



Badania eksperymentalne cyklonów przelotowych filtrów powietrza silników spalinowych

TADEUSZ DZIUBAK, SEBASTIAN SZWEDKOWICZ

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

Streszczenie. Przedstawiono podstawowe wymiary cyklonu osiowego przelotowego mające wpływ na jego charakterystyki filtracyjne. Omówiono mechanizm odseparowywania cząstek pyłu ze strumienia powietrza przepływającego w cyklonie. Podano metodykę i warunki badań cyklonów przelotowych oraz wyposażenie stanowiska pozwalające wyznaczać ich charakterystyki. Przeanalizowano uzyskane w trakcie badań eksperymentalnych wyniki charakterystyk skuteczności filtracji $\varphi_c = f(Q_{Gc})$, oporu przepływu $\Delta p_c = f(Q_{Gc})$ oraz dokładności filtracji $d_{zmax} = f(Q_{Gc})$. Przeanalizowano wpływ odsysania pyłu na skuteczność i dokładność filtracji cyklonów przelotowych. Ustalono optymalny stopień odsysania pyłu ze względu na osiąganą skuteczność filtracji.

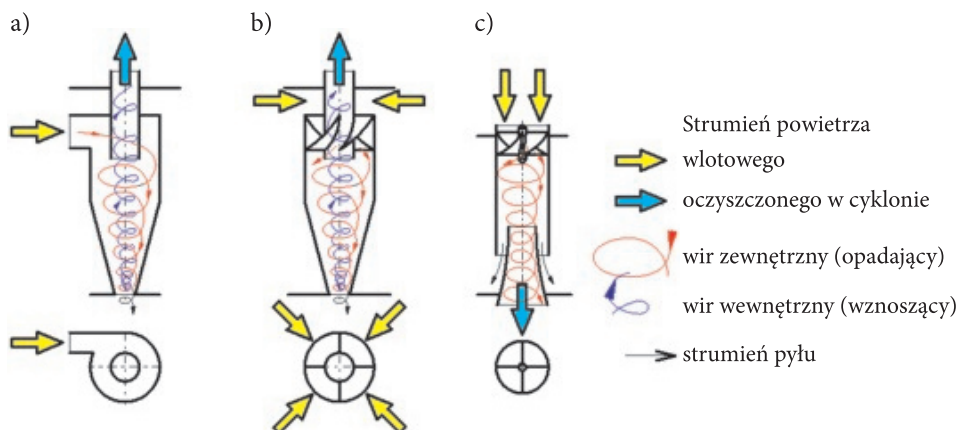
Słowa kluczowe: minicyklony przelotowe, skuteczność i dokładność filtracji, opór przepływu, filtry bezwładnościowe, silniki spalinowe

1. Wstęp

Wzrastające wymagania eksploatatorów dotyczące trwałości i niezawodności silników, a w szczególności silników pojazdów wojskowych, zmuszają do intensyfikacji prac konstrukcyjnych i badawczych dotyczących filtracji powietrza wlotowego do silników pojazdów mechanicznych i maszyn roboczych.

W większości współczesnych pojazdów ciężarowych, w tym wojskowych i specjalnych, spotyka się wielostopniowe systemy filtracji powietrza, w których pierwszym stopniem jest bateria minicyklonów (multicyklon), a drugim przegroda porowata najczęściej w postaci cylindrycznego wkładu papierowego [1, 4, 5]. W pojazdach mechanicznych

produkcji krajowej zastosowanie znalazły minicyklony zwrotne z wlotem stycznym (czołgi: PT-91 i T-72, bojowy wóz piechoty BWP-1) lub z wlotem osiowym (haubica samobieźna 2S-1, samochód ciężarowo-terenowy Star 266) — rys. 1.



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

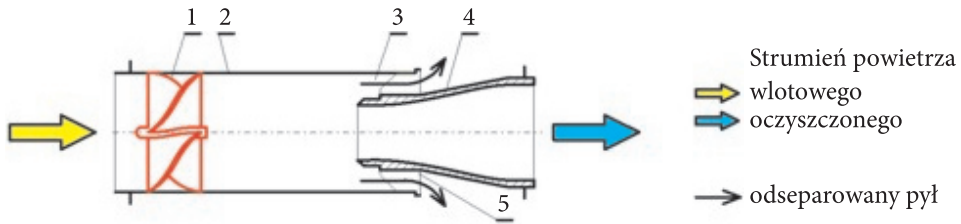
Minicyklony przelotowe z wlotem osiowym wykorzystano w filtrach powietrza pojazdów produkowanych za granicą (np. czołgi Leopard 2 i Abrams, samochody ciężarowe Scania i Volvo) oraz w samochodzie ciężarowym Star 1466 produkowanym w Polsce.

Od współczesnych systemów filtracji powietrza wlotowych silników wymaga się znacznej skuteczności i dokładności, małych oporów przepływu, małych wymiarów i masy oraz trwałości w działaniu. Tym wymaganiom odpowiadają najlepiej dwustopniowe systemy filtracji, gdzie pierwszym stopniem jest filtr bezwładnościowy zbudowany z minicyklonów przelotowych (rys. 1c).

W dostępnej literaturze krajowej niewiele jest jednak opracowań dotyczących współcześnie produkowanych i stosowanych w filtrach powietrza cyklonów przelotowych. Dlatego celowe jest podjęcie badań eksperymentalnych pozwalających określić ich charakterystyki filtracyjne.

2. Charakterystyka cyklonu przelotowego z wlotem osiowym

Budowa cyklonu przelotowego jest dość prosta. Składa się on z cylindrycznego na całej długości kadłuba, nieruchomego zawirowywacza łopatkowego umieszczonego na wlocie, komory separacyjnej oraz stożkowej rurki wylotowej (rys. 2). Węższa część rurki wylotowej znajduje się wewnątrz kadłuba. Komorę separacyjną tworzy wewnętrzna powierzchnia kadłuba oraz zewnętrzna powierzchnia rurki wylotowej.



Rys. 2. Cyklon przelotowy z wlotem osiowym filtra powietrza silnika pojazdu mechanicznego: 1 — zawirówywacz, 2 — kadłub, 3 — komora separacyjna, 4 — przewód wylotowy, 5 — otwory usuwania pyłu

W zanieczyszczonym strumieniu powietrza, podczas przepływu przez zawirówywacz, pojawia się składowa obwodowa prędkości. Dzięki jej aerodynamicznemu oddziaływaniu na ziarna pyłu, obok ruchu w kierunku osiowym, ziarna pyłu wykonują dodatkowo ruch w kierunku poprzecznym, który powoduje przemieszczanie ich do ściany kanału. W ten sposób powstaje niejednorodne stężenie zapylenia w strumieniu powietrza wzdłuż promienia cyklonu — większe w pobliżu ściany kanału. Rośnie ono wraz z oddalaniem się od zawirówywacza, ale tylko do określonej odległości. Umieszczenie w tej odległości komory separacyjnej powoduje, że dzięki siłom bezwładności do powstałej szczeliny (komory separacyjnej) przedostaje się większość ziaren znajdujących się w strefie ściany kadłuba, skąd ziarna są odsysane i wydalone do otoczenia lub wpadają do specjalnego, okresowo opróżnianego zbiornika. W opisywanych cyklonach stopień odsysania wynosi średnio 10-15%.

