



Bezładnościowy odpylacz osiowy z bocznym wlotem do filtracji wstępnej powietrza wlotowego silnika pojazdu specjalnego

TADEUSZ DZIUBAK

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,
Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2, tdziubak@wat.edu.pl

Streszczenie. Przeprowadzono analizę konstrukcji odpylaczy bezładnościowych stosowanych do filtracji wstępnej powietrza wlotowego silników pojazdów mechanicznych. Wykonano analizę porównawczą właściwości filtracyjnych odpylaczy bezładnościowych. Opracowano metodykę oraz warunki badań charakterystyk odpylacza bezładnościowego osiowego z bocznym wlotem powietrza. Przedstawiono wyniki badań charakterystyk skuteczności i oporu przepływu takiego odpylacza dla różnych wartości parametrów geometrycznych i przepływowych.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, filtracja powietrza, odpylacze bezładnościowe, skuteczność odpylania, opór przepływu odpylacza

1. Wstęp

Silniki samochodów ciężarowych, pojazdów specjalnych (w tym wojskowych — czołgi, transportery) eksploatowanych w warunkach dużego (powyżej 1 g/m^3) stężenia zapylenia powietrza, wyposaża się najczęściej w systemy filtracji realizujące dwustopniową filtrację powietrza wlotowego.

Pierwszym stopniem oczyszczania powietrza jest najczęściej odpylacz multicyklonowy (kilkadziesiąt równoległe połączonych cyklonów o średnicach $D < 40 \text{ mm}$) lub monocyclon (zespół łopatek zawirowujących strumień powietrza wlotowego), a drugim złoże filtracyjne w postaci przegrody porowatej z papieru filtracyjnego lub nieregularnego złoża siatkowego. Multicyklony filtru powietrza pojazdów mechanicznych (maszyn roboczych) produkowanych w kraju zbudowane są najczęściej

z cyklonów zwrotnych z wlotem stycznym (czołgi T-72 i PT-91, bojowy wóz piechoty BWP-1) lub z wlotem osiowym (samochód ciężarowo-terenowy STAR 266, kombajn Bizon). W multicyklonach filtrów powietrza pojazdów produkowanych za granicą (na przykład: czołgi Leopard 2 i Abrams, samochody ciężarowe Scania i Volvo) znalazły zastosowanie głównie cyklony przelotowe z wlotem osiowym.

Odpylacze multicyklonowe stosowane są do odpylania powietrza wlotowego silników spalinowych (szczególnie te zbudowane z cyklonów zwrotnych z wlotem stycznym), cechują się dużymi oporami przepływu, co nie jest bez wpływu na spadek napełnienia i mocy silnika. Monocyklony stosowane do filtracji wstępnej powietrza wlotowego silników pojazdów mechanicznych charakteryzują się znacznie mniejszymi oporami przepływu, ale też osiągają znacznie mniejsze wartości skuteczności odpylania.

Dlatego od lat prowadzone są prace mające na celu zastąpienie multicyklonów innymi odpylaczami bezwładnościowymi [2, 3, 7]. Z dostępnych danych literaturowych wynika, że do filtracji wstępnej powietrza zasysanego przez silniki można także zastosować:

- bezwładnościowy odpylacz promieniowy,
- bezwładnościowy odpylacz osiowy z bocznym doprowadzeniem powietrza.

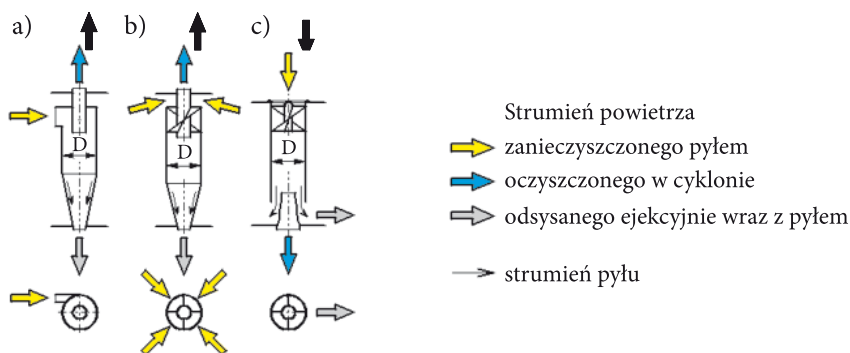
Bezwładnościowy odpylacz promieniowy do filtracji wstępnej powietrza wlotowego silnika samochodu ciężarowego był przedmiotem prac badawczo-konstrukcyjnych prowadzonych w WAT [3]. Wymiary główne odpylacza bezwładnościowego określono z wykorzystaniem opracowanego w tym celu modelu matematycznego płasko-promieniowego filtra bezwładnościowego. Zaproponowany dwustopniowy system filtracji powietrza wlotowego do silnika samochodu ciężarowego (odpylacz promieniowy — papierowy wkład filtracyjny) pozwolił na zmniejszenie o około 35% oporów przepływu układu dolotowego, nie pogarszając skuteczności filtracji [3].

Innym typem odpylacza wykorzystującego siły bezwładności do oczyszczania powietrza jest bezwładnościowy odpylacz osiowy z bocznym wlotem. Wyniki wstępnych prac badawczo-konstrukcyjnych tego odpylacza przedstawiono w [2]. Na skuteczność i opór przepływu tego odpylacza znaczny wpływ mają jego wymiary główne: średnica przewodu wylotowego, wysokość kanałów (okien) wlotowych (zawirowywacza), odległość pomiędzy ścianą pierścieniową zawirowywacza a krawędzią wlotową kanału wylotowego.

Ze względu na brak w dostępnej literaturze wystarczających danych na ten temat opracowano laboratoryjną konstrukcję bezwładnościowego odpylacza osiowego z bocznym wlotem powietrza do badań eksperymentalnych wpływu podstawowych wymiarów głównych odpylacza na jego skuteczność odpylania i opory przepływu z przeznaczeniem do silnika bojowego wozu piechoty BWP-1.

2. Charakterystyka odpylaczy bezwładnościowych

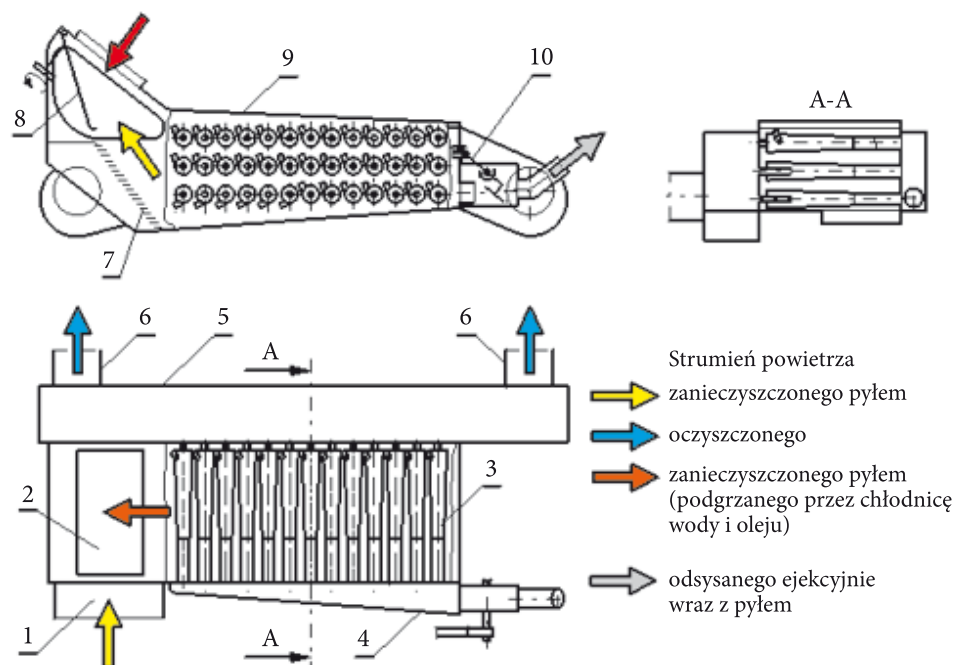
Odpylacze multicyklonowe (multicyklon) są najbardziej rozpowszechnionymi silnikowymi odpylaczami bezwładnościowymi powietrza wlotowego. Multicyklon będący zespołem kilku lub kilkudziesięciu, a nawet kilkuset cyklonów ($D < 40$ mm), nazywanych też minicyklonami (w odróżnieniu od cyklonów stosowanych w przemyśle, których średnice zwierają się w zakresie $D = 250-3000$ mm) rozmieszczonych obok siebie (połączenie równoległe) lub jeden za drugim (połączenie szeregowo) [11, 13]. Łączenie cyklonów w multicyklon może być wykonane z cyklonów zwrotnych z wlotem stycznym i osiowym jak i cyklonów przelotowych (rys. 1).



