

ANALIZA PORÓWNAWCZA BEZWŁADNOŚCIOWYCH ODPYLACZY DO FILTRACJI POWIETRZA WLOTOWEGO SILNIKÓW SPALINOWYCH

TADEUSZ DZIUBAK

Wojskowa Akademia Techniczna

Streszczenie

Przeprowadzono analizę konstrukcji odpylaczy bezwładnościowych stosowanych do filtracji wstępnej powietrza wlotowego silników pojazdów mechanicznych. Wykonano analizę porównawczą właściwości filtracyjnych odpylaczy bezwładnościowych punktu widzenia możliwości ich wykorzystania w lotniczych silnikach tłokowych i turbinowych. Przedstawiono wyniki badań charakterystyk skuteczności odpylania i oporu przepływu odpylaczy dla różnych wartości parametrów geometrycznych i przepływowych.

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

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 lub monocyklon, a drugim złoże filtracyjne w postaci przegrody porowatej z papieru filtracyjnego lub nieregularnego złoża siatkowego. Multicyklony filtru powietrza pojazdów mechanicznych 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 zagranicznych (na przykład: czołgi Leopard 2 i Abrams, samochody ciężarowe Scania i Volvo) znalazły zastosowanie głównie cyklony przelotowe z wlotem osiowym.

Od redaktora wydania:

Stężenia zapylenia powietrza w otoczeniu przemieszczających się kolumn ciężkich pojazdów po suchych polnych drogach lub bezdrożach są porównywalne z otoczeniem startujących lub lądujących na „przygodnych” lądowiskach śmigłowców bojowych, sanitarnych lub ratowniczych. Stąd potrzeba zainteresowania i przybliżenia problematyki odpylania powietrza wlotowego do turbinowych silników śmigłowcowych, ale i tłokowych silników samolotów dyspozycyjnych, sportowych..., a także moto- i paralotni, użytkownikom tych statków powietrznych.

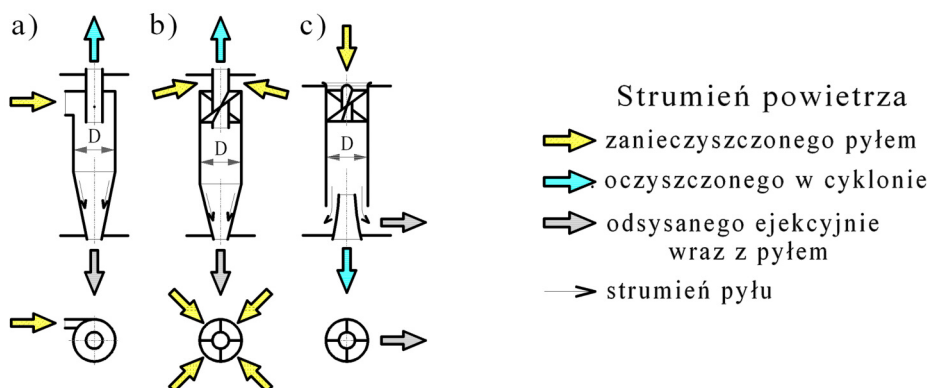
Odpylacze multicyklonowe stosowane są do odpylania powietrza wlotowego silników spalinyowych (szczególnie te zbudowane z cyklonów zwrotnych z wlotem stycznym) cechują się jednak dużymi oporami przepływu, co nie jest bez wpływu na spadek mocy silnika. Dlatego od lat prowadzone są prace mające na celu zastąpienie multicyklonów innymi odpylacza mi bezwładnościowymi [2, 3, 8]. 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.

Odpylacze bezwładnościowe do filtracji wstępnej powietrza wlotowego silnika samochodu ciężarowego był przedmiotem prac badawczo – konstrukcyjnych prowadzonych w Instytucie Pojazdów Mechanicznych i Transportu WAT [3, 8].