Ruch ziarna pyłu w cyklonie rozpatrywany jest najczęściej tylko w płaszczyźnie prostopadłej do osi cyklonu. Przy takim założeniu na ziarno pyłu działają dwie siły: siła bezwładności F_B i aerodynamiczna siła oporu ośrodka F_R . Ziarna pyłu poruszają się po torze, którego kształt będzie zależał od wzajemnej relacji wartości tych sił. Z kolei wartość tych sił uzależniona będzie od wymiaru, kształtu i materiału ziarna oraz rodzaju ośrodka. Ruch wirowy aerozolu powoduje powstawanie siły odśrodkowej, której wielkość odniesiona do ziarna pyłu o masie m_z , znajdującego się w odległości r od osi obrotu, wyniesie [9]:

$$F_B = \frac{m_z \cdot u_s^2}{r}, \quad (1)$$

gdzie: u_s — styczna składowa prędkości ruchu ziarna równa w przybliżeniu stycznej składowej prędkości gazu v_s w tym punkcie.

Siła ta powoduje ruch ziarna ku ściance cyklonu z prędkością u_r . Ruchowi temu przeciwdziała siła oporu ośrodka F_R określona zależnością [9]:

$$F_R = \lambda \cdot A_p \cdot \frac{u_r^2}{2} \cdot \rho_g, \quad (2)$$

gdzie: A_p — powierzchnia projekcyjna ziarna (powierzchnia rzutu ziarna na płaszczyznę) w kierunku jego ruchu;
 u_r — składowa promieniowa ruchu ziarna;
 ρ_g — gęstość gazu;
 λ — współczynnik oporów tarcia opisany ogólną zależnością:

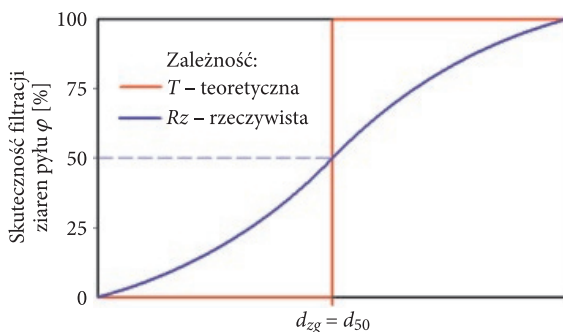
$$\lambda = f(\psi_k, R_e), \quad (3)$$

gdzie: Ψ_k — współczynnik kształtu ziarna;
 R_e — liczba Reynoldsa.

Zgodnie z prawem Newtona odniesionym do składowej promieniowej ruchu u_r , przy oporach skierowanych do wnętrza (osi) cyklonu, równanie ruchu ziarna przyjmie postać [13]:

$$m_z \cdot \frac{du_r}{dt} = \frac{m_z \cdot u_s^2}{r} - F_R. \quad (4)$$

Ziarna pyłu o średnicach mniejszych od pewnego wymiaru d_{zg} , definiowanych jako średnica ziarna granicznego, dla których zachodzi warunek $F_B < F_R$, będą dostawały się do środka cyklonu i zostaną porwane przez wir wewnętrzny powietrza w kierunku rurki wylotowej cyklonu. Skuteczność wychwytywania w cyklonie tych ziaren wynosi więc 0%. Natomiast ziarna pyłu o średnicach większych od wymiaru d_{zg} , dla których $F_B > F_R$, będą poruszały się po linii spiralnej i zostaną odrzucone na ścianki cyklonu, a więc zostaną odseparowane ze 100% skutecznością (linia T rys. 3).



Rys. 3. Skuteczność przedziałowa — zależność skuteczności filtracji φ cyklonu od średnicy ziaren pyłu d_z [9]

Ziarna o wymiarze równym $d_z = d_{zg}$, dla których następuje zrównanie siły odśrodkowej F_B i promieniowej składowej siły oporu ośrodku F_R , będą (teoretycznie) krążyły po okręgu o promieniu r . W rzeczywistości jednak ruch ziaren pyłu w cyklonie odbywa się w zmiennym w przestrzeni polu prędkości gazu oraz pod wpływem zmieniającego

się w przestrzeni układu sił działających na każde ziarno. Dodatkowo ziarna pyłu mają bardzo różnorodny, nieregularny kształt i wynikają z tego różne relacje sił bezwładności i aerodynamicznych, a ponadto występują zderzenia ziaren ze ściankami cyklonu i ze sobą powodujące między innymi koagulację pyłu. Czynniki te sprawiają, że nie wszystkie ziarna pyłu o rozmiarach większych od d_{zg} będą odseparowane w cyklonie ze 100% skutecznością, lecz mniejszą. Nie wszystkie ziarna o rozmiarach mniejszych od d_{zg} będą porwane w 100% przez wir powietrza w kierunku rurki wylotowej cyklonu. Część cząstek aerozolowych mniejszych od d_{zg} będzie jednak zatrzymana w cyklonie. Skuteczność wydzielenia cząstek aerozolowych z powietrza w cyklonie przebiega według krzywej R_z pokazanej na rysunku 3, nazywanej krzywą skuteczności przedziałowej. Ziarna, dla których zachodzi warunek $F_B = F_R$, nie krążą po okręgu o określonym promieniu. Część z nich jest zatrzymywana w cyklonie, a część porywana przez wir wewnętrzny w kierunku wylotu cyklonu. Rozmiar ziaren pyłu, których skuteczność wynosi 50%, nazywany jest średnicą ziarna granicznego d_{zg} i oznaczany d_{50} .

Wzrost wartości strumienia powietrza przepływającego przez cyklon (a tym samym prędkości liniowej powietrza) powoduje wzrost siły odśrodkowej F_B działającej na ziarno pyłu, a tym samym wzrost skuteczności odpylania φ_c .

Prędkość gazu w cyklonie reprezentowana jest najczęściej przez średnią prędkość na wlocie v_0 , która określona jest (w przypadku cyklonów zwrotnych z wlotem stycznym) jako iloraz strumienia powietrza Q_0 wpływającego do cyklonu i pola powierzchni A_0 przekroju poprzecznego króćca wlotowego, a w przypadku cyklonów przelotowych jako iloraz strumienia powietrza Q_0 wpływającego do cyklonu i pola powierzchni A_{0k} przekroju poprzecznego kadłuba cyklonu na wlocie [4, 5]:

$$v_0 = \frac{Q_0}{A_0} = \frac{Q_0}{A_{0k}}. \quad (5)$$

Wzrost prędkości v_0 ponad określoną dla danego cyklonu wartość powoduje gwałtowne narastanie oporu przepływu Δp_c , będącego funkcją $\Delta p_c = f(v^2)$, nie podnosząc przy tym skuteczności odpylania cyklonu φ_c , co jest wynikiem szybszego wzrostu sił aerodynamicznych działających na ziarno w porównaniu do sił bezwładności. Istnieje zatem pewien zakres prędkości wlotowej v_0 , w którego granicach cyklon uzyskuje optymalne warunki pracy — wysoki poziom skuteczności odpylania przy oporze przepływu nieprzekraczającym wartości dopuszczalnych.

