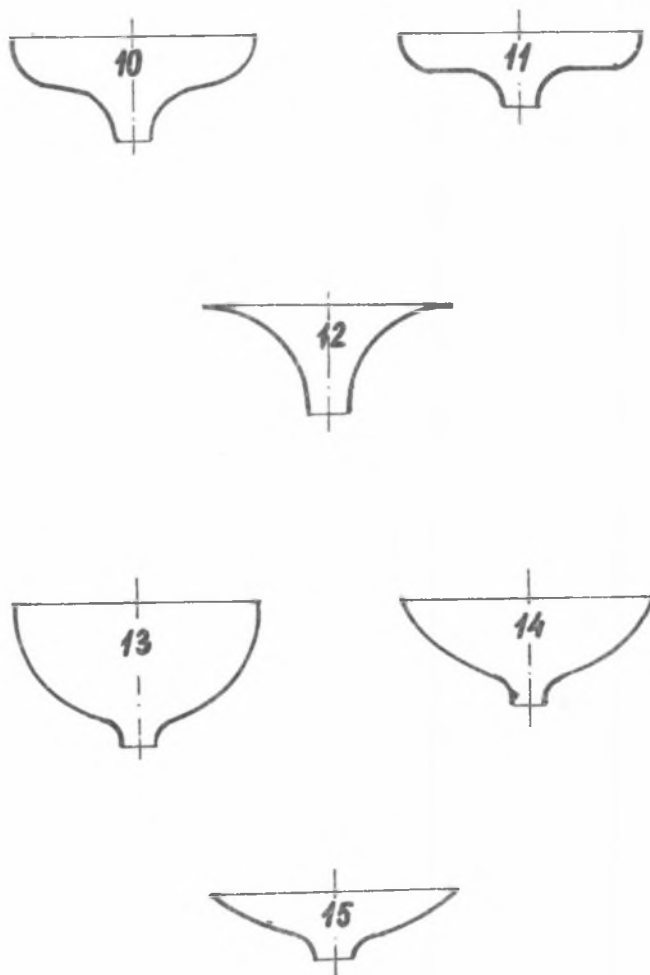
Badania nad rozdziałem gęstościowym prowadzono w hydrocyklonie wzbogacającym przedstawionym na rys. 1.



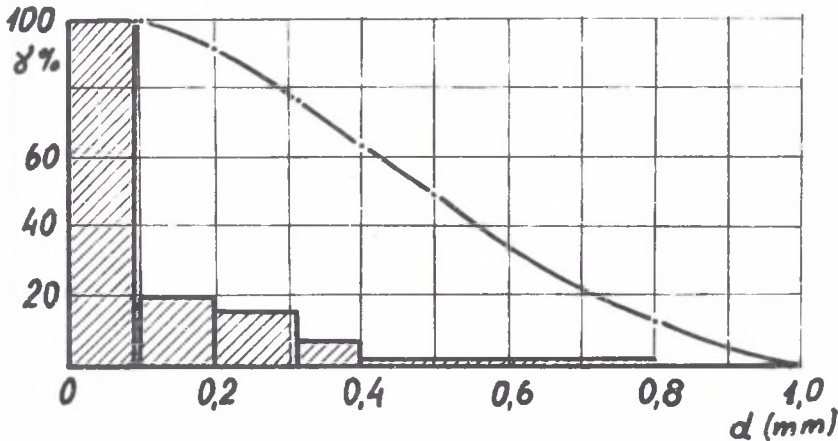
Rys. 1. Hydrocyklon wzbogacający  
 Fig. 1. Hydraulic cyclon



Rys. 2a. Profile stożków  
Fig. 2a. Conic profiles



Rys. 2b. Profile stożków  
Fig. 2b. Conic profiles



Rys. 3. Krzywa składu ziarnowego materiału modelowego z zawartością frakcji ciężkiej w poszczególnych klasach

Fig. 3. Grain-composition curve of model material containing heavy ends in the respective classes

W celu określenia wpływu kształtu części stożkowej na przebieg i rezultaty procesu rozdziału gęstościowego wykonano piętnaście wymiennych stożków różniących się geometrią profilu przekroju osłowego. Wszystkie stożki wykonano jako odlewy z kauczuku silikonowego i wyposażono w wymienne, kalibrowane dysze wylawowe wykonane z Metaplexu.