Rys. 1. Rodzaje cyklonów: a) zwrotny z wlotem stycznym; b) zwrotny z wlotem osiowym; c) przelotowy

Zasada odpylania powietrza w cyklonie polega na wprowadzeniu w ruch wirowy ziaren pyłu, wraz ze strumieniem powietrza, w wyniku czego pod wpływem siły bezwładności (zachowując swój ruch zbliżony do prostoliniowego, przy czym ich gęstość jest blisko 2500 razy większa od gęstości powietrza) zostają one odrzucone na ścianki, po których przemieszczają się do szczelnie zamocowanego zbiornika zanieczyszczeń. Strumień aerozolu można wprowadzić w ruch obrotowy wskutek stycznego doprowadzenia go do części cylindrycznej (rys. 1a) lub wskutek przepływu przez nieruchomy element zawirowujący (zawirowywacz) (rys. 1b, c), którego łopatki mają zarys linii śrubowej. Schemat funkcjonalny jednostopniowego filtra powietrza silnika UTD-20 BWP-1, którego multicyklon zbudowany jest z cyklonów zwrotnych z wlotem stycznym rozmieszczonych poziomo w trzech rzędach, pokazano na rysunku 2 [1].

Oczyszczone w cyklonach powietrze wypływa cylindrycznymi rurkami do zbiorczej przestrzeni czystego powietrza 5, a następnie przez kolektory dolotowe jest odsysane do cylindrów silnika. Odseparowany w każdym z cyklonów pył jest gromadzony we wspólnym dla kilkudziesięciu cyklonów osadniku, skąd następnie jest usuwany efekcyjnie w sposób ciągły za pomocą strumienia odsysania Q_s będącego częścią strumienia powietrza dopływającego do filtru. Miarą intensywności



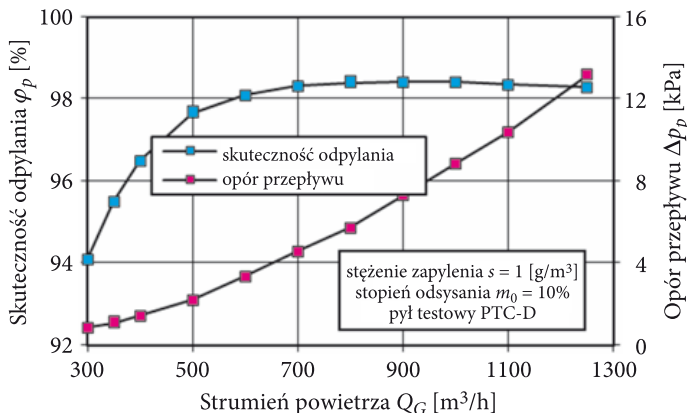
Rys. 2. Schemat funkcjonalny filtra powietrza silnika UTD-20 BWP-1: 1 — króciec wlotowy powietrza do filtru; 2 — otwór wlotu ciepłego powietrza; 3 — cyklon; 4 — osadnik pyłu; 5 — kolektor zbiorczy powietrza wylotowego; 6 — króćce wylotowe powietrza oczyszczonego; 7 — krata filtracyjna; 8 — przysłona wlotu ciepłego powietrza; 9 — multicyklon; 10 — urządzenie odcinające osadnik pyłu od ejektora

odsysania pyłu z osadnika odpylacza bezwładnościowego (multicyklonu, cyklonu) jest stopień odsysania m_0 definiowany zwykle jako iloraz wielkości strumienia Q_S w układzie odsysania i wielkości strumienia wylotowego z odpylacza (cyklonu), a w przypadku gdy odpylacz jest pierwszym stopniem oczyszczania powietrza w filtrze, wielkości strumienia wylotowego z filtru powietrza Q_G — wlotowego do silnika [3, 6, 8, 10]:

$$m_0 = \frac{Q_S}{Q_G} 100\%. \quad (1)$$

Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej silnika, a tym samym strumienia powietrza Q_G przepływającego przez filtr (multicyklon), następuje wzrost skuteczności odpylania powietrza φ_F oraz jednoczesny wzrost oporów przepływu Δp_p (rys. 3).

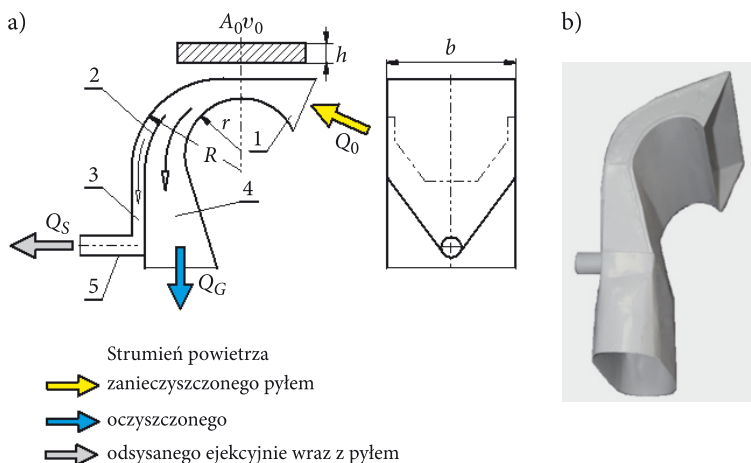
Taki przebieg skuteczności odpylania powietrza w filtrze silnika UTD-20 (znaczący początkowy wzrost skuteczności odpylania φ_p , a następnie jej stabilizacja) jest zgodny jest z informacjami literaturowymi podawanymi dla odpylaczy bezwładnościowych. Opór przepływu Δp_p filtru powietrza wzrasta parabolicznie i przy $Q_G = 1250 \text{ m}^3/\text{h}$, co odpowiada prędkości obrotowej mocy maksymalnej



Rys. 3. Charakterystyki skuteczności odpylania $\varphi_p = f(Q_G)$ oraz oporów przepływu $\Delta p_p = f(Q_G)$ filtru powietrza BWP-1

silnika, osiąga on wartość $\Delta p_p = 13,2$ kPa, która jest 3-4-krotnie większa od wartości oporów przepływu, jakimi charakteryzują się odpylacze multicyklonowe spotykane w dwustopniowych filtrach powietrza. Dla porównania dopuszczalny opór przepływu dwustopniowych filtrów powietrza samochodów ciężarowych i pojazdów specjalnych wynikający z warunku 3% spadku mocy silnika nie przekracza wartości $\Delta p_{fdop} = 5-7$ kPa.