Istotny wpływ na pracę każdego filtra bezwładnościowego ma stopień odsysania m_0 strumienia [8, 10, 11]. Definiowany jest jako iloraz strumienia odsysanego z komory separacyjnej Q_S i strumienia wpływającego z filtra Q_G [1, 2, 4, 6]:

$$m_0 = \frac{Q_S}{Q_G}. \quad (6)$$

Wielkość stopnia odsysania m_0 nie przekracza z reguły 15...20%, ponieważ dla większych wartości nie obserwuje się poprawy parametrów pracy cyklonu, skuteczności i dokładności filtracji [3, 4, 11, 12].

3. Cel i zakres badań

Celem badań było określenie wpływu strumienia powietrza Q_{Gc} na skuteczność filtracji φ_c , dokładność filtracji d_{zmax} oraz opory przepływu Δp_c dwóch, różniących się geometrią i warunkami przepływu, cyklonów przelotowych (tab. 1). Przedmiotem badań były współczesne konstrukcje cyklonów przelotowych stosowane w filtrach powietrza: samochodu ciężarowego Volvo FL10 oraz wojskowego pojazdu specjalnego KTO „Rosomak” (rys. 4).

TABELA 1

Parametry geometryczne cyklonów przelotowych

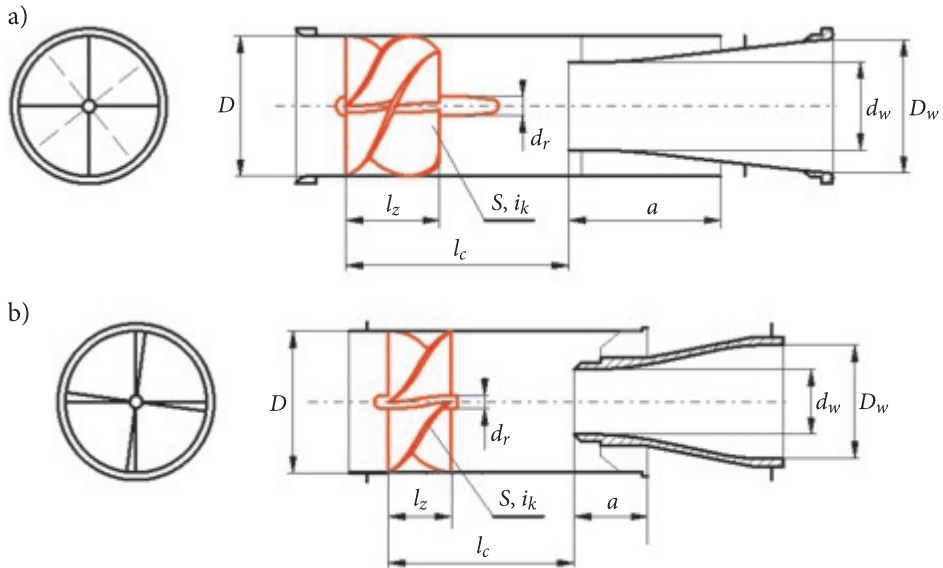
Parametr	Volvo	KTO „Rosomak”
Średnica wewnętrzna cyklonu D	35 mm	36 mm
Średnica przewodu wylotowego cyklonu D_w	38 mm	34 mm
Średnica otworu wlotowego przewodu wylotowego d_w	23 mm	18 mm
Średnica rdzenia d_r	7 mm	5 mm
Długość zawirowywacza l_z	26 mm	13 mm
Skok kierownic S	68 mm	53 mm
Liczba kierownic i_k	4	4
Długość komory separacyjnej a	34 mm	22 mm
Długość czynna cyklonu l_c	62 mm	45 mm

Badania wykonano w dwóch etapach. Zakres badań pierwszego etapu obejmował określenie następujących charakterystyk: skuteczności, dokładności i oporów przepływu, cyklonów pracujących bez eekcyjnego odsysania pyłu i dla stopnia odsysania $m_0 = 10\%$:

- 1) skuteczności filtracji $\varphi_c = f(Q_{Gc})$,
- 2) dokładności filtracji $d_{zmax} = f(Q_{Gc})$,
- 3) oporów przepływu $\Delta p_c = f(Q_{Gc})$.

W drugim etapie określono wpływ stopnia odsysania m_0 na skuteczność i dokładność filtracji dla stałej wartości strumienia Q_{Gc} odpowiadającego najwyższym wartościom skuteczności uzyskanym w pierwszym etapie badań w postaci następujących charakterystyk:

- 1) skuteczności filtracji $\varphi_c = f(m_0)$,
- 2) dokładności filtracji $d_{zmax} = f(m_0)$.



Rys. 4. Charakterystyczne wymiary cyklonu przelotowego z wlotem osiowym: a) Volvo FL10; b) KTO „Rosomak”: D — średnica wewnętrzna cyklonu, D_w — średnica kanału wylotowego, d_w — średnica otworu wlotowego kanału wylotowego, l_c — długość czynna cyklonu, l_z — długość zawirowywacza, a — długość komory separacyjnej, d_r — średnica rdzenia zawirowywacza, S — skok linii śrubowej kierownicy, i_k — liczba kierownic

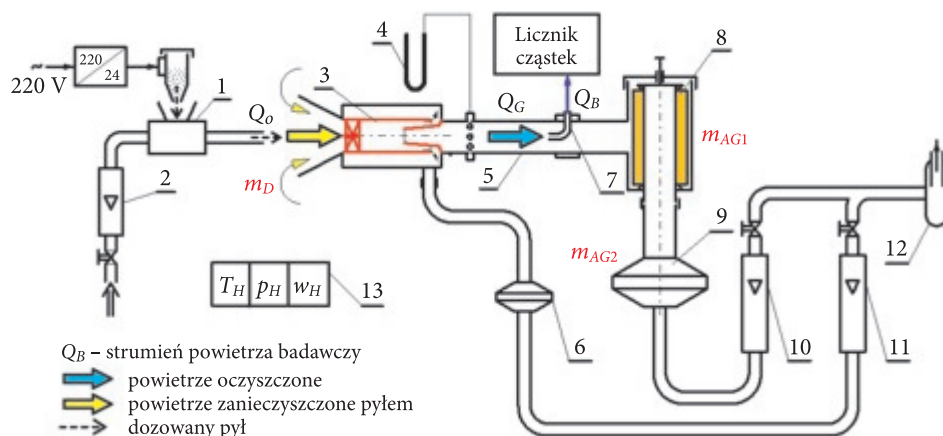
4. Metodyka i warunki badań cyklonów osiowych przelotowych

Badania przeprowadzono na specjalnie skonstruowanym w tym celu stanowisku pomiarowym (rys. 5) umożliwiającym wykonywanie podstawowych charakterystyk: skuteczności i dokładności filtracji oraz oporu przepływu cyklonów przelotowych dla strumienia powietrza w zakresie do $80 \text{ m}^3/\text{h}$. Stanowisko wyposażone jest w licznik cząstek stałych Pamas-2132 rejestrujący w strumieniu przepływającego powietrza Q_{Gc} za cyklonem liczbę i rozmiar ziaren pyłu z zakresu $0,7\text{-}100 \mu\text{m}$.