Badanymi parametrami geometrycznymi stożków były:

- $\varphi$  - kąt zbieżności stożka,
- $r_c$  - promień powierzchni sferycznej bądź odcinka powierzchni torusowej łączącej powierzchnię walcową części cylindrycznej z powierzchnią stożkową,
- $r_w$  - promień wycinka powierzchni torusowej łączącej powierzchnię stożkową z dyszą wylawową,
- $L_s$  - długość części stożkowej,
- $V_s$  - objętość części stożkowej,
- $d_w$  - średnica dyszy wylawowej.

Wspólną dla wszystkich stożków była jedynie wielkość średnicy większej podstawy  $D = 100$  (mm), (rys. 2).

Profile stożków dobrano w sposób umożliwiający usystematyzowanie ich w grupy o wspólnych cechach geometrycznych, w celu dokonania analizy porównawczej:

- A - (stożki oznaczone numerami 1, 2, 3, 4, 5) stożki konwencjonalne o kątach zbieżności zawartych w interwale  $\varphi = 60^\circ - 120^\circ$ ;
- B - (4, 6, 7) stożki o kącie zbieżności  $\varphi = 120^\circ$ ; różniące się promieniem powierzchni torusowej wierzchołka w interwale  $r_w = 0 - 25$  (mm);

C - (5, 8, 9) stożki o kącie zbieżności  $\varphi = 140^\circ$ ; różniące się promieniem powierzchni torusowej wierzchołka w interwale  $r_w = 0-25$  (mm);

D - (10, 11, 12) stożki utworzone z połączenia powierzchni torusowych  $r_w = 15-41,5$  (mm);  $r_o = 0-21,5$  (mm);

E - (13, 14, 15) stożki utworzone z połączenia powierzchni kulistych z powierzchniami torusowymi  $r_w = 10$  (mm);  $r_o = 50-75$  (mm).

Nadawę do badań stanowiły materiały modelowe (mieszanki dwufazowe) w układzie węgiel-magnetyt oraz węgiel-piasek kwarcowy.

Charakterystykę granulometryczną materiałów modelowych wraz z zawartością frakcji ciężkiej w poszczególnych klasach ziarnowych przedstawiono na rys. 3.

#### 4. WYNIKI BADAŃ

Wyniki badań modelowych oraz wnikliwa obserwacja przeprowadzonych doświadczeń potwierdzają istotny wpływ geometrii części stożkowej hydrocyklonu na przebieg i efektywność procesu rozdziału gęstościowego.

Czynnikiem decydującym o skuteczności rozdziału gęstościowego jest formujący się samorzadnie, w strefie wierzchołkowej części stożkowej, ośrodek o podwyższonej gęstości, tzw. płynne łożo. Jakość tego ośrodka uzależniona jest od stabilności wiru wytworzonego w hydrocyklonie.

