

Maria MAZUR

Instytut Techniki Ciepłej  
i Mechaniki Płynów  
Politechnika Wrocławska

#### PODSTAWY TEORETYCZNE PROCESU SEPARACJI PYŁU W PRZECIWBIEŻNYM ODPYLACZU CYKLONOWYM

**Streszczenie.** Przeciwbieżny odpylacz cyklonowy należy do nowej generacji odpylaczy mechanicznych, w których wykorzystuje się efekt siły odśrodkowej. Separacja pyłu spowodowana jest dynamicznym działaniem dwóch strumieni gazu wirujących w komorze odpylacza: gazu zapyłonego wprowadzonego w dolnej części odpylacza i tzw. gazu pomocniczego wprowadzonego w jego górnej części.

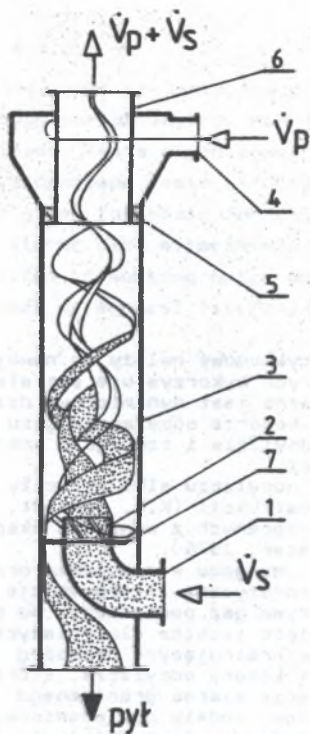
Dotychczasowe modele przepływu gazu w odpylaczu albo straciły swą aktualność ze względu na ewolucję konstrukcji (K.R. Schmidt, RFN, 1963), albo prowadzą do wniosków sprzecznych z wynikami eksperymentalnymi (D.F. Ciliberti, B.W. Lancaster, 1976).

Zaproponowany teoretyczny model przepływu gazu w odpylaczu oraz równanie ruchu ziaren pyłu umożliwiają teoretyczną interpretację roli, jaką w procesie separacji pyłu odgrywa gaz pomocniczy. Na podstawie analizy teoretycznej procesu przyjęto istotne dla dalszych rozważań założenie o stałości warunków determinujących przebieg procesu separacji pyłu na całej wysokości komory odpylacza, które to założenie posłużyło do zdefiniowania pojęcia ziarna granicznego, przedziałowej skuteczności odpylenia, budowy modelu obliczeniowego, a w efekcie do wprowadzenia zależności wiążącej efekt działania odpylacza z jego podstawowymi parametrami konstrukcyjnymi i eksploatacyjnymi.

Przeciwbieżny odpylacz cyklonowy stanowi nową generację odpylaczy mechanicznych suchych, w których separacja pyłu zachodzi w polu siły odśrodkowej. Zasadę budowy i działania odpylacza ilustruje rys. 1. Nie wnikając na razie bliżej w matematyczno-fizyczny opis zjawisk, można ogólnie stwierdzić, że separacja pyłu spowodowana jest dynamicznym działaniem dwóch strumieni gazu wirujących w komorze odpylacza: gazu zapyłonego  $\dot{V}_s$  wprowadzonego centralnie w jego dolnej części i gazu pomocniczego  $\dot{V}_p$  wprowadzonego od góry w pobliżu ścian komory. Dla określonej konstrukcji odpylacza i przy zachowaniu jego nominalnej przepustowości skuteczność odpylenia zależy od ilości wprowadzonego gazu pomocniczego wyrażonej stosunkiem  $\dot{V}_p/\dot{V}_s$  oraz od składu ziarnowego pyłu. Typowe przebiegi charakterystyk sprawnościowo-energetycznych odpylacza przedstawia rys. 2.

Szybki rozwój konstrukcji i osiągnięcie zadowalających parametrów pracy odpylacza na drodze eksperymentalnej nie sprzyjały prowadzeniu badań

teoretycznych. Znalazło to swój wyraz w niewielkiej ilości publikacji na temat teorii odpylacza.



