

Dr hab. inż. Tadeusz DZIUBAK, prof. WAT  
Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia Techniczna  
ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2  
00-908 Warszawa  
Tel: 261 837 121  
e-mail: [tadeusz.dziubak@wat.edu.pl](mailto:tadeusz.dziubak@wat.edu.pl)

## Wpływ odsysania pyłu na charakterystyki multicyklonu i włókninowej przegrody filtracyjnej filtra powietrza pojazdu specjalnego

**Słowa kluczowe:** silniki, eksploatacja, czystość powietrza, włóknina filtracyjna, skuteczność i dokładność filtracji, zużycie powierzchni, trwałość filtra.

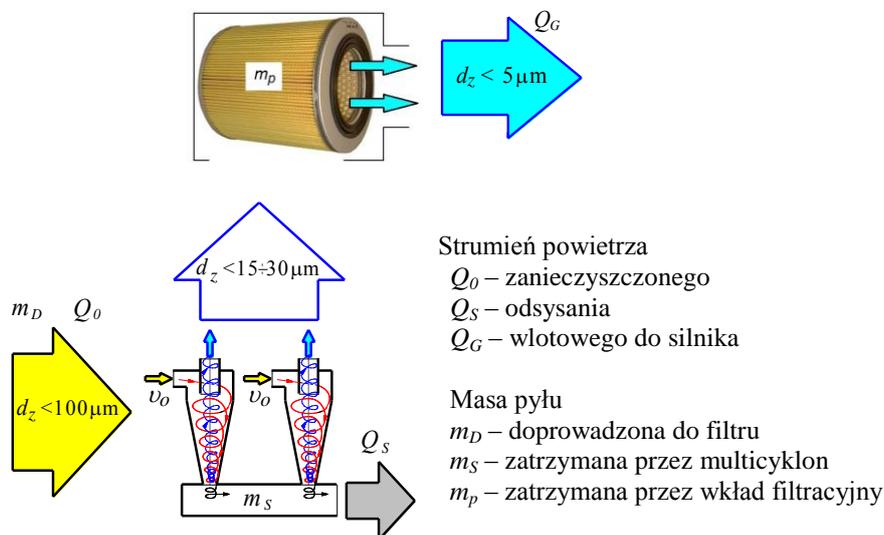
**Streszczenie.** Scharakteryzowano zanieczyszczenia powietrza wlotowego silnika spalinowego pojazdu mechanicznego. Przeanalizowano wartości stężenia pyłu w powietrzu dla różnych warunków eksploatacji pojazdów. Przedstawiono korzyści w postaci wydłużenia czasu eksploatacji silnika wynikające ze stosowania filtra bezwładnościowego (multicyklonu), jako pierwszego stopnia filtracji powietrza. Pokazano metody usuwania pyłu z osadnika multicyklonu filtra powietrza. Wykazano konieczność bieżącego, poprzez eiekcyjne odsysanie, usuwania pyłu z osadnika multicyklonu. Zdefiniowano stopień odsysania pyłu  $m_0$  oraz wykazano jego wpływ na skuteczność filtracji i opory przepływu cyklonów. Opracowano metodykę i warunki badań filtra dwustopniowego pracującego w układzie: multicyklon-włókninowy wkład filtracyjny. Wyznaczono charakterystyki skuteczności filtracji i oporów przepływu multicyklonu oraz włókniny filtracyjnej w zależności od masy pyłu dostarczonej wraz z powietrzem wlotowym do filtra dwustopniowego dla trzech wartości stopnia odsysania  $m_0 = 5\%$ ,  $m_0 = 10\%$ ,  $m_0 = 20\%$  oraz bez odsysania pyłu z osadnika multicyklonu. Wyznaczono charakterystyki skuteczności filtracji i oporów przepływu multicyklonu oraz włókniny filtracyjnej bez odsysania pyłu z osadnika multicyklonu i z okresowym obsługiwaniem oraz bez obsługiwania. Wykazano konieczność okresowego czyszczenia osadnika pyłu.

### 1. Wprowadzenie

Zapewnienie odpowiedniej czystości powietrza wlotowego do silników spalinowych pojazdów mechanicznych i maszyn roboczych, a tym samym zminimalizowanie zużycia skojarzeń ciernych oraz uzyskanie dużej trwałości zespołów, było zawsze i pozostaje nadal ważnym problemem eksploatacyjnym i konstrukcyjnym szczególnie, gdy pojazdy eksploatowane są w trudnych warunkach terenowych i dużego stężenia pyłu w powietrzu (około  $1 \text{ g/m}^3$ ) [2, 10, 12, 18, 20, 30]. Dotyczy to głównie pojazdów specjalnych, w tym wojskowych, wyposażonych w silniki o ZS dużej mocy, których maksymalne zapotrzebowanie powietrza  $Q_{Sil}$  znacznie przekracza wartość  $1 \text{ kg/s}$  na przykład: dla silnika czołgu T-72  $Q_{Sil} = 1,21 \text{ kg/s}$  ( $3400 \text{ m}^3/\text{h}$ ), a silnika czołgu Leopard 2  $Q_{Sil} = 2,15 \text{ kg/s}$  ( $6000 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Jeżeli stężenia pyłu w powietrzu wynosi  $s = 1 \text{ g/m}^3$ , co często ma miejsce podczas eksploatacji pojazdów na poligonowych placach ćwiczeń, to do silników wymienionych czołgów zasysany jest strumień pyłu o wartości odpowiednio  $0,94 \text{ g/s}$  i  $1,67 \text{ g/s}$ .

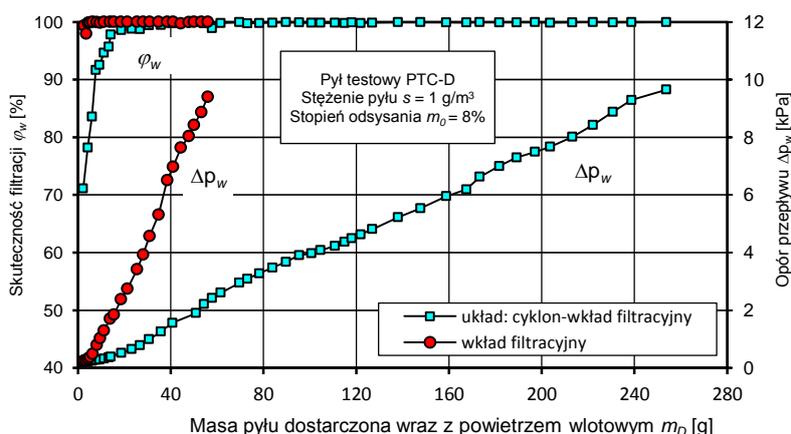
Do usunięcia ze strumienia powietrza wlotowego do silnika tak znacznej masy pyłu, którego rozmiary ziaren nie przekraczają  $100 \mu\text{m}$  [2, 4, 10], stosuje się dwustopniowe filtry powietrza, pracujące w systemie multicyklon-przegroda porowata, która wykonana jest najczęściej w postaci papierowego lub włókninowego wkładu filtracyjnego. Idea stosowania

filtrów dwustopniowych polega na wstępnym odseparowaniu w filtrze bezwładnościowym (multicyklonie) ziaren pyłu o większej masie i „pozostawieniu” w strumieniu powietrza ziaren pyłu o mniejszych rozmiarach ( $d_z < 15\div 30 \mu\text{m}$ ) i masie oraz odfiltrowaniu w przegrodowym filtrze powietrza mniejszych (powyżej  $d_z = 2\div 5 \mu\text{m}$ ) ziaren pyłu – rys. 1.



Rys. 1. Proces filtracji powietrza w filtrze dwustopniowym pracującym w systemie „multicyklon-przegroda porowata”

Tym samym czas użytkowania systemu filtracji powietrza w silniku do osiągnięcia dopuszczalnej wartości oporu przepływu filtru powietrza  $\Delta p_{fdop}$  ( $5\div 8 \text{ kPa}$ ) jest znacznie dłuższy niż samego filtru przegrodowego w tych samych warunkach zapylenia (rys. 2). Wkład filtracyjny pracujący pojedynczo ze średnią skutecznością  $\phi_w = 99,95\%$  osiągnął opór przepływu  $\Delta p_w = 9,4 \text{ kPa}$  po zassaniu wraz z powietrzem  $m_D = 56 \text{ g}$  pyłu. Taki sam wkład filtracyjny, ale pracujący w układzie „cyklon-wkład filtracyjny” osiągnął zbliżoną wartość oporu przepływu  $\Delta p_w = 9,65 \text{ kPa}$  po doprowadzeniu do „układu” wraz z powietrzem  $m_D = 254 \text{ g}$  pyłu, a więc pięciokrotnie więcej.



Rys. 2. Zmiana oporów przepływu  $\Delta p_w = f(m_D)$  i skuteczności filtracji  $\phi_w = f(m_D)$  papierowego wkładu filtracyjnego pracującego pojedynczo oraz w zestawie (cyklon-wkład filtracyjny) w funkcji masy pyłu  $m_D$  dostarczonego wraz powietrzem wlotowym [12]

Multicyklon jest to zespół kilku lub kilkudziesięciu, a nawet kilkuset cyklonów rozmieszczonych obok siebie (połączenie równoległe) i umocowanych we wspólnych płytach

sitowych – dolnej i górnej. Średnica wewnętrzna cyklonów stosowanych do filtracji powietrza wlotowego silników pojazdów mechanicznych nie przekracza  $D = 40$  mm. W odróżnieniu od cyklonów stosowanych w przemyśle, których średnice wewnętrzne zawierają się w zakresie  $D = 250\div 3000$  mm, cyklony te nazywane są też minicyklonami.

