

**Article citation info:**

Dziubak T. Problemy usuwania pyłu z multicyklonów filtrów powietrza silników terenowych pojazdów mechanicznych – Archiwum Motoryzacji. 2017; 76(2): 7-18, <http://dx.doi.org/10.14669/AM.VOL76.ART2>

# Problemy usuwania pyłu z multicyklonów filtrów powietrza silników terenowych pojazdów mechanicznych

Tadeusz Dziubak<sup>1</sup>

Wojskowa Akademia Techniczna

## Streszczenie

Omówiono organizację procesu odsysania pyłu z bezwładnościowych filtrów powietrza wlotowego silników spalinowych pojazdów mechanicznych. Przedstawiono stosowane konfiguracje ejetorów w układach odsysania pyłu. Omówiono przykłady układów eiekcyjnego odsysania zanieczyszczeń. Zdefiniowano stopień odsysania pyłu. Przeanalizowano jego wpływ na charakterystykę przepływową i skuteczności filtracji powietrza pojedynczych cyklonów. Wyjaśniono zjawisko wpływu odsysania pyłu z osadnika filtru bezwładnościowego (multicyklonu) na skuteczność filtracji. Przeanalizowano wpływ odsysania pyłu z osadnika na nierównomierność odsysania z pojedynczych cyklonów multicyklonu oraz pokazano przyczyny nierównomierności. Przytoczono wyniki obrazujące wpływ nierównomierności odsysania na skuteczność filtracji multicyklonu i wkładu włókninowego. Przeanalizowano metody prowadzące do uzyskania względnej równomierności strumieni odsysanych z pojedynczych cyklonów. Wykazano, że równomierne wartości strumieni odsysania z pojedynczych cyklonów można uzyskać poprzez odpowiednią zmianę struktury osadnika pyłu multicyklonu.

**Słowa kluczowe:** silnik spalinowy, zanieczyszczenia powietrza, filtr powietrza, multicyklon, skuteczność filtracji, usuwanie (odsysanie) pyłu

**Keywords:** internal combustion engine, air contaminants, air cleaner (filter), multi-cyclone, filtration efficiency, dust removal (extraction, suction)

## 1. Wstęp

Powietrze atmosferyczne zanieczyszczone jest głównie pyłem unoszonym z podłoża przez wiatr lub ruch pojazdów mechanicznych. Uwidacznia się to szczególnie podczas eksploatacji pojazdów gąsienicowych po bezdrożach o suchym podłożu i terenie

---

<sup>1</sup> Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Polska, e-mail: [tdziubak@wat.edu.pl](mailto:tdziubak@wat.edu.pl)

piaszczystym lub drogach słabo utwardzonych, gdzie stężenie pyłu w powietrzu może osiągać wartość nawet  $7 \text{ g/m}^3$  [1, 4, 21, 27, 28, 32, 33].

Dostające się wraz z powietrzem do wnętrza silnika twarde, o ostrych krawędziach, drobnodispersyjne cząstki pyłu, powodują przyspieszone zużycie części i zespołów silników zarówno tłokowych, jak i turbinowych, ograniczając ich trwałość i niezawodność [1, 3, 9, 22, 27, 31, 33, 34]. Dlatego muszą być skutecznie eliminowane z powietrza zasysanego przez silniki spalinowe pojazdów mechanicznych. Zadanie to spełniają filtry powietrza, które dobiera się do silnika w zależności od przewidywanych warunków eksploatacji pojazdu.

Do filtracji powietrza wlotowego silników wielu terenowych pojazdów mechanicznych, a także maszyn roboczych, eksploatowanych w warunkach o stężeniu pyłu w powietrzu większym niż  $1 \text{ g/m}^3$ , stosuje się filtry dwustopniowe, gdzie pierwszym stopniem filtracji powietrza jest filtr bezwładnościowy. Jest to zazwyczaj zespół składający się z kilku do kilkudziesięciu elementów filtracyjnych połączonych równolegle - cyklonów (minicyklonów), a całość tworzy multicyklon. Multicyklony stosuje się do filtracji powietrza wlotowego silników czołgów PT-91, T-72, bojowego wozu piechoty BMP-1, samochodów ciężarowych Volvo oraz Scania, pojazdów gaśnicowych 2S-1 i KTO Rosomak, a za granicą: między innymi w czołgach Leopard 2, Abrams, Challenger oraz Leclerc.

Obecnie, jako drugi stopień filtracji powietrza do silników spalinowych stosuje się powszechnie porowatą przegrodę papierową, chociaż duże zastosowanie mają „gradientowe” włókniny filtracyjne charakteryzujące się narastającym upakowaniem włókien w kierunku napływu powietrza, a tym samym dużą zdolnością pochłaniania pyłu. Coraz częściej do budowy przegród filtracyjnych stosowane są nanowłókna otrzymywane metodą electrospinningu lub meltblown [23, 24, 26, 30, 35].

Odseparowany w każdym z pojedynczych cyklonów multicyklonu pył, jest gromadzony w wspólnym kolektorze (pojemniku), zwanym osadnikiem pyłu, skąd następnie jest usuwany. W okresie międzyobsługowym (1000 km przebiegu czołgu T-72), w warunkach dużego stężenia pyłu w powietrzu, multicyklon jest w stanie odseparować z powietrza ponad 150 kg pyłu. Magazynowanie w osadniku tak dużej masy pyłu nie jest wskazane ze względu na brak miejsca jak i niepotrzebne obciążanie konstrukcji filtra, a przede wszystkim ze względu na powtórne zassanie pyłu podczas wstrząsów pojazdu. Dlatego w multicyklonach przeznaczonych do filtracji powietrza wlotowego silników pojazdów specjalnych, stosuje się ciągłe usuwanie (najczęściej odsysanie) z osadnika gromadzonego tam pyłu. Zastosowanie odsysania pyłu z osadnika multicyklonu powoduje zauważalny wzrost jego skuteczności filtracji.