Rys. 1. Zasada działania przeciwbieżnego odpylacza cyklonowego 7

1 - wlot gazu zapyłonego, 2 - element formujący przepływ gazu zapyłonego, 3 - komora odpylająca, 4 - wlot gazu pomocniczego, 5 - element formujący przepływ gazu pomocniczego, 6 - wylot gazu odpylonego, 7 - taśma zwrotna

Fig. 1. Principle of work of a cyclone with extra backward circulation

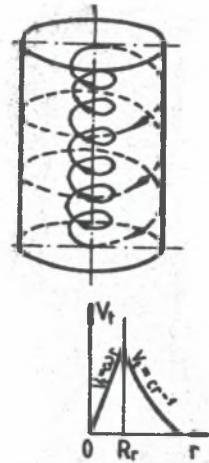
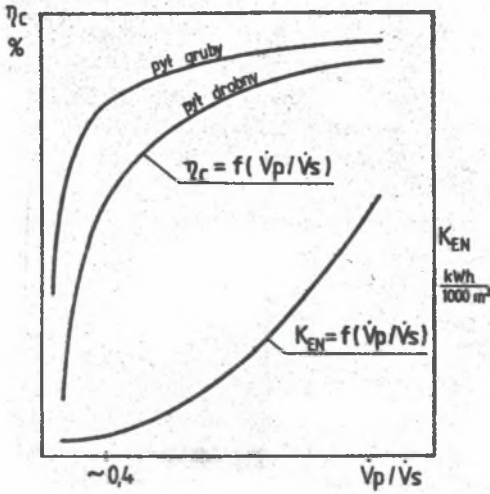
1 - inlet of dust-polluted gas, 2 - element that forms the flow of dust-polluted gas, 3 - dust removal chamber, 4 - inlet of auxiliary gas, 5 - element that forms the flow of auxiliary gas, 6 - outlet of dedusted gas, 7 - worm wheel

Pierwszą próbę opisu zjawisk zachodzących w odpylaczu podjął K.R. Schmidt [1] w 1963 r. Przepływ gazu w odpylaczu zamodelował przepływem obrotowym nad stałym podłożem (rys. 3). Ograniczając zagadnienie do przepływu płaskiego i analizując przyspieszenia promieniowe, wprowadził wzór na średni promień równowagi  $R_r$ , sugerując równocześnie, że obszar w jego pobliżu można z pewnym przybliżeniem traktować jako strefę powstawania pierścieni pyłowych. Ponieważ swoje rozważania Autor ograniczył do czystego płynu, podane przez niego zależności nie mają praktycznego znaczenia dla jakościowej oceny procesu separacji pyłu.

Z teorią K.R. Schmidta polemizował w swym artykule z 1972 r. K. Budinsky [2], który na podstawie badań pól prędkości w komorze odpylacza (rys. 4) sformułował następujące wnioski:

- rzeczywiste pola prędkości, szczególnie w przypadku składowej stycznej, wyraźnie różni się od teoretycznego przebiegu wynikającego z teorii K.R. Schmidta,
- trajektorie ruchu ziaren obliczone metodą numeryczną na podstawie badań profili prędkości (rys. 5) wykluczają możliwość formowania się pierścieni pyłowych.

Dalszy postęp w rozwoju teorii dopylacza wnoszą prace D.F. Cilibertiego i B.W. Lancastera [3, 4] z 1976 r. Przyjmując za obszar separacji strefę ograniczoną promieniem wlotu gazu zapyłonego do komory, traktując przepływ gazu w tej strefie jako obrót ciała sztywnego oraz wychodząc z klasycznego warunku równowagi sił działających na



Rys. 2. Typowe charakterystyki sprawnościowo-energetyczne przeciwbieżnego odpylacza cyklonowego

Rys. 3. Przepływ obrotowy nad stałą podłożem

Fig. 2. Typical efficiency - energy characteristics of a cyclone with backward circulation

Fig. 3. Rotary flow over solid base

ziarno pyłu w polu siły odśrodkowej (rys. 6). Autorzy wyprowadzili formułę obliczeniową na minimalne ziarno pyłu zatrzymywane w odpylaczu:

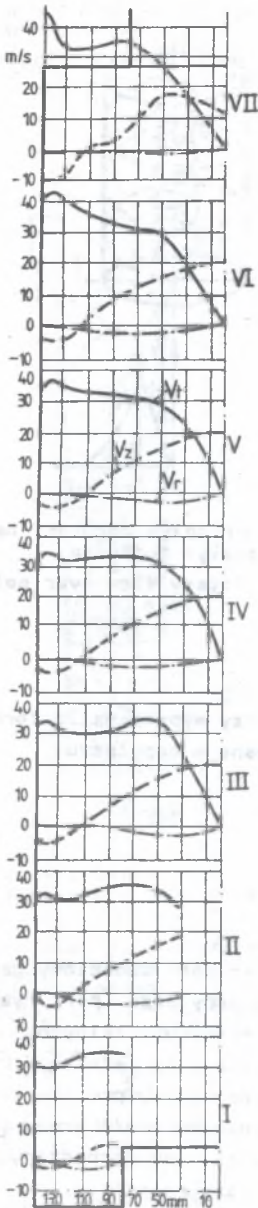
$$\delta_0 = \frac{3}{2\tau_s} \sqrt{\frac{\eta}{\rho_s} \frac{\pi R_0^2 H}{\dot{V}_s + 0,5 \dot{V}_p} \ln(1 + \frac{\dot{V}_p}{\dot{V}_s})} \quad (1)$$

gdzie:  $s$  - ilość obrotów gazu w komorze odpylacza.

