

Tadeusz KNAP  
Politechnika Rzeszowska

## WYSOKIEJ SKUTECZNOŚCI ODPYLACZ WIRNIKOWY - BUDOWA I WŁAŚCIWOŚCI

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono podstawowe własności i cechy przepływów dwu- i wielofazowych. Scharakteryzowano przepływy płynów lepkich oraz ruch cząstek ciał stałych rozdrobnionych w ośrodku gazowym. Określono główne parametry ruchu swobodnego cząstek pod wpływem sił grawitacji oraz w warunkach przeciążenia. Podano uproszczone równania ruchu cząstek pyłu w kanałach wirujących. Przedstawiono metodę określenia skuteczności odpylania, jeśli znane są parametry pyłu oraz parametry przepływowe, geometryczne i ruchowe odpylacza. W części eksperymentalnej omówiono stanowisko badawcze, budowę odpylacza wirnikowego oraz zasadę jego działania. W zakończeniu pracy sformułowano wnioski.

## ROTATING DUST SEPARATOR OF HIGH EFFICIENCY

**Summary.** The paper presents a new design which can serve as a highly effective dust separator installed within different neighbourhoods. To rationalise this design its theory has been developed. It includes the mathematical model of the motion of two phase media taking place in ducted channels rotating with a high angular velocity and conducting the medium such as dusty air. Presented analysis offers also some simplified model which may serve as a basis for the initial design of such devices. In the concluding part of the paper the experimental stand to test the dust separator is also presented. The results obtained in these two independent ways support each other and show satisfying accordance between them.

### 1. WPROWADZENIE

Powietrze atmosferyczne zawiera niewielkie ilości substancji stałych i ciekłych w postaci rozdrobnionej. W przyrodzie ruch powietrza jest w istocie transportem wielofazowym. Według badań amerykańskich określono średnie stężenie cząstek pyłu w powietrzu atmosferycznym:  $C_A = 3 \cdot 10^6$  cząstek/m<sup>3</sup>. Można przyjąć, że cząstki pyłu o średnicy poniżej 1 μm nie osiadają w warunkach naturalnych, są więc stałym składnikiem powietrza atmosferycznego. W powietrzu

atmosferycznym przy znacznej burzliwości i wietrze mogą znajdować się cząstki o średnicy 10  $\mu\text{m}$ . Istotne znaczenie dla zdrowia człowieka mają skład chemiczny pyłu, jego stężenie oraz skład frakcyjny. Rozdzielenie faz w wielu dziedzinach techniki staje się problemem podstawowym. Największa trudność rozdzielania faz występuje dla cząstek o średnicach poniżej 20  $\mu\text{m}$  przy jednocześnie wysokich jednostkowych kosztach. Urządzenia przemysłowe do odpylania gazów cechuje duża różnorodność konstrukcji [1], [2], [3], [7]. Różnorodność ta wynika z właściwości pyłu, oczekiwanej skuteczności odpylania, przyjętej zasady działania, kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych itp.

W artykule omówiono urządzenie wykorzystujące właściwości ruchu zapyłonego gazu w kanałach wirujących do oddzielenia pyłu od gazu, określane jako odpylacz wirnikowy [4], [5], [6]. W pracy przedstawiono analizę ruchu cząstek w kanałach wirujących, konstrukcję urządzenia, w którym realizuje się taki przepływ, oraz weryfikację doświadczalną.

Pod nazwą odpylacze wirnikowe znane są konstrukcje opisane w pracy [2], np. Roto-Clone firmy American Air Filter Co oraz Econdust firmy Bronswerk i inne, które nie znalazły jednak szerszego zastosowania. Wykorzystuje się w nich również duże przeciążenia cząstek, jednak w czasie bardzo krótkim, nie zapewniając wysokiej skuteczności odpylania.

Podstawowa różnica w stosunku do przedstawionego w pracy odpylacza wirnikowego to odmienna konstrukcja wirnika. W prezentowanym odpylaczu czas przeciążenia cząstek może być znacznie dłuższy, zależny od długości wirnika i prędkości przepływu.

## 2. RUCH CZĄSTEK PYŁU W OŚRODKU GAZOWYM POD WPŁYWEM SIŁ MASOWYCH

Ruch pojedynczej cząstki pyłu w ośrodku nieruchomym ciągłym pod wpływem siły grawitacji jest jego najprostszym przypadkiem, którego przedstawienie umożliwi podkreślenie wielu istotnych cech związanych z ruchem cząstek [6].