Charakterystyki cyklonów: skuteczności $\varphi_c = f(Q_{Gc})$ i dokładności filtracji $d_{z\text{max}} = f(Q_{Gc})$ oraz oporu przepływu $\Delta p_c = f(Q_{Gc})$ wyznaczano w zakresie strumienia powietrza $Q_{Gc} = Q_{Gc\text{min}}\text{-}Q_{Gc\text{max}}$ wynikającego z zapotrzebowania powietrza przez silniki pojazdów, z których pozyskano cyklony do badań, i liczby cyklonów w filtrze.

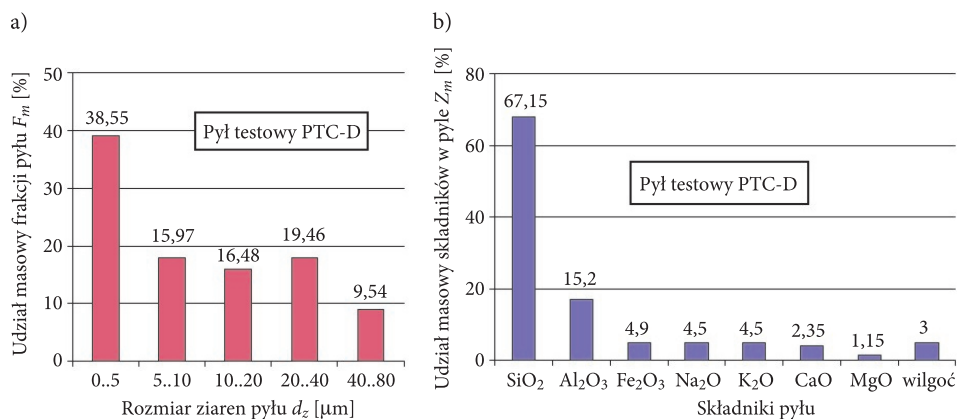
$$Q_{Gc(\text{min,max})} = \frac{Q_{Sil(\text{min,max})}}{n}, \quad (7)$$

gdzie: $Q_{Sil(\text{min,max})}$ — minimalny (maksymalny) strumień powietrza zasysany przez silnik;
 n — liczba cyklonów kompletnego multicyklonu.



Rys. 5. Schemat funkcjonalny stanowiska do badań papierów filtracyjnych w systemie „cyklon – przegroda”: 1 – dozownik pyłu, 2 – rotametr sprężonego powietrza, 3 – cyklon, 4 – manometr cieczyowy, 5 – przewód pomiarowy, 6 – filtr absolutny strumienia odsysania, 7 – sonda pyłowa, 8 – filtr absolutny nr 1 strumienia głównego, 9 – filtr absolutny nr 2 strumienia głównego, 10 – rotametr strumienia głównego, 11 – rotametr strumienia odsysania, 12 – wentylator ssawny, 13 – termohigrobarometr

Charakterystykę skuteczności filtracji badanego cyklonu określono metodą grawimetryczną w kilkukrotnie powtarzanych cyklach pomiarowych o określonym czasie trwania, przy zastosowaniu pyłu testowego PTC-D (rys. 6) i stężeniu pyłu w powietrzu wlotowym do cyklonu $s = 1 \text{ g/m}^3$.



Rys. 6. Skład granulometryczny (a) i skład chemiczny (b) pyłu testowego PTC-D stosowanego podczas badań cyklonów filtra powietrza samochodu Volvo i KTO „Rosomak” [7]

Skuteczność filtracji φ_c określano według poniższej zależności metodą grawimetryczną: ważenia dozownika pyłu oraz filtrów absolutnych przed każdym cyklem pomiarowym i po nim:

$$\varphi_c = \frac{m_D - (m_{AG1} + m_{AG2})}{m_D}, \quad (8)$$

gdzie: m_D — masa pyłu dostarczonego równomiernie do cyklonu z powietrzem wlotowym w określonym czasie τ ;
 m_{AG1} , m_{AG2} — masa pyłu przepuszczonego przez cyklon (zatrzymanego przez filtry absolutne).

Opór przepływu cyklonu Δp_c określano jako różnicę ciśnień statycznych przed i za cyklonem w odległości $6d_w$ od krawędzi minicyklonu (gdzie d_w — średnica wewnętrzna przewodu wylotowego minicyklonu):

$$\Delta p_c = p_H - p_2, \quad (9)$$

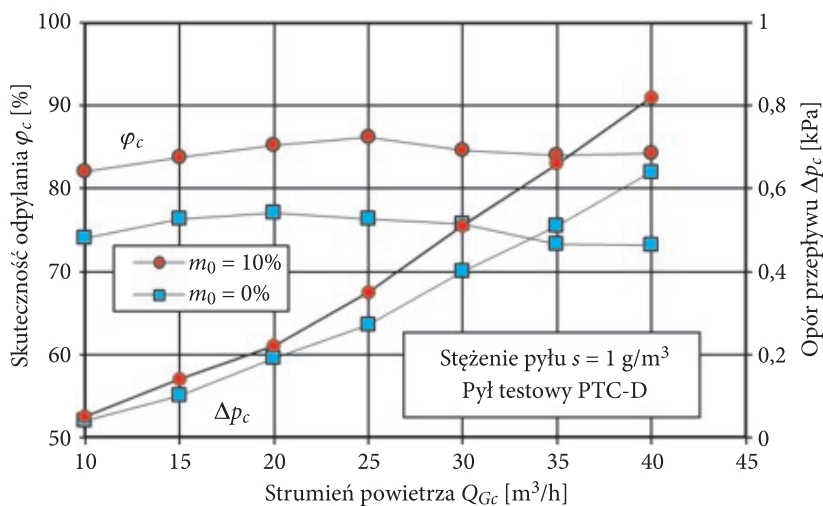
gdzie: p_H , p_2 — ciśnienie statyczne odpowiednio przed i za cyklonem.

5. Analiza wyników

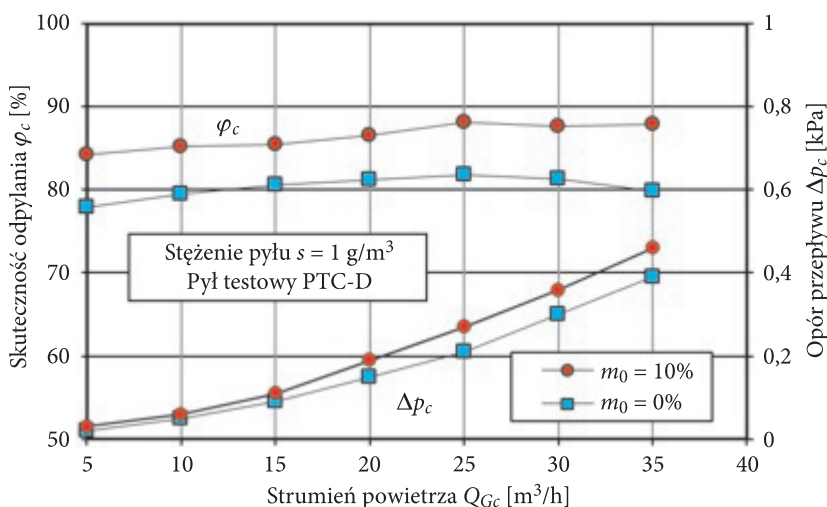
Wyniki badań cyklonów przelotowych z wlotem osiowym w postaci charakterystyk skuteczności $\varphi_c = f(Q_{Gc})$ i oporu przepływu $\Delta p_c = f(Q_{Gc})$ przedstawiono na rysunkach 7 i 8. Wraz ze wzrostem strumienia powietrza przepływającego przez minicyklon Q_{Gc} , a tym samym prędkości wlotowej v_0 , dochodzi do wzrostu skuteczności filtracji minicyklonów, a po osiągnięciu wartości maksymalnej następuje jej nieznaczny spadek.