W multicyklonie zbudowanym z dużej liczby 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 pogorszenie efektywności działania tych cyklonów, a w efekcie zmniejszenie skuteczności i dokładności filtracji całego multicyklonu. Tym samym masa pyłu przedostająca się na drugi stopień filtracji

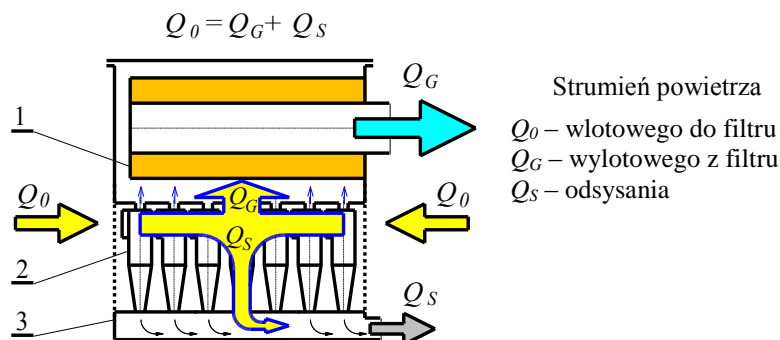
(papierowy wkład filtracyjny) jest większa, co ze względu na ograniczoną chłonność papieru filtracyjnego, skraca czas pracy filtra (przebieg pojazdu) do osiągnięcia ustalonej wartości oporu dopuszczalnego  $\Delta p_{fdop}$  wynikającego z 3% spadku mocy silnika. Dla silników samochodów ciężarowych i pojazdów specjalnych opór dopuszczalny filtrów powietrza ustalany jest w zakresie  $\Delta p_{fdop} = (5\div 7)$  kPa [1, 13, 15, 18, 28, 33].

Chcąc uzyskać dużą skuteczność filtracji powietrza w multicyklonie należy nie tylko dokonać prawidłowego doboru jego parametrów konstrukcyjnych i przepływowych, ale także poświęcić wiele uwagi organizacji procesu odsysania odseparowanych w nim zanieczyszczeń.

## 2. Organizacja procesu odsysania pyłu z filtrów bezwładnościowych

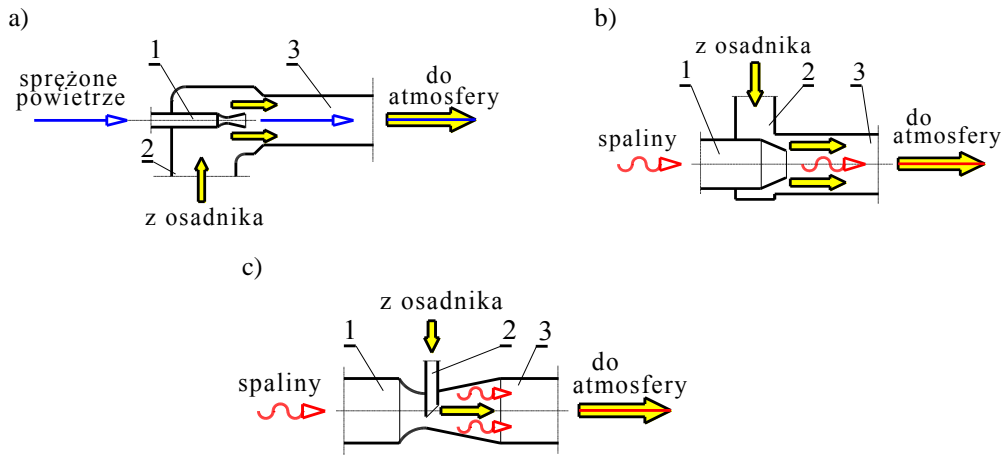
Odsysanie pyłu z osadnika odbywa się za pomocą układu odsysania, którego elementami są: osadnik pyłu (komora separacyjna) multicyklonu, urządzenie wymuszające przepływ (efekt odsysania) oraz przewody odprowadzające pył z osadnika na zewnątrz. Odsysanie zachodzi wskutek wytworzenia odpowiedniego podciśnienia strumieniem odsysania, stanowiącego część strumienia powietrza wpływającego do multicyklonu (cyklonu) – rys. 1. Strumień odsysania przepływa przez osadnik unosząc ze sobą ziarna pyłu, a następnie jest kierowany na zewnątrz pojazdu w miejsce na tyle odległe od chwytu powietrza wlotowego, by nie zachodziła obawa ponownego zassania tam odseparowanego pyłu.

Realizacja odsysania stanowi dość poważny problem natury technicznej. Do wytwarzania strumienia odsysania stosuje się powszechnie specjalne wentylatory lub dmuchawy. Tego typu mechaniczne urządzenia odsysające muszą mieć odpowiedni napęd. Napęd mechaniczny od silnika pojazdu raczej nie wchodzi w rachubę, choćby z uwagi na to, że charakterystyki wentylatorów silnie zależą od prędkości obrotowej, a w konsekwencji od zakresu pracy silnika. Z góry byłoby również zdeterminowane jego usytuowanie przy silniku, w miejscu niekoniecznie dostosowanym do położenia filtra.



Rys. 1. Podział strumienia powietrza wlotowego w filtrze z eiekcyjnym odsysaniem pyłu z osadnika 1– wkład filtracyjny, 2 – multicyklon, 3 – osadnik pyłu:

Napęd elektryczny jest znacznie bardziej realny, ale stanowiłby dodatkowe obciążenie układu wytwarzającego energię elektryczną dla potrzeb pojazdu. Ponadto wymagana ciągłość działania wentylatora pociąga za sobą wysokie wymagania odnośnie trwałości napędu. Oba opisane urządzenia obciążają energetycznie silnik – pobierają od niego moc. Dlatego we współczesnych rozwiązaniach filtrów powietrza do odsysania pyłu z osadników multicyklonów filtrów powietrza wlotowego silników spalinowych stosuje się zwykle różne konfiguracje ejektorów (rys. 2)

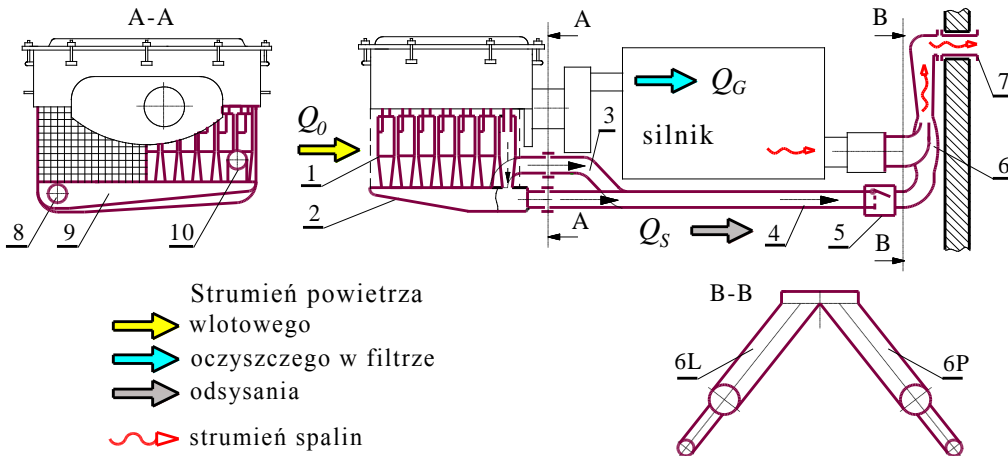


**Rys. 2. Stosowane konfiguracje ejektorów w układach odsysania do wymuszania strumienia ejekcyjnego:**

**a) sprężonym powietrzem, b i c) spalinami: 1 – kanał dolotowy strumienia czynnego, 2 – kanał dolotowy strumienia biernego, 3 – komora mieszania [17]**