Założenia:

- na cząstkę działają tylko siły ciężkości, oporu opływu i bezwładności,
- pominięto siłę wyporu wynikającą z różnicy gęstości materiału cząstki i płynu,
- pominięto siłę wynikającą z gradientu ciśnienia oraz wpływ nieciągłości ośrodka.

Przyjmując cząstkę w kształcie kuli równanie ruchu przyjmie postać :

$$\frac{dW}{dt} = k \cdot g - C_x \cdot B \cdot W^2 \quad (1)$$

Dla ruchu ustalonego otrzymuje się:

$$W_u = \sqrt{\frac{k \cdot g}{B \cdot C_x}}, \quad (2)$$

gdzie  $C_x$  - współczynnik oporu opływu kuli. Do obliczeń przyjęto wzór Adamowa [6], który zapewnia dobrą zgodność z eksperymentem dla  $Re = 0 - 2 \cdot 10^5$  w postaci:

$$C_x = \frac{24}{Re} \cdot (1 + 0.065 \cdot Re^{0.666})^{1.5} \quad (3)$$

$$Re = \frac{W \cdot d}{\nu} \quad \text{- liczba Reynoldsa} \quad (4)$$

Na rys. 1 przedstawiono wyniki obliczeń dla wybranych wielkości cząstek oraz parametrów ośrodka gazowego i cząstki.

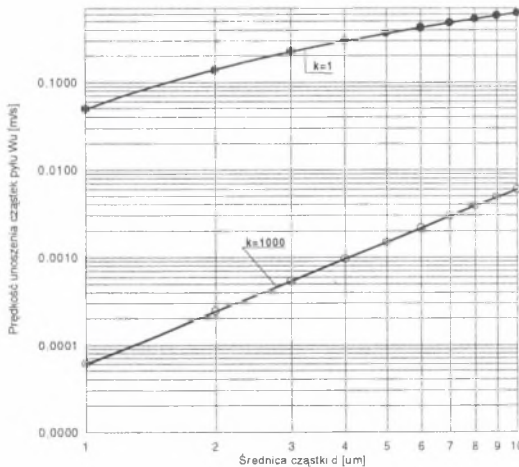
Przyjęte parametry:

$\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$  - gęstość powietrza,

$t = 18 \text{ }^\circ\text{C}$  - temperatura powietrza,

$\rho_c = 2000 \text{ kg/m}^3$  - gęstość materiału cząstki,

$k=1$  oraz  $k=1000$  – przeciążenie.



Rys. 1. Prędkość unoszenia cząstek pyłu dla przeciążenia  $k=1$  oraz  $k=1000$

Fig. 1. Free fall velocity dust particles for  $k=1$  and  $k=1000$

W analizie przypadków technicznych dla cząstek o średnicy  $d < 10 \text{ } \mu\text{m}$  parametry ruchu nieustalonego mogą być pominięte i analizowany będzie tylko ruch ustalony.

### 3. MODEL MATEMATYCZNY RUCHU CZĄSTEK W KANAŁACH WIRUJĄCYCH

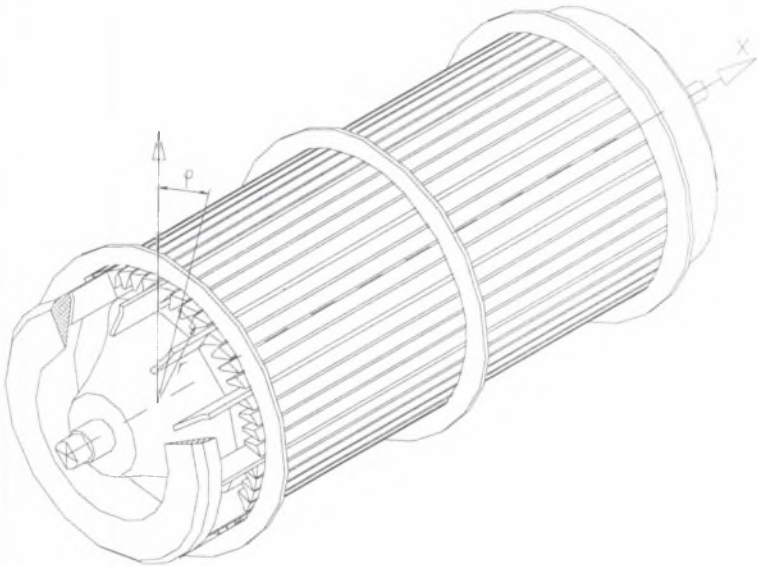
#### 3.1. Równania ruchu cząstek w kanałach wirujących