W przypadku minicyklonu filtru powietrza KTO „Rosomak” maksymalną skuteczność filtracji (bez odsysania pyłu z osadnika) $\varphi_c = 77,1\%$ uzyskano przy strumieniu powietrza $Q_{Gc} = 20 \text{ m}^3/\text{h}$. Natomiast przy strumieniu powietrza $Q_{Gc} = 40 \text{ m}^3/\text{h}$ skuteczność filtracji osiąga nieznacznie mniejszą wartość $\varphi_c = 73,2\%$. Stosując ejekcyjne odsysanie pyłu na poziomie $m_0 = 10\%$ charakterystyka skuteczności filtracji $\varphi_c = f(Q_{Gc})$ minicyklonu przyjmuje wyższe wartości i różni się nieznacznie co do przebiegu. Zastosowanie odsysania spowodowało wzrost skuteczności filtracji cyklonu do $\varphi_c = 86,1\%$, czyli o 11,6%.

Podobny przebieg charakterystyk skuteczności filtracji $\varphi_c = f(Q_{Gc})$ uzyskano dla minicyklonu filtru powietrza samochodu ciężarowego Volvo. Skuteczność filtracji tego cyklonu osiąga nieznacznie większe wartości zarówno bez odsysania jak i z odsysaniem pyłu. Maksymalną skuteczność filtracji minicyklonu: $\varphi_c = 81,8\%$



Rys. 7. Charakterystyka skuteczności filtracji $\varphi_c = f(Q_{Gc})$ i oporów przepływu $\Delta p_c = f(Q_{Gc})$ minicyklonu przelotowego filtra KTO „Rosomak” z odsysaniem pyłu ($m_0 = 10\%$) i bez odsysania



Rys. 8. Charakterystyka skuteczności filtracji $\varphi_c = f(Q_{Gc})$ i oporów przepływu $\Delta p_c = f(Q_{Gc})$ minicyklonu przelotowego filtra samochodu ciężarowego Volvo z odsysaniem pyłu ($m_0 = 10\%$) i bez odsysania

(bez odsysania) i $\varphi_c = 88,1\%$ przy zastosowaniu odsysania pyłu na poziomie $m_0 = 10\%$ zarejestrowano dla strumienia powietrza $Q_G = 25 \text{ m}^3/\text{h}$. Taki charakter przebiegu skuteczności $\varphi_c = f(Q_{Gc})$ jest zgodny z informacjami literaturowymi i innymi wynikami badań [1, 3, 4, 6].

otrzymany z eksperymentu przebieg zmian skuteczności $\varphi_c = f(Q_{Gc})$ jest potwierdzeniem teorii działania cyklonów, według której odseparowanie ziarna pyłu

ze strumienia powietrza jest głównie rezultatem wzajemnych relacji sił bezwładności F_d działających na ziarno pyłu i sił aerodynamicznych F_R oddziaływania strumienia gazu. Wraz ze wzrostem strumienia powietrza przepływającego przez cyklon (prędkości przepływu) wartości obu sił są coraz większe, przy czym dla wyższych wartości strumienia (w badanych cyklonach po przekroczeniu $Q_{Gc} = 25 \text{ m}^3/\text{h}$) przyrost siły aerodynamicznej F_R zaczyna być szybszy niż siły bezwładności F_d , co powoduje wyhamowanie ruchu ziaren, a tym samym może nastąpić ich porywanie przez strumień (wir) powietrza wylotowego z cyklonu. W konsekwencji przy wyższych wartościach strumienia powietrza następuje niewielki spadek skuteczności φ_c cyklonu.

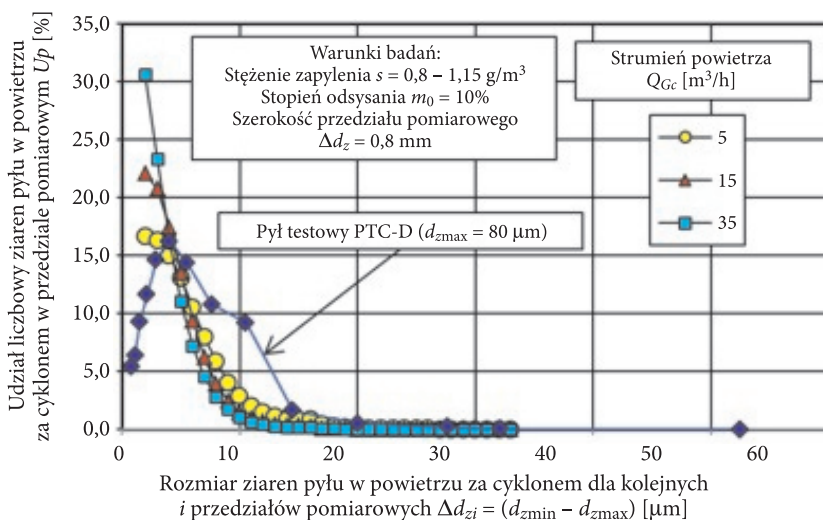
Wraz ze wzrostem strumienia powietrza Q_{Gc} następuje paraboliczny wzrost oporów przepływu Δp_c minicyklonów. Dla maksymalnej wartości strumienia powietrza $Q_{Gc} = 40 \text{ m}^3/\text{h}$ opór przepływu minicyklonu KTO Rosomak przyjmuje odpowiednio wartości: $\Delta p_c = 0,64 \text{ kPa}$ bez odsysania i $\Delta p_c = 0,82 \text{ kPa}$ z odsysaniem $m_0 = 10\%$. Opór przepływu minicyklonu filtra powietrza samochodu Volvo kształtuje się na niższym poziomie, co wynika z mniejszej prędkości strumienia powietrza w otworze wlotowym rurki wylotowej wynoszącej $v_w = 23,4 \text{ m/s}$ przy strumieniu $Q_{Gcmax} = 35 \text{ m}^3/\text{h}$. W przypadku minicyklonu z filtra powietrza KTO „Rosomak” prędkość ta, przy strumieniu powietrza $Q_{Gcmax} = 40 \text{ m}^3/\text{h}$, ma wartość $v_w = 43,7 \text{ m/s}$.