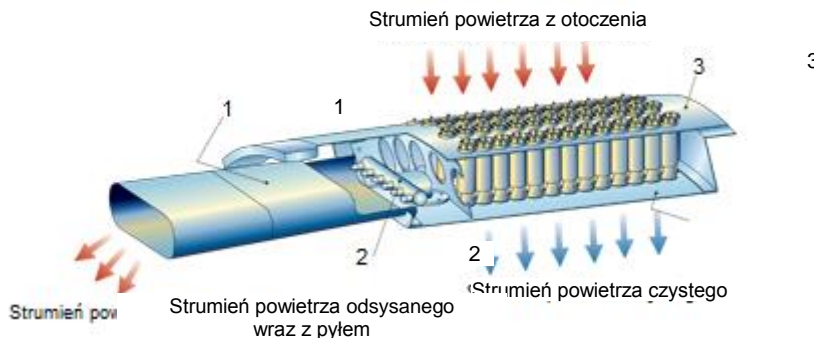
W silnikach tłokowych wykorzystują one energię spalin wypływających z układu wylotowego silnika. W silnikach turbinowych można także wykorzystać energię sprężonego powietrza ze sprężarki silnikowej. Dzięki nieskomplikowanej budowie koszty wytworzenia ejektora są niewielkie, a brak części ruchomych czyni go w wysokim stopniu niezawodnym. Konfiguracje ejektorów, gdzie strumieniem wymuszającym przepływ (czynnym) w kanale odsysania są spaliny odprowadzane z silnika, pokazano na rysunku 2b, c. Strumieniem czynnym wymuszającym przepływ w kanale odsysania (kanale biernym) może być także strumień sprężonego powietrza (rys.2a). Ejekcyjny sposób odsysania pyłu jest znacznie oszczędniejszy, zarówno pod względem energetycznym, jak i w kosztach wytworzenia, a także charakteryzuje się dużą niezawodnością.

Konfiguracja ejektora pokazana na rys. 2b znajduje się w układzie ejekcyjnego odsysania zanieczyszczeń z osadnika filtra powietrza czołgów T-72 i PT-91 (rys. 3). W układzie ejekcyjnego odsysania znajdują się dwa ejektory połączone przewodami rurowymi z dwoma króćcami osadnika pyłu. Ejektor (lewy i prawy) umieszczony jest w układzie odprowadzającym spaliny z każdego bloku cylindrów silnika. Podobny układ odsysania pyłu z osadnika multicyklonu, ale z jednym ejektorem, znajduje się w bojowym wozie piechoty - BWP i pojeździe 2S-1.



**Rys. 3. Układ ejekcyjnego odsysania zanieczyszczeń z multicyklonu filtra powietrza czołgu T-72: 1 – multicyklon, 2 – osadnik pyłu, 3, 4 – prawy i lewy przewód odsysania, 5 – zawór odcinający, 6 –ejektor (6L – lewy, 6P – prawy), 7 – rura wylotowa spalin, 8, 10 – prawy i lewy króciec odsysania, 9 – ściana czołowa osadnika**

Konfiguracja ejektora pokazana na rysunku 2a stosowana jest powszechnie w układzie ejekcyjnego odsysania zanieczyszczeń z osadników multicyklonów filtrów powietrza śmigłowców – rys. 4.

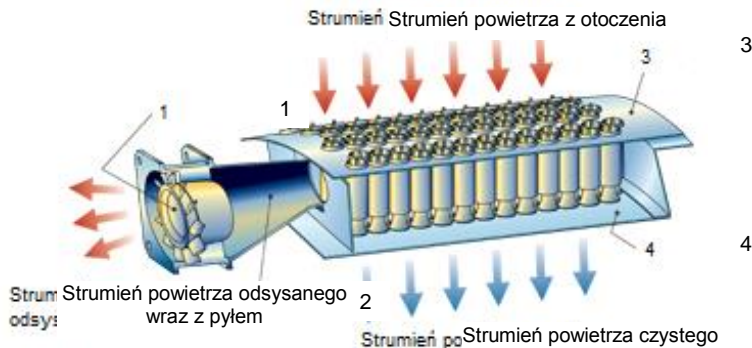


**Rys. 4. Układ ejekcyjnego odsysania zanieczyszczeń (sprężonym powietrzem) z multicyklonu filtra powietrza śmigłowca: 1 – przewód odsysania, 2 – ejektor, 3 – multicyklon [37]**

Do wytworzenia strumienia ejekcyjnego odsysania w układach usuwania pyłu z osadników multicyklonów stosowane są też specjalne wentylatory z napędem elektrycznym. Urządzenia tego typu znajdują się w układach odsysania pyłu z filtrów powietrza śmigłowców (rys. 5) i w czołgu Leopard 2.

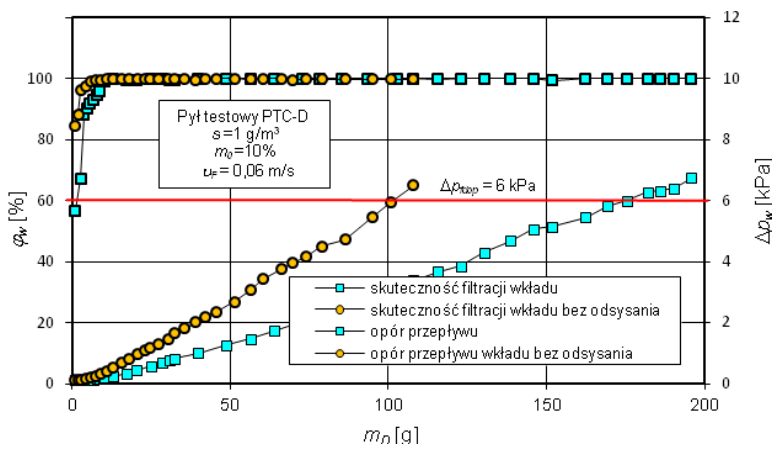
Z powyższych rozważań wynika, że najbardziej racjonalną i powszechnie stosowaną metodą wymuszenia strumienia odsysającego pył z osadnika filtra jest wykorzystanie strumienia spalin wypływających z silnika lub strumienia sprężonego powietrza.

Usuwanie (poprzez odsysanie) z osadnika multicyklonu odseparowanego przez cyklony i zgromadzonego tam pyłu powoduje zauważalny wzrost jego skuteczności, a tym samym wydłużenie czasu pracy filtru powietrza limitowanego ustaloną wartością oporu dopuszczalnego  $\Delta p_{fdop}$ .