Ruch cząstek w kanałach wirujących jest zagadnieniem złożonym. Główną trudność stanowi nieznajomość rozkładu prędkości w przekroju poprzecznym kanału. Przekrój poprzeczny kanału ma złożoną geometrię wynikającą z uwarunkowań przepływowych oraz wytrzymałościowych, które wirnik powinien spełniać. Równania ruchu cząstek w kanałach wirujących zamieszczono w pracy [6]. W referacie niniejszym będą przedstawione i omówione równania uproszczone.

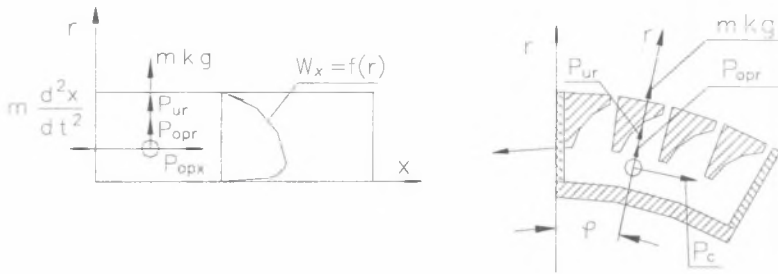
Założenia:

- jest znany rozkład prędkości gazu w kanale wirnika i nie zależy on od stężenia fazy stałej oraz od jej rozłożenia w kanale,
- przepływ gazu w kanale wirnika jest ustalony,
- prędkość obrotowa wirnika jest stała,
- średnica cząstek  $d < 10 \mu\text{m}$ .

Przyjęto biegunowy układ współrzędnych.



Rys. 2. Wirnik odpylacza z zaznaczonym układem współrzędnych  
Fig. 2. Perspective view of the rotor showing polar coordinates



Rys. 3. Siły działające na cząstkę w wirującym kanale odpylacza

Fig. 3. Details of the forces acting on a dust particle within rotating channel of the rotor

**Uwaga.** W równaniach ruchu pominięto: siły unoszenia, siły od gradientu ciśnienia na kierunku promieniowym i osi x; ich udział względny w stosunku do sił odśrodkowych jest bardzo mały. Pominięto również człony sił oporu opływu na kierunku wzdłużnym. Przyjęto, że cząstki mają prędkość ośrodka gazowego. Takie założenie jest dopuszczalne dla cząstek o średnicy  $d < 10 \mu\text{m}$ . Wykorzystując zasady mechaniki oraz wprowadzając uproszczenia, równania ruchu przyjmują postać:

$$\frac{dW_r}{dt} = r \cdot \omega^2 - B \cdot C_x \cdot W_r \cdot \sqrt{W_r^2 + (\omega_w \cdot r)^2} \quad (5)$$

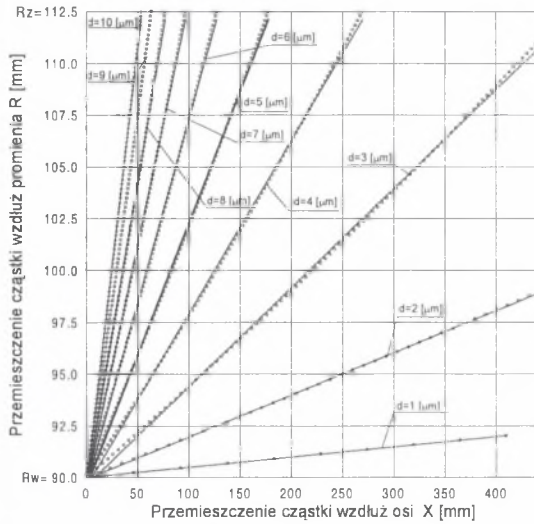
$$\frac{d\omega}{dt} = 2 \cdot \frac{\omega}{r} \cdot W_r + B \cdot r \cdot \omega_w^2 \quad (6)$$

Rozwiązanie równań (5) i (6) przeprowadzono wykorzystując metodę różnic skończonych. Na rysunku 4 przedstawiono tor lotu cząstki przy założeniu stałej prędkości (wzdłuż promienia) w kanałach, na rys. 5 dla zmiennej prędkości (wzdłuż promienia) w kanałach, przy średniej prędkości w obydwu przypadkach  $W_{x\text{sr}} = 10 \text{ m/s}$ .