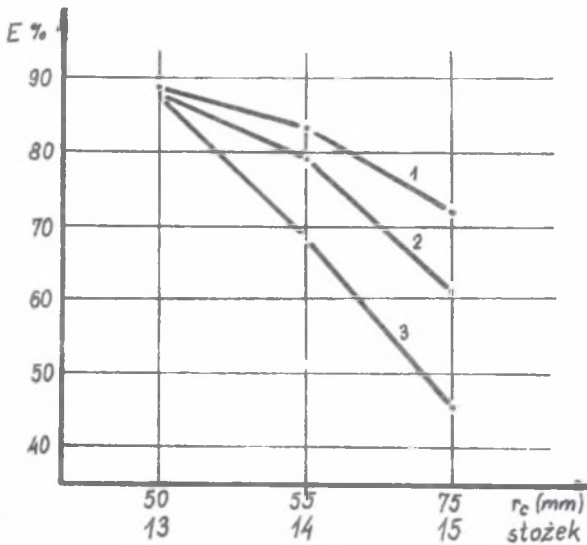
Na podstawie obserwacji procesu oraz rezultatów badań można stwierdzić, że karby konstrukcyjne występujące na granicach styku części cylindrycznej ze stożkową, a zwłaszcza części stożkowej z dyszą wylwową (a więc załamania i zagięcia o małym promieniu krzywizny), są źródłami silnych zaburzeń wiru. Skutkiem tych zaburzeń jest znaczny spadek efektywności rozdziału gęstościowego.

Wir, który wytwarza się i ustala w części cylindrycznej, natrafia nagle na przeszkodę w postaci stożka. Im kąt zbieżności stożka będzie większy, tym skutki "zderzenia" będą silniejsze. Jak duże są oddziaływania tych zaburzeń na stabilność wiru i płynnego łoża świadczą wyniki uzyskane na stożkach oznaczonych numerami 13, 14, 15.

Badania prowadzone na tych stożkach, przy tych samych parametrach procesu, wykazały wyraźne zróżnicowanie wartości wskaźnika efektywności rozdziału. Stożek 13 ma najłagodniej wyprofilowane połączenie części cylindrycznej ze stożkową. Zanotowano znaczny spadek wartości wskaźnika rozdziału gęstościowego z  $E_{13} = 88,11\%$  do  $E_{15} = 45,88\%$  (rys. 4).

Silniejsze zaburzenia wiru powstają w strefie wierzchołkowej stożka. Promień krążenia wiru zmniejsza się gwałtownie. Wir osiąga tam najwyższą prędkość styczną, zatem występuje tam najwyższy spadek ciśnienia. Przy nagłej zmianie kształtu powierzchni na granicy styku części stożkowej i dyszy wylkowej może wystąpić zjawisko kawitacji. Zjawisko to daje się



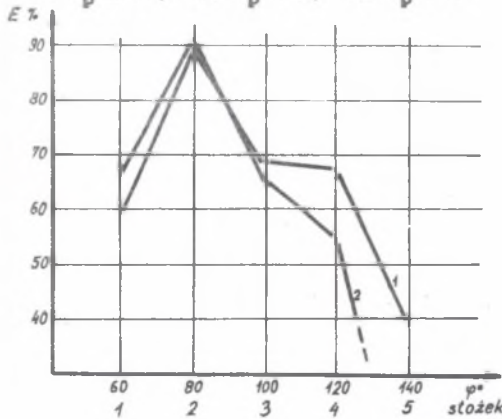


Rys. 4. Zależność wskaźnika efektywności rozdzielu gęstościowego od promienia powierzchni sferycznej części stożkowej (13, 14, 15). Parametry procesu:  $\alpha = 20$  (%);  $d_w = 15$  (mm)

1.  $h_p = 10$ ; 2.  $h_p = 5$ ; 3.  $h_p = 0$

Fig. 4. Dependence of the effectivity coefficient of the density distribution on the radius of the spherical surface of the conic part (13, 14, 15). Process parameters:  $\alpha = 20$  (%);  $d_w = 15$  (mm)