Cyklony stosowane w pojazdach mechanicznych charakteryzują się skutecznością filtracji dochodzącą do 96% [2, 4, 14]. Tylko w ciągu 8 godzin pracy silnika czołgu T-72 w warunkach poligonowych multicyklon filtru powietrza tego silnika może zatrzymać ponad 25 kg pyłu. Odseparowany przez cyklony pył jest gromadzony we wspólnym dla wszystkich cyklonów osadniku pyłu. Masa pyłu, która magazynowana jest w osadniku, zależy od wielkości strumienia powietrza, stężenia pyłu w powietrzu i skuteczności cyklonów.

Magazynowanie w osadniku tak znacznej masy pyłu nie jest wskazane ze względu na:

- konieczność stosowania osadnika o dużej pojemności, co zwiększa gabaryty filtru i utrudnia jego usytuowanie w pojeździe,
- występowanie powtórnego zassania pyłu podczas wstrząsów pojazdu i gwałtownych zmian strumienia powietrza w wyniku szybkich zmian prędkości obrotowej silnika,
- zapelnienie osadnika, w wyniku czego następuje porywanie pyłu i spadek skuteczności multicyklonu,
- niepotrzebne obciążenie konstrukcji filtru dodatkową masą.

Dlatego w multicyklonach filtrów powietrza silników pojazdów, szczególnie pojazdów eksploatowanych w warunkach dużego stężenia pyłu w powietrzu, stosuje się systematyczne (ciągłe) usuwanie pyłu z osadnika, dzięki wytworzeniu (wykorzystując zjawisko ejekcji) strumienia powietrza – strumienia odsysania.

W multicyklonie zbudowanym z dużej liczby (50÷100 sztuk i więcej) cyklonów i mających wspólny osadnik pyłu, stosuje się powszechnie tylko jeden lub dwa króćce odsysające pył z osadnika. W związku z tym odległości otworów wylotowych strumieni odsysanych poszczególnych cyklonów od króćca układu odsysającego są niejednakowe, co stwarza problemy z usuwaniem pyłu ze skrajnych pojedynczych cyklonów multicyklonu. Powoduje to obniżenie efektywności działania tych cyklonów, a tym samym zmniejszenie skuteczności i dokładności filtracji całego multicyklonu. Tym samym masa pyłu przedostająca się na drugi stopień filtracji jest większa, co skraca czas pracy filtru (przebieg pojazdu) do osiągnięcia oporu dopuszczalnego.

Do oceny efektywności działania cyklonów są stosowane powszechnie badania numeryczne w postaci programów CFD (Computational Fluid Dynamics) [1, 3, 7, 8, 15, 17, 21, 22, 26, 28, 32]. Programy CFD umożliwiają szczegółową analizę zagadnień związanych z przepływem płynów, eliminując konieczność przeprowadzenia czasochłonnych i kosztownych badań doświadczalnych podczas cyklu projektowania i modernizacji urządzeń. Pozwalają uzyskać niezbędne informacje o przepływie płynu (rozkład pola prędkości, pole ciśnienia), ruchu ciepła (pole temperatury) i masy. Osiąga się to przez numeryczne rozwiązanie równań opisujących wymianę pędu, bilansu energii i masy.

W dostępnej literaturze spotyka się nieliczne opracowania dotyczące numerycznej [29] jak i doświadczalnej [4, 10, 11, 19] oceny efektywności działania układów odsysania pyłu z osadnika multicyklonu.

Z tego powodu i wychodząc z założenia, że badania eksperymentalne są najbardziej wiarygodną metodą badawczą, w niniejszej pracy przedstawiono eksperymentalną ocenę w zakresie efektywności działania oraz wpływu na proces filtracji w przegrodzie porowatej układu odsysania pyłu z osadnika filtru powietrza pojazdu mechanicznego.

## 2. Zanieczyszczenia powietrza wlotowego silników spalinowych

Powietrze atmosferyczne zasysane przez silniki spalinowe pojazdów mechanicznych zawiera znaczne ilości zanieczyszczeń, które można podzielić na będące w stanie gazowym (organiczne i nieorganiczne) oraz na zanieczyszczenia pyłowe [2, 4, 5, 6]. Za pył uznaje się fazę rozproszoną układu dwufazowego, na którą składa się ciało stałe zawieszone w gazowej fazie rozpraszającej, tj. mieszanina cząstek stałych zawieszonych w powietrzu.

Źródłami emisji pyłów są zarówno zjawiska naturalne, jak i działania cywilizacyjne. Powszechnie uważa się, że w skali globalnej emisja pyłów ze źródeł naturalnych jest dominująca. Do najważniejszych naturalnych źródeł emisji pyłów zalicza się przede wszystkim: wybuchy wulkanów, materiały osadowe, aerozole morskie, roślinne i zwierzęce, a także pożary lasów [5]. W obszarach o szczególnie intensywnej działalności przemysłu największy wpływ na zanieczyszczenie środowiska pyłami mają ich źródła antropogenne, którymi są właściwie wszystkie procesy produkcyjne i procesy spalania paliw – głównie paliw stałych. Szczególnie dużo pyłów jest emitowanych z urządzeń przemysłu energetycznego, przemysłu chemicznego, wydobywczego, metalurgicznego oraz budowlanego, zwłaszcza podczas produkcji cementu [6].

W zależności od wymiarów cząstek pyłu wyróżnia się [5]:

- pył całkowity – będący mieszaniną małych cząstek stałych (zawieszonych w powietrzu) o umownych wymiarach mniejszych niż 300  $\mu\text{m}$ ,
- pył zawieszony PM10 – o umownych wymiarach mniejszych od 10  $\mu\text{m}$ ,
- pył drobny PM2.5 – o umownych wymiarach mniejszych niż 2,5  $\mu\text{m}$ ,
- nanocząstki PM1 – o umownych wymiarach mniejszych niż 1  $\mu\text{m}$ .

Powszechnie uważa się, że wszystkie ziarna pyłu o wymiarach większych od 1  $\mu\text{m}$ , są przyczyną przyspieszonego zużycia elementów maszyn i to właśnie one powinny być usunięte z powietrza wlotowego silników przez filtry powietrza.

Szczególne miejsce w procesach emisji pyłów (PM10 i PM2.5) ze źródeł antropogennych zajmuje transport drogowy ze względu na masowość użytkowania samochodów. Pochodzi z niego około 15% obydwu frakcji wymiarowych cząstek stałych [5, 27]. Pyły ze źródeł motoryzacyjnych (z ruchu drogowego) pochodzą z [2, 5, 9]:

- unoszenia z podłoża, przez ruch pojazdów mechanicznych lub przez wiatr pyłu mineralnego (pył drogowy), którego głównym składnikiem jest dwutlenek krzemu,
- emisji spalin przez silniki pojazdów mechanicznych (pył, sadza, związki ołowiu, ciężkie węglowodory, cząstki stałe PM oraz gazy),
- emisji przez pojazdy mechaniczne pyłów pochodzących z węzłów trybologicznych, gdzie intensywnemu zużyciu ulegają materiały cierne okładzin hamulców oraz tarcz sprzęgłowych [4],

- emisji pyłów ze zużycia ogumienia kół jezdnych oraz nawierzchni jezdni wynikająca z wzajemnej współpracy kół oraz nawierzchni [4].

Powszechnym szkodliwym dla eksploatowanych urządzeń technicznych zanieczyszczeniem powietrza jest pył drogowy, który unoszony jest z powierzchni ziemi podczas ruchu pojazdów mechanicznych lub przez wiatr, a następnie zasysany jest wraz z powietrzem do cylindrów silników. Pył drogowy to polidispersyjny pył o zróżnicowanych właściwościach fizykochemicznych, którego podstawowym składnikiem są ziarna twardych minerałów: dwutlenku krzemu (krzemionki) oraz trójtlenku aluminium (korundu), których udział w pyłe dochodzi do 60÷95% [2]. Twardość ziaren krzemionki, określana w dziesięciostopniowej skali Mohsa wynosi 7, a korundu 9, czyli więcej niż twardość materiałów konstrukcyjnych stosowanych do budowy silników spalinowych. Ziarna pyłu są to bryły o nieregularnych kształtach i ostrych krawędziach.

Cechą charakterystyczną zanieczyszczonego powietrza jest stężenie zapylenia powietrza, a jego miarą jest masa pyłu (w gramach lub w mg) zawarta w 1 m<sup>3</sup> powietrza atmosferycznego. Stężenie pyłu w powietrzu jest wielkością zmienną i zależy od bardzo wielu czynników. W zależności od warunków eksploatacji pojazdów mechanicznych, wartości stężenia pyłu w powietrzu są bardzo zróżnicowane.

Najmniejsze stężenie pyłu w powietrzu, około 0,001 g/m<sup>3</sup> [2, 4, 11] występuje podczas poruszania się pojazdów po drogach utwardzonych i ulicach, poniżej 0,001 g/m<sup>3</sup> w dzielnicach mieszkaniowych. Największe stężenie pyłu w powietrzu, dochodzące do 3,8÷7 g/m<sup>3</sup> [2, 9, 13, 18, 20], występuje podczas jazdy pojazdów gąsienicowych w kolumnie po poligonowych placach ćwiczeń o suchym podłożu. Podczas startu i lądowania śmigłowca stężenia pyłu w powietrzu przy wlocie do silnika może osiągać wartości do 3 g/m<sup>3</sup>. W czasie burzy piaskowej stężenie zapylenia powietrza osiąga wartości 10 g/m<sup>3</sup> [20]. Jest ono, więc ponad 1000 razy większe niż podczas ruchu pojazdów na ulicach miast.