Rys. 5. Układ ejekcyjnego odsysania zanieczyszczeń (za pomocą wentylatora) z multicyklonu filtru powietrza śmigłowca: 1 – przewód odsysania, 2 – ejektor, 3 – multicyklon, 4 – osadnik pyłu [37]

Potwierdzają to wyniki badań (wykonanych przez autora) charakterystyk oporów przepływu  $\Delta p_w = f(m_D)$  i skuteczności filtracji  $\phi_w = f(m_D)$  papierowej przegrody filtracyjnej w funkcji masy pyłu  $m_D$  zassanego wraz z powietrzem pracującej w układzie „cyklon – wkład filtracyjny” (rys. 6). Usuwanie (poprzez odsysanie) z osadnika cyklonu odseparowanego pyłu spowodowało wydłużenie o 75% czasu pracy wkładu filtracyjnego (limitowanego ustaloną wartością oporu  $\Delta p_f = 6$  kPa



Rys. 6. Zmiana oporów przepływu i skuteczności filtracji papierowego wkładu filtracyjnego pracującego w układzie (cyklon – wkład filtracyjny) z ejekcyjnym usuwaniem pyłu i bez usuwania w funkcji masy pyłu  $m_D$  zassanego do układu [13]

### 3. Wpływ odsysania na efektywność filtracji powietrza w multicyklonie

Zastosowanie strumienia odsysania do usuwania zanieczyszczeń z osadnika pyłu daje wymierny efekt pracy multicyklonu – powoduje wzrost skuteczności filtracji powietrza. Miarą intensywności odsysania jest stopień odsysania  $m_0$  definiowany zwykle jako iloraz wielkości strumienia odsysania  $Q_S$  (rys. 1) i strumienia wylotowego z filtru (wlotowego do silnika)  $Q_G$  wyrażony w procentach [2, 5, 7, 12, 15, 25, 29]:

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

Z prac poświęconych temu problemowi wynika, że stopień odsysania zawiera się najczęściej w przedziale  $m_0 = (5\div 15)\%$  [5, 6, 15, 18, 20]. Na ogół w praktyce strumień odsysania  $Q_S$  nie przekracza 10% objętości strumienia wylotowego  $Q_G$  z filtru. Dalszy wzrost strumienia  $Q_S$  nie powoduje bowiem istotnego wzrostu skuteczności filtracji powietrza w multicyklonie. Ponadto umieszczenie ejektora w układzie wylotowym silnika zwiększa opory przepływu układu. Zwiększanie wartości strumienia odsysania podwyższa oczywiście skuteczność filtracji powietrza w multicyklonie, wymaga to jednak zmian parametrów ejektora, co powoduje dodatkowy wzrost oporów przepływu układu wylotowego, a w konsekwencji prowadzi do zauważalnego spadku mocy silnika. Przy stosowanych wartościach stopnia odsysania  $m_0 = (5\div 15)\%$  opory te są jednak na tyle małe, że spadek mocy silnika jest znikomy. Nadmierne (ponad 15%) zwiększanie wartości strumienia odsysania pociąga za sobą wzrost wymiarów filtru, ze względu na zwiększenie (zgodnie z zależnością 2) o wartość  $Q_S$  strumienia wlotowego  $Q_0$  wpływającego do filtra.

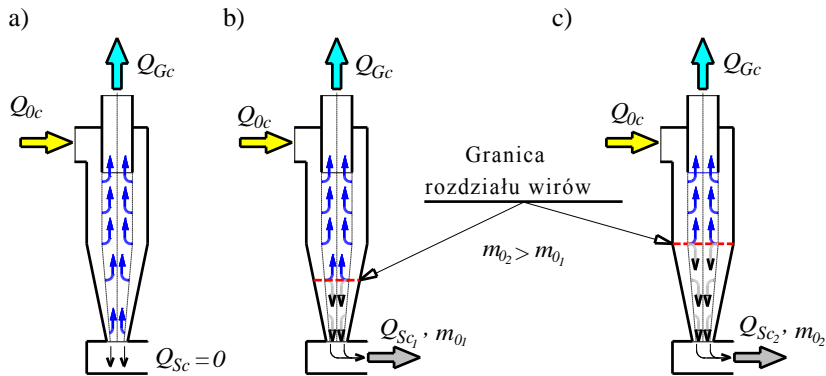
$$Q_0 = Q_G + Q_S \quad (2)$$

Zwiększenie strumienia  $Q_0$  przy zachowaniu tego samego pola przekroju poprzecznego wlotu cyklonu prowadzi do wzrostu oporów przepływu multicyklonu, a w konsekwencji do spadku mocy silnika.

Wyjaśnienie zjawiska wpływu odsysania pyłu z osadnika filtru bezwładnościowego (multicyklonu) na skuteczność filtracji nie jest zjawiskiem prostym. Wynika to z złożonego ruchu aerozolu w cyklonie. Wprowadzony w ruch wirowy zanieczyszczony gaz porusza się w pierwszej fazie ruchem śrubowym ku dołowi części stożkowej cyklonu tworząc tzw. wir zewnętrzny. Wir ten przenosi się do osadnika pyłu powodując wirowanie znajdującego się tam i odseparowywanego pyłu, a następnie przechodzi w ruch śrubowy ku rurce wylotowej cyklonu tworząc wir wewnętrzny. Zmiana kierunku ruchu wirów w dolnej części cyklonu powoduje powstawanie w osadniku pyłu podciśnienia.

Wytworzenie w cyklonie strumienia odsysania  $Q_{Sc}$  powoduje, że strumień zanieczyszczonego pyłem powietrza wlotowego  $Q_{0c}$ , który ruchem śrubowym (wir zewnętrzny) przemieszcza się do dna części stożkowej cyklonu nie zawraca w całości w kierunku wylotu cyklonu, jako strumień zwrotny – wir wewnętrzny. W obszarze dna części stożkowej cyklonu powstaje wir promieniowy od ściany do osi cyklonu, a następnie ku otworowi wlotowemu do osadnika (rys. 7). W efekcie pewna część strumienia powietrza o wartości  $Q_{Sc}$  oddziela się i wypływa ze strefy części stożkowej cyklonu otworem

upustowym do osadnika pyłu, porywając ze sobą odseparowane ziarna pyłu większych rozmiarów, co powoduje wzrost skuteczności cyklonu.