Przykład obliczenia torów cząstek dla danych:

- średnica cząstki  $d = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 \mu\text{m}$ ,
- gęstość materiału cząstki  $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$ ,
- początkowa odległość cząstki od osi obrotu (promień)  $r_p = 90 \text{ mm}$ ,
- prędkość obrotowa kanału  $n = 2850 \text{ obr/min}$ ,
- prędkość powietrza w kanale  $W_x = 10 \text{ m/s}$  i jest stała,
- oś kanału jest równoległa do osi obrotu,  $R_w = 90 \text{ mm}$ ,  $R_z = 112.5 \text{ mm}$ .

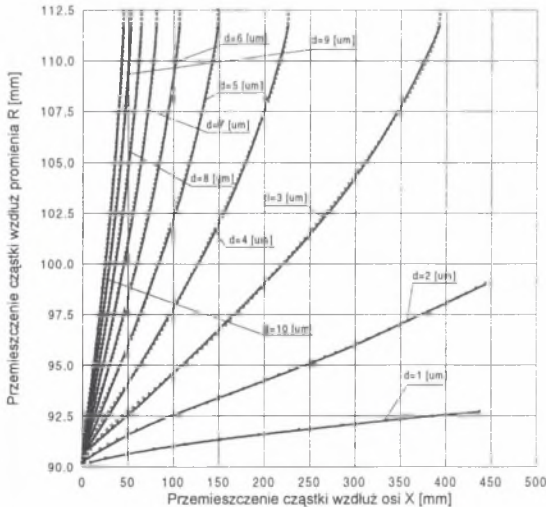
Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 4



Rys. 4. Tory cząstek kulistych o średnicach 1 do 10  $\mu\text{m}$  w kanale wirnika przy stałej prędkości powietrza w kanale (wzdłuż promienia)

Fig. 4. Trajectories of the spherical dust particles for a constant axial speed

Wyniki obliczeń dla zmiennej prędkości zależnej od promienia, określonej doświadczalnie w kanale ( $W_{\text{sr}}=10$  m/s) przedstawiono na rys. 5. Porównanie rysunków 4 i 5 uwiadcza wpływ rozkładu prędkości gazu na tor cząstki pyłu. W obszarze o zmniejszonej prędkości wzdłużnej zwiększone jest przemieszczenie promieniowe, które zwiększa skuteczność rozdzielania faz.



Rys. 5. Tory cząstek kulistych o średnicach 1 do 10  $\mu\text{m}$  w kanale wirnika przy zmiennej prędkości powietrza w kanale (wzdłuż promienia)

Fig. 5. Trajectories of the spherical dust particles for the axial speed varying in radial direction

### 3.2. Metoda określenia skuteczności rozdzielania faz w odpylaczu wirnikowym

Przy projektowaniu urządzeń odpylających bardzo istotnym problemem jest określenie skuteczności odpylania. Przedstawiona analiza, umożliwiająca określenie toru cząstek w kanałach wirujących, pozwala na określenie skuteczności odpylania w odpylaczu wirnikowym przy następujących założeniach ogólnych:

- znany jest rozkład frakcyjny cząstek (masowy) na wejściu do odpylacza,
- znane są parametry geometryczne oraz pracy odpylacza,
- geometria kanałów jest geometrycznie podobna do ODP-225.