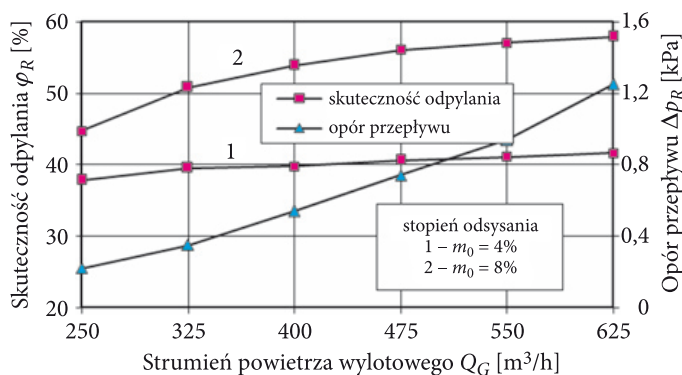
Odpylacz promieniowy przedstawiony na rysunku 4 wykorzystuje siły bezładności działające na ziarna pyłu znajdujące się w strumieniu powietrza przepływającego przez krzywoliniowy kanał o przekroju prostokątnym.



Rys. 4. Odpylacz promieniowy: a) schemat funkcjonalny; b) widok ogólny: 1 — wlot powietrza zanieczyszczonego, 2 — separator, 3 — kanał odsysania, 4 — kanał główny, 5 — rurka odsysająca, h — wysokość kanału odpylacza, b — szerokość kanału odpylacza

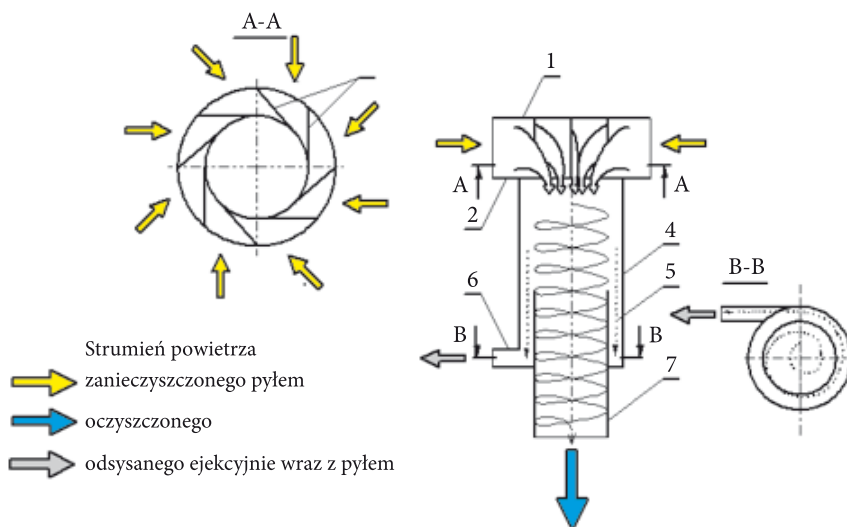
Siły te powodują koncentrację ziaren w strefie ściany o większym promieniu R . Umieszczenie w określonym miejscu kanału separatora 2 umożliwia podział strumienia na główny Q_G , w którym stężenie pyłu ulega wyraźnemu zmniejszeniu, i strumień odsysany Q_S , o zdecydowanie większym stężeniu pyłu. Strumień Q_G kierowany jest na drugi stopień filtracji (filtr przegrodowy), a następnie do cylindrów silnika, gdzie wymagany jest odpowiedni stopień czystości powietrza, strumień zaś Q_S odprowadzany jest do otoczenia za pomocą urządzenia odsysającego. Aby działanie odpylacza było skuteczne, jego kanał musi być odpowiednio zaprofilowany, co jest znacznym problemem konstrukcyjnym. Podstawowe parametry geometryczne kanału odpylacza to jego wysokość h w najmniejszym przekroju A_0 , promienie R i r , a także szerokość kanału b (rys. 4). Doświadczenia wykazały, że odpylacz powinien mieć część wlotową 1 ukształtowaną w postaci konfuzora, której zadaniem jest minimalizowanie strat aerodynamicznych.

Kompleksowe badania odpylacza promieniowego wykazały, że jego skuteczność zależy od wartości strumienia powietrza Q_G (prędkości przepływu) oraz w dużym stopniu od odsysania zanieczyszczeń z komory separacyjnej (rys. 5). Wzrost stopnia odsysania z 4% do 8% powoduje przyrost skuteczności odpylacza promieniowego o blisko 15%. Wraz ze wzrostem strumienia powietrza Q_G opór przepływu odpylacza zwiększa się parabolicznie i przy Q_{Gmax} przyjmuje już znaczącą wartość ponad 1,2 kPa.



Rys. 5. Charakterystyki skuteczności odpylenia ($\varphi_R = f(Q_G)$) i oporu przepływu ($\Delta p_R = f(Q_G)$) promieniowego odpylacza bezwładnościowego dla różnych stopni efektywnego odsysania m_0 [7]

Konstrukcja odpylacza bezwładnościowego osiowego z bocznym wlotem powietrza jest dość prosta, co stanowi znaczną jego zaletę. Wlot powietrza do odpylacza następuje oknami utworzonymi przez kołowe tarcze i prostopadłe łopatki zawirowywacza, które zostały równomiernie rozmieszczone co 45° (rys. 6). Nadają one również strumieniowi powietrza ruch wirowy. Wprowadzony w ruch wirowy strumień zanieczyszczonego powietrza porusza się ruchem śrubowym w kierunku



Rys. 6. Schemat funkcjonalny odpylacza bezwładnościowego z wlotem osiowym: 1 — kołowa tarcza zewnętrzna; 2 — kołowa tarcza wewnętrzna; 3 — łopatki zawirowywacza; 4 — kadłub cylindryczny; 5 — przewód wylotowy; 6 — króciec odsysania; 7 — komora separacyjna

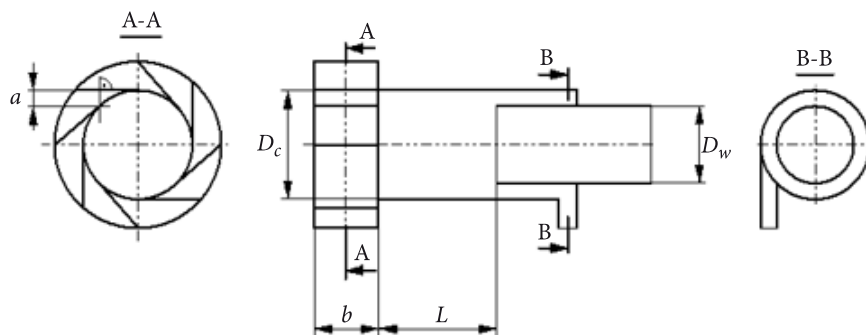
otworu wlotowego przewodu wylotowego. Wytrącony z powietrza pył kieruje się na ścianę wewnętrzną kadłuba cylindrycznego, gdzie wytraca prędkość i gromadzi się na dnie komory separacyjnej, skąd odprowadzany jest na zewnątrz odpylacza króćcem odsysania dołączonym stycznie do cylindrycznego kadłuba. Strumień oczyszczonego powietrza porusza się nadal ruchem śrubowym i przewodem wylotowym, a następnie opuszcza odpylacz.