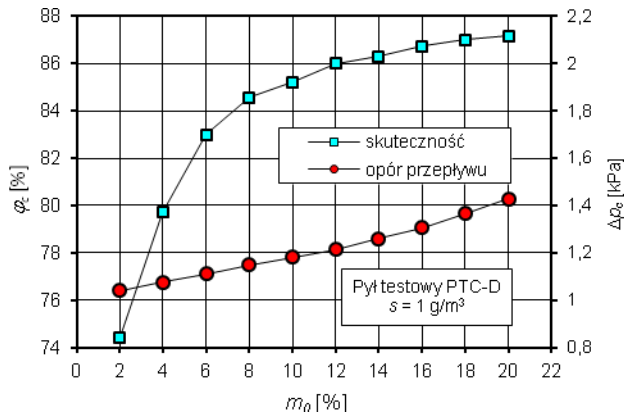


**Rys. 7. Przepływ strumieni powietrza przez cyklon zwrotny z wlotem stycznym:**  
 a) bez odsysania, b), c) z odsysaniem o różnej intensywności [13],  $Q_{0c}$  - strumień powietrza wlotowego,  $Q_{Sc}$  - strumień odsysania,  $Q_{Gc}$  - strumień oczyszczonego powietrza

Wzrost wartości strumienia odsysania  $Q_{Sc}$  (stopnia odsysania  $m_0$ ) powoduje, że umowna granica rozdzielająca oba wiry znajduje się w coraz większej odległości od otworu upustowego (rys. 7), a objętość cyklonu objęta strumieniem odsysania jest coraz większa. Jednocześnie następuje wzrost prędkości osiowej strumienia w obszarze dna części stożkowej cyklonu, co skutkuje wzrostem prędkości (w kierunku osadnika) ziaren pyłu znajdujących się w tej strefie. Stąd udział liczbowy większych ziaren pyłu w strumieniu wylotowym oraz ich rozmiar systematycznie maleje, a skuteczność cyklonu ma coraz większą wartość.

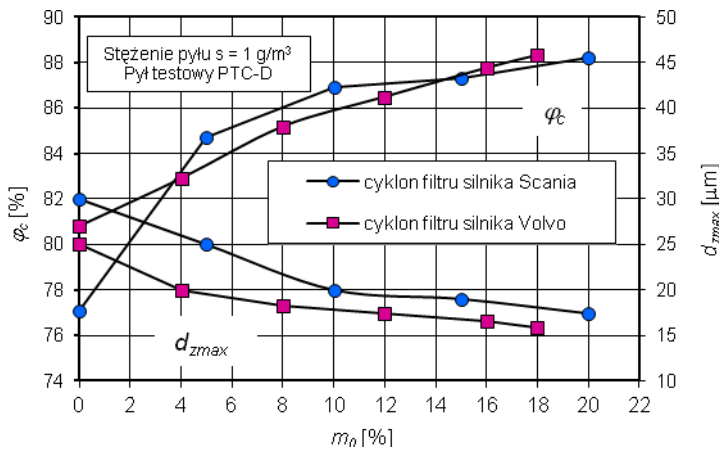
Zwiększanie wartości stopnia odsysania  $m_0$  powoduje intensywny wzrost skuteczności filtracji cyklonu, ale tylko do pewnej granicy. Dla cyklonu przelotowego z wlotem osiowym zmiana stopnia odsysania powoduje gwałtowny wzrost skuteczności filtracji cyklonu w zakresie  $m_0 = (2 \div 10)\%$  (rys. 8). Przy dalszym wzroście stopnia odsysania wzrost skuteczności filtracji jest nieznaczny. Zmiana stopnia odsysania w zakresie  $m_0 = (2 \div 20)\%$  powoduje wzrost oporu przepływu cyklonu z 1,04 kPa do 1,42 kPa, a więc o ponad 35%.





Rys. 8. Wpływ stopnia odsysania  $m_0$  na skuteczność i opór przepływu cyklonu przelotowego [16]

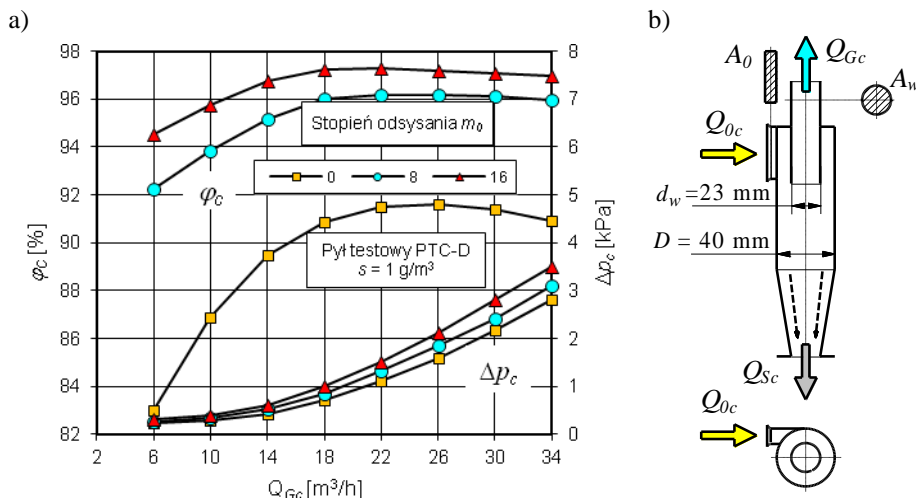
Z przedstawionych na rys. 9 charakterystyk skuteczności  $\varphi_c$  i dokładności filtracji  $d_{zmax}$  dwóch cyklonów przelotowych wynika, że w przypadku cyklonu będącego elementem filtru powietrza pojazdu spacyjnego KTO Rosomak gwałtowny wzrost skuteczności  $\varphi_c$  następuje przy wzroście stopnia odsysania w zakresie do  $m_0 = 10\%$ , a dla cyklonu z filtru powietrza pojazdu Volvo wynika, że wartością optymalną jest stopień odsysania  $m_{0opt} = 16\%$  (rys. 9). Wzrost stopnia odsysania powoduje wzrost dokładności filtracji obu badanych cyklonów. Zmiana stopnia odsysania w zakresie do  $m_0 = 18\%$  następuje spadek wartości rozmiarów maksymalnych ziaren pyłu z  $(30 \div 25) \mu m$  do  $(17,4 \div 15,8) \mu m$ .