Wykorzystany do badań licznik cząstek stałych Pamas-2132 rejestruje w strumieniu przepływającego powietrza Q_{Gc} za cyklonem liczbę i rozmiar ziaren pyłu z zakresu $0,7\text{-}100 \text{ }\mu\text{m}$ w $i = 32$ przedziałach pomiarowych. Obliczano udział Up_i liczby N_i ziaren pyłu z każdego przedziału pomiarowego ($d_{zimin}\text{-}d_{zimax}$) w całkowitej liczbie N ziaren pyłu w powietrzu za cyklonem (liczba ziaren pyłu ze wszystkich przedziałów pomiarowych i), stosując zależność:

$$Up_i = \frac{N_i}{N} = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^{32} N_i}. \quad (10)$$

W pyłe testowym PTC-D największe udziały liczbowe mają ziarna pyłu o rozmiarach w zakresie $1,5\text{-}10,5 \text{ }\mu\text{m}$, przy czym dla $d_z = 4 \text{ }\mu\text{m}$ udział liczbowy Up ma wartość maksymalną $Up_{max} = 16\%$ (rys. 9). Po „przejściu” pyłu przez cyklon, w wyniku zatrzymania ziaren pyłu o większych rozmiarach i masie, skład granulometryczny pyłu ulega zdecydowanej zmianie.

Dla stałej wartości strumienia Q_{Gc} oraz stopnia odsysania m_0 obserwuje się wraz ze wzrostem rozmiarów ziaren pyłu systematyczny spadek liczby ziaren pyłu w strumieniu powietrza za cyklonem, a tym samym ich udziały liczbowe Up w poszczególnych przedziałach pomiarowych Δd_z są coraz mniejsze aż do osiągnięcia wartości minimalnej Up_{min} , która określa udział pojedynczego ziarna pyłu o maksymalnym rozmiarze d_{zmax} w ogólnej liczbie ziaren pyłu N (rys. 9).

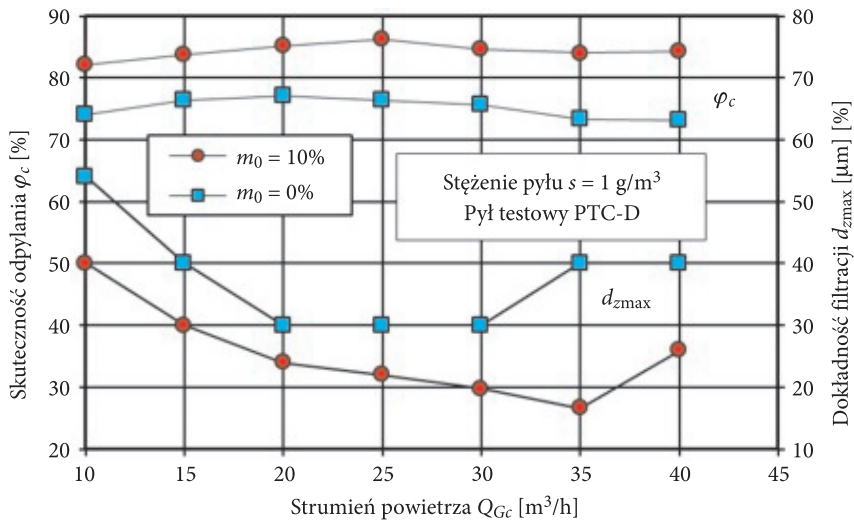


Rys. 9. Udział liczbowy U_p ziaren pyłu w powietrzu przed i za badanym cyklonem przelotowym filtra powietrza samochodu Volvo

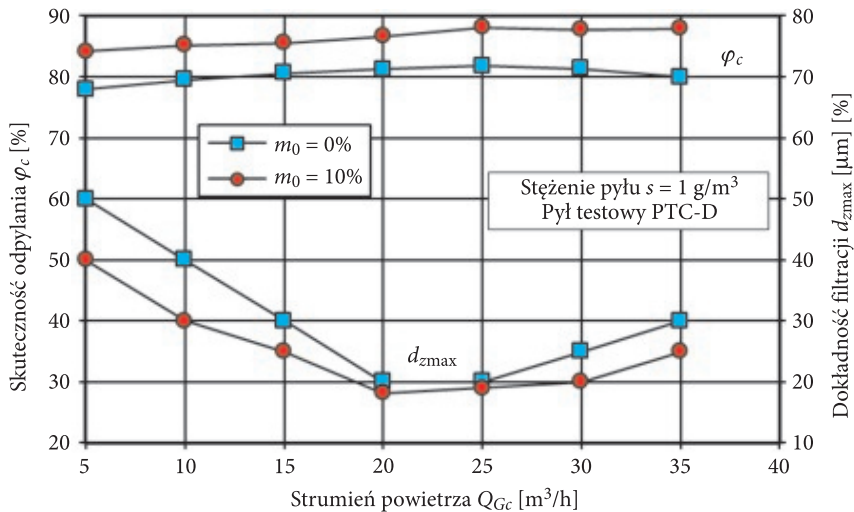
Wraz ze wzrostem strumienia powietrza Q_{Gc} udział liczbowy U_p ziaren pyłu o rozmiarach poniżej $d_z = 3 \mu\text{m}$ ulega zwiększeniu i wynosi: dla $Q_{Gc} = 5 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_{Gc} = 15 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_{Gc} = 35 \text{ m}^3/\text{h}$, odpowiednio $U_{p5} = 16,6\%$, $U_{p15} = 22,15\%$, $U_{p35} = 31\%$. Dla rozmiarów ziaren powyżej $d_z = 3 \mu\text{m}$ udział liczbowy U_p zmniejsza się wraz ze wzrostem strumienia powietrza Q_{Gc} i dla $d_z = 10 \mu\text{m}$ nie przekracza 2,5%.

Charakterystyki skuteczności $\varphi_c = f(Q_{Gc})$ i dokładności filtracji $d_{z\text{max}} = f(Q_{Gc})$ cyklonu filtra powietrza KTO „Rosomak” i Volvo z odsysaniem pyłu ($m_0 = 10\%$) i bez odsysania przedstawiono na rysunkach 10 i 11.

Z przedstawionych wyników widać wyraźną zależność między charakterystyką skuteczności $\varphi_c = f(Q_{Gc})$ oraz dokładności $d_{z\text{max}} = f(Q_{Gc})$ cyklonów przelotowych. Wzrost strumienia powietrza (prędkości przepływu) w zakresie $Q_{Gc} = 10\text{-}25 \text{ m}^3/\text{h}$ powoduje zmniejszenie o 50% wartości rozmiaru maksymalnych ziaren pyłu $d_{z\text{max}}$ i związany z tym wzrost skuteczności φ_c cyklonów. Dla $Q_{Gc} = 10 \text{ m}^3/\text{h}$ wartości rozmiarów maksymalnych ziaren pyłu są największe i zawierają się w zakresie $d_{z\text{max}} = 54\text{-}40 \mu\text{m}$, a dla $Q_{Gc} = 20\text{-}35 \text{ m}^3/\text{h}$ są najmniejsze i przyjmują wartości $d_{z\text{max}} = 19,8\text{-}30 \mu\text{m}$. Przy dalszym wzroście prędkości przepływu w cyklonie obserwuje się zjawisko wzrostu rozmiarów maksymalnych ziaren pyłu $d_{z\text{max}}$ w strumieniu powietrza wylotowego przy nieznacznym spadku skuteczności φ_c cyklonów. Dla strumienia powietrza $Q_{Gc} = 40 \text{ m}^3/\text{h}$ ziarna pyłu mają maksymalne rozmiary $d_{z\text{max}} = 26\text{-}40 \mu\text{m}$. W zakresie strumienia powietrza $Q_{Gc} = 10\text{-}40 \text{ m}^3/\text{h}$ występuje dla $Q_{Gc} = 20\text{-}30 \text{ m}^3/\text{h}$ maksimum skuteczności i minimum maksymalnych (nieodseparowanych w cyklonie) ziaren $d_{z\text{max}}$. Tym samym dokładność badanego cyklonu przelotowego dla tego zakresu strumienia Q_{Gc} jest największa.



