

$$\frac{d\bar{v}_x}{\bar{v}_x} = - \frac{z^2 dz}{z^3 + A z + B}.$$

Po scałkowaniu mamy

$$\ln \bar{v}_x = \ln C_2 - \int \frac{z^2 dz}{z^3 + A z + B}. \quad (10.36)$$

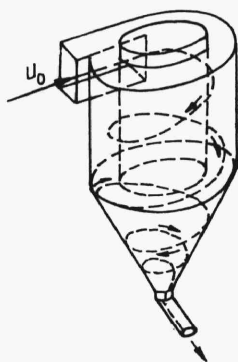
Po rozwiązaniu tego równania możemy - znając względną prędkość  $\bar{v}_x$  przepływu w przewodzie - wyznaczyć względną prędkość  $\bar{u}_x$  wypływu powietrza przez szczelinę.

Z zależności (10.31) wynika, że  $\bar{u}_x = \bar{Q}_x$ . Ponieważ w naszym przypadku  $\bar{Q}'_x = \bar{v}'_x$ , to prędkość wypływu równa się  $\bar{u}_x = \bar{v}_x$ .

Całkowite nadciśnienie lub podciśnienie w przekroju początkowym przewodu oraz współczynnik oporów obliczymy ze wzorów (10.32) i (10.35).

#### 10.4. PODSTAWOWE ZASADY TEORII ODPYLANIA POWIETRZA W CYKLONACH

Zadaniem cyklonów jest usunięcie z powietrza zawieszonych w nim cząstek pyłu. Zapyłone powietrze doprowadzane jest przewodem o przekroju prostokątnym do górnej części cyklonu wzdłuż stycznej do jego bocznej powierzchni cylindrycznej (rys.10.6). Podczas ruchu zapyłone-



Rys. 10.6

go powietrza w cyklonie cząstki pyłu, wskutek działania sił odśrodkowych odrzucane są na boczna powierzchnię cylindryczną cyklonu, po której wykonując ruchy śrubowe opadają do stożkowej części cyklonu, a następnie dostają się do przewodu spustowego pyłu. Oczyszczone z pyłu powietrze wychodzi z cyklonu przez rurę wydmuchową.

W rozdziale niniejszym podane są podstawowe zasady teorii oddzielania pyłu w cyklonach.

Cząstki pyłu zawieszone w powietrzu poruszają się ruchem śrubowym w cyklonie odrzucane są w kierunku promieniowym wskutek działania siły odśrodkowej (rys.10.7)

$$S = m \omega^2 r,$$

gdzie:  $\omega$  - prędkość kątowna,  
 $m$  - masa cząstki pyłu,  
 $r$  - odległość od pionowej osi cyklonu.

Podczas ruchu laminarnego w kierunku promieniowym na cząstkę działa opór powietrza, który wg Stokesa równy jest

$$P = 3\pi \mu d_p u_r,$$

gdzie:  $d_p$  - średnica równoważna cząstki pyłu,  
 $u_r$  - prędkość ruchu cząstki pyłu w kierunku promieniowym na zewnątrz cyklonu.

Rozpatrzmy przypadek, kiedy siła odśrodkowa  $S$  działająca na cząstkę zrównoważona jest działającym na nią oporem powietrza  $P$ , a więc

$$m \omega^2 r = 3\pi \mu d_p u_r, \quad (10.37)$$

gdzie:  $m = \frac{1}{6} \pi \rho_p d_p^3$ ,

$\rho_p$  - gęstość cząstki pyłu.

Podstawiając wyrażenie na masę do (10.37) otrzymamy

$$u_r = \frac{\rho_p \omega^2 d_p^2}{18\mu} r. \quad (10.38)$$

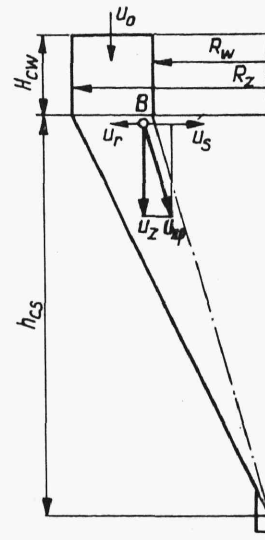
Uwzględniając, że  $u_r = \frac{dr}{dt}$  można równanie (10.38) przedstawić w postaci

$$dt = \frac{18\mu}{\rho_p \omega^2 d_p^2} \frac{dr}{r}. \quad (10.39)$$

Całkując równanie (10.39) w granicach od  $R_w$  do  $R_z$  znajdujemy czas  $t$  potrzebny dla przemieszczenia cząstki pyłu od wewnętrznego do zewnętrznego cylindra cyklonu

$$t = \frac{18\mu}{\rho_p \omega^2 d_p^2} \ln \frac{R_z}{R_w}, \quad (10.40)$$

gdzie:  $R_z$  i  $R_w$  - zewnętrzny i wewnętrzny promień cyklonu.