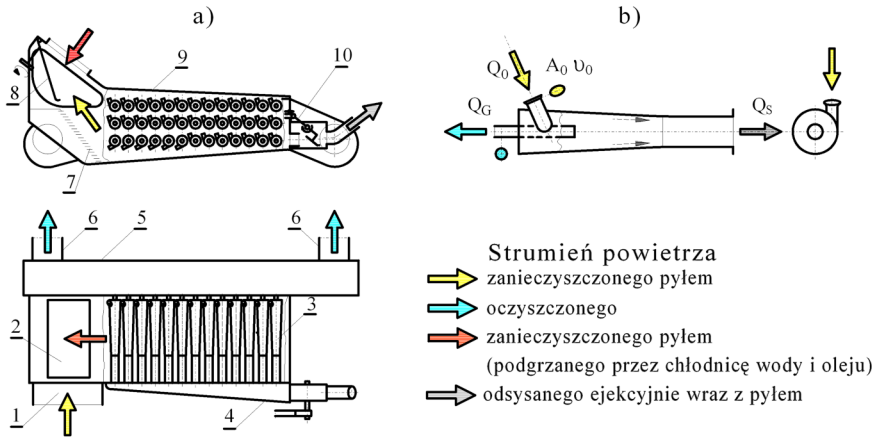
1. ODPYLACZ MULTICYKLONOWY

Multicyklon jest 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 $D = 250 \div 3000$ mm) rozmieszczonych obok siebie (połączenie równoległe) lub jeden za drugim (połączenie szeregowe) [4, 6, 12, 14]. 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 ziarna pod wpływem siły bezwładności (zachowując swój ruch zbliżony do prostoliniowego, przy czym ich gęstość jest blisko 2500 razy większa od gęstości powietrza) zostają odrzucane 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 zawirowywacz (rys. 1 b, c), którego łopatki mają zarys linii śrubowej. Schemat funkcjonalny jednostopniowego multicyklonu silnika UTD-20 BWP-1, który zbudowany jest z cyklonów zwrotnych z wlotem stycznym rozmieszczonych poziomo w trzech rzędach pokazano na rys. 2 [6].



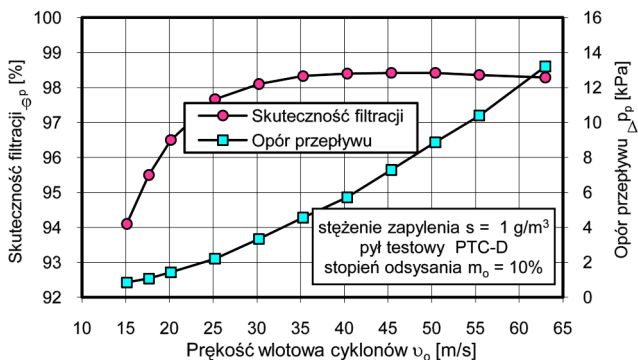
Rys. 2. Schemat funkcjonalny; a) filtru powietrza silnika UTD-20 BWP-1, b) cyklonu:

- 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

Oczyszczone w cyklonach powietrze wypływa cylindrycznymi rurkami do zbiorczej przestrzeni czystego powietrza 5, a następnie przez kolektory dolotowe jest odsysane przez silnik. Odseparowany w każdym z cyklonów pył, gromadzony we wspólnym dla kilkudziesięciu cyklonów osadniku, skąd jest usuwany ejekcyjnie w sposób ciągły za pomocą strumienia odsysania Q_S . Miarą intensywności 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 wlotowego z odpylacza Q_G - wlotowego do silnika [3, 6, 9, 11]:

$$m_0 = \frac{Q_S}{Q_G} \cdot 100\%$$

Z badań autora wynika, że wraz ze wzrostem prędkości przepływu strumienia powietrza Q_G przepływającego przez multicyklon (prędkości przepływu reprezentowanej przez prędkość v_0 w króćcu wlotowym cyklonu), następuje wzrost skuteczności odpylania powietrza φ_p oraz jednoczesny wzrost oporów przepływu Δp_p (rys. 3).