Rys. 9. Charakterystyki skuteczności i dokładności filtracji cyklonów przelotowych w funkcji stopnia efektywnego odsysania pyłu  $m_0$  [11]

Na rysunku 10 pokazano wpływ stopnia odsysania  $m_0$  na charakterystyki skuteczności filtracji powietrza  $\varphi_c = f(Q_{Gc})$  i oporu przepływu  $\Delta p_c = f(Q_{Gc})$  cyklonu zwrotnego z wlotem stycznym D40 stosowanego w multicyklonach filtrów powietrza pojazdów gąsienicowych. Charakter przebiegu zależności  $\varphi_c = f(Q_{Gc})$  i  $\Delta p_c = f(Q_{Gc})$  jest typowy dla tego rodzaju cyklonów. Odsysanie pyłu z osadnika cyklonu powoduje przesunięcie charakterystyk omal

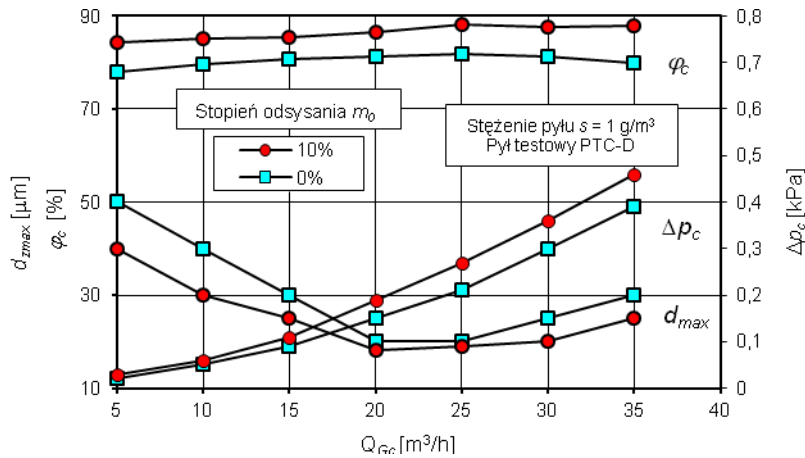
równoległe w stronę wyższych wartości. Znaczny wzrost skuteczności filtracji cyklonu przelotowego D40 następuje przy zmianie stopnia odsysania  $m_0$  w zakresie (0÷8)% (rys. 10).



**Rys. 10. Wpływ stopnia odsysania  $m_0$  na charakterystyki cyklonu zwrotnego z wlotem stycznym D-40:**  
**a) skuteczność  $\varphi_c = f(Q_{Gc})$  i opór przepływu  $\Delta p_c = f(Q_{Gc})$ , b) schemat funkcjonalny cyklonu zwrotnego z wlotem stycznym D-40 [15]**

Badany cyklon w zakresie strumienia powietrza  $Q_{Gc} = (6÷34) m^3/h$  i dla stopnia eiekcyjnego odsysania  $m_0 = 8\%$ , osiąga skuteczność filtracji  $\varphi_c=96,2\%$ , a więc o około 5% więcej niż bez odsysania. Wzrost stopnia eiekcyjnego odsysania o dalsze 8% spowodował wzrost skuteczności filtracji zaledwie o około 1%. Zastosowanie eiekcyjnego odsysania pyłu z osadnika filtru powoduje także wzrost oporu przepływu  $\Delta p_c$  cyklonu. Zwiększenie (o wartość  $Q_{Sc}$ ) strumienia wlotowego  $Q_{0c}$ , skutkuje wzrostem prędkości przepływu  $v_0$  powietrza przez króciec wlotowy cyklonu. Ponieważ opór przepływu  $\Delta p$  jest funkcją kwadratu prędkości  $\Delta p_c=f(v_0^2)$  dlatego też nieznaczne zmiany prędkości wlotowej  $v_0$  powodują istotne zmiany  $\Delta p_c$ .

Charakterystyki skuteczności  $\varphi_c = f(Q_{Gc})$  i dokładności filtracji  $d_{zmax} = f(Q_{Gc})$  oraz oporu przepływu  $\Delta p_c = f(Q_{Gc})$  cyklonu przelotowego z wlotem osiowym filtru powietrza silnika samochodu ciężarowego Volvo z odsysaniem pyłu ( $m_0 = 10\%$ ) i bez odsysania przedstawiono na rys. 11.



Rys. 11. Charakterystyka skuteczności filtracji  $\varphi_c = f(Q_{Gc})$  i  $d_{zmax} = f(Q_{Gc})$  oraz oporów przepływu  $\Delta p_c = f(Q_{Gc})$  cyklonu przelotowego filtru powietrza silnika samochodu ciężarowego Volvo z odsysaniem pyłu ( $m_0 = 10\%$ ) i bez odsysania [11]

Stosując efektywne odsysanie pyłu na poziomie  $m_0 = 10\%$  charakterystyka skuteczności filtracji  $\varphi_c = f(Q_{Gc})$  badanego cyklonu przyjmuje wyższe wartości i różni się nieznacznie co do przebiegu. Zastosowanie odsysania spowodowało wzrost skuteczności filtracji cyklonu Volvo do  $\varphi_c = 88,1\%$  czyli o 7,7%. Taki charakter przebiegu skuteczności filtracji  $\varphi_c = f(Q_{Gc})$  zgodny jest z informacjami literaturowymi i innymi wynikami badań cyklonów [1, 3, 4, 6].

Z przedstawionych wyników badań widać wyraźny wpływ odsysania pyłu z osadnika na dokładność filtracji  $d_{zmax} = f(Q_{Gc})$  cyklonów przelotowych. Pracujący bez odsysania cyklon filtru powietrza silnika samochodu Volvo uzyskuje największą dokładność filtracji  $d_{zmax} = 20 \mu m$  dla strumienia powietrza  $Q_{Gc} = (20 \div 30) m^3/h$ . Praca cyklonu w tym zakresie strumienia powietrza  $Q_{Gc}$  i przy efektywnym odsysaniu pyłu na poziomie  $m_0 = 10\%$  charakteryzuje się zmniejszeniem wartości rozmiaru maksymalnych ziaren pyłu do  $d_{zmax} = (18,2 \div 19) \mu m$ . W tym też zakresie strumienia powietrza  $Q_{Gc}$  cyklon pracuje z maksymalną skutecznością. Wzrost jak i spadek strumienia powietrza poza zakres  $Q_{Gc} = (20 \div 30) m^3/h$  powoduje wzrost rozmiarów maksymalnych ziaren pyłu  $d_{zmax}$  przy nieznacznym spadku skuteczności filtracji.

Wraz ze wzrostem strumienia powietrza  $Q_{Gc}$  następuje paraboliczny wzrost oporów przepływu  $\Delta p_c$  cyklonu, co jest zgodne z teorią działania cyklonów. Dla maksymalnej wartości strumienia powietrza  $Q_{Gc} = 35 m^3/h$  opór przepływu cyklonu filtru powietrza silnika samochodu Volvo przyjmuje odpowiednio wartości:  $\Delta p_c = 0,39 kPa$  bez odsysania i  $\Delta p_c = 0,46 kPa$  z odsysaniem  $m_0 = 10\%$ , co stanowi wzrost o 18%.