Rys.10.7

Czas  $t$  powinien być zgodny z czasem ruchu powietrza przez pierścieniową przestrzeń pomiędzy cylindrem i rurą wydmuchową cyklonu. Składowa prędkość tego ruchu w kierunku osi cyklonu

$$u_z = \frac{Q}{\pi(R_z^2 - R_w^2)}, \quad (10.41)$$

a czas potrzebny dla przemieszczenia powietrza wzdłuż wysokości cyklonu

$$t = \frac{H_{cw}}{u_z} = \frac{H_{cw}}{Q} \pi(R_z^2 - R_w^2), \quad (10.42)$$

gdzie:  $Q$  - wydatek powietrza,

$H_{cw}$  - wysokość cylindrycznej części cyklonu.

Przyrównując do siebie wyrażenia (10.40) i (10.42) otrzymamy wzór

$$H_{cw} = \frac{18 \mu Q}{\pi \rho_p \omega_p^2 d_p^2 (R_z^2 - R_w^2)} \ln \frac{R_z}{R_w}. \quad (10.43)$$

Z powyższego równania przy zadanych promieniach  $R_z$  i  $R_w$  można znaleźć wysokość cylindrycznej części cyklonu, potrzebnej do wydzielienia w niej cząstek pyłu o zadanej równoważnej średnicy. Dla przypadku odwrotnego, kiedy zadane są wymiary cyklonu, minimalną średnicę wydzielonych cząstek pyłu możemy określić z równania

$$d_p = \left[ \frac{18 \mu Q}{\pi \rho_p \omega_p^2 H_{cw} (R_z^2 - R_w^2)} \ln \frac{R_z}{R_w} \right]^{0,5}. \quad (10.44)$$

Nie ma dostatecznie jasnego poglądu o ruchu powietrza w części stożkowej cyklonu. W celu przeanalizowania tej sprawy śrubowy ruch powietrza w cyklonie rozdzielimy na dwa ruchy: osiowy i obrotowy.

Wskutek ruchu osiowego strumień porusza się początkowo wzdłuż cylindrycznych ścianek cyklonu. W stożkowej części cyklonu w pobliżu wyobrażalnej powierzchni, którą nazywamy stożkiem powrotu, strumień zawraca do góry, zmieniając swój kierunek ze zstępującego na wstępujący, aby wpłynąć w końcu do rury wydmuchowej.

Rozpatrując obrotowy ruch powietrza w cyklonie, należałoby przyjąć zależność  $ru = \text{const}$ . Jednakże doświadczalnie stwierdzono, że

prędkość powietrza w cylindrycznej części cyklonu nie zachowuje początkowej swojej prędkości  $u_0$  a jego obrót nie jest zgodny z zależnością  $ru = \text{const}$ . Według tej zależności prędkość powietrza powinna wzrastać w miarę przybliżenia się do osi obrotu, podczas gdy w rzeczywistości spotykamy się ze zmniejszeniem prędkości, w przybliżeniu tak jak to ma miejsce przy obrocie ciała stałego.

Doświadczalnie stwierdzono, że prędkość obwodowa cząstki pyłu w cylindrycznej części cyklonu jest równa

$$u = \frac{\bar{u}_0}{1,7} \frac{r}{\bar{R}}, \quad (10.45)$$

gdzie:  $u_0$  - średnia prędkość wejścia powietrza w cyklon,

$\bar{R}$  - średni promień wejścia,

$u$  - prędkość obwodowa na promieniu  $r$ ,

1,7 - współczynnik uwzględniający zmniejszenie prędkości obwodowej w pierścieniowej przestrzeni cyklonu w porównaniu z prędkością na wejściu  $u_0$ .

Zależność  $ru = \text{const}$  jest bardziej odpowiednia dla stożkowej części cyklonu. Szczególnie charakterystyczne w danym przypadku jest występowanie podciśnień w pobliżu osi cyklonu, wskutek dużego wzrostu prędkości obwodowych.

Wskutek tego podciśnienia na osi stożkowej części cyklonu może mieć miejsce podsysanie powietrza przez przewód spustowy pyłu, powodując zmianę ruchu pyłu ze schodzącego śrubowego w ruch wschodzący śrubowy. Efektywność cyklonu staje się wówczas równa zero.

Rozpatrzmy obecnie zachowanie się cząstki pyłu w środkowej części cyklonu. Wybierzmy najbardziej niedogodne położenie cząstki pyłu, które znajduje się przy wejściu w stożek cyklonu w pobliżu zewnętrznej ścianki rury wydmuchowej. Na rysunku 10.7 jest ono oznaczone punktem B. Z tego położenia cząstka może najłatwiej dostać się w strefę strumienia wstępującego. Aby do tego nie dopuścić wektor prędkości cząstki w momencie jej wejścia w stożek powinien odchyłać się do powierzchni stożka. Rzut wektora prędkości zstępującej cząstki pyłu  $u_{zp}$  na płaszczyznę rysunku (rys.10.7) składa się z:

a) wektora prędkości przemieszczenia cząstki pyłu na skutek działania siły odśrodkowej -  $u_r$ ,

b) wektora prędkości  $u_s$  na skutek oddziaływania stożka cyklonu,

c) wektora prędkości równoległej do pionowej osi cyklonu -  $u_z$ .