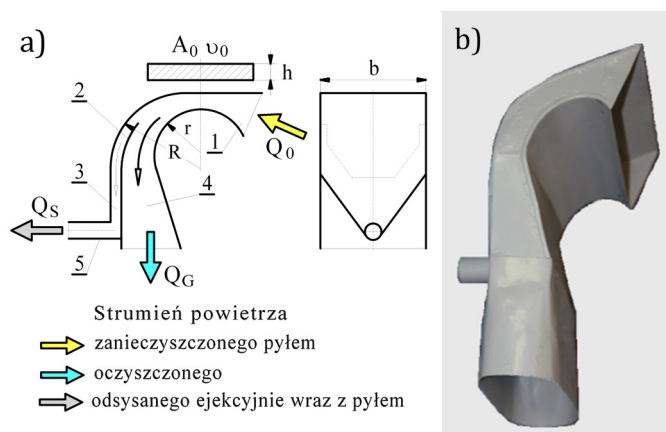
Rys. 3. Charakterystyki skuteczności odpylania ($\varphi_p = f(v_0)$) oraz oporów przepływu ($\Delta p_p = f(v_0)$) filtru powietrza wlotowego silnika pojazdu BWP-1

Taki przebieg skuteczności odpylania powietrza w filtrze silnika UTD-20 (znaczny 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 $v_0 = 63 \text{ m/s}$ ($Q_G = 0,43 \text{ kg/s}$), co odpowiada pracy silnika przy mocy maksymalnej, osiąga wartość $\Delta p_p = 13,2 \text{ kPa}$, 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 $\Delta p_{fdop} = 5 \div 7 \text{ kPa}$.

2. ODPYLACZ PROMIENIOWY

W odpylaczu promieniowym przedstawionym na rys. 4 wykorzystuje się siły bezwładności działające na ziarna pyłu znajdujące się w strumieniu powietrza przepływającego przez krzywoliniowy kanał o przekroju prostokątnym. 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 może być kierowany (w wariantach samochodowych) na drugi stopień filtracji (filtr przegrodowy), a następnie do cylindrów silnika. Zaś strumień zaś Q_S odprowadzany jest do otoczenia za pomocą urządzenia odsysającego. 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 oporów aerodynamicznych.

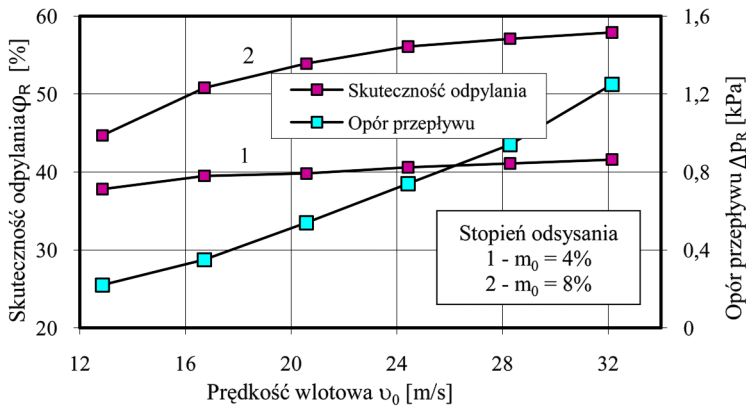


Rys. 4. Odpylacz promieniowy: a) schemat funkcjonalny, b) widok ogólny:

1 - wlot powietrza zanieczyszczonego, 2 - separator, 3 - kanał odsysania, 4 - kanał główny, 5 - rurka odsysająca, h - wysokość kanału odpylacza, b - szerokość kanału odpylacza

Kompleksowe badania odpylacza promieniowego, przeprowadzone przy bezpośrednim współudziale autora, wykazały, że jego skuteczność zależy od wartości prędkości przepływu (strumienia powietrza Q_G) oraz w dużym stopniu od intensywności 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 prędkości v_0 przepływu powietrza przez odpylacz w jego najmniejszym przekroju A_0 , opór przepływu odpylacza zwięk-