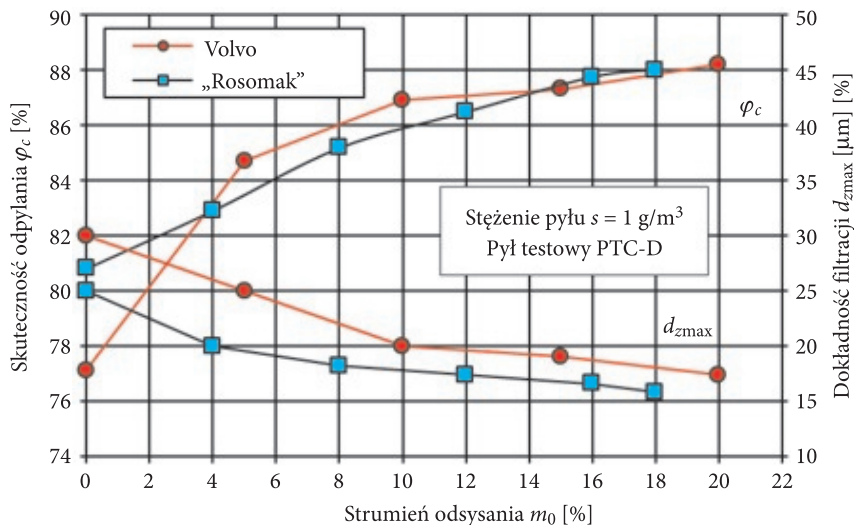
Rys. 10. Charakterystyka skuteczności $\varphi_c = f(Q_{Gc})$ i dokładności filtracji $d_{zmax} = f(Q_{Gc})$ minicyklonu przelotowego KTO „Rosomak” z odsysaniem pyłu ($m_0 = 10\%$) i bez odsysania



Rys. 11. Charakterystyka skuteczności $\varphi_c = f(Q_{Gc})$ i dokładności filtracji $d_{zmax} = f(Q_{Gc})$ minicyklonu przelotowego samochodu ciężarowego Volvo z odsysaniem pyłu ($m_0 = 10\%$) i bez odsysania

Ze względu na wysoką skuteczność i dokładność filtracji praca cyklonów powinna odbywać się w określonym zakresie strumienia powietrza i przy stopniu efekcyjnego odsysania m_0 nieprzekraczającego wartości optymalnej. Jest to taka wartość, po przekroczeniu której wzrost stopnia odsysania powoduje tylko nieznaczny wzrost skuteczności cyklonu. Wartość optymalną stopnia odsysania m_{0opt}

należy określić eksperymentalnie dla każdego typu cyklonu. Wyniki takich badań pokazano na rysunku 12.

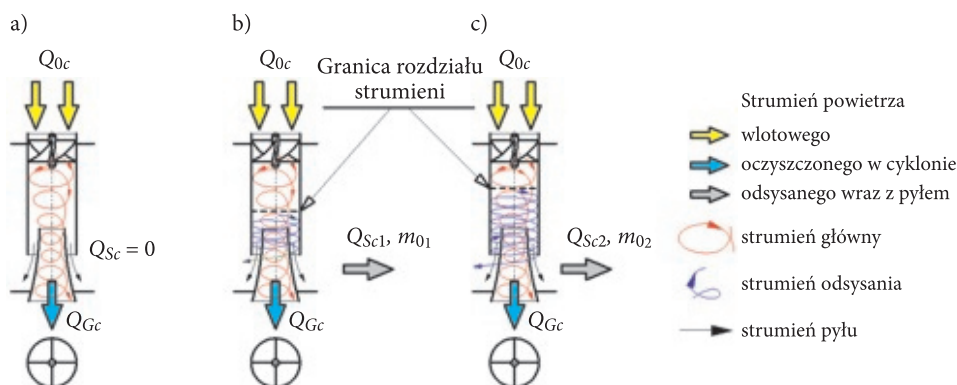


Rys. 12. Charakterystyki skuteczności φ_c i dokładności filtracji d_{zmax} cyklonów przelotowych w funkcji stopnia efektywnego odsysania pyłu m_0

W przypadku cyklonu z filtru powietrza pojazdu KTO „Rosomak” gwałtowny wzrost skuteczności φ_c następuje przy wzroście stopnia odsysania w zakresie do $m_0 = 10\%$. Przy dalszym wzroście stopnia odsysania wzrost skuteczności cyklonu jest nieznaczny. Wartością optymalną jest więc stopień odsysania $m_{0opt} = 10\%$. Przyjmując tę samą zasadę dla cyklonu z filtru powietrza pojazdu Volvo, wartością optymalną jest stopień odsysania $m_{0opt} = 16\%$ (rys. 12). Wzrost stopnia odsysania powoduje wzrost dokładności filtracji obu badanych cyklonów. Wzrost stopnia odsysania w zakresie do $m_0 = 18\%$ spowodował w przypadku cyklonu volvo spadek wartości rozmiarów maksymalnych ziaren pyłu z $25\ \mu\text{m}$ do $15,8\ \mu\text{m}$. W przypadku cyklonu KTO „Rosomak” spadek wartości rozmiarów maksymalnych ziaren pyłu wystąpił w zakresie $30\text{-}17,4\ \mu\text{m}$.

Wyjaśnienie zjawiska wzrostu skuteczności filtracji aerozolu w cyklonie wynikające z wystąpienia odsysania przedstawiono na rysunku 13. Wytworzenie w cyklonie strumienia odsysania Q_{Sc} powoduje, że strumień powietrza wlotowego Q_{0c} , który ruchem śrubowym przemieszcza się w kierunku rurki wylotowej z cyklonu, nie trafia do niej w całości. W efekcie pojawienia się strumienia odsysania pewna część strumienia powietrza o wartości Q_{Sc} (rys. 13b) oddziela się i porywając ze sobą odseparowane, znajdujące się w pobliżu ścianki komory separacyjnej cyklonu ziarna pyłu większych rozmiarów, napływa

do osadnika, a stąd odpowiednim przewodem na zewnątrz pojazdu, co powoduje wzrost jego skuteczności filtracji. Wzrost wartości strumienia odsysania Q_{Sc} (stopnia odsysania m_0) powoduje, że umowna granica rozdziału strumienia wlotowego i strumienia odsysania znajduje się w coraz większej odległości od otworu upustowego komory separacyjnej (rys. 13 b, c), a obszar objęty strumieniem odsysania jest coraz większy. Stąd udział liczbowy większych ziaren pyłu w strumieniu wylotowym oraz ich rozmiar systematycznie maleje, a skuteczność cyklonu ma coraz większą wartość.