Bliższa analiza powyższej zależności wskazuje, że wzrost ilościowy gazu pomocniczego powoduje pogorszenie efektu działania odpylacza (por. rys. 10), co pozostaje w sprzeczności z wynikami badań eksperymentalnych.

Przedstawiony powyżej przegląd stanu teorii wskazuje na istnienie poważnych sprzeczności oraz brak możliwości jakościowej oceny procesu separacji pyłu w odpylaczu. Problemom tym poświęcono znaczną część pracy [5], w której podjęto kolejną próbę teoretycznego opisu zjawisk zachodzących w odpylaczu. Wyniki tych rozważań prezentuje niniejszy referat.

Ponieważ zachodziła wyraźna sprzeczność pomiędzy rzeczywistymi profilami prędkości podawanymi również przez innych autorów a zanegowaniem przez K. Budinsky'ego możliwości formowania się w tych warunkach pierścieni pyłowych, których istnienie potwierdziły badania wizualizacyjne, należało w pierwszym rzędzie wyjaśnić ten problem.



Rys. 4. Profile prędkości gazu w komorze

Fig. 4. Gas velocity profiles in the chamber

Rozpatrując ruch ziarna pyłu o średnicy ekwiwalentnej  $\delta_1 \leq 10 \mu\text{m}$  oraz wykazując, że opływ ziarna przez płyn jest laminarny, a czas relaksacji znacznie mniejszy od czasu przebywania ziaren w komorze odpylacza, przyjęto, że ruch ziaren pyłu odbywa się w warunkach równowagi siły odśrodkowej oraz siły dynamicznego oporu ośrodka opisanej równaniem Stokesa:

$$\frac{\pi}{6} \delta_1^3 \rho_s \frac{v_t^2}{r_1} - 3\pi\eta\delta_1 \left( \frac{dr}{dz} - v_r \right) = 0 \quad (2)$$

Wykazano, że w przeprowadzonych rozważaniach można pominąć wpływ przepływów promieniowych gazu ( $v_r = 0$ ) i dokonując niezbędnych przekształceń otrzymano równanie ruchu ziaren pyłu w postaci:

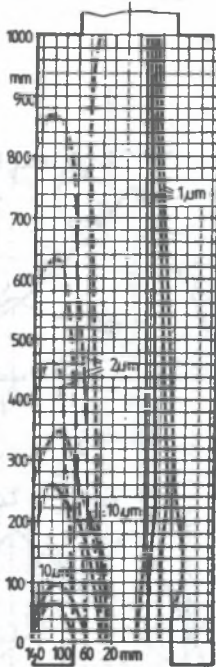
$$\delta_1^2 \frac{\rho_s}{18\eta} \frac{v_t^2}{r} \frac{1}{v_z} = \frac{dr}{dz} \quad (3)$$

Rys. 7 przedstawia trajektorie ziaren pyłu obliczone według powyższego równania dla rzeczywistego profilu prędkości (przekrój VI) zaczerpniętego z pracy [2]. Wykazano w ten sposób, że:

- istniejące pole prędkości umożliwia formowanie pierścieni pyłowych,
- przyjęte założenia upraszczające nie zniekształciły w sposób znaczący obrazu ruchu ziaren pyłu w komorze odpylacza i mogą być wykorzystane w dalszej analizie zjawisk.

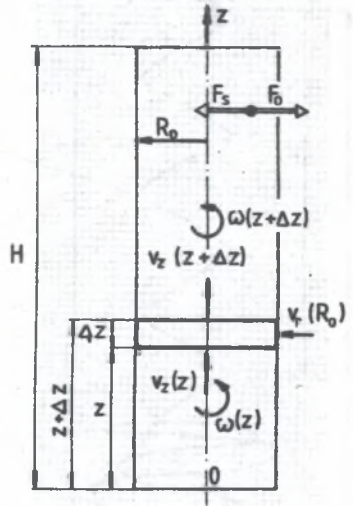
Kolejny problem stanowiło znalezienie takiego modelu przepływu gazu, który uwzględniłby fakt obecności dwóch strumieni gazu w komorze oraz wpływ ilości gazu pomocniczego na efekt pracy odpylacza.