Należy także zwrócić uwagę na fakt, że zawieszone w powietrzu pyły ograniczają widoczność (rys. 3), co ma wpływ na bezpieczeństwo ruchu drogowego. Stężenie pyłu w powietrzu rzędu 0,7 g/m<sup>3</sup> ogranicza poważnie widoczność, a przy stężeniu około 1,5 g/m<sup>3</sup> praktycznie jest ona równa zero [10].

a)



b)



Rys. 3. Ograniczenie widoczności spowodowane eksploatacją: a) bojowych wozów piechoty, b) czołgów [18]

Część zanieczyszczeń powietrza, które dostają się do cylindrów silnika przez układ zasilania powietrzem jest spalana, część jest usuwana wraz ze spalinami. Na ściankach tulei cylindrowej osiada tylko 10÷20% pyłu, który dostaje się do silnika przez układ dolotowy. Ta

część pyłu tworzy wraz z olejem rodzaj pasty ścierniej, która w zetknięciu z powierzchniami skojarzenia tłok-pierścienie tłokowe-cylinder (T-P-C) powoduje przyspieszone zużycie tulei cylindrowej, pierścieni tłokowych i rowków pierścieniowych tłoka. Wzrastają luzy w skojarzeniu (T-P-C), co powoduje spadek szczelności komory spalania. W efekcie następuje spadek ciśnienia sprężania i mocy silnika [16], wzrost natężenia przedmuchów spalin do skrzyni korbowej [24], co przyspiesza degradację oleju silnikowego. Obniżają się osiągi silnika i zdolności rozruchowe zimnego silnika. Zwiększa się zużycie paliwa i oleju silnikowego oraz emisja związków toksycznych [25].

W wyniku ruchu tłoka w kierunku DMP pierścienie zgarniają olej z gładzi cylindrowej wraz z zanieczyszczeniami do miski olejowej. Po przedostaniu się do układu smarowania, zanieczyszczenia rozprowadzane są przez instalację olejową do tych obszarów tribologicznych silnika, które są smarowane olejem, na przykład do skojarzeń: czop-panewka wału korbowego, czop-panewka wałka rozrządu, prowadnica zaworu-trzonek zaworu, powodując ich przyspieszone zużycie.

Do zużycia ściernego dochodzi wtedy, gdy twarde ciała obce dostają się pomiędzy dwie współpracujące powierzchnie, wbijając się na różne głębokości, doprowadzają do odkształcenia i skrawania mikroobjętości warstw wierzchnich współpracujących elementów.

Wśród autorów prac, którzy badali wpływ zanieczyszczeń płynów eksploatacyjnych na zużycie elementów silnika tłokowego dominuje pogląd, że największe zużycie powodują ziarna pyłu o rozmiarach  $d_z$  równych minimalnej  $h_{min}$  grubości warstwy oleju potrzebnej do utworzenia klina smarnego między powierzchniami współpracującymi [16].

### 3. Metody usuwania pyłu z osadnika multicyklonu filtra powietrza

Usuwanie pyłu z osadnika multicyklonu filtra powietrza jest czynnością, którą w starszych rozwiązaniach filtrów powietrza wykonuje kierowca podczas każdorazowego obsługiwanego codziennego (rys. 4a). We współczesnych rozwiązaniach filtrów powietrza usuwanie pyłu z osadników następuje samoczynnie:

- poprzez rozszczelniające się (po każdorazowym unieruchomieniu silnika) gumowe stożki spustowe (rys. 4b),
- w sposób ciągły, dzięki wytworzeniu (wykorzystując zjawisko eejkcji) strumienia powietrza – strumienia odsysania  $Q_s$  (rys. 4c).

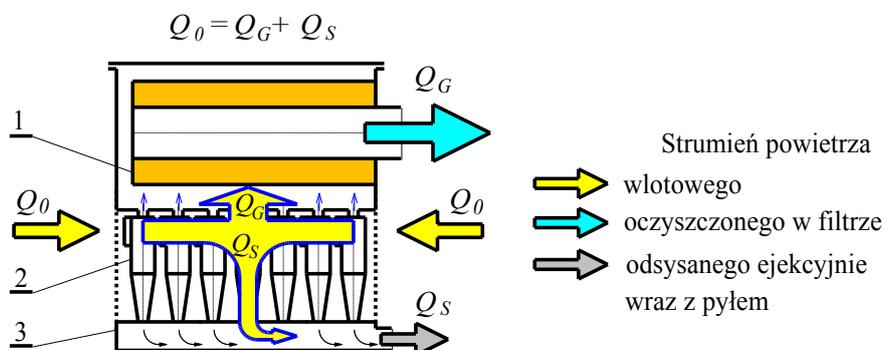


Rys. 4. Sposoby usuwania pyłu z filtrów bezwładnościowych: a) ręcznie (filtr samochodu Jelcz 317), b) gumowym stożkiem spustowym (filtr Mann+Hummel), c) gumowy stożek spustowy, d) eejkcyjnie (filtr czołgu T-72)

Odsysanie pyłu odbywa się dzięki wytworzeniu strumienia powietrza  $Q_s$ , stanowiącego część strumienia wlotowego (zanieczyszczonego)  $Q_0$  do multicyklonu (rys. 5):

$$Q_0 = Q_G + Q_s, \quad (1)$$

gdzie:  $Q_G$  – strumień powietrza wylotowego z filtra (oczyszczonego) – wlotowego do silnika.



Rys. 5. Podział strumienia powietrza wlotowego w filtrze z efekcyjnym odsysaniem pyłu z osadnika: 1 – przegroda filtracyjna, 2 – multicyklon, 3 – osadnik pyłu

Do wytwarzania strumienia odsysania stosuje się powszechnie specjalne wentylatory lub dmuchawy. Wadą tego rodzaju urządzeń jest konieczność ich napędzania, zwykle za pomocą silnika elektrycznego lub rzadziej, przez przekładnię mechaniczną, od wału korbowego silnika. Charakterystyki wentylatora zależą wtedy bezpośrednio od prędkości obrotowej silnika, a w konsekwencji od zakresu jego pracy. Z góry również zdeterminowane jest usytuowanie wentylatora przy silniku, w miejscu niekoniecznie dostosowanym do położenia filtra. Ponadto wymagana ciągłość działania wentylatora pociąga za sobą wysokie wymagania w stosunku do trwałości napędu. Napęd elektryczny wentylatora stanowi znaczące obciążenie układu wytwarzającego energię elektryczną dla potrzeb pojazdu. Wentylator z napędem elektrycznym stosowany jest do odsysania pyłu z osadnika filtra powietrza czołgu Leopard 2.

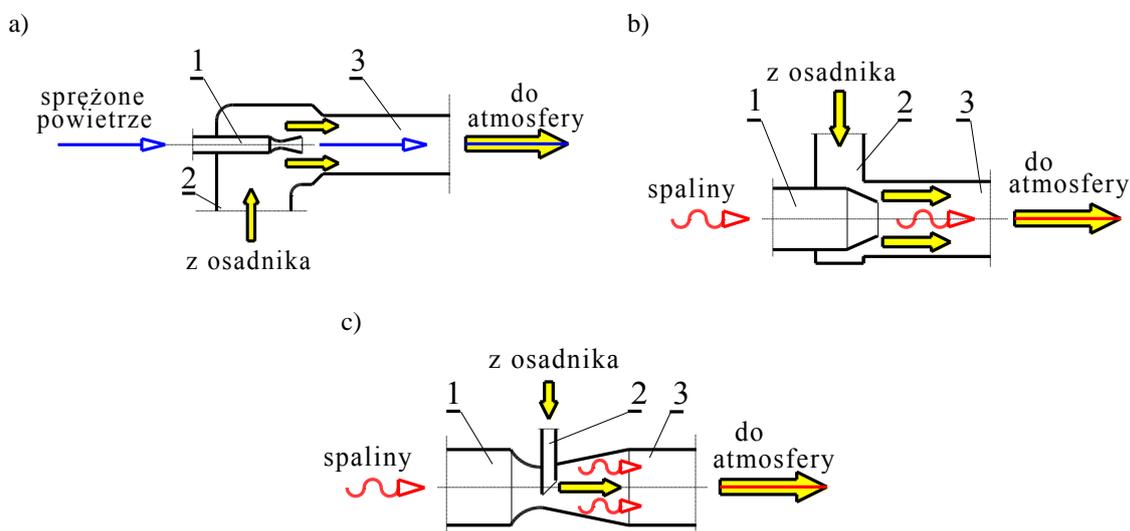
Z tego względu w rozwiązaniach wielu filtrów powietrza do wytworzenia strumienia odsysania, jako urządzenie wymuszające przepływ stosuje się odpowiednie eektory wykorzystujące energię strumienia sprężonego powietrza [4] lub energię spalin wpływających z układu wylotowego silnika [2, 11].

Strumień odsysania  $Q_s$  przepływając przez komorę osadnika, unosi przedostające się tam ziarna pyłu, a następnie odprowadzany jest przewodami i skierowany na zewnątrz pojazdu.

Zadaniem eektora jest wymuszenie lub zintensyfikowanie przepływu strumienia odsysania pomiędzy dwiema przestrzeniami, stanowiącymi zwykle termodynamiczne układy otwarte. Charakterystyczną cechą eektora jest występowanie dwóch strumieni, pomiędzy którymi następuje wzajemne przekazywanie pędu. Strumień zwany aktywnym dysponuje większą wartością wektora pędu, a jego zwrot jest ściśle określony. Zwrot wektora drugiego strumienia (pasywnego) jest zwykle taki sam. Ze względu na różne sposoby doprowadzania strumieni: aktywnego i pasywnego spotyka się różne konfiguracje eektorów (rys. 6).

Z konfiguracji eektorów przedstawionych na rys. 6 bardziej praktyczna i częściej wykorzystywana w układzie wylotowym spalin jest konfiguracja pokazana na rys. 6b.

Cechuje ją zdecydowanie łatwiejsza technologia wykonania oraz mniejsza masa, co w przypadku zwykle drgającego układu wylotowego ma istotne znaczenie. Taka konfiguracja ejektora znajduje się w układzie ejekcyjnego odsysania zanieczyszczeń z osadnika filtru powietrza czołgów T-72 i PT-91 i w pojazdach specjalnych zbudowanych na podwoziach tych czołgów.