1.  $h_p = 10$ ; 2.  $h_p = 5$ ; 3.  $h_p = 0$

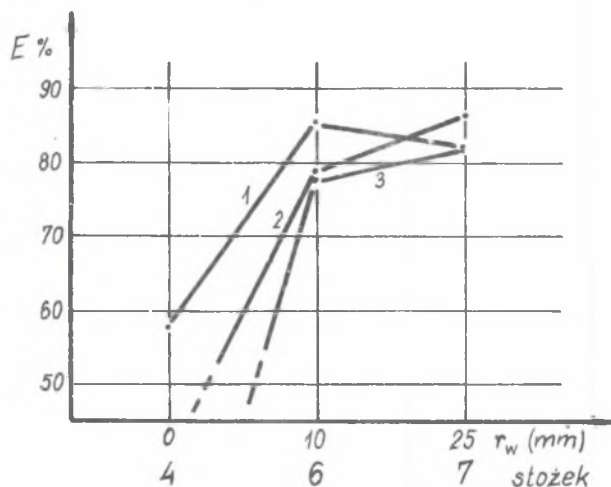


Rys. 5. Zależność wskaźnika efektywności rozdzielu gęstościowego od kąta zbieżności stożka (1, 2, 3, 4, 5). Parametry procesu:  $\alpha = 20$  (%);  $d_w = 15$  (mm)

1.  $h_p = 5$ ; 2.  $h_p = 0$  (mm)

Fig. 5. Dependence of the effectivity coefficient of the density distribution on the draft angle of the cone (1, 2, 3, 4, 5). Process parameters:  $\alpha = 20$  (%);  $d_w = 15$  (mm)

1.  $h_p = 5$ ; 2.  $h_p = 0$  (mm)

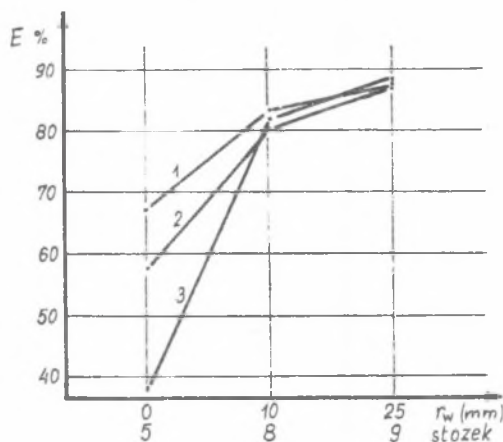


Rys. 6. Zależność wskaźnika efektywności rozdziału gęstościowego od promienia powierzchni torusowej wierzchołka stożka (4, 5, 6)  
 Parametry procesu:  $\alpha = 20$  (%);  $d_w = 15$  (mm);  $\varphi = 120$  ( $^\circ$ )

1.  $h_p = 10$ ; 2.  $h_p = 5$ ; 3.  $h_p = 0$  (mm)

Fig. 6. Dependence of the effectivity coefficient of the density distribution on the radius of the torus surface of the cone vortex (4, 5, 6)  
 Process parameters:  $\alpha = 20$  (%);  $d_w = 15$  (mm);  $\varphi = 120$  ( $^\circ$ )

1.  $h_p = 10$ ; 2.  $h_p = 5$ ; 3.  $h_p = 0$  (mm)



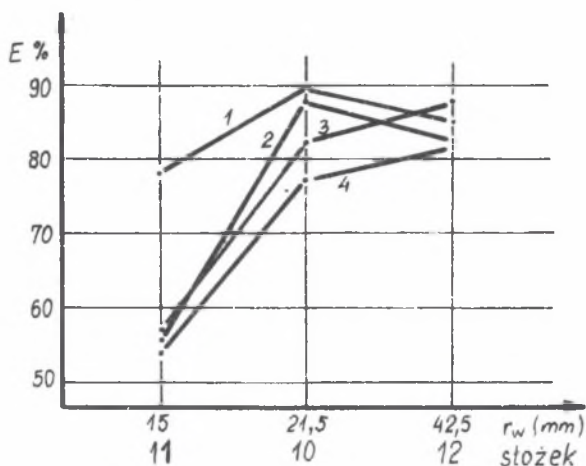
Rys. 7. Zależność wskaźnika rozdziału gęstościowego od promienia powierzchni torusowej wierzchołka stożka (5, 8, 9)  
 Parametry procesu:  $\alpha = 20$  (%);  $d_w = 15$  (mm);  $\varphi = 140$  ( $^\circ$ )