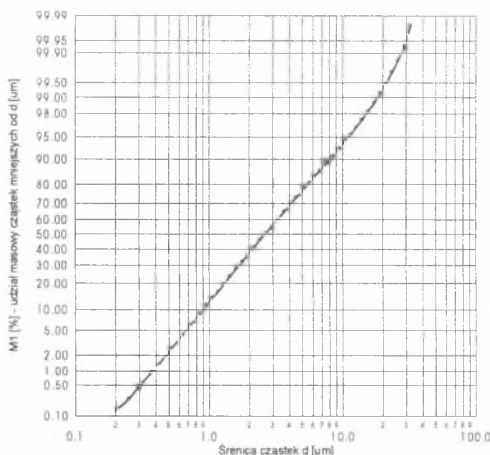
Wzór na skuteczność odpylania ma postać:

$$\eta = 100 - \frac{1}{Q_c} \sum_{i=1}^M [0.5 \cdot \Delta M_1(i) + M_1(i)] \cdot \Delta Q(i) \quad (7)$$

### 3.3. Wyniki analizy porównawczej

Przyjętym parametrem do porównań była skuteczność odpylania. Przyjmując w obliczeniach parametry geometryczne i ruchowe odpylacza takie same jak w eksperymencie, tj.:

- $n = 2850$  obr/min - prędkość obrotowa wirnika,
- $Q = 608.6$  m<sup>3</sup>/h - natężenie przepływu przez odpylacz,
- rodzaj pyłu - pył kwarcowy,
- skład frakcyjny przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Rozkład frakcyjny badanego pyłu kwarcowego

Fig. 6. Probability density of the dust particle sizes



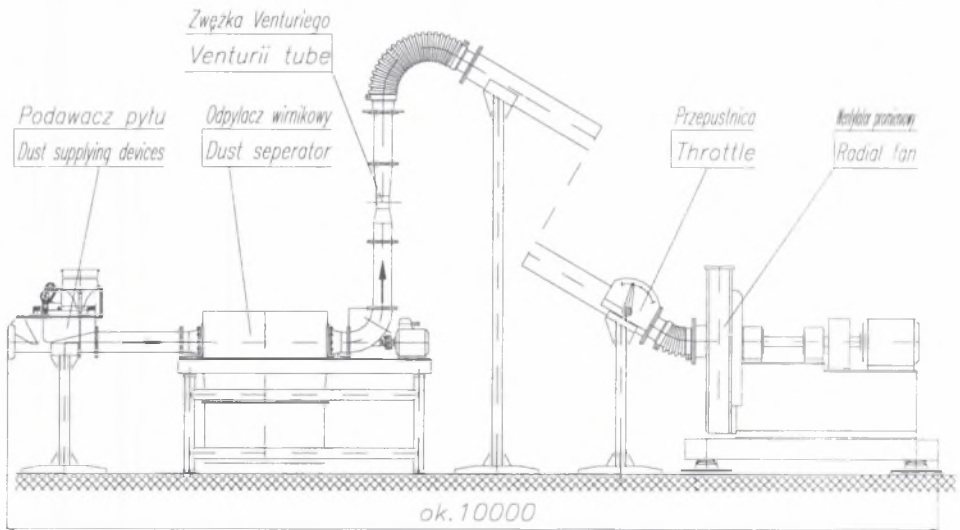
Porównanie wyników skuteczności odpylania określonej metodą obliczeniową przy wykorzystaniu wzoru (7) z wynikami eksperymentu.

Skuteczność określona metodą obliczeniową	Skuteczność określona ekspery- mentalnie
$\eta_{obl} = 96.5 \%$	$\eta_{eksp} = 97.5 \%$

#### 4. BADANIA EKSPERYMENTALNE ODPYLACZA WIRNIKOWEGO

##### 4.1. Opis stanowiska badawczego

Stanowisko badawcze przedstawiono na rys. 7. Składa się ono z podawacza pyłu (zbiornik pyłu, podajnik wibracyjny oraz ssawka z odcinkiem prostym rurociągu), odpylacza wirnikowego, odcinka rurociągu pomiarowo-regulacyjnego oraz wentylatora promieniowego.



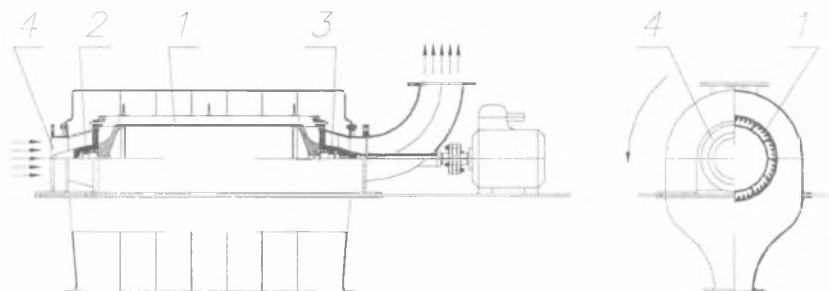
Rys. 7. Stanowisko do badań odpylacza wirnikowego  
Fig. 7. Outlook of the experimental stand

W odcinku pomiarowo-regulacyjnym znajdują się: zwężka Venturiego do pomiaru natężenia przepływu oraz przepustnica. Wirnik odpylacza napędzany jest silnikiem elektrycznym asynchronicznym klatkowym. Zasilanie silnika odbywa się za pomocą przekształtnika częstotliwości.