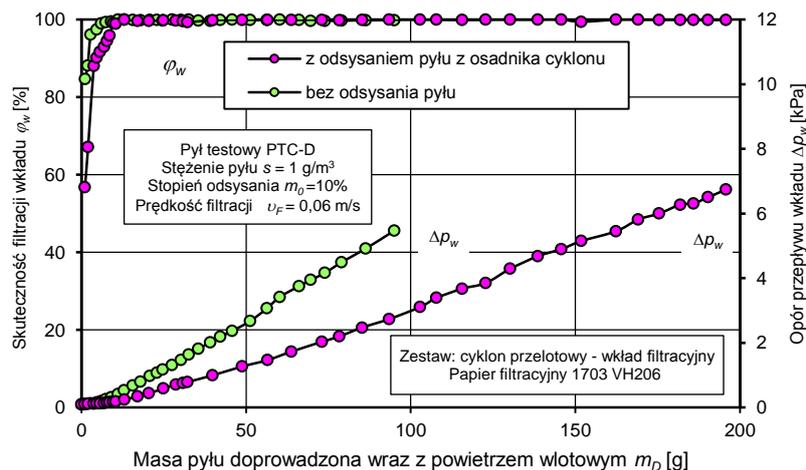
Rys. 6. Stosowane konfiguracje ejektorów w układach odsysania do wymuszania strumienia ejekcyjnego: a) sprężonym powietrzem, b i c) spaliny: 1 – kanał dolotowy strumienia aktywnego, 2 – kanał dolotowy strumienia pasywnego, 3 – komora mieszania [10]

Ejektor odznacza się bardzo prostą konstrukcją, małą liczbą elementów składowych i brakiem części ruchomych. Wymaga znikomego nadzoru eksploatacyjnego, sprowadzającego się do okresowej kontroli wizualnej jego stanu technicznego i szczelności przewodu łączącego z osadnikiem filtru bezwładnościowego. Z drugiej jednak strony stosowanie ejektora wymaga zwiększenia energii przeznaczanej na odsysanie.

Miarą intensywności odsysania pyłu z osadnika multicyklonu (cyklonu) jest stopień odsysania  $m_0$  definiowany zwykle, jako iloraz wielkości strumienia  $Q_s$  w układzie odsysania do wielkości strumienia wylotowego z multicyklonu (cyklonu), a w przypadku, gdy multicyklon jest pierwszym stopniem oczyszczania powietrza w filtrze, do wielkości strumienia wylotowego z filtra powietrza  $Q_G$  – wlotowego do silnika [10, 19, 23, 31]:

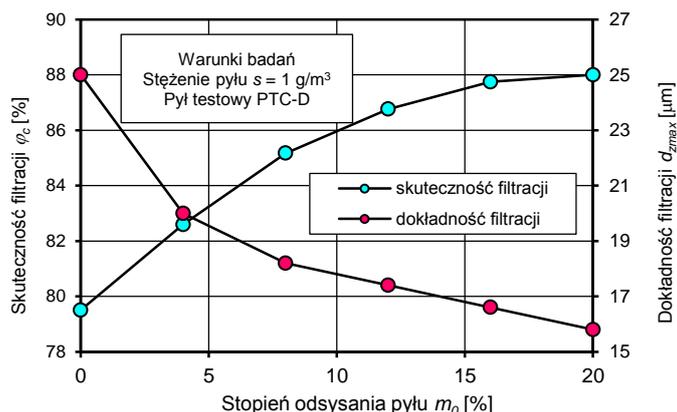
$$m_0 = \frac{Q_s}{Q_G} 100\%. \quad (2)$$

Usuwanie (poprzez odsysanie) z osadnika multicyklonu odseparowanego przez cyklony i zgromadzonego tam pyłu powoduje zauważalny wzrost jego skuteczności, a tym samym wydłużenie czasu pracy filtra powietrza limitowanego ustaloną wartością oporu dopuszczalnego  $\Delta p_{fdop}$ . Potwierdzają to wyniki badań charakterystyk oporów przepływu  $\Delta p_w = f(m_D)$  i skuteczności filtracji  $\varphi_w = f(m_D)$  papierowej przegrody filtracyjnej w funkcji masy pyłu  $m_D$  zassanego wraz powietrzem wlotowym pracującej w szeregowym układzie „cyklon przelotowy – wkład filtracyjny” (rys. 7).



Rys. 7. Charakterystyki papierowego wkładu filtracyjnego pracującego za cyklonem przelotowym z odsysaniem pyłu z osadnika cyklonu i bez odsysania [12]

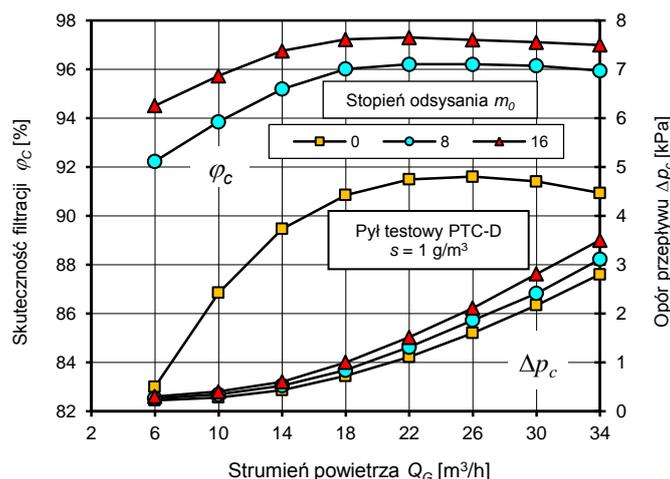
Z nielicznych prac poświęconych badaniom wpływu odsysania na efektywność filtracji w cyklonie, wynika, że zwiększanie wartości stopnia odsysania  $m_0$  powoduje intensywny wzrost skuteczności cyklonu  $\varphi_c$ , tylko do pewnej granicy (rys. 8 i 9). Dla cyklonu przelotowego (rys. 8) wartością graniczną jest to  $m_{0g} = 10 \div 15 \%$  [14].



Rys. 8. Wpływ stopnia odsysania  $m_0$  na skuteczność i dokładność cyklonu przelotowego [14]

Wzrost stopnia odsysania  $m_0$  powoduje jednocześnie wzrost oporów przepływu cyklonu wynikający ze wzrostu wartości strumienia  $Q_0$  i prędkości przepływu powietrza.

Istnieje, zatem określony zakres optymalnych stopni odsysania, odstępstwo od którego może spowodować pogorszenie parametrów pracy cyklonu i zwiększenie strat energii silnika. W istniejących konstrukcjach cyklonów i działających multicyklonach stopień odsysania  $m_0$  zawiera się najczęściej w przedziale  $m_0 = 8 \div 15\%$ , chociaż sporadycznie może przyjmować wartość  $m_0 = 20\%$  [10, 19, 23, 31].



Rys. 9. Wpływ stopnia odsysania  $m_0$  na charakterystyki: skuteczności  $\varphi_c = f(Q_G)$  i oporu przepływu  $\Delta p_c = f(Q_G)$  cyklonu zwrotnego z wlotem stycznym D-40 [12]

#### 4. Cel, metodyka i warunki badań

Celem badań było wykazanie przyczyn spadku skuteczności filtracji multicyklonu w zależności od masy pyłu zadozowanego do filtru dwustopniowego i wpływu tych zmian na charakterystyki włókniny filtracyjnej pracującej w dwustopniowym (za multicyklonem) systemie filtracji.

W związku z tym wyznaczono charakterystyki włókniny filtracyjnej pracującej w warunkach filtracji dwustopniowej oraz multicyklonu (pierwszego stopnia filtracji) przy ustalonym strumieniu powietrza  $Q_G$  i ustalonej wartości stopnia eiekcyjnego odsysania pyłu z osadnika multicyklonu. Wykonano charakterystyki dla trzech wartości stopnia eiekcyjnego odsysania pyłu  $m_0 = 5\%$ ,  $m_0 = 10\%$ ,  $m_0 = 20\%$  oraz bez odsysania, a także bez odsysania, ale z cyklicznym usuwaniem pyłu z osadnika. Przyjęcie do badań takich wartości stopnia eiekcyjnego odsysania  $m_0$  wynika z przedziału, w jakim zawierają się stopnie odsysania w istniejących i działających konstrukcjach multicyklonów.

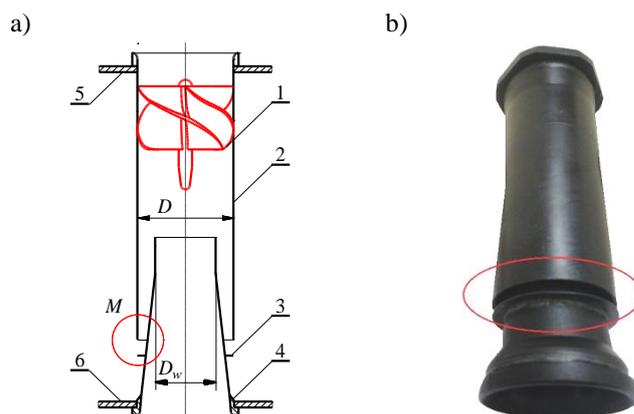
Wyznaczono charakterystyki w postaci:

- skuteczność filtracji wkładu filtracyjnego  $\varphi_w = f(m_D)$ ,
- opór przepływu wkładu filtracyjnego  $\Delta p_w = f(m_D)$ ,
- skuteczność filtracji multicyklonu  $\varphi_M = f(m_D)$ ,

Przedmiotem badań były: wkład filtracyjny wykonany z włókniny dwuwarstwowej AC-301 (tab. 1) mającej pole powierzchni filtracyjnej  $F_w = 2 \text{ m}^2$  oraz multicyklon wykonany z cyklonów przelotowych (rys. 10) ustawionych równolegle względem siebie w trzech kolumnach, po sześć cyklonów w kolumnie – rys. 11.

Tabela 1. Parametry włókniny filtracyjnej AC-301 firmy Korea Filtration Technologies Co.