Najbardziej istotne wymiary bezwładnościowego odpylacza osiowego z wlotem bocznym, które decydują o skuteczności odpylania i oporach przepływu, podano na rysunku 7. Doświadczenie wskazuje, że znaczący wpływ na skuteczność odpylania ma odległość L . Jej nadmierna wartość powoduje spadek skuteczności odpylacza.

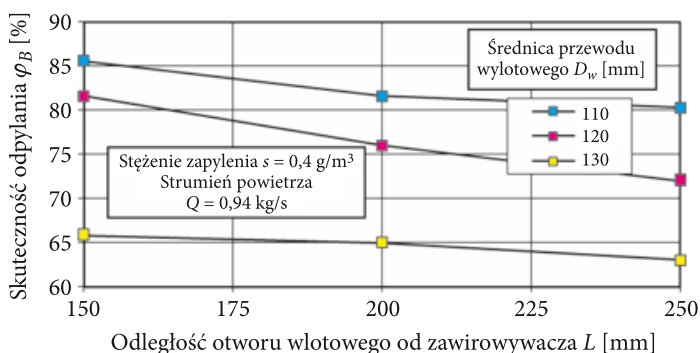
Znane z literatury wyniki badań bezwładnościowego odpylacza osiowego z wlotem bocznym zostały pokazane na rysunku 8 [2].

Dla coraz mniejszej średnicy przewodu wylotowego D_w i odległości otworu wlotowego od zawirowywacza L skuteczność odpylacza przyjmuje coraz większe wartości. Maksymalną skuteczność $\varphi_B = 85,6\%$ odpylacz osiąga dla $L = 150$ mm oraz $D_w = 110$ mm przy strumieniu powietrza $Q_G = 2800$ m³/h (0,94 kg/s). Dla $L = 250$ mm i $D_w = 130$ mm skuteczność odpylacza wyraźnie maleje ($\varphi_B = 63\%$), a opór przepływu osiąga wartość $\Delta p = 1,95$ kPa.

Z rozważanych tu trzech typów odpylaczy bezwładnościowych (multicyklonu, promieniowego i osiowego bocznym wlotem) największą skuteczność $\varphi_p = 98,4\%$, ale jednocześnie największy opór przepływu $\Delta p_p = 13,2$ kPa osiąga multicyklon filtru powietrza BWP. Odpylacz promieniowy charakteryzuje się skutecznością odpylania



Rys. 7. Podstawowe wymiary odpylacza bezwładnościowego osiowego z wlotem bocznym powietrza: a — szerokość kanału wlotowego; b — wysokość kanału wlotowego (szerokość zawirowywacza); L — odległość pomiędzy ścianą pierścieniową zawirowywacza a krawędzią wlotową kanału wylotowego; D_c — średnica wewnętrzna kadłuba cylindrycznego; D_w — średnica wewnętrzna cylindrycznego przewodu wylotowego



Rys. 8. Skuteczność φ_B odpylacza w zależności od odległości otworu wylotowego od zawirowywacza L dla różnych średnic D_w otworu wlotowego przewodu wylotowego [3]

$\varphi_R = 57,9\%$, ale przy oporach przepływu zaledwie $\Delta p_R = 1,25$ kPa, natomiast skuteczność odpylacza bezwładnościowego osiowego z bocznym wlotem powietrza, w zależności od średnicy przewodu wylotowego, osiąga wartość w granicach $\varphi_B = 64,6-85,6\%$ przy oporach przepływu zbliżonych do odpylacza promieniowego $\Delta p_B = 2$ kPa. Widać dużą zależność między skutecznością a oporami przepływu odpylacza. Im większa wartość skuteczności odpylacza, tym wyższe opory przepływu.

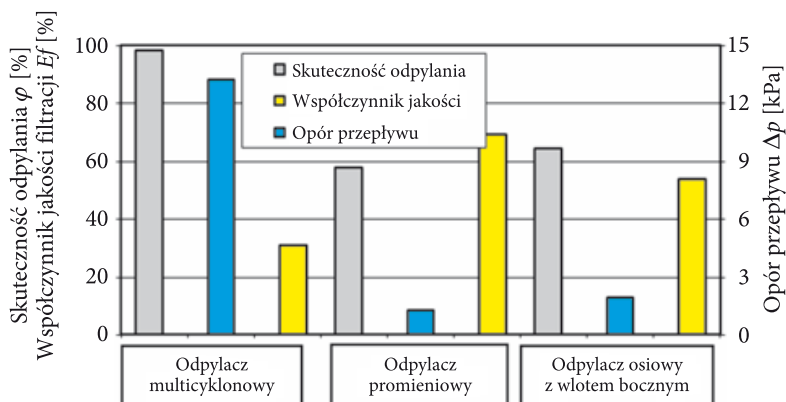
Przebieg procesu odpylania powietrza w odpylaczach scharakteryzowano współczynnikiem jakości filtracji E_f zdefiniowanym zależnością [9]:

$$E_f = \frac{-\ln(1-\varphi)}{\Delta p} 100\% \quad (2)$$

gdzie: φ , Δp , — skuteczność i opór przepływu odpylacza bezwładnościowego dla nominalnego strumienia powietrza.

Powyższa zależność pozwala na porównywanie efektywności odpylania powietrza w odpylaczach. Im większa wartość współczynnika jakości, tym korzystniejsza relacja między skutecznością a oporami przepływu danego odpylacza.

Odpylacz multicyklonowy BWP charakteryzuje współczynnik o wartości $E_{fp} = 30,8\%$, a więc znacznie mniejszy niż dla pozostałych odpylaczy bezładnościowych: dla odpylacza promieniowego $E_{fR} = 69,2\%$, a dla bezładnościowego z bocznym wlotem $E_{fB} = 53,2\%$.



Rys. 9. Skuteczność odpylania i opory przepływu analizowanych odpylaczy bezładnościowych

Odpylacz bezładnościowy osiowy z bocznym wlotem powietrza osiąga, przy nominalnym strumieniu powietrza i w odniesieniu do tego samego pyłu, skuteczność dochodzącą do 85%, a więc znacznie wyższą od odpylaczy promieniowych i nieco niższą od odpylaczy multicyklonowych. Brakuje jednak informacji dotyczących zmian skuteczności i oporów przepływu odpylaczy bezładnościowych z wlotem osiowym w zależności od wartości strumienia powietrza i prędkości wlotowej.

Dużą zaletą tych odpylaczy jest bardzo prosta budowa, niewielkie wymiary, niski koszt i łatwość „wpasowania” ich w kanał układu doprowadzającego powietrze do silnika. Naturalnym rozwiązaniem konstrukcyjnym odpylacza promieniowego jak i bezładnościowego z wlotem osiowym jest wykorzystanie ich jako bezpośredniego chwytu powietrza — czerpni powietrza. Opór przepływu odpylacza bezładnościowego z wlotem osiowym w porównaniu z odpylaczem multicyklonowym jest kilka razy niższy.

Dlatego też niezbędne jest przeprowadzenie kompleksowych badań wpływu wymiarów głównych odpylacza bezładnościowego osiowego z bocznym wlotem powietrza na jego podstawowe charakterystyki. Do zrealizowania tego celu opracowano konstrukcję odpylacza laboratoryjnego z przeznaczeniem do silnika UTD-20 BWP-1.