Ograniczając zagadnienie do przepływów płaskich i osiowo-symetrycznych oraz rozpatrując każdy ze strumieni gazu, niezależnie zaproponowano:



Rys. 5. Tory ruchu ziaren określone metodą numeryczną

Fig. 5. Grain trajectories determined by means of a numerical method



Rys. 6. Model obliczeniowy przyjęty w metodzie B.W. Lancastera i D.T. Cilibeitiego

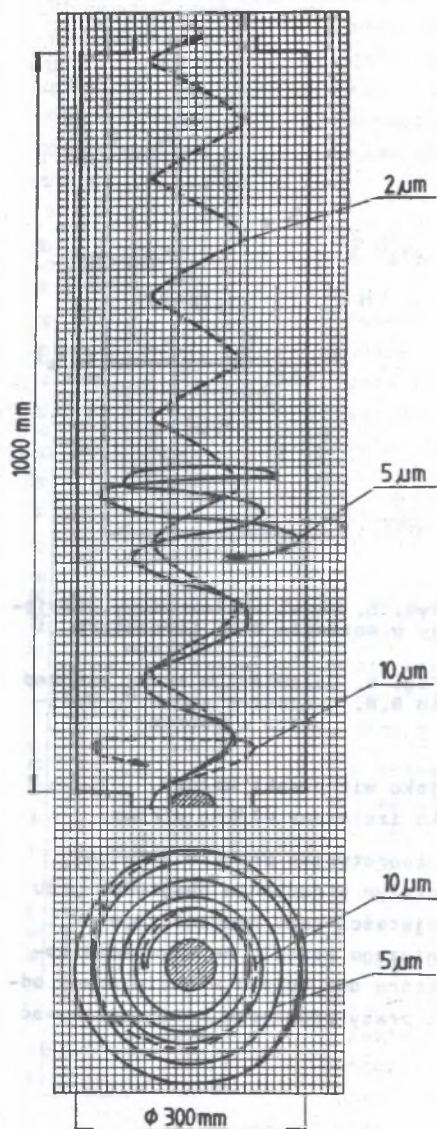
Fig. 6. Calculation model assumed in B.W. Lancaster and D.T. Cilibeiti's method

- przepływ gazu pomocniczego traktować jako wir płaski kołowy,
- przepływ gazu zapyłonego traktować jako izolowane włókno wirowe.

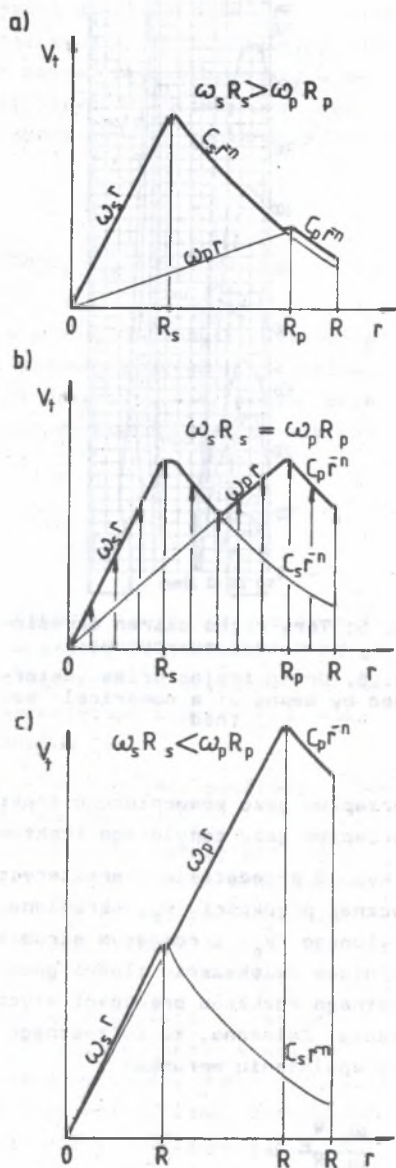
Rys. 8 przedstawia charakterystyczne teoretyczne profile składowej stycznej prędkości  $v_t$ , określone przy stałym atrumieniu objętości gazu zapyłonego  $\dot{V}_s$  i rosnącym strumieniu objętości gazu pomocniczego  $\dot{V}_p$ . Stopniowe zwiększanie ilości gazu pomocniczego pozwala na uzyskanie korzystnego rozkładu prędkości stycznej, która decyduje o efekcie pracy odpylacza. Założono, że korzystnego efektu pracy odpylacza można oczekiwać przy spełnieniu warunku:

$$\frac{\omega}{v_t} \frac{R}{\rho} \geq 1$$

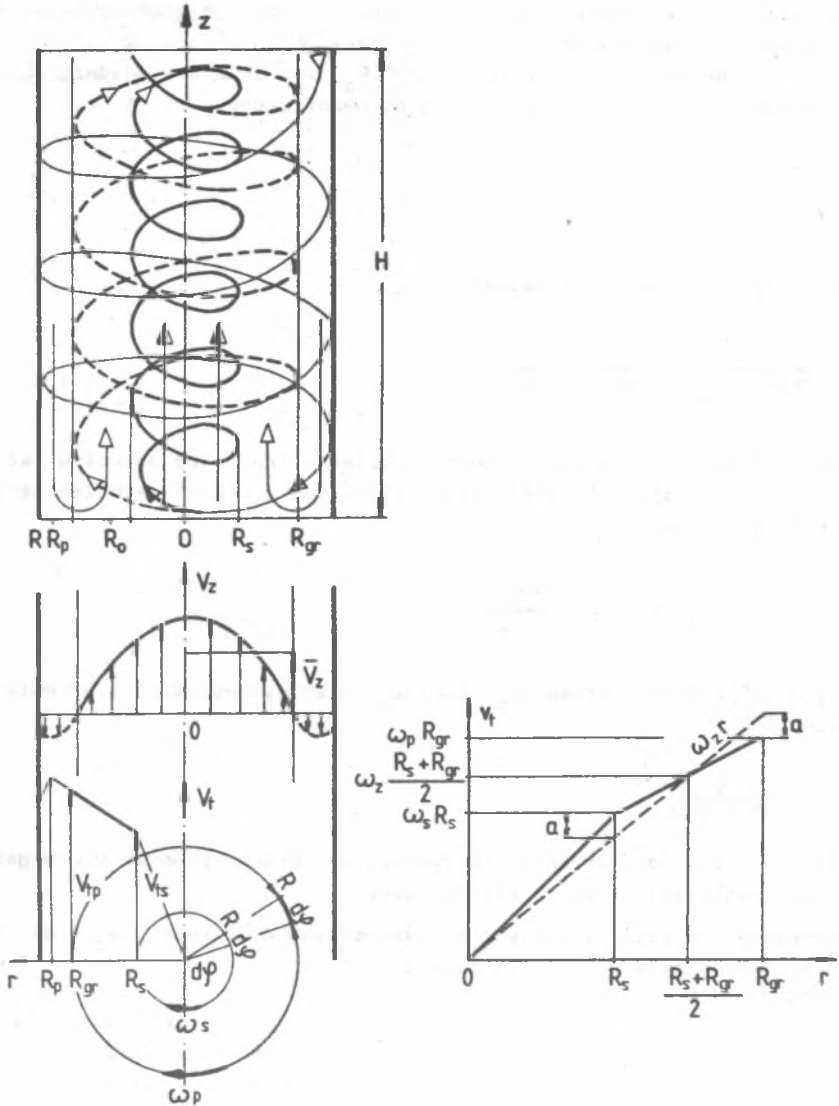
Wychodząc z tego założenia, konstruowano model obliczeniowy (rys. 9), w którym:



Rys. 7. Trajektorie ruchu ziaren pyłu w odpylaczu przeciwbieżnym  
Fig. 7. Dust grain trajectories in the cyclone with extra backward circulation



Rys. 8. Teoretyczny profil składowej stycznej prędkości w komorze odpylacza o średnicy  $2R$   
Fig. 8. Theoretical profile of the velocity tangent component in the cyclone chamber of diameter  $2R$



Rys. 9. Szkic ilustrujący przyjęty model obliczeniowy

$R$  - promień komory,  $R_0$  - promień króćca wlotowego gazu zapyłonego,  $R_p$  - średni promień wlotu gazu pomocniczego,  $R_s$  - średni promień wlotu gazu zapyłonego,  $R_{gr}$  - promień graniczny

Fig. 9. Illustration of the assumed calculation model

$R$  - chamber radius,  $R_0$  - radius of the convecting pipe of dust polluted gas inlet,  $R_p$  - mean radius of the auxiliary gas inlet  $R_s$  - mean radius of the dust-polluted gas inlet  $R_{gr}$  - limiting radius