Parametr	Jednostka	Wartość
Gramatura	[g/m <sup>2</sup> ]	210±10%
Grubość	[mm]	2,34÷2,86
Przepuszczalność powietrza	[dm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /s]	800÷1100 przy 120 Pa
Wytrzymałość na rozciąganie	[N/50 mm]	> 98
Wytrzymałość na zginanie	[N/30 mm]	1,47÷2,94



Rys. 10. Cyklon przelotowy badanego multicyklonu: a) schemat funkcjonalny, b) widok ogólny: 1 – zawiruwacz, 2 – korpus, 3 – występ technologiczny, 4 – rurka wylotowa, 5 – płyta górna multicyklonu, 6 – płyta dolna multicyklonu,  $D$  – średnica wewnętrzna korpusu cyklonu,  $D_w$  – średnica wewnętrzna rurki wylotowej,  $M$  – szczelina wylotowa odsysanego pyłu

Jako wartość strumienia głównego przyjęto  $Q_G = 600 \text{ m}^3/\text{h}$ . Do usuwania pyłu z osadnika multicyklonu stosowano układ eiekcyjnego odsysania strumieniem powietrza  $Q_S$ . Wartość  $Q_S$  określono z poniższej zależności dla przyjętych wartości stopnia odsysania:  $m_0 = 5\%$ ,  $m_0 = 10\%$ ,  $m_0 = 20\%$ :

$$Q_S = Q_G \cdot m_0. \quad (3)$$

Badania prowadzono dla stałego strumienia powietrza przepływającego przez filtr  $Q_G = 600 \text{ m}^3/\text{h}$  (prędkość filtracji  $v_{F dop} = 0,08 \text{ m/s}$ ) i strumienia odsysania  $Q_S = 30 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $Q_S = 60 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $Q_S = 120 \text{ m}^3/\text{h}$  oraz bez odsysania, przy ustalonym stężeniu zapylenia powietrza na wlocie do multicyklonu  $s = 1 \text{ g/m}^3$ . Stosowano pył testowy PTC-D będący krajowym zamiennikiem pyłu AC-Fine, którego skład granulometryczny i chemiczny podano w [13].

Skuteczność filtracji  $\varphi_w$  badanej włókniny filtracyjnej oraz multicyklonu wyznaczono metodą masową w kolejnych  $j$  cyklach pomiarowych, których czas trwania (czas równomiernego dozowania i rozprowadzania pyłu testowego) przyjęto:  $t_{1pom} = 3 \text{ min}$  w początkowym okresie filtracji i  $t_{2pom} = 15 \text{ min}$  – w dalszym okresie badań.

Po każdym  $j$  cyklu pomiarowym wyznaczano:

- skuteczność filtracji  $\varphi_w$  wkładu filtracyjnego z zależności:

$$\varphi_{wj} = \frac{m_{wj}}{m_{Dwj}} \cdot 100\% , \quad (4)$$

gdzie:  $m_{wj}$  – masa pyłu zatrzymanego przez wkład filtracyjny,  $m_{Dwj}$  – masa pyłu doprowadzonego do wkładu filtracyjnego (masa opuszczająca multicyklon) w czasie trwania cyklu pomiarowego.

- skuteczność filtracji  $\varphi_M$  multicyklonu z zależności:

$$\varphi_{Mj} = \frac{m_{Mj}}{m_{Dj}} \cdot 100\% , \quad (5)$$

gdzie:  $m_{Mj}$  – masa pyłu zatrzymanego przez multicyklon,  $m_{Dj}$  – masa pyłu doprowadzonego do multicyklonu (filtru) w czasie trwania cyklu pomiarowego.

- opór przepływu wkładu filtracyjnego z zależności:

$$\Delta p_{wj} = \frac{\Delta h_{wj}}{1000} (\rho_m - \rho_H) g \text{ [kPa]}, \quad (6)$$

gdzie:  $\Delta h_w$  – wartość spadku ciśnienia statycznego odczytanego (w mm H<sub>2</sub>O) z manometru wodnego typu U-rurka,  $\rho_m$  – gęstość cieczy manometrycznej (H<sub>2</sub>O) w temperaturze pomiaru  $t_H$ ,  $\rho_H$  – gęstość powietrza atmosferycznego w kg/m<sup>3</sup>,  $g$  – lokalne przyspieszenie ziemskie.

- stężenie pyłu w powietrzu z zależności:

$$s_j = \frac{m_{Dj} \cdot 60}{(Q_G + Q_s) \cdot \tau_{j pom}} \text{ [g/m}^3\text{]}. \quad (7)$$

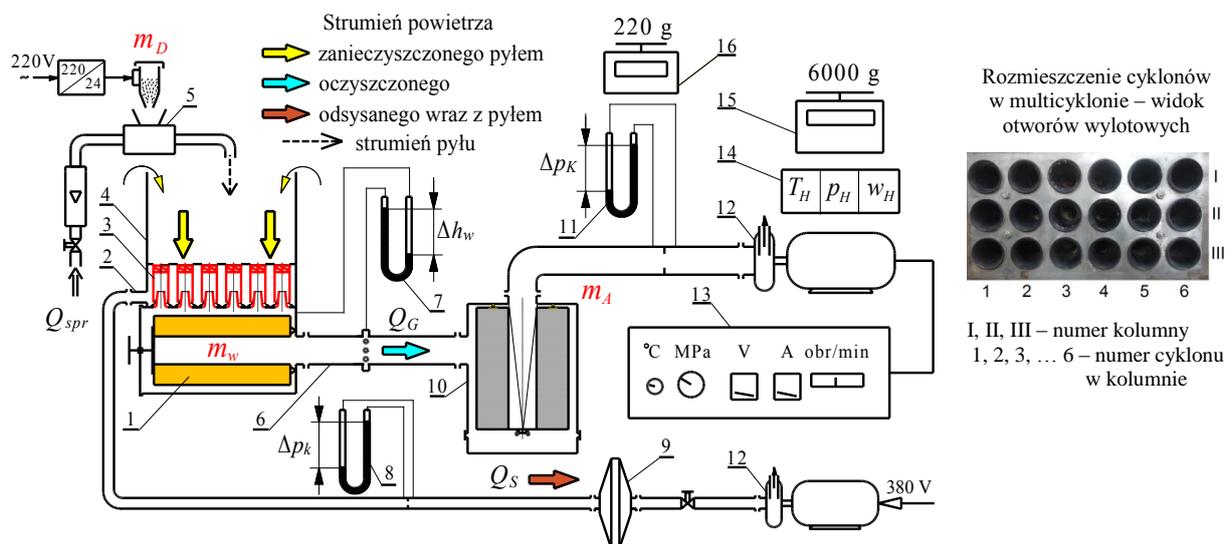
gdzie:  $m_{Dj}$  – masa pyłu doprowadzona do multicyklonu (filtru) w czasie trwania cyklu pomiarowego.

Masę pyłu zatrzymanego przez wkład filtracyjny oraz filtr absolutny określano wagą analityczną o udźwigu 6000 g i dokładności 0,01 g. Masę pyłu doprowadzonego do multicyklonu (filtru) niezbędną do określenia wartości stężenia pyłu w powietrzu określano wagą analityczną o udźwigu 220 g i dokładności 0,0001 g.

Wartości strumienia  $Q_G$  w przewodzie głównym ustalano z wykorzystaniem kryzy pomiarowej o zakresie 200÷1500 m<sup>3</sup>/h, a strumienia  $Q_s$  za pomocą rotametu pływakowego RIN-60 o zakresie 6÷130 m<sup>3</sup>/h i klasie dokładności 2,5.

Badania kończono z chwilą osiągnięcia przez badawczy wkład filtracyjny oporu przepływu 6 kPa będącego najczęściej stosowaną wartością oporu dopuszczalnego filtrów powietrza samochodów członowych.

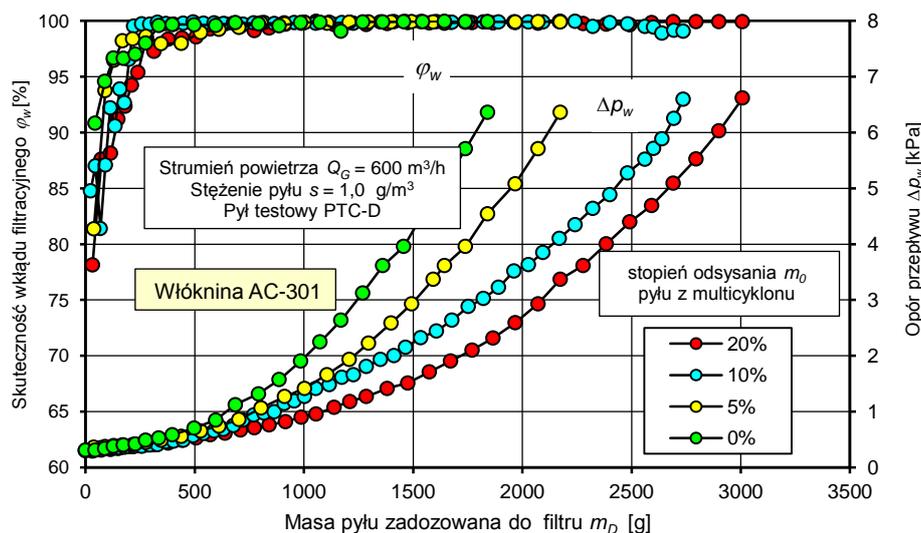
Badania wkładów filtracyjnych przeprowadzono na stanowisku (rys. 11) umożliwiającym wykonywanie podstawowych charakterystyk skuteczności filtracji i oporu przepływu dla strumienia powietrza do 1500 m<sup>3</sup>/h, przy stopniu efektywnego odsysania do 20% i stężeniu zapylenia do 3 g/m<sup>3</sup>.