5. Obliczenia wymiarów odpylacza

Doboru podstawowych wymiarów odpylacza dokonano w oparciu o doświadczenia uzyskane przy budowie i badaniach odpylacza opisanego w pracy [2]. Wielkością wyjściową do projektowania jest nominalne zapotrzebowanie powietrza przez silnik UTD-20 BWP-1, z którym odpylacz ma współpracować. Jego wartość określono z zależności [7]:

$$Q = \frac{60 \cdot V_{SS} \cdot n \cdot \eta_V}{1000 \cdot \kappa} \quad [\text{m}^3/\text{h}], \quad (3)$$

gdzie: V_{SS} — pojemność skokowa silnika [dm^3];
 n — prędkość obrotowa silnika [obr/min];
 κ — współczynnik liczby suwów (2 — dla silników czterosuwowych,
 1 — dla silników dwusuwowych);
 η_V — współczynnik napelnienia (przyjęty zgodnie z [15]):
 0,7-0,9 — czterosuwowe silniki o ZS i o ZI wolnossące,
 1,60 — czterosuwowe turbodoładowane silniki o ZS,
 1,85 — czterosuwowe turbodoładowane silniki o ZS z intercoolerem,
 1,40 — dwusuwowe silniki o ZS z układem odsysania zanieczyszczeń,
 1,90 — dwusuwowe turbodoładowane silniki o ZS.

Dla danych silnika UTD-20:

- pojemność skokowa silnika $V_{SS} = 15,9 \text{ dm}^3$,
- minimalna prędkość obrotowa silnika $n_{\min} = 800 \text{ obr/min}$,
- maksymalna prędkość obrotowa silnika $n_{\max} = 2900 \text{ obr/min}$,
- $\eta_V = 0,9$,

badawczy strumień powietrza zgodnie z powyższą zależnością (dla skrajnych prędkości obrotowych silnika) przyjmuje wartości:

- $Q_{\min} = 350 \text{ m}^3/\text{h}$,
- $Q_{\max} = 1250 \text{ m}^3/\text{h}$.

Przyjmując stopień odsysania $m_0 = 8\%$, strumień powietrza Q_c przepływający w kanale cylindrycznym kadłuba o średnicy D_c ma wartość:

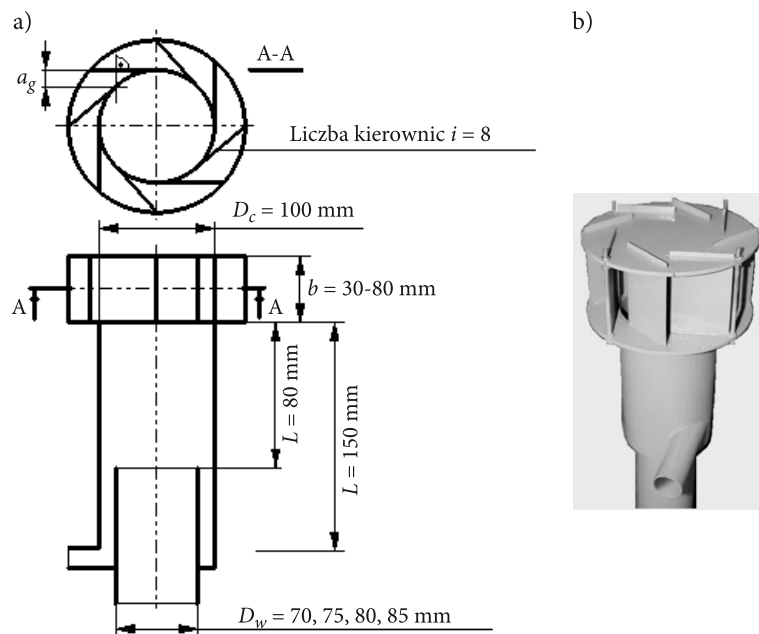
$$Q_c = Q_{\max} (1 + m_0), \quad (4)$$

$$Q_c = 1250 (1 + 0,08) = 1350 \text{ m}^3/\text{h}.$$

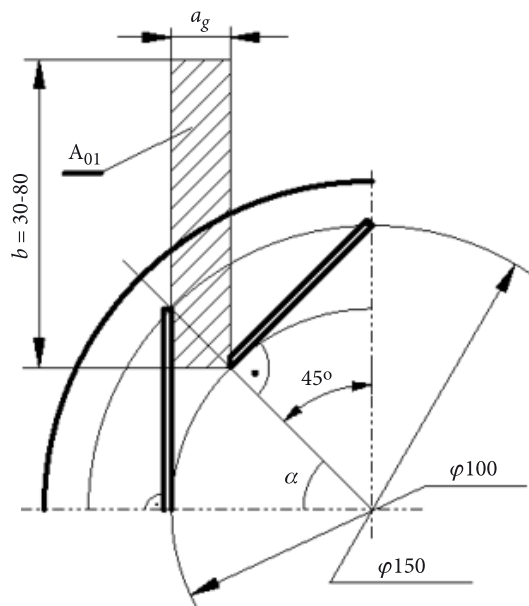
Przyjmując prędkość przepływu w kanale cylindrycznym kadłuba $v_c = 45 \text{ m/s}$, średnica cylindra D_c przyjmuje wartość:

$$D_c = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_c}{3600 \cdot \pi \cdot v_c}}, \quad D_c = \sqrt{\frac{4 \cdot 1350}{3600 \cdot 3,14 \cdot 45}} = 0,103 \text{ m}. \quad (5)$$

Przyjęto $D_c = 100 \text{ mm}$.



Rys. 10. Odpylacz bezładnościowy osiowy z wlotem bocznym powietrza do badań laboratoryjnych:
a) wymiary główne; b) widok ogólny



Rys. 11. Geometria kanału (okna) wlotowego zawirowywacza

Przy założeniu liczby łopatek $z = 8$ w zawirowywaczu, dla obliczonej średnicy cylindra, najmniejsza wysokość kanału międzyłopatkowego, wynikająca z geometrii, wynosi:

$$a_g = R - R \cos \alpha. \quad (6)$$

Dla danych:

$$R = 50 \text{ mm}, \alpha = 45^\circ$$

$$a_g = R - R \cos \alpha, a_g = 14,6 \text{ mm}.$$

Przyjęto: $a_g = 15 \text{ mm}$.

Prędkość wlotowa zawirowywacza (prędkość przepływu aerozolu w miejscu o najmniejszym przekroju poprzecznym) określona w przekroju o powierzchni prostokąta A_{01} dla dwóch skrajnych szerokości zawirowywacza $b = 30$ i $b = 80 \text{ mm}$ wynosi odpowiednio: $v_{0S_{\max}} = 107 \text{ m/s}$ i $v_{0S_{\min}} = 40 \text{ m/s}$.

3. Badania rozpoznawcze odpylacza bezwładnościowego

Celem badań było:

- 1) określenie wpływu charakterystycznych wymiarów odpylacza bezwładnościowego: b, D_w, L na jego opór przepływu dla określonego strumienia powietrza Q_G ;
- 2) wykonanie dla wariantowych ustawień wymiarów: b, D_w, L , charakterystyk odpylacza w zakresie wartości strumienia powietrza $Q_G = 350\text{-}1250 \text{ m}^3/\text{h}$ odpowiadającego objętościowemu zapotrzebowaniu powietrza przez silnik UTD-20 BWP-1 (wypływającego z odpylacza) w zakresie prędkości obrotowej $n_{\min}\text{-}n_{\max}$:
 - oporu przepływu $\Delta p_B = f(Q_G)$,
 - skuteczności odpylenia $\varphi_B = f(Q_G)$.