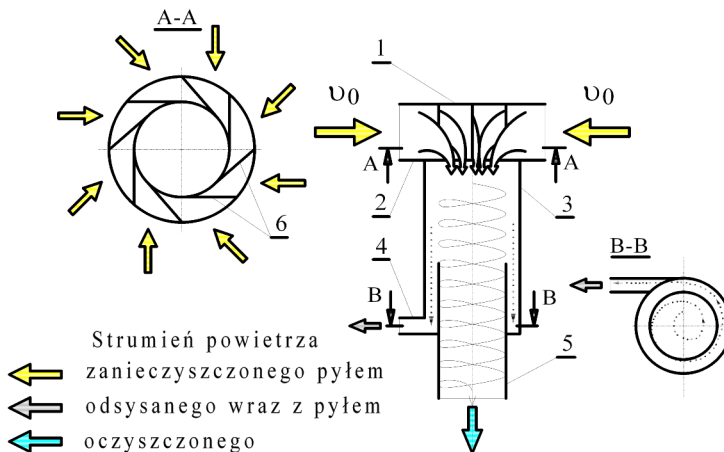
sza się parabolicznie i dla $v_0 = 32$ m/s ($Q_G = 0,22$ kg/s), co odpowiada pracy silnika przy mocy maksymalnej, przyjmuje wartość 1,25 kPa.



Rys. 5. Charakterystyki skuteczności odpylania ($\varphi_R = f(v_0)$) i oporu przepływu ($\Delta p_R = f(v_0)$) promieniowego odpylacza bezwładnościowego dla różnych stopni efektywności odsysania m_0 [8]

3. BEZWŁADNOŚCIOWY ODPYLACZ OSIOWY Z BOCZNYM WŁOTEM

Konstrukcja odpylacza bezwładnościowego osiowego z bocznym wlotem jest dość prosta, co stanowi znaczną jego zaletę. Wlot powietrza do odpylacza następuje prostokątnymi oknami utworzonymi przez kołowe tarcze i skośne łopatki zawirowywacza, które w naszych badaniach zostały równomiernie rozmieszczone co 45° (rys. 6). Nadają one strumieniowi zanieczyszczonego powietrza ruch wirowy, w wyniku czego ziarna pyłu pod wpływem siły bezwładności zostają odrzucone na ścianę wewnętrzną cylindrycznego kadłuba, gdzie wytracają prędkość i gromadzą się na dnie komory separacyjnej, skąd odprowadzane są na zewnątrz odpylacza króćcem odsysania dołączonym stycznie do cylindrycznego kadłuba. Strumień oczyszczonego powietrza porusza się nadal ruchem śrubowym, a następnie przewodem wylotowym opuszcza odpylacz.

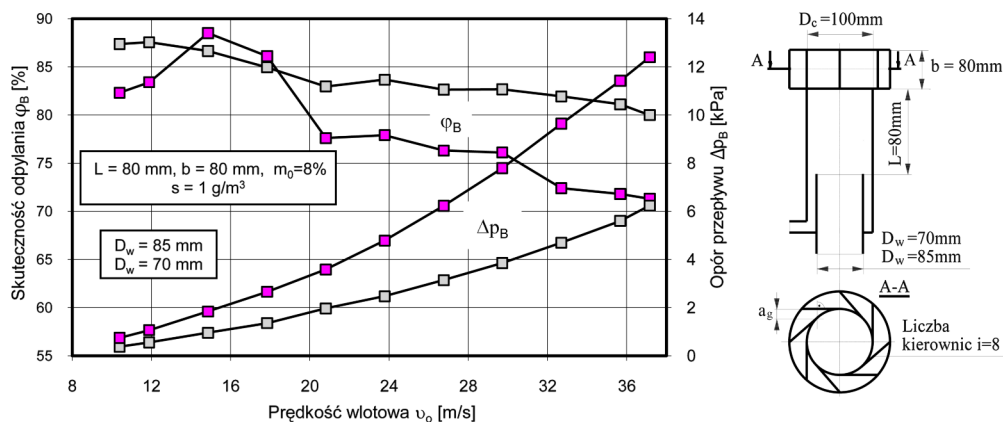


Rys. 6. Schemat funkcjonalny odpylacza bezwładnościowego z wlotem osiowym:

1 - kołowa tarcza zewnętrzna, 2 - kołowa tarcza wewnętrzna, 3 - kadłub cylindryczny, 4 - króćiec odsysania, 5 - przewód wylotowy, 6 - łopatki zawirowywacza