Rys. 11. Schemat stanowiska badawczego: 1 – wkład filtracyjny, 2 – osadnik pyłu, 3 – multicyklon, 4 – komora pyłowa, 5 – dozownik pyłu, 6 – przewód pomiarowy oporu przepływu, 7 – manometr pomiaru spadku ciśnienia statycznych wkładu filtracyjnego, 8 – manometr pomiaru ciśnienia różnicowego kryzy (objętościowego natężenia przepływu  $Q_s$ ), 9 – filtr absolutny przewodu odsysania pyłu, 10 – filtr absolutny przewodu głównego, 11 – manometr pomiaru ciśnienia różnicowego kryzy (strumienia  $Q_G$ ), 12 – wentylatory ssawne, 13 – pulpit sterowniczy silnika i wentylatora powietrza, 14 – zestaw do pomiaru ciśnienia, temperatury i wilgotności względnej powietrza otoczenia, 15, 16 – waga analityczna

## 5. Analiza wyników badań

Charakterystyki skuteczności filtracji  $\varphi_w$  i oporu przepływu  $\Delta p_w$  wkładu filtracyjnego wykonanego z włókniny AC-301 pracującego w warunkach filtracji dwustopniowej (za multicyklonem) w funkcji masy pyłu  $m_D$  dostarczonej wraz z powietrzem wlotowym do filtru przedstawiono na rysunku 12. Ze względu na osiągnięte wartości skuteczności filtracji, czas pracy wkładu filtracyjnego można podzielić umownie na dwa okresy. Pierwszy (początkowy), charakteryzujący się małą wartością skuteczności filtracji, która systematycznie i gwałtownie wzrasta wraz z ilością masy pyłu dostarczonej do filtru. Ten krótki okres trwa od chwili rozpoczęcia procesu filtracji do osiągnięcia przez włókninę określonej wartości skuteczności filtracji, której umowną wartość przyjęto na poziomie 99,5% [8]. Następujący po nim okres filtracji zasadniczej charakteryzuje się dużymi (powyżej 99,5%) i ciągle, ale powolnie rosnącymi, wartościami skuteczności filtracji. Po pierwszych cyklach pomiarowych skuteczność włókniny filtracyjnej AC-301 osiąga wartości w granicach  $\varphi_w = 78,8 \div 88,3\%$  (rys. 12). Pierwszy okres filtracji (osiągnięcie założonej skuteczności filtracji  $\varphi_w = 99,5\%$ ) dla badanej włókniny kończy się z chwilą dostarczenia do filtru około 450 g masy pyłu.



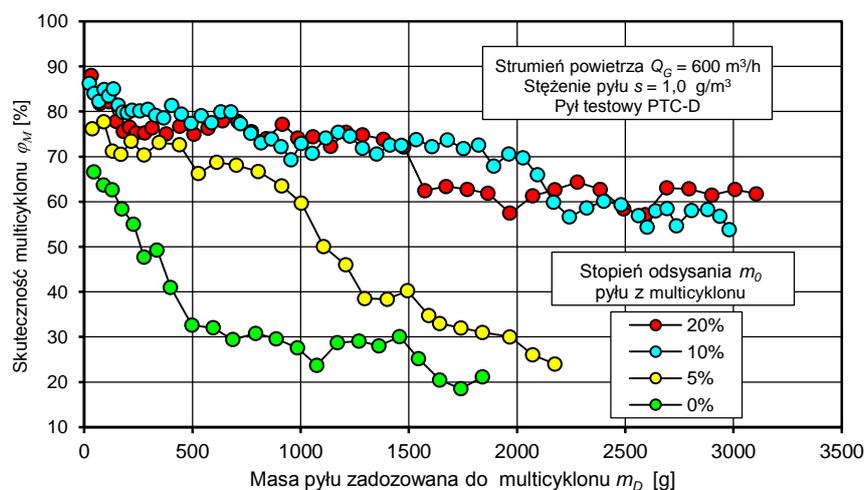
Rys. 12. Skuteczność filtracji i opory przepływu wkładu pracującego (włóknina AC-301), jako drugi stopień filtracji za multicyklonem dla różnych stopni  $m_0$  eiekcyjnego odsysania pyłu z osadnika

Wraz ze wzrostem masy pyłu dostarczonej do filtru, opór przepływu  $\Delta p_w$  wkładu cały czas systematycznie rośnie, a intensywność wzrostu jest tym większa im mniejsza jest wartość stopnia odsysania pyłu  $m_0$ . Dlatego ustalony opór przepływu  $\Delta p_w = 6$  kPa wkład filtracyjny uzyskuje po dostarczeniu do filtru różnych mas pyłu. Praca multicyklonu ze stopniem odsysania  $m_0 = 20\%$  powoduje, że wkład filtracyjny uzyskuje opór przepływu  $\Delta p_w = 6$  kPa po dostarczeniu do układu  $m_D = 2,9$  kg pyłu. Dla stopnia odsysania  $m_0 = 10\%$  jest to wartość  $m_D = 2,7$  kg, a dla  $m_0 = 5\%$   $m_D = 2,1$  kg pyłu. Praca multicyklonu bez odsysania pyłu z osadnika powoduje, że wkład filtracyjny uzyskuje opór przepływu  $\Delta p_w = 6$  kPa po dostarczeniu do układu  $m_D = 1,8$  kg pyłu, a więc niespełna 40% mniej niż podczas pracy multicyklonu z odsysaniem  $m_0 = 20\%$ . Tym samym czas użytkowania systemu

filtracji powietrza w silniku do osiągnięcia dopuszczalnej wartości oporu przepływu filtru powietrza  $\Delta p_{fdop}$  jest znacznie krótszy niż z odsysaniem pyłu z osadnika.

Opisane zjawisko spowodowane jest mniejszą skutecznością filtracji multicyklonu przy mniejszej wartości stopnia odsysania pyłu z osadnika oraz zmniejszaniem się skuteczności filtracji multicyklonu wraz czasem jego pracy i zwiększaniem masy pyłu dostarczonego do układu (rys. 13).

Wraz z ilością masy pyłu dostarczonej z powietrzem do filtru skuteczność filtracji multicyklonu systematycznie maleje, z tym, że im mniejsza jest wartość stopnia odsysania pyłu  $m_0$ , tym spadek skuteczności jest bardziej intensywny. Z chwilą rozpoczęcia pracy multicyklonu, przy stopniu odsysania pyłu  $m_0 = 20\%$ , jego skuteczność ma wartość  $\varphi_M = 86,25\%$ , a po dostarczeniu ponad 3 kg pyłu skuteczność maleje do  $\varphi_M = 61,72\%$ . W przypadku pracy multicyklonu ze stopniem odsysania  $m_0 = 5\%$ , wartości te wynoszą odpowiednio: na początku  $\varphi_M = 76,2\%$  i po dostarczeniu  $m_D = 2,17$  kg pyłu –  $\varphi_M = 24,2\%$ . W tym przypadku skuteczność multicyklonu maleje trzykrotnie. Spadek skuteczności multicyklonu powoduje, że na wkład filtracyjny kierowana jest większa masa pyłu, co powoduje szybsze zapelnianie się wolnych przestrzeni (porów) w materiale filtracyjnym, a tym samym postępujący wzrost prędkości  $v$  przepływu między, obłożonymi pyłem, włóknami złoża filtracyjnego. Skutkuje to intensywnym wzrostem oporu przepływu (rys. 12) będącego funkcją  $\Delta p = f(v^2)$ .



Rys. 13. Skuteczność filtracji multicyklonu dla różnych stopni  $m_0$  efektywnego odsysania pyłu z osadnika

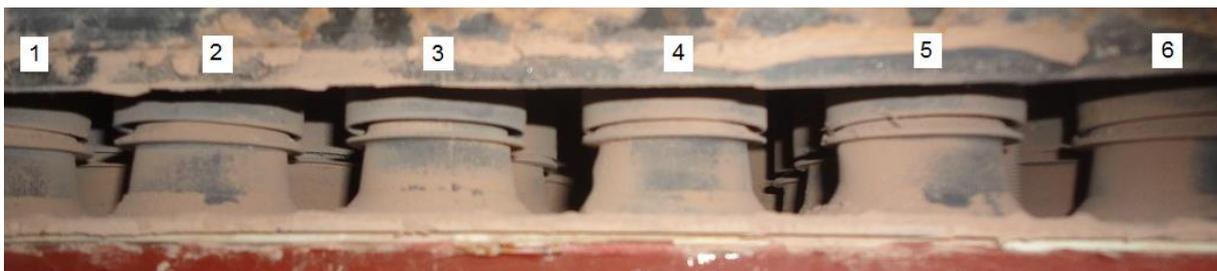
Jeżeli osadnik pyłu obejmuje swym zasięgiem kilkadziesiąt cyklonów, a odsysanie pyłu z osadnika następuje dwoma lub jednym króćcem, tak jak w przypadku badanego filtru, to występuje wtedy [8, 9, 16]:

- zróżnicowanie wartości strumieni odsysania z poszczególnych cyklonów,
- wzajemne oddziaływanie zawirowanych strumieni wypływających z cyklonów i wpływających do wspólnej komory osadnika pyłu,
- możliwość przepływów zwrotnych w cyklonach umiejscowionych na obrzeżu multicyklonu.