Przedmiotem badań był egzemplarz laboratoryjnego odpylacza bezwładnościowego osiowego z bocznym wlotem powietrza, którego ogólny schemat zgodny jest z rysunkiem 6 i który umożliwia zmianę podstawowych wymiarów w zakresie jak na rysunku 10a.

4. Metodyka i warunki badań

Badania przeprowadzono na stanowisku, którego schemat przedstawiono na rysunku 12, umożliwiającym wykonywanie podstawowych charakterystyk: skuteczności odpylenia oraz oporu przepływu filtrów powietrza w zakresie strumienia powietrza $Q_G = 300\text{-}2000 \text{ m}^3/\text{h}$ dla stężenia zapylenia do $2 \text{ g}/\text{m}^3$ i przy efektywnym stopniu odsysania pyłu m_0 do 15%.

Do wyznaczenia charakterystyk aerodynamicznych $\Delta p_B = f(Q_G)$ oraz skuteczności odpylania $\varphi_B = f(Q_G)$ odpylacza bezładnościowego przyjęto 11 wartości strumieni powietrza z zakresu $Q_G = 350-1250 \text{ m}^3/\text{h}$, dla których następnie określano opór przepływu Δp_B oraz skuteczność φ_B . Cykl pomiarowy dla przyjętych wartości strumieni powietrza powtarzano pięciokrotnie.

Opór przepływu Δp_f odpylacza określono jako spadek ciśnienia całkowitego w przewodzie wylotowym w odległości $6D_w$ (gdzie D_w — średnica wewnętrzna przewodu wylotowego odpylacza) na podstawie zależności:

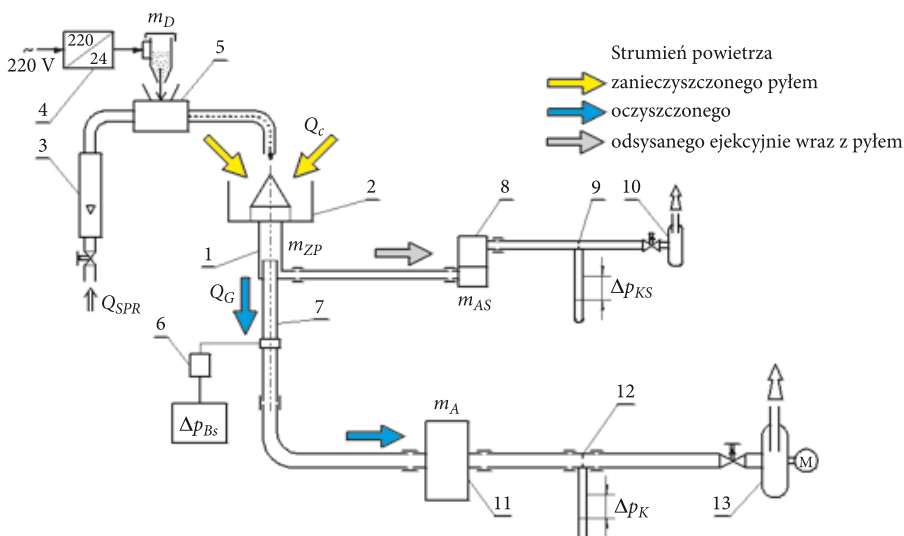
$$\Delta p_B = \Delta p_{Bs} - \rho_H \frac{v_w^2}{2}, \quad (7)$$

gdzie: ρ_H — gęstość powietrza w warunkach pomiaru;

v_w — prędkość powietrza w przewodzie wylotowym odpylacza wyznaczona z następującej zależności:

$$v_w = \frac{Q_G}{3600 \cdot A_w}, \quad (8)$$

gdzie: $A_w [\text{m}^2]$ — pole powierzchni przekroju poprzecznego przewodu wylotowego odpylacza o średnicy D_w .



Rys. 12. Schemat stanowiska do badania charakterystyk laboratoryjnego odpylacza bezładnościowego z bocznym wlotem powietrza: 1 — badany odpylacz; 2 — komora pyłowa; 3 — rotametr; 4 — autotransformator; 5 — dozownik pyłu; 6 — czujnik spadku ciśnienia statycznego; 7 — przewód pomiaru oporu przepływu; 8 — dwustopniowy filtr absolutny strumienia odsysanego; 9 — kryza do pomiaru strumienia odsysania Q_S ; 10, 13 — wentylatory ssawne; 11 — filtr absolutny strumienia głównego Q_G ; 12 — kryza do pomiaru strumienia Q_G

Skuteczność odpylania określano metodą grawimetryczną zgodnie z PN-S-34040 [12] dozując wraz z powietrzem pył w czasie cyklu pomiarowego o ustalonym, w warunkach badań, czasie pomiaru t_p :

$$\varphi_B = \frac{m_{ZP}}{m_D} \cdot 100\%, \quad (9)$$

gdzie: m_{ZP} – masa pyłu zatrzymanego przez odpylacz;
 m_D – masa pyłu wprowadzonego równomiernie wraz ze strumieniem wlotowym Q_C .

Stężenie zapylenia strumienia powietrza wlotowego Q_C określano po każdym cyklu badawczym według zależności:

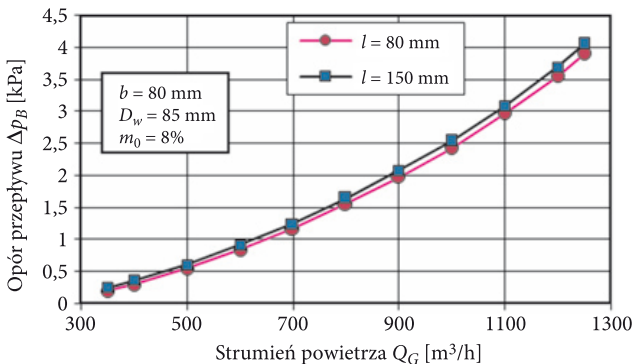
$$s = \frac{m_D}{Q_C \cdot t_p} = \frac{m_D}{(Q_G + Q_S) \cdot t_p} \quad [\text{g/m}^3]. \quad (10)$$

Przyjęto następujące warunki badań laboratoryjnego odpylacza bezwładnościowego:

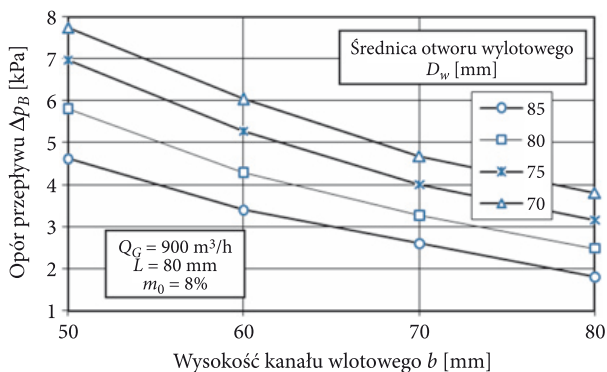
- stężenie zapylenia powietrza $s = 1 \text{ g/m}^3$,
- pył testowy PTC-D będący krajowym zamiennikiem pyłu AC-fine [12],
- stopień efektywnego odsysania $m_0 = 8\%$,
- czas trwania cyklu pomiarowego $t_p = 4 \text{ min}$.