1.  $h_p = 15$ ; 2.  $h_p = 10$ ; 3.  $h_p = 5$  (mm)

Fig. 7. Dependence of the coefficient of the density distribution on the radius of the torus surface of the cone vortex (5, 8, 9)

Process parameters:  $\alpha = 20$  (%);  $d_w = 15$  (mm);  $\varphi = 140$  ( $^\circ$ )

1.  $h_p = 15$ ; 2.  $h_p = 10$ ; 3.  $h_p = 5$  (mm)



Rys. 8. Zależność wskaźnika efektywności rozdzielu gęstościowego od promienia powierzchni torusowej wierzchołka stożka (10, 11, 12)

Parametry procesu:  $\alpha = 20$  (%),  $d_w = 15$  (mm)

1.  $h_p = 15$ ; 2.  $h_p = 10$ ; 3.  $h_p = 5$ ; 4.  $h_p = 0$  (mm)

Fig. 8. Dependence of the effectiveness coefficient of the density distribution on the radius of the torus surface of the cone vortex (10, 11, 12)

Process parameters:  $\alpha = 20$  (%),  $d_w = 15$  (mm)

1.  $h_p = 15$ ; 2.  $h_p = 10$ ; 3.  $h_p = 5$ ; 4.  $h_p = 0$  (mm)

łatwo zauważyć zarówno poprzez efekty akustyczne (charakterystyczne dudnienie) jak i silne drgania hydrocyklonu.

Potwierdzenie tego uzyskano w badaniach prowadzonych na stożkach konwencjonalnych, oznaczonych numerami (1, 2, 3, 4, 5). Stożki o większych kątach zbieżności cechują się większą ostrością karbu na granicy styku z dyszą wylewową.

Najwyższą efektywność rozdzielu uzyskano na stożku 2. Zwiększenie kąta zbieżności od  $80^\circ$  do  $140^\circ$  powoduje znaczny spadek wartości wskaźnika efektywności rozdzielu (rys. 5) z  $E_2 = 91,24\%$  do  $E_5 = 4,72\%$ .

Poprawę stabilności wiru osiągnąć można, łagodząc karb na styku stożka z dyszą wylewową. Pełne potwierdzenie tego twierdzenia uzyskano w badaniach prowadzonych na stożkach o złożonej geometrii profilu, przy jednakowej zbieżności stożka. Zarówno dla stożków grupy (4, 6, 7) o kącie zbieżności  $\varphi = 120^\circ$ , jak i stożków grupy (5, 8, 9)  $\varphi = 140^\circ$  łagodzenie karbu powierzchnią torusową znacznie poprawiło efektywność rozdzielu gęstościowego (rys. 6, rys. 7).

Ośrodek o podwyższonej gęstości, tworząc się w wierzchołku części stożkowej, znajduje się w centrum zaburzeń powstających w wirze na styku stożka z dyszą wylewową. Jest więc bardziej narażony na utratę stabilności

w wyniku zaburzeń powstałych w tej części stożka. Znajduje to potwierdzenie w wynikach badań przeprowadzonych na stożkach grupy (10, 11, 12). Stożek oznaczony numerem 12 posiada najłagodniej wyprofilowany wylew i mimo najostrzejszego karbu na granicy styku części cylindrycznej z częścią stożkową, daje najwyższe wartości wskaźnika efektywności rozdzielania w tej grupie stożków (rys. 8).

## 5. WNIOSKI

1. Czynnikiem decydującym o skuteczności rozdzielania gęstościowego jest formujący się samorodnie, w strefie wierzchołkowej części stożkowej hydrocyklonu, ośrodek o podwyższonej gęstości, tzw. płynne łożo. Jakość tego ośrodka uzależniona jest od stabilności wiru wytworzonego w hydrocyklonie.