Powyższe zjawiska mogą być przyczyną nie tylko mniejszej skuteczności multicyklonu, niż wynikałoby to z zastosowanego stopnia odsysania dla pojedynczych

cyklonów, ale też przyczyną spadku skuteczności filtracji multicyklonu wraz z ilością masy pyłu dostarczanej z powietrzem do filtru. Następuje wtedy:

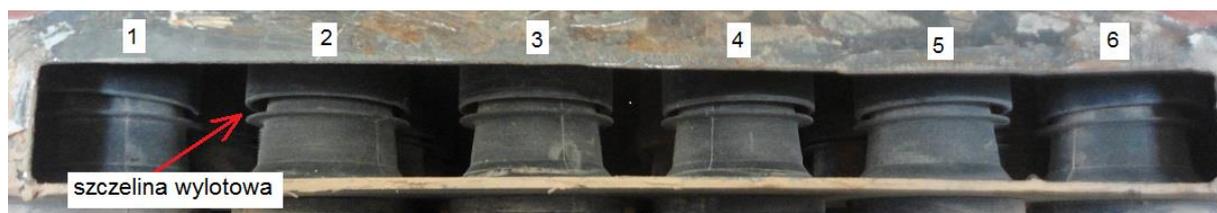
- 1) Trwale osadzanie się pyłu na powierzchniach wewnętrznych elementów wylotowych cyklonu tworzących szczelinę, którą następuje wypływ odsysanego pyłu – rys. 14. Wraz z upływem czasu pracy multicyklonu masa osadów pyłowych w szczelinie jest coraz większa, co w efekcie powoduje utrudniony wypływ strumienia odsysania z cyklonu i może spowodować wyłączenie go z pracy – rys. 15.
- 2) Trwale osadzanie się pyłu w narożach i na obrzeżach obudowy osadnika pyłu (rys. 15), skąd odsysanie jest mniej efektywne niż z cyklonów znajdujących się w bliskiej odległości przewodu odsysającego. Gromadzący się i zalegający na dnie osadnika pył powoduje utrudnienia wypływu z cyklonu zarówno odsysanego pyłu jak i oczyszczonego powietrza. W wyniku tego strumień powietrza (prędkość) przepływający przez te cyklony przyjmuje coraz mniejsze wartości, co skutkuje spadkiem skuteczności. Wraz z upływem czasu pracy multicyklonu masa zalegającego pyłu na dnie osadnika oraz na jego obrzeżach jest coraz większa, co w efekcie powoduje zablokowanie otworów wylotowych z tych cyklonów i wyłączenie ich z pracy (rys. 15).



Rys. 14. Widok szczelin wylotowych pyłu z cyklonów multicyklonu po zadozowaniu do filtru 500 g pyłu i pracy ze stopniem odsysania pyłu  $m_0 = 5\%$  – widok od strony kolektora odsysającego pyłu: 1, 2, 3, ..., 6 – numer kolejny cyklonu w kolumnie



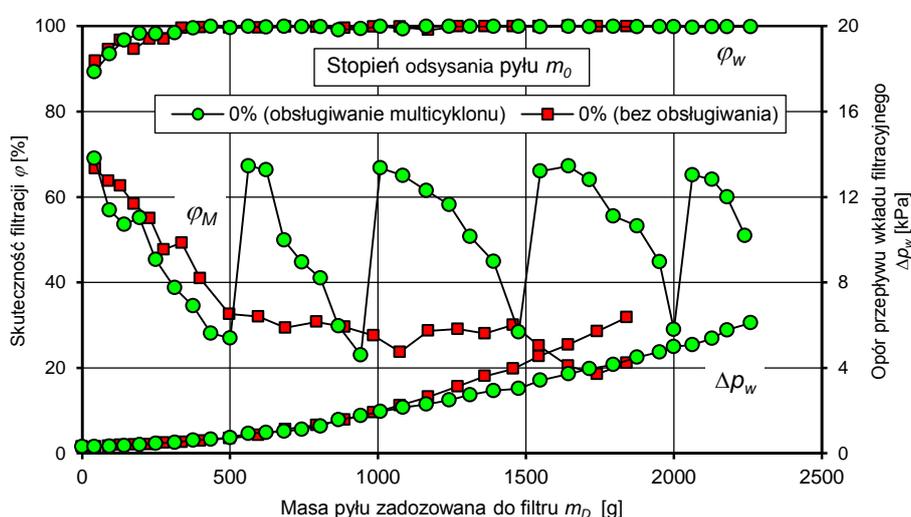
Rys. 15. Widok szczelin wylotowych pyłu z cyklonów multicyklonu po zadozowaniu do filtru 2150 g pyłu i pracy ze stopniem odsysania pyłu  $m_0 = 5\%$  – widok od strony kolektora odsysającego pyłu: 1, 2, 3, ..., 6 – numer kolejny cyklonu w kolumnie (strzałką zaznaczono cyklony, w których szczeliny zostały zablokowane pyłem)



Rys. 16. Widok szczelin wylotowych pyłu z cyklonów multicyklonu po obsłudze – widok od strony kolektora odsysającego pyłu: 1, 2, 3, ..., 6 – numer kolejny cyklonu w kolumnie

Zjawiska te, zmniejszające skuteczność multicyklonu wraz z ilością masy pyłu dostarczonej do filtru, zachodzą w cyklonach multicyklonu tym intensywniej, im mniejszą wartość ma stopień odsysania pyłu z osadnika.

Zjawisku zmniejszania skuteczności multicyklonu w czasie pracy można częściowo zapobiec poprzez okresowe czyszczenie osadnika pyłu. Na rys. 17 przedstawiono zmiany skuteczności multicyklonu wraz z ilością masy pyłu dostarczonej do filtru bez odsysania i z okresowym usuwaniem pyłu (co 500 g dostarczonego pyłu) z osadnika. Po rozpoczęciu pracy skuteczność multicyklonu miała wartość  $\varphi_M = 69,1\%$ , a po dostarczeniu 500 g pyłu skuteczność spadła do  $\varphi_M = 26,9\%$ , co jest wartością zbliżoną gdy multicyklon pracował bez obsługiwan. Po wykonaniu obsługiwan multicyklonu (rys. 16) polegające na oczyszczeniu go z pyłu sprężonym powietrzem skuteczność multicyklonu wzrosła do  $\varphi_M = 66,8\%$ , a więc do wartości nieznacznie różniące się od początkowej, a następnie znów następował jej spadek. Cykl obsługiwan cyklonów multicyklonu powtórzono trzykrotnie, obserwując za każdym razem podobny jego skutek – rys. 17.



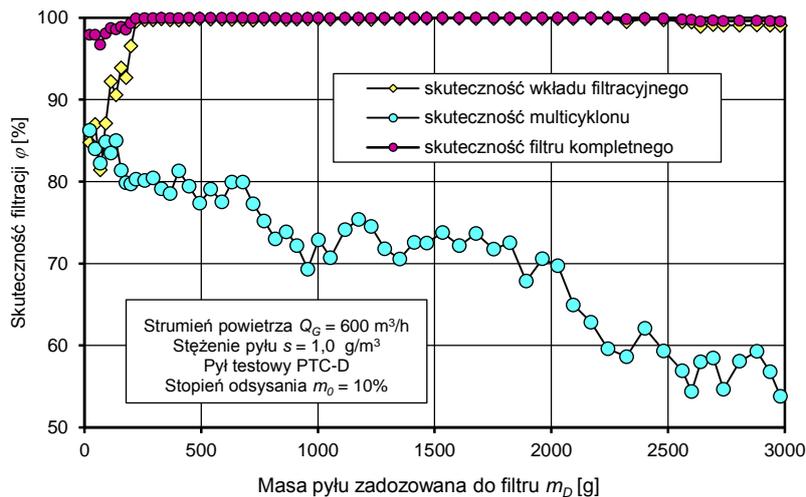
Rys. 17. Wpływ okresowego usuwania pyłu z osadnika na skuteczność filtracji i opór przepływu wkładu filtracyjnego (włóknina AC-301) oraz skuteczność filtracji multicyklonu pracującego bez eiekcyjnego odsysania pyłu z osadnika

O skuteczności kompletnego dwustopniowego filtru powietrza decyduje zarówno multicyklon jak i wkład filtracyjny. W początkowym okresie filtracji, kiedy wkład filtracyjny osiąga małe wartości skuteczności w zakresie  $\varphi_w = 81,4\div 96,6\%$ , o skuteczności filtru decyduje multicyklon, który charakteryzuje się maksymalną skutecznością w granicach  $\varphi_M = 86,3\div 81,4\%$  (rys. 18). Spadek skuteczności multicyklonu wraz z ilością masy pyłu dostarczonej z powietrzem wlotowym (przebiegiem pojazdu) nie wpływa decydująco na skuteczność filtru kompletnego.

Dla filtrów wielostopniowych, w których stopnie filtracji ustawione są szeregowo, skuteczność filtracji określa się najczęściej według zależności [20]:

$$\varphi_f = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \varphi_{fi}), \quad (8)$$

gdzie:  $n$  – liczba stopni filtracji,  $\varphi_{fi}$  – skuteczność filtracji  $i$ -tego stopnia.



Rys. 18. Wpływ masy zadozowanego pyłu na skuteczność filtracji multicyklonu, wkładu filtracyjnego (włóknina AC-301) oraz kompletnego filtra dla stopnia efektywnego odsysania  $m_0 = 10\%$

Dla badanego filtra dwustopniowego, którego pierwszy stopień filtracji (multicyklon) pracuje ze skutecznością początkową  $\varphi_{M1} = 86,25\%$ , a drugi (wkład filtracyjny)  $\varphi_{w1} = 84,78\%$  (rys. 18), skuteczność filtracji ma wartość:

$$\varphi_{f1} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \varphi_i)$$

$$\varphi_{f1} = 1 - (1 - \varphi_{M1}) \cdot (1 - \varphi_{w1})$$

$$\varphi_{f1} = 1 - (1 - 0,8625) \cdot (1 - 0,8478)$$

$$\varphi_{f1} = 97,91\%.$$

Wyznaczona natomiast eksperymentalnie początkowa skuteczność filtracji tego filtra wynosi  $\varphi_{fE1} = 97,91\%$ .

Po zadozowaniu do filtra  $m_D = 2028,6$  g pyłu (cykl pomiarowy nr 44 rys. 18) wyznaczona eksperymentalnie skuteczność filtracji filtra dwustopniowego wynosi  $\varphi_{fE44} = 99,97\%$ , natomiast skuteczność określona według powyższej zależności ( $\varphi_{M44} = 67,73\%$ ,  $\varphi_{w44} = 99,9\%$ ) ma wartość bardzo zbliżoną  $\varphi_{f44} = 99,97\%$ . Uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników skuteczności filtracji filtra dwustopniowego wyznaczonej eksperymentalnie i skuteczności filtracji obliczonej z powyższej zależności.