Rys. 13. Przepływ strumieni powietrza przez cyklon przelotowy: a) bez odsysania; b, c) z odsysaniem o różnej intensywności

Uzyskane w wyniku badań przebiegi zmian charakterystyk skuteczności filtracji $\varphi_c = f(Q_{Gc})$ i dokładności filtracji $d_{zmax} = f(Q_{Gc})$ są potwierdzeniem teorii działania cyklonów, według której odseparowanie ziarna ze strumienia powietrza jest głównie rezultatem wzajemnych relacji sił bezwładności F_B działających na ziarno pyłu (wynikającej z krzywoliniowego toru ruchu ziarna w cyklonie) oraz sił aerodynamicznych F_R oddziaływania strumienia gazu. Wraz ze wzrostem strumienia powietrza przepływającego przez cyklon, a więc i przy wzroście prędkości gazu w cyklonie, wartości obu sił rosną, przy czym po przekroczeniu pewnej wartości progowej dla danego cyklonu (w badanych cyklonach 25-30 m³/h) przyrost siły aerodynamicznej F_R staje się intensywniejszy niż siły bezwładności F_B , co powoduje wyhamowanie ruchu ziaren i możliwość ich porywania przez strumień powietrza wylotowego z cyklonu (wir wewnętrzny). W konsekwencji przy wyższych wartościach strumienia powietrza występuje spadek skuteczności odpylania w cyklonie. Brak wzrostu skuteczności odpylania spowodowany jest także tym, że duże ziarna pyłu, uderzając z dużą prędkością w ściankę cyklonu, ulegają odbiciu, a następnie są znowu porywane przez strumień powietrza i unoszone z nim do wylotu cyklonu [4].

Maksymalne wartości oporu przepływu cyklonów Δp_c (przy maksymalnych wartościach strumienia badawczego) wzrosły odpowiednio z 0,64 kPa do 0,82 kPa

w przypadku minicyklonu KTO „Rosomak” (wzrost o 28%) i z 0,39 kPa do 0,46 kPa w przypadku minicyklonu Volvo (wzrost o 18%).

Wzrost oporów przepływu przy zastosowaniu eiekcyjnego odsysania pyłu należy tłumaczyć większą wartością strumienia wlotowego Q_0 do cyklonu powiększoną o wartość strumienia odsysania Q_{Sc} , a tym samym wzrostem prędkości wlotowej v_0 do cyklonu.

6. Wnioski

1. Skuteczność filtracji badanych cyklonów przelotowych rośnie wraz ze wzrostem prędkości wlotowej v_0 (strumienia powietrza Q_{Gc}) do wartości maksymalnej, a następnie nieznacznie maleje. Taki charakter zmian $\varphi_c = f(Q_{Gc})$ jest zgodny z informacjami podawanymi w literaturze.
2. Opory przepływu badanych minicyklonów przelotowych rosną parabolicznie wraz ze wzrostem strumienia powietrza Q_{Gc} , przy strumieniu nominalnym $Q_{Gc} = 35\text{-}40 \text{ m}^3/\text{h}$ nie przekraczają wartości $\Delta p_c = 0,7 \text{ kPa}$ i są zdecydowanie niższe niż opory przepływu jakie osiągają minicyklony zwrotne ($\Delta p_c = 2,4 \text{ kPa}$) stosowane w filtrach silników pojazdów mechanicznych starszej konstrukcji. W tym przypadku na duże opory przepływu ma przepływ zwrotny strumienia powietrza w cyklonie w postaci wiru wewnętrznego.
3. Skuteczność filtracji badanych cyklonów przelotowych nie przekracza $\varphi_c = 90\%$ i jest niższa od skuteczności cyklonów zwrotnych ($\varphi_c = 97\%$), co wynika bezpośrednio z ich konstrukcji.
4. Zwiększenie skuteczności i dokładności filtracji cyklonów, w zakresie 5-8%, można uzyskać poprzez zastosowanie bieżącego usuwania pyłu przez odsysanie, w wyniku czego nie następuje porywanie przez strumień wylotowy odseparowanego wcześniej pyłu. Wiąże się to z koniecznością zastosowania dodatkowego układu wytwarzającego strumień odsysania.

LITERATURA

- [1] K. BACZEWSKI, M. HEBDA, *Filtracja płynów eksploatacyjnych*, MCNEMT, Radom, 1991/92.
- [2] Cenrtisep Air Cleaner.: *Materiały informacyjne firmy PALL Corporation, USA*, 2004.
- [3] T. DZIUBAK, *The problems of dust extraction from air intake cyclonic dedusters of special vehicle engine*, Silniki Spalinowe, 4, 2009.
- [4] T. DZIUBAK, *Analiza procesu filtracji powietrza wlotowego do silników pojazdów specjalnych*, rozprawa habilitacyjna, WAT, Warszawa, 2008.
- [5] T. DZIUBAK, *Assessment of possibility to improve dust suction efficiency from multicyclone air filter of track vehicle*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN, 1 (149), 2007.
- [6] T. DZIUBAK, *Problemy odsysania pyłu z multicyklonu filtru powietrza silnika pojazdu mechanicznego eksploatowanego w warunkach dużego zapylenia powietrza*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN, 1(125), 2001.

- [7] *Filtry powietrza do silników spalinowych i sprężarek*, PN-ISO 5011.1994.
- [8] R.R. GREENFIELD, *The Use of Cyclones for Control of Solids Emission from Fluidised Bed Boilers*, Filtration & Separation, 22, 1, 1986.
- [9] P. KABSCH, *Odpylanie i odpylacze*, WNT, Warszawa, 1992.
- [10] H.T. KIM, Y. ZHU, W.C. HINDS, K.W. LEE, *Experimental study of small virtual cyclones as particle concentrators*, Journal of Aerosol Science, 33, 5, 2002.
- [11] Mann+Hummel Air Cleaners.: www.mann-hummel.com.
- [12] P.W. SAGE, M.A. WRIGHT, *The Use of Bleeds to Enhance Cyclone Performance*, Filtration & Separation, 23, 1, 1986.
- [13] J. WARYCH, *Oczyszczanie gazów — procesy i aparatura*, WNT, Warszawa, 1998.

T. DZIUBAK, S. SZWEDKOWICZ

Experimental research of axial cyclones of combustion engines air filters

Abstract. Principal parameters of the axial cyclone that impact on its filtration characteristics are presented. The mechanism of the dust particles separating from the air stream flowing through the cyclone is described. The methodology and the research conditions of axial cyclones and the equipment of test stand allowing to define its characteristics are given. There are analysed the experimental research results of the efficiency $\varphi_c = f(Q_{Gc})$, the flow drag $\Delta p_c = f(Q_{Gc})$, and the filtration accuracy $d_{zmax} = f(Q_{Gc})$ characteristics. The influence of dust sucking-off on efficiency and filtration accuracy of the axial cyclones was analysed. The optimum degree of dust sucking-off because of the achieved efficiency of filtration was established.

Keywords: axial minicyclones, efficiency and accuracy of the filtration, flow drag, inertial filters, combustion engines