- wyodrębniono strefę separacji pyłu ograniczoną powierzchnią rozdziału o promieniu  $R_{qr}$  ( $v_z=0$ ) oraz strefę transportu pyłu ograniczoną promieniem komory  $R$  i promieniem  $R_{gr}$ ; założono przy tym brak wymiany masy przez powierzchnię rozdziału,
- w obszarze przepływów wznoszących ( $r < R_{qr}$ ) wprowadzono średnią składową osiową prędkości  $v_z$  niezależną od współrzędnych  $z$  i  $r$ :

$$v_z = \frac{\dot{V}_s + \dot{V}_p}{\pi R_{gr}^2} \quad (4)$$

gdzie  $R_{qr}$  wyznaczono z zależności:

$$\frac{\dot{V}_p}{\pi(R^2 - R_{gr}^2)} = \frac{\dot{V}_p}{\pi(R_{gr}^2 - R_s^2)} \quad (5)$$

- rozkład składowej stycznej prędkości opisano traktując przepływ gazu w obszarze separacji jako obrót ciała sztywnego z pewną ekwiwalentną prędkością kątową  $\omega_e$ :

$$v_t(r) = \omega_e r = \frac{\omega_p R_{gr} + \omega_s R_s}{R_{gr} + R_s} r \quad (6)$$

przy czym prędkość kątowa  $\omega_p$  lub  $\omega_s$  może być wyznaczona odpowiednio jako:

$$\omega = \frac{\dot{V}}{A R \operatorname{tg} \alpha} \quad (7)$$

gdzie:  $A$  - swobodny przekrój napływowy,  $R$  - średni promień wlotu gazu,  $\alpha$  - kąt pochylenia łopatek kierowniczych,

- wprowadzono pojęcie hipotetycznej płaszczyzny wylotowej ( $v_z = 0$ ), do której ziarno pyłu dociera po czasie  $\tau$ :

$$\tau = \int_0^H \frac{1}{v_z} dz \quad (8)$$

- przemieszczając się równocześnie w kierunku promieniowym od średniego promienia wlotu  $R_s$  w kierunku ścian komory,
- w warunkach równowagi sił działających na ziarno pyłu  $\delta_1$  w hipotetycznej płaszczyźnie wylotowej trajektorią jego ruchu będzie okrąg o promieniu równowagi  $r_1$ , co oznacza przyporządkowanie zbiorowi ziaren  $\{\delta_1\}$  promieni równowagi  $\{r_1\}$ .



Dalsze rozważania prowadzono w kierunku znalezienia postaci funkcji  $\eta_{p1} = f(\delta_1)$ . Przyjęto, że jeżeli istnieje taka funkcja  $f_1$ , że  $r_1 = f_1(\delta_1)$  i jeżeli znajdzie się funkcję  $f_2$  taką, że  $\eta_{p1} = f_2(r_1)$ , to wówczas musi istnieć również szukana funkcja  $\eta_{p1} = f(\delta_1)$ .

Zgodnie z wprowadzonymi powyżej pojęciami warunek równowagi sił można zapisać w postaci:

$$\delta_1^2 \frac{\rho_s}{18\eta} \int_0^{\tau_{\max}} d\tau = \int_{R_s}^{r_1} \frac{r}{v_z^2(r)} dr \quad (9)$$

Po uwzględnieniu zależności (7) i (8) otrzymuje się szukaną postać funkcji  $f_1$ :

$$\delta_1^2 \frac{\rho_s}{18\eta} \frac{H}{v_z} \omega_e^2 = \ln \frac{r_1}{R_s} \quad (10)$$

Szukana funkcja  $\eta_{p1} = f_2(r_1)$  powinna spełniać następujące warunki brzegowe:

$$\begin{aligned} 1^\circ \quad r_1 = R_s &\implies \eta_{p1} = 0 \\ 2^\circ \quad r_1 = R_{gr} &\implies \eta_{p1} = 0,5 \end{aligned}$$

Zaproponowano funkcję o postaci:

$$\eta_{p1} = 1 - \frac{R_s}{r_1} \quad (11)$$

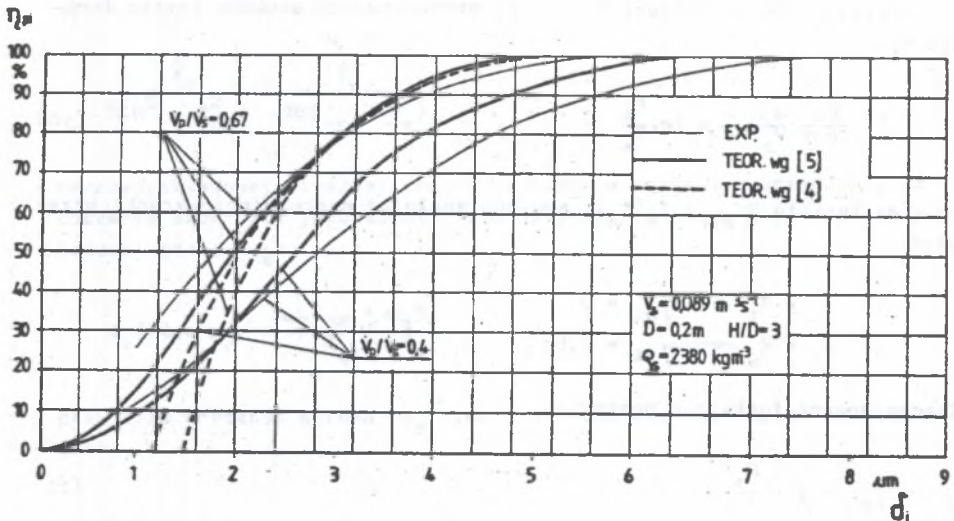
Wprowadzając powyższą zależność do równania (10), otrzymuje się:

$$\eta_{p1} = 1 - \exp\left(-\delta_1^2 \frac{\rho_s}{18\eta} \frac{H}{v_z} \omega_e^2\right) \quad (12)$$

Ponieważ podano wzory pozwalające obliczyć  $\omega_e$  i  $v_z$  (4), (5), (6), (7), a dla określonej konstrukcji odpylacza promienie  $R_s$  i  $R_{gr}$  wyznaczyć można jako funkcję średnicy komory  $D$ , otrzymuje się teoretyczną zależność wiążącą parametry konstrukcyjne i eksploatacyjne odpylacza z efektem jego działania:

$$\eta_{p1} = f(\dot{V}_s, \dot{V}_p, H, D, \alpha, \delta_1, \rho_s, \eta) \quad (13)$$

Powstaje oczywiście pytanie, w jakim stopniu opracowany teoretyczny model oddaje rzeczywisty przebieg procesu separacji pyłu w odpylaczu. Posługując się wyprowadzoną formułą obliczeniową (12), sporządzono dla odpylacza  $D = 200$  mm teoretyczne charakterystyki  $\eta_{pi} = f(\delta_i)$  dla  $\dot{V}_p/\dot{V}_s = 0,4$  i  $\dot{V}_p/\dot{V}_s = 0,67$  i porównano je z wynikami badań eksperymentalnych (rys. 10). Uzyskano znaczną zgodność wyników teoretycznych i eksperymentalnych, aczkolwiek za najistotniejsze na tym etapie badań teoretycznych uważa się właściwe reagowanie wzoru teoretycznego na zmianę strumienia objętości gazu pomocniczego, wyrażonego stosunkiem  $\dot{V}_p/\dot{V}_s$ . Fakt ten potwierdza słuszność przyjętego teoretycznego modelu procesu separacji.



Rys. 10. Charakterystyka przedziałowej skuteczności działania odpylacza  
Fig. 10. Characteristic of interval efficiency of the cyclone

Znajomość charakterystyki przedziałowej skuteczności odpylenia oraz charakterystyki składu ziarnowego pyłu pozwala w prosty sposób określić przewidywaną całkowitą skuteczność działania odpylacza. W ostatnim okresie czasu przeprowadzono takie obliczenia i porównano je z wynikami badań skuteczności działania pięciu w międzyczasie wybudowanych i przekazanych do eksploatacji przemysłowych instalacji odpylających (6). Wyniki tego porównania przedstawia poniższe zestawienie.

Różnice pomiędzy wartościami teoretycznymi i eksperymentalnymi zawierają się w granicach  $\eta_c = -5,5\% - +4,7\%$ , co należy uznać za wynik zadowalający.

Charakterystyka obiektu	$\eta_{CEX}, \%$	$\eta_{CT}, \%$
1	2	3
HM "LEGNICA" - suszarka obrotowa koncentratu miedzi, bateria OP-6x1000		
I linia: $\dot{V}_s = 10,4 \text{ m}^3/\text{s}$ , $\dot{V}_p = 8,7 \text{ m}^3/\text{s}$	91	95,7
II linia: $\dot{V}_s = 9,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , $\dot{V}_p = 7,6 \text{ m}^3/\text{s}$	96	98,4
III linia: $\dot{V}_s = 12,2 \text{ m}^3/\text{s}$ , $\dot{V}_p = 5,5 \text{ m}^3/\text{s}$	98	97,3
ZCh "BLACHOWNIA" - odciąg pyłowe, odpylacz pojedynczy OP-1x700		
$\dot{V}_s = 0,92 \text{ m}^3/\text{s}$ , $\dot{V}_p = 0,68 \text{ m}^3/\text{s}$	95	94,5
JZMO w Jarosławie - obrotowe piece prązalnicze gliny, bateria OP-10x1000		
$\dot{V}_s = 22,4 \text{ m}^3/\text{s}$ , $\dot{V}_p = 12,9 \text{ m}^3/\text{s}$	89	83,5