## 4.2. Budowa odpylacza wirnikowego

Na rys. 8 przedstawiono w przekroju odpylacz wirnikowy w wersji ostatecznej. Podstawowym elementem jest wirnik 1 podparty na końcach w węzłach łożyskowych 2 i 3. W części wlotowej 4 znajduje się kołnierz do podłączenia rurociągu doprowadzający zapyłony gaz.



Rys. 8. Odpylacz wirnikowy

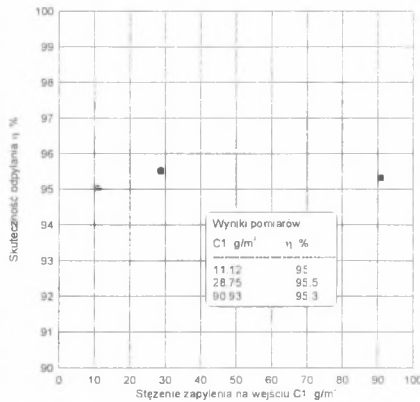
Fig. 8. Radial cross-section of the dust separator

Końcówka wału na wyjściu wirnika umożliwia sprzęgnięcie go z silnikiem napędowym. Konstrukcja wirnika w części wlotowej i wylotowej ma promieniowe przejście zakończone łopatkami. Część wlotowa przechodzi w równoległe kanały rozdzielone przegrodami na całej cylindrycznej części wirnika.

**Zasada działania odpylacza:** zanieczyszczony pyłem gaz dostaje się do króćca wlotowego, a następnie ukierunkowany jest na obracający się wirnik. Na skutek wymuszonego przepływu przez odpylacz oraz ruchu obrotowego wirnika siła odśrodkowa przemieszcza cząstki na zewnątrz wirnika. Cząstki o małych wymiarach dostają się do wzdłużnych kanałów, gdzie pod wpływem przeciążenia uzyskują znaczną prędkość promieniową, powodującą zakrzywienie toru lotu ku zewnętrznej powierzchni wirnika. Wytrącane na zewnątrz wirnika cząstki opadają do dolnej części obudowy. Ścianki boczne kanału mają korzystny wpływ na skuteczność odpylania, ponieważ w obszarze warstwy przyściennej przy ścianie prędkość wzdłużna zmniejsza się, a zatem wydłuża się czas oddziaływania przeciążenia cząstek znajdujących się w tym obszarze.

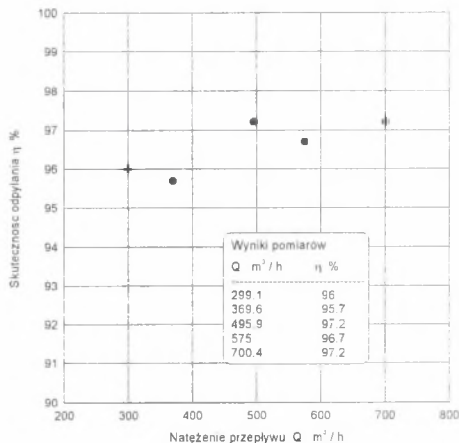
### 4.3. Wpływ niektórych parametrów pracy obiektu badań na skuteczność odpylania

**Wpływ stężenia zapylenia na wejściu do odpylacza** - w zakresie możliwych do uzyskania zmian stężenia pyłu na wejściu do urządzenia nie stwierdzono jego wpływu na skuteczność rozdzielania faz. Wyniki badań przedstawiono na rys. 9. Różnice skuteczności są niewielkie i mieszczą się w granicach błędu pomiaru.