2. Na podstawie obserwacji procesu oraz rezultatów badań można stwierdzić, że karby konstrukcyjne występujące na granicach styku części cylindrycznej ze stożkową, a zwłaszcza części stożkowej z dyszą wylewową, są źródłami silnych zaburzeń wiru. Skutkiem tych zaburzeń jest znaczny spadek efektywności rozdzielania gęstościowego.

3. Najwyższą efektywność rozdzielania gęstościowego uzyskano w hydrocyklonach ze stożkami o złożonej geometrii przekroju osiowego z łagodnie wyprofilowanym wylewem. Są to stożki o kątach zbliżności  $\varphi = 120^\circ$  i  $\varphi = 140^\circ$  oraz promieniu krzywizny wierzchołka  $r_w = 25$  (mm).

## LITERATURA

- [1] Bednarski S.: Podział, systematyka i budowa hydro- i multihydrocyklonów oraz innych urządzeń odśrodkowych typu cyklon. Rudy Żelaza, Nr 3-4, 1970.
- [2] Bednarski S.: Konstrukcja hydrocyklonów. Rudy Żelaza, Nr 5-6, 1970.
- [3] Błaszczyński S.: Badania nad wzbogacaniem mułów węglowych w hydrocyklonie o potrójnym kącie zbliżności stożka. ZN Politechniki Śląskiej, s. Górniotwo, z. 48, 1971.
- [4] Błaszczyński S., Olas A., Świerkot-Kopala A.: Wzbogacanie drobnych ziarn węglowych w hydrocyklonach. ZN Politechniki Śląskiej, s. Górniotwo, z. 88, 1979.
- [5] Kelsall D.F.: A study of the motion of solid particles in a hydraulic cyclone. Trans. Inst. Chem. Eng., vol. 30, No 2, 1952.
- [6] Lisoń J.: O wzbogacaniu drobnouziarnionych węgla w hydrocyklonach z ośrodkiem wodnym. Wzbogacanie i użycia kopalni, Nr 5, 1974.
- [7] Lopatin A.G., Sergeev J.A., Skobeev I.K.: Vlijanie nekotorych konstruktivnych parametrov i režimnych faktorov na process gravitacionnogo obogashhenija v gidrociklonach. I.V.U.Z., Cvetnaja Metallurgija, Nr 2, 1974.
- [8] Szpyrka J.: Wpływ geometrii części stożkowej hydrocyklonu wzbogającego ośrodku wodnym na separację składników ciężkich z drobnouziarnionych węgla. Praca Doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1986.

- [9] Visman J.: The cleaning of highly friable coals by water cyclones. IV Kongres Przeróbki Mechanicznej Węgla, Harrogate, 1962.
- [10] Visman J.: Bulk processing of fine materials by means of compound water cyclones. Canadian Mining Journal, vol. 87, Nr 6, 1966.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ КОНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ОБОГАЩАЮЩЕГО  
ГИДРОЦИКЛОНА В ВОДНОЙ СРЕДЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
ПЛОТНОСТИ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Р е з ю м е

Исследования в рамках представленной работы имеют целью повышение эффективности распределения плотности мелкозернистых материалов. Концентрируются главным образом на влиянии геометрии конической части гидроциклона, как одного из наиболее важных элементов, воздействующих на ход процесса распределения, особенно в обогащающих гидроциклонах исключительно в водной среде.

INVESTIGATIONS ON THE INFLUENCE OF THE GEOMETRY OF THE CONIC PART  
OF A HYDROCYCLONE IN AN AQUEOUS MEDIUM UPON THE EFFECTIVENESS OF  
THE DENSITY DISTRIBUTION OF FINE-GRAINED MATERIAL

S u m m a r y

The aim of the investigations presented in this paper was to increase the effectiveness of the density distribution of fine-grained material. They deal mainly with the influence of the geometry of the conic part of a hydrocyclone being one of the most essential elements affecting the process of separation, particularly in the case of hydrocyclones operating merely in an aqueous medium.