Podsumowując, stwierdza się, że pomimo daleko idących uproszczeń, opracowany teoretyczny model separacji pyłu w przeciwbieżnym odpylaczu cyklonowym:

- 1<sup>o</sup> dostatecznie dobrze opisuje ruch ziarna pyłu i przepływ gazu w komorze odpylacza,
- 2<sup>o</sup> umożliwi teoretyczną interpretację wyników badań eksperymentalnych odpylacza,
- 3<sup>o</sup> pozwala oszacować przewidywany efekt działania odpylacza dla określonych parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych.

Nie zmienia to oczywiście faktu, że pomimo uzyskania dobrej zgodności wyników teoretycznych i eksperymentalnych, opracowany model teoretyczny jest mało precyzyjny w swym opisie matematyczno-fizycznym i może być traktowany jedynie jako pierwsze teoretyczne przybliżenie procesu separacji pyłu w przeciwbieżnym odpylaczu cyklonowym.

#### LITERATURA

- [1] Schmidt K.R.: Pfyikalische Grundlagen und Prinzip des Drehstromungs-entstaubers, Staub 23, 11, 1963, s. 491.
- [2] Budinsky K.: Die Bewegung der festen Teilchen im Drehstromungs-entstauber, Staub-Reinhalt. Luft 32, 1972, s. 82.
- [3] Ciliberti D.F., Lancaster B.W.: Performance of Rotary Flow Cyclones, AIChE Journal 22, 2, 2976, s. 394.
- [4] Ciliberti D.F., Lancaster B.W.: An Improvement of the Simple Model for Rotary Flow Cyclones, AIChE Journal, 22, 6, 1976, s. 1150.
- [5] Mazur M.: Analiza teoretyczno-eksperymentalna parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych przeciwbieżnego odpylacza cyklonowego, Praca doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1981.

- [6] Mazur M., Teisseyre M.: Nowa technologia suchego odpylania gazów przemysłowych - przeciwbieżny odpylacz cyklonowy, Ochrona Powietrza, 1, 1987, s. 13.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА СЕПАРАЦИИ ПЫЛИ  
В ПРОТИВОХОДНОМ ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПЫЛЕОТДЕЛИТЕЛЕ

Р е з ю м е

Противоходный центробежный пылеотделитель принадлежит к новой генерации механических пылеотделителей, в которых используется эффект центробежной силы. Сепарация пыли происходит путем динамического воздействия двух потоков газа циркулирующих в камере пылеотделителя: запыленного газа находящегося в нижней части пылеотделителя и так называемого вспомогательного газа находящегося в верхней его части.

Применяемые до сих пор модели протекания газа в пылеотделителе или потеряли свою актуальность из-за эволюции конструкции (К.Р. Шмидт ФРГ, 1963) или приводят к заключениям не соответствующим экспериментальным результатам (Д.Ф. Килиберти, Б. Ланкастер США, 1976).

Предложенная теоретическая модель протекания газа в пылеотделителе и уравнение движения зерен пыли делают возможной теоретическую интерпретацию роли, какую в процессе сепарации пыли играет вспомогательный газ. С опорой на теоретический анализ процесса была принята существенная для последующих рассуждений предпосылка о неизменности условий детерминирующих ход процесса сепарации пыли на всей высоте камеры пылеотделителя. С помощью этой предпосылки было сформулировано понятие предельного зерна, предельная эффективность обеспечения, структура расчетной модели, а в конечном результате была введена зависимость между эффектом действия пылеотделителя и его основными конструкционными и эксплуатационными параметрами.

THEORETICAL BASIS OF DUST SEPARATION PROCESS  
IN A CYCLONE WITH EXTRA BACKWARD CIRCULATION

S u m m a r y

Theoretical model of gas flow in a dust collector and equation of dust particles motion are suggested, owing to which theoretical interpretation of the part of auxiliary gas stream in a separation process is possible. On the basis of the theoretical analysis of the process, it is assumed that the conditions that determine the process of dust separation are constant at the whole height of the cyclone chamber. This assumption is then used to derive a relation between the effect of the cyclone performance and its basic construction and exploitation parameters.