4. Wyniki badań oraz ich analiza

Wpływ charakterystycznych wymiarów odpylacza bezwładnościowego: b , D_w , L na jego opór przepływu pokazano na rysunkach 13 i 14. Z charakterystyk



Rys. 13. Charakterystyki $\Delta p_B = f(Q_G)$ odpylacza bezwładnościowego z bocznym doprowadzeniem powietrza dla różnych odległości pomiędzy ścianą pierścieniową zawirowywacza a krawędzią wlotową kanału wylotowego: $L_1 = 80 \text{ mm}$, $L_2 = 150 \text{ mm}$

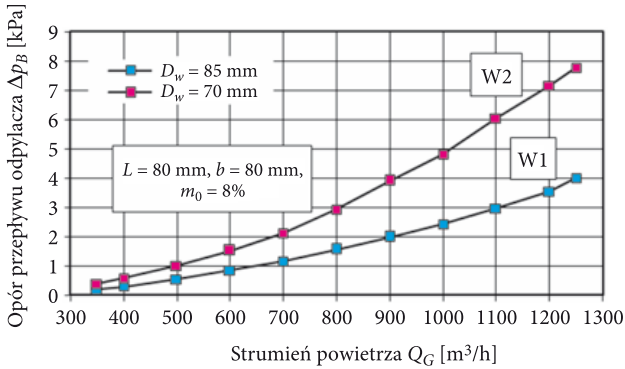


Rys. 14. Wpływ wymiarów głównych odpylacza osiowego z wlotem bocznym na jego opory przepływu

aerodynamicznych odpylacza bezładnościowego (rys. 13) wynika, że wpływ wymiaru L (odległość pomiędzy ścianą pierścieniową zawirowywacza a krawędzią wlotową kanału wylotowego) na opory przepływu odpylacza jest nieznaczny. Zmiana wymiaru $L_1 = 80$ mm na $L_2 = 150$ mm powoduje nieznaczny wzrost oporu przepływu odpylacza w całym zakresie strumienia powietrza i dla $Q = 1250$ m³ wzrost ten jest maksymalny i wynosi 1,7%. Z innych danych wynika, że nadmierna wartość L powoduje spadek skuteczności odpylacza. W związku z tym do dalszych badań przyjęto wartość odległości $L_1 = 80$ mm, co jednocześnie zmniejsza zdecydowanie gabaryty odpylacza.

Wpływ wymiarów głównych odpylacza bezładnościowego osiowego z wlotem bocznym (b i D_w) na jego opory przepływu określono dla strumienia powietrza $Q_{G_{pom}} = 900$ m³/h odpowiadającego prędkości obrotowej silnika $n_{pom} = 2100$ obr/min, której położenie znajduje się w równej odległości między prędkością obrotową momentu maksymalnego $n_M = 1600$ obr/min i maksymalnej mocy $n_N = 2600$ obr/min.

Wraz ze wzrostem wysokości b kanału wlotowego zawirowywacza (zwiększenie przekroju poprzecznego okien wlotowych), a tym samym zmniejszeniem prędkości wlotowej następuje spadek oporów przepływu odpylacza niezależnie od średnicy przewodu wylotowego D_w (rys. 14). Natomiast wraz ze zmniejszaniem się średnicy przewodu wylotowego D_w opory przepływu kształtują się na coraz wyższym poziomie, ale z zachowaniem charakteru przebiegu. Dla przewodu wylotowego o średnicy $D_w = 70$ mm zmiana wysokości b kanału wlotowego zawirowywacza b w zakresie 50-80 mm (zmiana prędkości wlotowej w zakresie = 10,46-7,17 m/s) powoduje spadek oporu przepływu z $\Delta p_B = 7,74$ kPa do $\Delta p_B = 3,806$ kPa, a więc o ponad 50%. Dla ustalonej wartości wysokości b opory są tym większe, im średnica D_w ma mniejszą wartość. Na przykład dla wysokości $b = 80$ mm i średnicy $D_w = 85$ mm opór przepływu odpylacza ma wartość $\Delta p_B = 1,803$ kPa, a dla średnicy $D_w = 70$ mm opór przepływu odpylacza wzrasta do $\Delta p_B = 3,806$ kPa, a więc o ponad 100%.



Rys. 15. Charakterystyki $\Delta p_B = f(Q_G)$ odpylacza bezwładnościowego osiowego z bocznym wlotem powietrza dla ustalonych parametrów $L = 80$ mm, $b = 80$ mm oraz różnych średnic przewodu wylotowego D_w

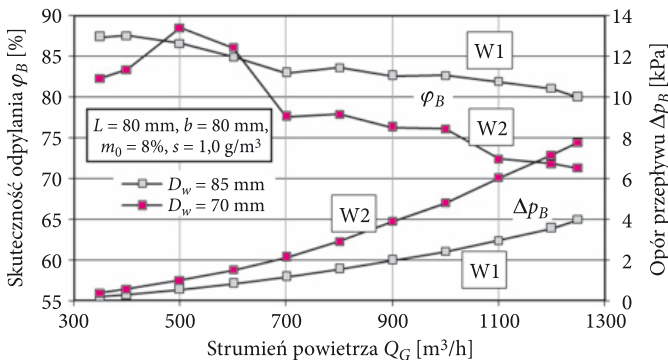
Charakterystyki $\Delta p_B = f(Q_G)$ dla tych dwóch wariantów (W1 i W2) odpylacza bezwładnościowego (o parametrach przedstawionych poniżej) pokazano na rysunku 15.

W1 – $L = 80$ mm, $b = 80$ mm, $D_w = 85$ mm,

W2 – $L = 80$ mm, $b = 80$ mm, $D_w = 70$ mm.

Przy maksymalnej wartości strumienia powietrza $Q_{Gmax} = 1250$ m³/h odpylacz osiąga znaczne opory przepływu w zakresie 4-7,8 kPa, co nie jest spotykane w filtrach I stopnia.

Dla tych samych wariantów odpylacza wykonano badania w zakresie skuteczności odpylania (rys. 16). Pierwszy wariant odpylacza (W1) charakteryzuje się wartościami skuteczności filtracji, które systematycznie i powoli maleją wraz ze wzrostem



Rys. 16. Charakterystyki skuteczności odpylania $\varphi_B = f(Q_G)$ i oporów przepływu $\Delta p_B = f(Q_G)$ odpylacza bezwładnościowego osiowego z wlotem bocznym powietrza dla ustalonych parametrów $L = 80$ mm, $b = 80$ mm oraz różnych średnic przewodu wylotowego D_w

strumienia powietrza Q_G od $\varphi_B = 87,39\%$ przy $Q_G = 350 \text{ m}^3/\text{h}$ do $\varphi_B = 79,99\%$ przy $Q_G = 1250 \text{ m}^3/\text{h}$, co jest sprzeczne z teorią odpylania powietrza w tego typu urządzeniach.

W prawidłowo działającym odpylaczu bezładnościowym wraz ze wzrostem strumienia powietrza (prędkości przepływu) skuteczność odpylania wzrasta: w pierwszej fazie gwałtownie, a następnie (druga faza) wzrost skuteczności jest nieznaczny. Dalszy wzrost strumienia powietrza (trzecia faza) może spowodować brak wzrostu skuteczności, a nawet jej spadek. Przyczyną tego zjawiska może być duża prędkość, z jaką uderzają ziarna pyłu o ścianę wewnętrzną cylindrycznego przewodu wylotowego. Ziarna pyłu nie zatrzymują się, lecz ulegają odbiciu i są porywane przez strumień wylotowy powietrza. Przedstawione na rysunku wyniki badań skuteczności odpylania (wariant W1 odpylacza) są więc charakterystyczne dla trzeciej fazy pracy odpylacza. Wynika z tego, że prędkości strumienia powietrza przyjmują zbyt duże wartości.