Rys. 9. Wpływ stężenia pyłu na wejściu do odpylacza na skuteczność odpylania  
Fig. 9. Intensity of the dust fraction vs. dust separation efficiency

**Wpływ natężenia przepływu** - zwiększenie natężenia przepływu mieszaniny gazu i pyłu przez odpylacza powoduje niewielki wzrost skuteczności odpylania. Wyniki przedstawiono na rys.10.



Rys. 10. Wpływ natężenia przepływu na skuteczność odpylania  
Fig. 10. Flow rate variations versus the dust separation efficiency

## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Odpylacz wirnikowy jest urządzeniem mechanicznym posiadającym poszerzone możliwości rozdzielania faz w stosunku do dotychczas osiągniętych.

Wnioski ogólne:

1. Zjawiska występujące podczas przepływów dwu- i wielofazowych mieszanin w kanałach wirujących stwarzają korzystne warunki do rozdzielania faz.
2. Skuteczność odpylania dla zadanego pyłu jest zależna od wartości przeciążenia, kształtu przekroju poprzecznego kanału, jego długości i prędkości średniej przepływu przez kanały.
3. Przedstawiona metoda umożliwia określenie skuteczności odpylania dla pyłów o znanym rozkładzie frakcyjnym oraz parametrach geometrycznych i ruchowych odpylacza wirnikowego.

## LITERATURA

1. Anioła J., Drzymała Z., *Wybrane zagadnienia z projektowania urządzeń ochrony atmosfery*, Zeszyty AGH, Kraków, 1973
2. Juda J., Nowicki M., *Urządzenia odpylające*. PWN, Warszawa 1986
3. Kabsch P., *Odpylanie i odpylacze*, t.1, PWT, Warszawa, 1992
4. Knap T., *Urządzenie do oczyszczania gazów z pyłów*, Patent nr 67099, Urząd Patentowy PRL, 1973, Warszawa
5. Knap T., Knap A., Knap K., *Urządzenie do oczyszczania gazów z pyłów*. Patent nr 170030. Urząd Patentowy RP, 1996, Warszawa
6. Knap T., *Odpylacz wirnikowy*, Piąte Ogólnopolskie Sympozjum „Zastosowanie mechaniki płynów w inżynierii środowiska - 97”, ref. 16, str. 161-169, Gliwice 1997
7. Warych J., *Oczyszczanie przemysłowych gazów odlotowych*. WNT, Warszawa 1994

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

$$B = 0.75 \cdot \frac{\rho}{\rho_c} \cdot \frac{1}{d} \quad \text{-- stała}$$

$C_x$  – współczynnik oporu opływu cząstki

$d$  – średnica cząstki

$g$  – przyspieszenie ziemskie

$k$  – przeciążenie ( $k = \frac{r \cdot \omega}{g}$ )

$M_1(i)$  – udział masowy cząstek o średnicy  $d(i) < d_{gr}$ , na promieniu  $R(i) > R_w$

$\Delta M_1(i) = M_1(i+1) - M_1(i)$  – udział masowy cząstek z warstwy między  $R(i+1)$  a  $R(i)$

$R$  – promień

$\Delta Q(i)$  – natężenie przepływu przez warstwę między  $R(i+1)$  a  $R(i)$

$Q_c$  – natężenie przepływu przez odpylacz

$W$  – prędkość cząstki

$W_r$  – składowa prędkości promieniowej cząstki

$W_u$  – prędkość unoszenia cząstki

$\rho$  – gęstość ośrodka gazowego

$\rho_c$  – gęstość materiału cząstki

$\omega$  – prędkość kątowna cząstki względem osi wirnika

$\omega_w$  – prędkość kątowna cząstki względem kanału

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Tadeusz Chmielniak

## Abstract

Paper presents main properties and characteristics of the flowing two-phase and multi-phase media. The description contains both viscous fluids and dispensed particles moving through out sounding them gases. Main parameters of the free motion caused by the gravitational field and due to external accelerations imposed on investigated particles are given. Theoretical part of the paper analyses the physical nature of the dust particles forced to move through rotating channels. Equations of motion were analysed having in mind the discussion of the importance of the particular terms and possibilities to simplify them while building simple models of the investigated motion. Experimental part presents the testing stand and gives some details of the dust separator under investigation. The idea of the dust separator is based on the forced motion of the dust trough-out rotating channels undergoing high accelerations what eventually resents them out of the devices. The paper ends with short conclusions.