Z badań autora wynika, że w prawidłowo działającym odpylaczu bezwładnościowym zwiększanie prędkości przepływu powoduje intensywny wzrost skuteczności odpylania tylko do pewnej granicy (rys. 7). Dalszy wzrost prędkości przepływu nie powoduje już istotnego wzrostu skuteczności, a czasami nawet jej spadek. Przyczyną tego zjawiska może być duża prędkość, z jaką uderzają ziarna pyłu o ścianę wewnętrzną cylindrycznego przewodu wylotowego, w wyniku czego ziarna pyłu ulegają odbiciu i są porywane przez strumień wylotowy powietrza. Przedstawione na rysunku wyniki badań skuteczności odpylania są więc charakterystyczne dla tej fazy pracy odpylacza. Wynika z tego, że prędkości przepływu przyjmują zbyt duże wartości.

Drugi wariant odpylacza różniący się od pierwszego mniejszą średnicą przewodu wylotowego, a więc większą przestrzenią komory separacyjnej, charakteryzuje się wzrostem skuteczności filtracji w zakresie małych prędkości przepływu i dla $v_0 = 14,8$ m/s osiąga maksymalną wartość $\varphi_{Bmax} = 88,5$ %, a następnie nieznacznie lecz systematycznie maleje wraz ze wzrostem prędkości przepływu. Dla $v_0 = 37$ m/s ($QG = 0,43$ kg/s) skuteczność osiąga wartość $\varphi_B = 71,3$ %.



Rys. 7. Charakterystyki skuteczności odpylania $\varphi_B = f(v_0)$ i oporów przepływu $\Delta p_B = f(v_0)$ odpylacza bezwładnościowego osiowego z wlotem bocznym powietrza dla ustalonych parametrów $L = 80$ mm, $b = 80$ mm oraz różnych średnic przewodu wylotowego D_w

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

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

gdzie:

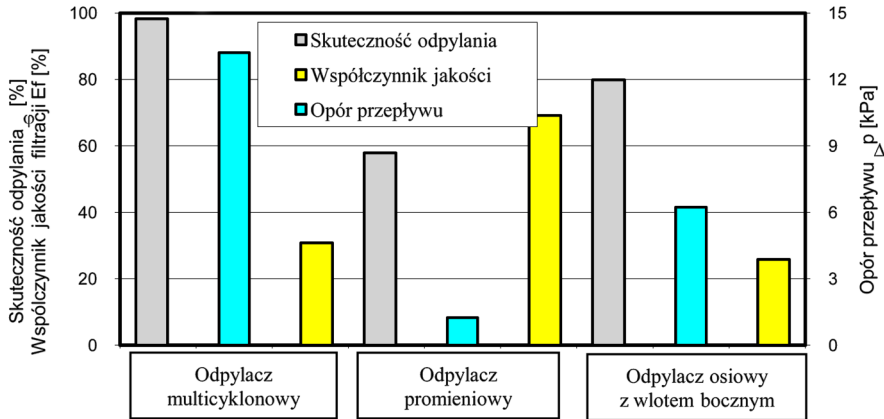
φ , Δp , - skuteczność i opór przepływu odpylacza bezwładnościowego dla nominalnego strumienia powietrza.

Powyższa zależność pozwala na porównywanie efektywności odpylania powietrza w odpylaczach. Im większa wartość współczynnika jakości, tym korzystniejszą relacją między skutecznością a oporami przepływu danego odpylacza (rys. 8).

Odpylacz multicyklonowy BWP-1 charakteryzuje współczynnik o wartości $E_{fp} = 30,8\%$, a więc znacznie mniejszy niż dla pozostałych odpylaczy bezwładnościowych.

Współczynnik jakości nie uwzględnia jednak ważnego parametru pracy odpylacza jakim jest rozmiar odseparowanych ziaren pyłu, która w odpylaczach bezwładnościowych zależy od intensywności zawirowania strumienia powietrza.

Od filtrów powietrza wlotowego silników spalinowych pojazdów mechanicznych wymaga się odseparowania ziaren pyłu większych od $2 \div 5 \mu\text{m}$. W pojazdach taką dokładność zapewniają papierowe przegrody filtracyjne, które są drugimi stopniami filtracji.