Inną przyczyną charakterystycznego spadku skuteczności odpylania może być zbyt mała przestrzeń komory separacyjnej odpylacza, czyli przestrzeń zawarta pomiędzy powierzchnią zewnętrzną przewodu wylotowego, powierzchnią wewnętrzną kadłuba przesuwnego i powierzchnią czołową pierścienia ustalającego, gdzie gromadzi się pył.

Drugi wariant odpylacza (W2) różniący się od pierwszego (W1) mniejszą średnicą przewodu wylotowego, a więc większą przestrzenią komory separacyjnej, charakteryzuje się wartościami skuteczności filtracji, które w pierwszym krótkim okresie nieznacznie rosną i przy $Q_G = 500 \text{ m}^3/\text{h}$ skuteczność osiąga maksymalną wartość $\varphi_{B\max} = 88,5\%$, a następnie systematycznie maleją wraz ze wzrostem strumienia powietrza i przy $Q_G = 1250 \text{ m}^3/\text{h}$ skuteczność ma wartość $\varphi_B = 71,3\%$.

Współczynnik jakości filtracji E_f dla zbadanych wariantów odpylacza przyjmuje odpowiednio wartości $E_{fW1} = 41\%$ i $E_{fW2} = 16\%$, co nie jest zadowalającym wynikiem.

5. Podsumowanie

Bezładnościowy odpylacz osiowy z wlotem bocznym charakteryzuje się nieskomplikowaną konstrukcją oraz znacznie mniejszymi gabarytami niż odpylacze multicyklonowe o zbliżonej wartości strumienia przepływającego powietrza. Zaletą odpylacza bezładnościowego jest łatwość „wpasowania” go w kanał układu doprowadzającego powietrze do silnika. Naturalnym rozwiązaniem konstrukcyjnym odpylacza bezładnościowego osiowego z wlotem bocznym jest wykorzystanie go jako bezpośredniego chwytu powietrza — czerpni powietrza.

Przeprowadzone badania rozpoznawcze odpylacza wykazały, że cechuje się on znacznymi oporami przepływu w zakresie założonych zmian wysokości b (30-80 mm) kanału wlotowego zawirowywacza i średnicy przewodu wylotowego D_w (70-85 mm). Zmiana odległości L pomiędzy ścianą pierścieniową zawirowywacza

a krawędzią wlotową kanału wylotowego powoduje nieznaczne zmiany oporu przepływu odpylacza.

Zbadane warianty odpylacza bezwładnościowego osiowego charakteryzują się dość znacznymi (4-8 kPa) oporami przepływu i wartościami skuteczności odpylania w zakresie 70-80%. Systematyczny i powolny spadek skuteczności wraz ze wzrostem strumienia powietrza Q_G sugeruje nieodpowiednie dopasowanie wymiarów odpylacza do rzeczywistych wartości strumienia powietrza. Ponieważ maksymalne wartości skuteczności odpylacza uzyskuje dla małych (400-700 m³/h) wartości strumienia powietrza, sugeruje to zmianę konstrukcji odpylacza w kierunku zwiększenia średnicy wewnętrznej kadłuba cylindrycznego D_c i średnicy wewnętrznej cylindrycznego przewodu wylotowego D_w z zachowaniem dotychczasowej wysokości kanału wlotowego ($b = 50-80$ mm) oraz odległości $L = 80$ mm pomiędzy ścianą pierścieniową zawirowywacza a krawędzią wlotową kanału wylotowego.

Artykuł wpłynął do redakcji 20.12.2010 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w lutym 2011 r.

LITERATURA

- [1] K. BACZEWSKI, M. HEBDA, *Filtracja płynów eksploatacyjnych*, MCNEMT, Radom, 1991/92.
- [2] P. BARTKIEWICZ, *Projekt i badania modeli odpylacza do silnika śmigłowego*, Praca dyplomowa (kierownik P. Dzierżanowski), WAT, Warszawa, 1998.
- [3] P. DZIERŻANOWSKI, T. DZIUBAK, *Układ filtracyjny powietrza z efektywnym odsysaniem pyłu silnika samochodu ciężarowego*, Materiały VI Międzynarodowego Sympozjum Instytutu Pojazdów Mechanicznych, Warszawa, Rynia, 4-6 grudnia 1996.
- [4] T. DZIUBAK, *Analiza procesu filtracji powietrza wlotowego do silników pojazdów specjalnych*, rozprawa habilitacyjna, WAT, Warszawa, 2008.
- [5] T. DZIUBAK, *Możliwości modyfikacji konstrukcji cyklonu zwrotnego z wlotem stycznym*, Biul. WAT, 55, 2, 2006, 279-301.
- [6] T. DZIUBAK, *Problemy filtracji powietrza zasysanego do spalinowych silników pojazdów mechanicznych*, Biul. WAT, 55, 3, 2006.
- [7] T. DZIUBAK, P. DZIERŻANOWSKI, W. STOLARCZYK, *Opracowanie i wykonanie filtrów powietrza o wybranych charakterystykach dla pojazdów o różnym przeznaczeniu*, Temat nr 6.4 Projektu celowego Nr 793/C.S6-9/93, WAT, Warszawa, 1994.
- [8] T. DZIUBAK, *Problemy odsysania pyłu z multicyklonu filtru powietrza silnika pojazdu mechanicznego eksploatowanego w warunkach dużego zapylenia powietrza*, ZEM, 1(125), 2001.
- [9] J. GEORGE, R. FORNA, T. CRAVERO, *Air Filtration with Fine Polymeric Fibers*, 16th Annual Technical Conference and Exposition 2003 Technical Sessions Papers, Reno-Nevada, June 17-20, 2003.
- [10] T. DZIUBAK, *Badanie możliwości poprawy efektywności odsysania pyłu z odpylacza multicyklonowego silnika wojskowego pojazdu gąsienicowego*, Biul. WAT, 49, 7, 2000.
- [11] P. KABSCH, *Odpylanie i odpylacze*, t. 1, WNT, Warszawa, 1992.
- [12] PN-34040, *Filtry powietrza. Wymagania i badania*, PKNM, 1996.
- [13] S. SZCZECIŃSKI, *Odpylanie powietrza wlotowego*, Wojskowy Przegląd Techniczny, 6, 1983.
- [14] J. WARYCH, *Oczyszczanie gazów — procesy i aparatura*, WNT, Warszawa, 1998.
- [15] www.cumminsfiltration.com.

T. DZIUBAK

Axial inertial dust collector with a lateral air intake for preliminary inlet air filtration of motor vehicles engines

Abstract. The analysis of the structure of inertial dust collector used for preliminary intake air filtration of motor vehicle engines was carried out. There was made a comparative analysis of inertial dust collectors properties. Methodology and conditions of the study of axial inertial dust separator with side air intake characteristics were devised. The results of tests of effectiveness and flow drag characteristics of the axial inertial dust separator with side air intake for various dust collector geometric and flow parameters are presented.

Keywords: combustion engines, air filtration, inertial dust collectors, dust collection efficiency, flow drag