#### 4. Nierównomierność odsysania

Z analizy dostępnych rozwiązań konstrukcyjnych multicyklonów i ich układów odsysania pyłu z osadnika wynika, że jeżeli osadnik pyłu obejmuje swym zasięgiem kilkadziesiąt cyklonów, a odsysanie pyłu z osadnika następuje dwoma lub jednym króćcem, to występuje wtedy [5, 6, 12, 15, 17, 19, 20, 36]:

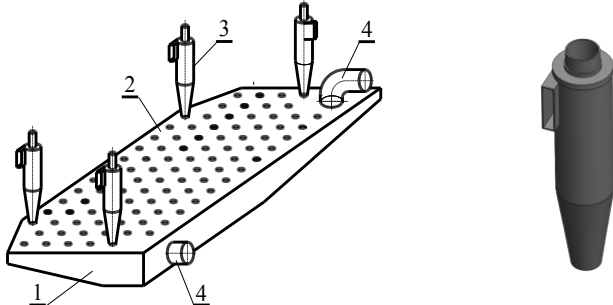
- zróżnicowanie wartości strumieni odsysania z poszczególnych cyklonów,
- wzajemne oddziaływanie zawirowanych strumieni wypływających z cyklonów i wpływających do wspólnej komory osadnika pyłu,
- możliwość przepływów zwrotnych w cyklonach umiejscowionych na obrzeżu multicyklonu.

Powyższe zjawiska mogą być przyczyną mniejszej skuteczności multicyklonu, niż wynikałoby to z zastosowanego stopnia odsysania dla pojedynczych cyklonów. Wyniki badań potwierdzających tę tezę przedstawiono w pracach [5, 6, 15, 17].

Skuteczność filtrów multicyklonowych zależy więc nie tylko od właściwego doboru ich parametrów konstrukcyjnych i przepływowych, ale w równym stopniu od równomiernego rozdziału aerozolu na wszystkie cyklony oraz od właściwej organizacji układu odprowadzania odseparowanego pyłu. W dostępnej literaturze brak jest analiz teoretycznych i badań eksperymentalnych wyjaśniających ten problem.

Badania wpływu konstrukcji multicyklonu i jego osadnika pyłu na wartości strumieni odsysanych  $Q_{sc}$  z pojedynczych cyklonów przeprowadzono z wykorzystaniem multicyklonu filtra powietrza silnika pojazdu specjalnego T-72.

Osadnik pyłu badanego multicyklonu jest pustą wewnątrz komorą o kształcie zbliżonym do płaskiego prostopadłościanu. Na prostokątnej płycie, będącej górną ścianą osadnika pyłu umocowanych jest 96 cyklonów zwrotnych z wlotem stycznym o średnicy wewnętrznej  $D = 40$  mm rozmieszczonych w rzędach i kolumnach. Odsysanie pyłu z osadnika multicyklonu realizowane jest punktowo dwoma króćcami umieszczonymi na ścianie czołowej osadnika pyłu i płytce mocującej cyklony – rys. 12.



Rys. 12. Konstrukcja multicyklonu T72 i osadnika pyłu filtra powietrza pojazdu gąsienicowego specjalnego:

1 – osadnik pyłu, 2 – płyta mocująca cyklony, 3 – cyklon, 4 – króćce odsysania

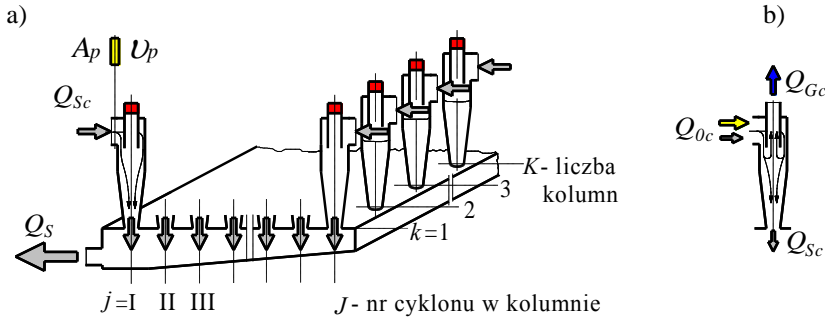
Wartości strumieni odsysanych  $Q_{sc}$  z pojedynczych cyklonów multicyklonu filtra powietrza określono metodą pośrednią polegającą na pomierzeniu wartości strumienia

wlotowego  $Q_{oc}$  do cyklonu, który dla przypadku, gdy, strumień wylotowy z cyklonu  $Q_{Gc} = 0$ , przyjmuje wartość  $Q_{oc} = Q_{Sc}$ . Przypadek taki zaistnieje wtedy, kiedy otwory wylotowe z wszystkich cyklonów multicyklonu zostaną zasłonięte, a z osadnika pyłu multicyklonu odsysany jest strumień  $Q_{SF}$  będący sumą strumieni odsysanych  $Q_{Sc}$  z pojedynczych cyklonów – rys. 13.

$$Q_{SF} = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Q_{Sc_{jk}}, \quad (3)$$

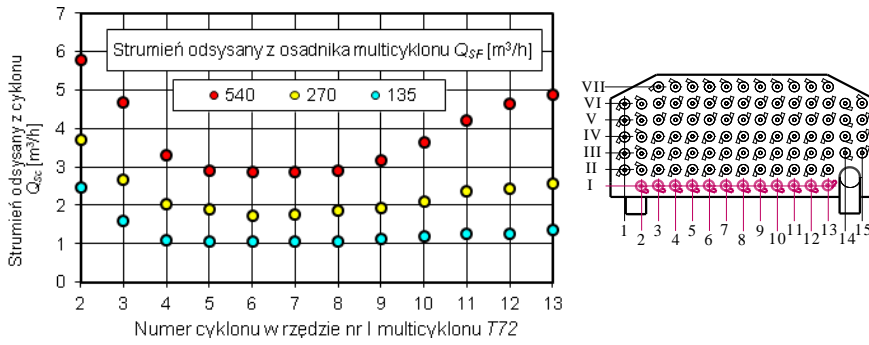
gdzie: I, II, III, ..., j, ..., J – numer kolejny cyklonu w kolumnie - liczba rzędów,  
 1, 2, 3, ..., k, ..., K – numer kolejny cyklonu w rzędzie - liczba kolumn.