Rys. 8. Skuteczność odpylania i opory przepływu analizowanych odpylaczy bezwładnościowych

PODSUMOWANIE

Z rozważanych tu trzech typów odpylaczy bezwładnościowych największą skuteczność odpylania $\varphi_f = 98,4\%$, ale jednocześnie największy opór przepływu $\Delta p_{pf} = 13,2$ kPa osiąga multicyklon BWP-1. Odpylacz promieniowy charakteryzuje się stosunkowo małą skutecznością odpylania $\varphi_R = 57,9\%$, ale przy oporach przepływu zaledwie $\Delta p_{pR} = 1,25$ kPa, natomiast skuteczność odpylacza osiowego z bocznym wlotem powietrza, w zależności od średnicy przewodu wylotowego osiąga znaczne skuteczności - w granicach $\varphi_B = 70,80\%$, przy oporach przepływu dochodzących do $\Delta p_{pB} = 6$ kPa. Widać współzależność między skutecznością, a oporami przepływu odpylaczy bezwładnościowych. Im większa skuteczność, tym wyższe opory przepływu.

Dużą zaletą odpylaczy: promieniowego i bezwładnościowego z bocznym wlotem jest bardzo prosta budowa, niewielkie wymiary, niski koszt i łatwość „wpasowania” ich w kanał układu doprowadzającego powietrze do silnika oraz bezobsługowość. Odseparowany w odpylaczach pył usuwany jest efektywnie na zewnątrz dzięki wytworzeniu strumienia odsysania. Naturalnym rozwiązaniem konstrukcyjnym tych odpylaczy jest ich wykorzystanie jako bezpośredniego chwytu powietrza – czerpni powietrza.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Baczewski K., Hebda M.: Filtracja płynów eksploatacyjnych. MCNEMT, Radom 1991/92.
- [2] Bartkiewicz P.: Projekt i badania modeli odpylacza do silnika śmigłowego. Praca dyplomowa. WAT, Warszawa 1998.
- [3] Dzierżanowski P., Dziubak T.: Układ filtracyjny powietrza z efektywnym odsysaniem pyłu silnika samochodu ciężarowego. Materiały VI Międzynarodowego Sympozjum Instytutu Pojazdów Mechanicznych. Warszawa, Rynia 4–6 grudnia 1996.
- [4] Dzierżanowski P., Kordziński W., Otyś J., Szczeciński S., Wiatrek R.: Napędy lotnicze. Turbinowe silniki śmigłowe i śmigłowcowe. WKŁ, Warszawa 1985.

-
- [5] Dziubak T.: Analiza procesu filtracji powietrza wlotowego do silników pojazdów specjalnych. Rozprawa habilitacyjna. WAT, Warszawa 2008.
 - [6] Dziubak T.: Możliwości modyfikacji konstrukcji cyklonu zwrotnego z wlotem stycznym. Biuletyn WAT, LV, 2 (642), 2006. str. 279-301.
 - [7] Dziubak T.: Problemy filtracji powietrza zasysanego do spalinowych silników pojazdów mechanicznych. Biuletyn WAT, LV, 3 (643), 2006.
 - [8] Dziubak T., Dzierżanowski P., Stolarczyk W.: 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.
 - [9] Dziubak T.: Problemy odsysania pyłu z multicyklon filtru powietrza silnika pojazdu mechanicznego eksploatowanego w warunkach dużego zapylenia powietrza, ZEM 1(125)2001.
 - [10] George J., Forna R., Cravero T.: Air Filtration with Fine Polymeric Fibers. 16th Annual Technical Conference and Exposition 2003 Technical Sessions Papers. Reno-Nevada, June 17-20, 2003.
 - [12] Kabsch P.: Odpylanie i odpylacze t.1, WNT, Warszawa 1992.
 - [13] PN- 34040. Filtry powietrza. Wymagania i badania, PKNM, 1996.
 - [14] Szczeciński S.: Odpylanie powietrza wlotowego. Wojskowy Przegląd Techniczny, Nr 6, 1983.