Kierunek wektora  $u_{zp}$  będzie zgodny z tworzącą stożka, jeżeli będzie zachowana następująca zależność wynikająca z geometrii układu

$$\frac{u_s - u_r}{u_z} = \frac{R_w}{h_{cs}}, \quad (10.46)$$

gdzie  $h_{cs}$  - wysokość stożka powrotu.

Podstawiając do (10.46) prędkość  $u_r$  obliczoną ze wzoru (10.38) dla  $r = R_w$  oraz uwzględniając, że

$$u_s = u_z \frac{R_z}{h_{cs}}$$

otrzymuje się wzór na określenie minimalnej równoważnej średnicy cząstki pyłu, która będzie się przemieszczała ruchem zstępującym w punkcie B stożkowej części cyklonu

$$d_{p \min} = \left[ \frac{18 \mu Q}{\pi \rho_p \omega^2 h_{cs} R_w (R_w + R_z)} \right]^{0,5}. \quad (10.47)$$

Jeżeli cząstka nie wejdzie w strefę wstępującego strumienia powietrza w górnej części stożka cyklonu, to nie powinna wejść w tę strefę również i w jego dolnej części, gdyż w miarę obniżania się cząstki w kierunku przewodu spustowego wzrasta siła odśrodkowa na skutek zmniejszania się promienia obrotu.

Przykład 10.1. Obliczyć minimalną średnicę cząstek pyłu wydzielanych w cylindrycznej części cyklonu (rys.10.7) o wymiarach  $R_z = 1$  m,  $R_w = 0,5$  m,  $H_{cw} = 5$  m,  $h_{cs} = 2$  m. Objętościowe natężenie przepływu oczyszczonego powietrza  $Q = 0,5$  m<sup>3</sup>/s, a jego temperatura  $T = 293$  K. Średnia prędkość przepływu w przewodzie doprowadzającym  $\bar{u}_o = 8,0$  m/s. Gęstość pyłu  $\rho_p = 2500$  kg/m<sup>3</sup>.

Rozwiązanie. Równoważną średnicę cząstek pyłu wytrąconych w cylindrycznej części cyklonu można obliczyć ze wzoru (10.44), po wyznaczeniu wartości współczynnika lepkości dynamicznej powietrza, odpowiadającej temperaturze  $T = 293$  K

$$\mu = 18,053 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m} \cdot \text{s}.$$

Prędkość kątową cząstek określamy ze wzoru (10.45)

$$u = \omega r = \frac{\bar{u}_o}{1,7 R} r,$$

skąd

$$\omega = \frac{\bar{u}_o}{1,7 \frac{R_z + R_w}{2}} = \frac{8,0 \cdot 2}{1,7(1,0 + 0,5)} = 6,28 \text{ s}^{-1}.$$

Po podstawieniu wartości liczbowych do wzoru (10.44) otrzymamy

$$d_{p \min} = \left[ \frac{18 \mu Q}{\pi \rho_p \omega^2 H_{cw} (R_z^2 - R_w^2)} \ln \frac{R_z}{R_w} \right]^{0,5} =$$

$$= \left[ \frac{18 \cdot 18,053 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5}{\pi \cdot 2500 \cdot 6,28^2 \cdot 5(1^2 - 0,5^2)} \ln \frac{1,0}{0,5} \right]^{0,5} = 0,85 \cdot 10^{-6} \text{ m.}$$

Z obliczenia wynika, że w cylindrycznej części cyklonu zostaną wytrącone cząstki pyłu o średnicy  $d_p > 0,85 \mu\text{m}$ .

Przykład 10.2. Obliczyć minimalną średnicę cząstek pyłu wydzielanych w stożkowej części cyklonu o wymiarach podanych w poprzednim przykładzie.

Rozwiązanie. Prędkość obwodowa cząstek pyłu w płaszczyźnie przejścia z cylindrycznej do stożkowej części cyklonu w bezpośredniej bliskości rury wydmuchowej obliczona ze wzoru (10.45) jest równa

$$u = \frac{\bar{u}_o}{1,7} \cdot \frac{R_w}{\bar{R}} = \frac{8,0 \cdot 0,5 \cdot 2}{1,7 \cdot (1,0 + 0,5)} = 3,14 \text{ m/s.}$$

Prędkość w kierunku równoległym do pionowej osi cyklonu wynosi

$$u_z = \frac{Q}{\pi (R_z^2 - R_w^2)} = \frac{0,5}{\pi (1^2 - 0,5^2)} = 0,212 \text{ m/s.}$$

Podstawiając powyższe wartości liczbowe do wzoru (10.47) otrzymamy

$$d_{p \min} = \left[ \frac{18 \mu Q}{\pi \rho_p \omega^2 h_{cs} R_w (R_w + R_z)} \right]^{0,5} =$$

$$= \left[ \frac{18 \cdot 18,053 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5}{\pi \cdot 2500 \cdot 6,28^2 \cdot 2 \cdot 0,5(0,5 + 1)} \right]^{0,5} = 18,7 \cdot 10^{-6} \text{ m.}$$

W stożkowej części cyklonu zostaną wytrącone cząstki pyłu o średnicy  $d_p > 18,7 \mu\text{m}$ .