## Podsumowanie

Do filtracji powietrza wlotowego silników pojazdów mechanicznych eksploatowanych w warunkach dużego stężenia pyłu w powietrzu ( $s = 1$  g/m<sup>3</sup> i powyżej) stosowane są filtry dwustopniowe (multicyklon-przegroda porowata) z efektywnym odsysaniem pyłu z osadnika.

Z przeprowadzonych badań i analiz wynika, że efektywny sposób usuwania pyłu z osadnika multicyklonu filtra dwustopniowego spełnia swoje zadanie, ale jest niedoskonały. Przejawia się to w postaci malejącej skuteczności filtracji multicyklonu i bardziej intensywnym przyrostem oporu przepływu wkładu filtracyjnego.

Wraz z ilością masy pyłu dostarczonej z powietrzem do filtra skuteczność filtracji multicyklonu systematycznie maleje, z tym, że im mniejsza jest wartość stopnia odsysania

pyłu  $m_0$ , tym spadek skuteczności jest bardziej intensywny (rys. 13). Spowodowane jest to szczególną konstrukcją multicyklonu oraz niedoskonałością układu odsysania pyłu z osadnika. Jeżeli osadnik pyłu obejmuje swym zasięgiem kilkadziesiąt cyklonów, a odsysanie pyłu z osadnika następuje jednym króćcem, to występuje wtedy zróżnicowanie wartości strumieni odsysania z poszczególnych cyklonów oraz możliwość przepływów zwrotnych w cyklonach umiejscowionych na obrzeżu multicyklonu. Występuje wtedy trwałe osadzanie się pyłu w narożach i na obrzeżach obudowy osadnika pyłu, skąd odsysanie jest mniej efektywne niż z cyklonów znajdujących się w bliskiej odległości przewodu odsysającego. Gromadzący się i zalegający na dnie osadnika pył powoduje utrudnienia wypływu z cyklonu zarówno odsysanego pyłu jak i oczyszczonego powietrza, co w efekcie powoduje zablokowanie otworów wylotowych z tych cyklonów i wyłączenie ich z pracy. Zjawiska te zachodzą intensywniej w przypadku stosowania małych wartości stopnia odsysania lub pracy multicyklonu bez odsysania pyłu z osadnika.

W eksploatacji, tę niedoskonałość konstrukcyjną osadnika pyłu można zrekomensować wykonując w określonych odstępach czasu, systematyczne czyszczenie osadnika pyłu i szczelin wylotowych cyklonów. Skutki takiego zabiegu, w postaci przywrócenia skuteczności filtracji multicyklonu do wartości początkowej, wykazano podczas badań (rys. 17).

Jest to jednak przedsięwzięcie trudne do realizacji z uwagi na konieczność wymontowywania filtra z pojazdu. Filtry powietrza pojazdów specjalnych charakteryzują się dużymi wymiarami i masą. Często też brak jest możliwości demontażu osadnika pyłu.

Osadzaniu się pyłu w narożach i na obrzeżach obudowy osadnika oraz w szczelinach cyklonów umiejscowionych na obrzeżu multicyklonu można zapobiec wykonując odpowiednią konstrukcję wewnętrznej przestrzeni komory osadnika pyłu. Jednym ze sposobów może być podział komory osadnika multicyklonu na niezależne segmenty i kanały odsysania, którym przyporządkowano określone grupy pojedynczych cyklonów. Taka konstrukcja może zapewnić uzyskanie jednakowych wartości strumieni odsysanych z wszystkich cyklonów i zapobiec trwałemu osadzaniu się pyłu w narożach i na obrzeżach obudowy osadnika.

Konstrukcja osadnika zbudowanego z segmentów ułatwia znacznie proces jego projektowania. Podstawowe badania ograniczają się wówczas do segmentu, przez co są znacznie prostsze i mniej kosztowne.

Intensywność wzrostu oporu przepływu  $\Delta p_w$  wkładu filtracyjnego pracującego, jako drugi stopień filtracji (za multicyklonem) jest tym większa im mniejsza jest skuteczność filtracji multicyklonu. W efekcie na wkład filtracyjny przedostaje się w jednostce czasu większa masa pyłu. W eksploatacji oznacza to, że przy ustalonym oporze dopuszczalnym  $\Delta p_{fdop}$ , skróceniu ulega okres międzyobsługowy. Oznacza to większą liczbę obsługuwanych, a tym samym wzrost kosztów eksploatacji.

## LITERATURA

- [1] Azadi M, Azadi M. An analytical study of the effect of inlet velocity on the cyclone performance using mathematical models. Powder Technology 2012; 217: 121-127

- [2] Baczewski K, Hebda M. Filtracja płynów eksploatacyjnych. Radom: MCNEMT, 1991/92.
- [3] Cernecky J, Plandorova K. The effect of the introduction of an exit tube on the separation efficiency in a cyclone. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 2013; Vol. 30, No. 3: 627-641.
- [4] Cenrtisep Air Cleaner.: Materiały informacyjne firmy PALL Corporation, USA 2004.
- [5] Chłopek Z. Testing of hazards to the environment caused by particulate matter during use of vehicles. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2012; 2: 160-170.
- [6] Chłopek Z, Jakubowski A. A study of the particulate matter emission from the braking systems of motor vehicles. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2009; 4: 45-52.
- [7] Chu K W, Wang B, Xu D L, Chen Y X, Yu A B. CFD–DEM simulation of the gas–solid flow in a cyclone separator. *Chemical Engineering Science* 2011; 66: 834-847.
- [8] Chuah L A, Gimbin J, Choong T S Y, Fakhru'l-Razi A. A CFD analysis on the effect of vortex finder and cylindrical length on cyclone hydrodynamics and centrifugal forces. *Journal - The Institution of Engineers, Malaysia* 2009; Vol. 71, No. 2: 51-58.
- [9] Durst M, Klein G, Moser N. Filtration in Fahrzeugen. Materiały informacyjne firmy Mann+Hummel GMBH. Ludwigsburg, Niemcy 2005.
- [10] Dziubak T. The assessment of the possibilities of improvement of the extraction evenness, in multicyclone dedusters fitted in special vehicles. *Combustion Engines* 2012; 4 (151): 34-42.
- [11] Dziubak T.: A study on the improvement of uniformity of dust extraction from multicyclone dust collectors. *Combustion Engines* 2011; 4(147): 69-78.
- [12] Dziubak T.: The research of air filtration process on paper partition in the Cyclone-porous partition” system. *Journal of KONES Powertrain and Transport* 2007; 2(14): 115-124.
- [13] Dziubak T., Szwedkowicz S.: Operating properties of non-woven fabric panel filters for internal combustion engine inlet air in single and two-stage filtration systems. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2015; 4: 519-527.
- [14] Dziubak T, Szwedkowicz S. Experimental research on filtering fibers in a cyclone–porous barrier system. *Combustion Engines* 2014; 3(158): 45-55.
- [15] Elsayed K. Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using Co-Kriging. *Powder Technology* 2015; 269: 409-424.
- [16] Fitch J. Clean Oil Reduces Engine Fuel Consumption. *Practicing Oil Analysis Magazine* 2002; 11-12.
- [17] Gawali S S, Bhambere M B. Computational fluid dynamics approach for prediction of cyclone separator pressure drop. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research* 2015; Vol.4, No.1: 374-377.
- [18] Grafe T, Gogins M, Barris M, Schaefer J, Canepa R. Nanofibers in Filtration Applications in Transportation. *Filtration International Conference and Exposition, Chicago – Illinois, December 3-5, 2001.*
- [19] Greenfield R. R. The Use of Cyclones for Control of Solids Emission from Fluidised Bed Boilers. *Filtration & Separation* 1986; vol. 22, no. 1: 38-39.

- [20] Jaroszczyk T. Air Filtration in Heavy-Duty Motor Vehicle Applications. Proc. Dust Symposium III Vicksburg MS, 15-17 September 1987.
- [21] Jiao J, Zheng Y, Sun G, Wang J. Study of the separation efficiency and the flow field of a dynamic cyclone. Separation and Purification Technology 2006; 49: 157-166.
- [22] Karagoz I, Avci A, Surmen A, Sendogan O. Design and performance valuation of a new cyclone separator. Journal of Aerosol Science 2013; 59: 57-64.
- [23] Kim H T, Zhu Y, Hinds W C, Lee KW. Experimental study of small virtual cyclones as particle concentrators. Journal of Aerosol Science 2002; 5(33): 721-733
- [24] Koszałka G, Suchecki A. Changes in performance and wear of small diesel engine during durability test. Combustion Engines 2015; 3(162), 34-40.
- [25] Koszałka G. Model of operational changes in the combustion chamber tightness of a diesel engine. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2014; 1: 133-139.
- [26] Ma L, Ingham D. B, Wen X. Numerical modelling of the fluid and particle penetration through small sampling cyclones. Journal of Aerosol Science 2000; 9(31): 1097-1119.
- [27] Pui D Y H, Chen S Ch, Zuo Z. PM<sub>2.5</sub> in China: Measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation, Particuology 2014; 13: 1-26.
- [28] Qian F, Zhang J, Zhang M. Effects of the prolonged vertical tube on the separation performance of a cyclone. Journal of Hazardous Materials 2006; 136: 822-829.
- [29] Reddy G C, Kuppuraj U. Numerical study of flue gas flow in a multi cyclone separator. Int. Journal of Engineering Research and Applications 2015; 5(1): 48-53.
- [30] Rybak P. Operating loads of impulse nature acting on the special equipment of the combat vehicles. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2014; 3: 347-353.
- [31] Sage P W, Wright M A. The Use of Bleeds to Enhance Cyclone Performance. Filtration & Separation 1986; 1(23): 32-36.
- [32] Wang B, Xu D L, Chu K W, Yu A B. Numerical study of gas–solid flow in a cyclone separator. Applied Mathematical Modelling 2006; 30: 1326-1342.