Wartości strumieni odsysanych  $Q_{Sc}$  określono z pojedynczych skrajnych cyklonów multicyklonu filtru powietrza. Nie jest możliwe określenie wartości strumieni  $Q_{Sc}$  z cyklonów znajdujących się w środkowej części multicyklonu zaproponowaną metodą. Badania wykonano w warunkach, gdy przez osadnik multicyklonu przepływa kolejno strumień odsysania  $Q_{SF}$  o wartościach wynikających z wartości stopnia odsysania odpowiednio  $m_0 = 4\%$ ,  $8\%$  i  $16\%$  i nominalnego zapotrzebowania powietrza przez silnik  $Q_{Sil} = Q_G = 3400 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $0,944 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

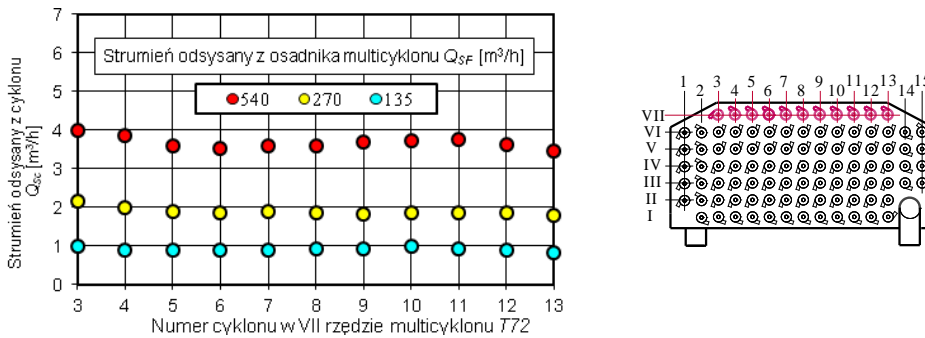


**Rys. 13. Przemieszczanie się strumienia  $Q_{Sc}$  w cyklonie: a) w czasie pomiaru, b) podczas pracy, I, II, III, ..., j, ..., J – numer kolejny cyklonu w kolumnie – liczba rzędów; 1, 2, 3, ..., k, ..., K – numer kolejny cyklonu w rzędzie – liczba kolumn [15]**

Strumienie odsysane  $Q_{Sc}$  z pojedynczych cyklonów multicyklonu przyjmują bardzo zróżnicowane wartości (rys. 14÷15). Niezależnie od wartości strumienia odsysania  $Q_{SF}$  z osadnika pyłu, dla cyklonów, których wylot strumieni odsysania znajduje się blisko króćców odsysania z osadnika multicyklonu, wartości  $Q_{Sc}$  są największe i zawierają się w zakresie  $Q_{Sc} = (2,5 \div 5,95) \text{ m}^3/\text{h}$  – rys. 14. Strumienie  $Q_{Sc}$  odsysane z cyklonów środkowych badanego rzędu multicyklonu, a znajdujących się w pewnym oddaleniu od króćców odsysania, przyjmują wartości w granicach  $Q_{Sc} = (1,05 \div 2,95) \text{ m}^3/\text{h}$ , a więc są o ponad 50% mniejsze. W ostatnim (VII) rzędzie cyklonów, strumienie odsysane z pojedynczych cyklonów przyjmują wartości o połowę mniejsze (rys. 14) niż w rzędzie pierwszym (I) multicyklonu. Mniejsze są też różnice między maksymalnymi a minimalnymi wartościami strumieni odsysanych  $Q_{Sc}$  i dla  $Q_{SF} = 540 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$ ),  $270 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $0,075 \text{ m}^3/\text{s}$ ),  $135 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $0,0375 \text{ m}^3/\text{s}$ ) przyjmują odpowiednio wartości 11%, 14% i 16%.



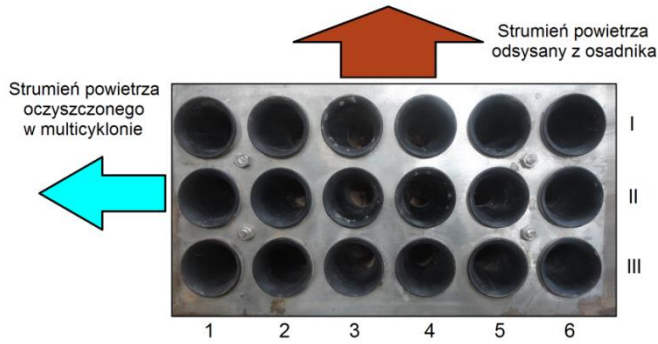
Rys. 14. Wartości strumieni odsysanych  $Q_{Sc}$  z pojedynczych cyklonów I rzędu multicyklonu T72 [15, 20]



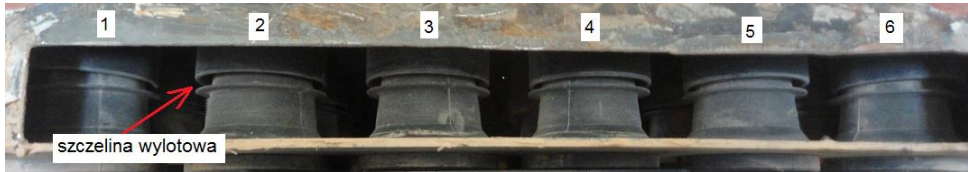
Rys. 15. Wartości strumieni odsysanych  $Q_{Sc}$  z cyklonów VII rzędu multicyklonu T72 [15, 20]

W multicyklonie zbudowanym z dużej liczby cyklonów mających wspólny osadnik pyłu, zastosowanie tylko jednego lub dwóch króćców odsysających pył z osadnika powoduje, że odległości otworów wylotowych strumieni odsysanych poszczególnych cyklonów od króćca układu odsysającego są niejednakowe, co stwarza w naturalny sposób różnice między wartościami strumieni odsysanych z pojedynczych cyklonów i może mieć negatywny wpływ na skuteczność filtracji pojedynczych cyklonów i multicyklonu. Wyniki takich badań przedstawiono na rys. 18.

Badano multicyklon zbudowany z cyklonów przelotowych z wlotem osiowym. Cyklony ustawione są w górnej płycie osadnika w trzech rzędach (I, II, III) i w sześciu kolumnach (1 ... 6) – rys. 16.

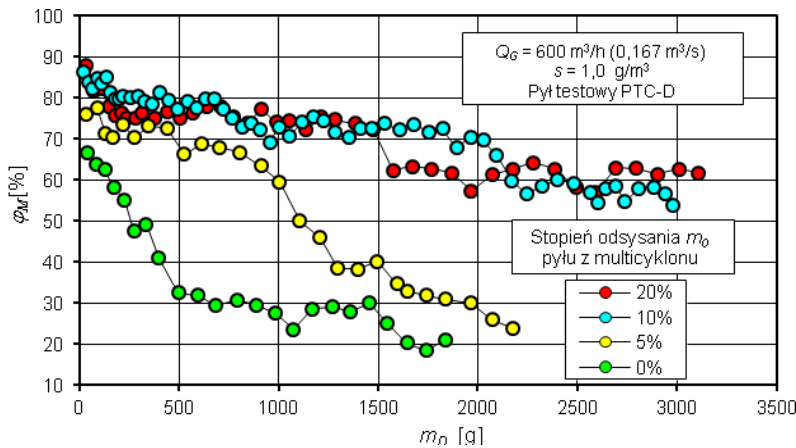


Rys. 16. Rozmieszczenie cyklonów w badanym multicyklonie: I, II, III – numery rzędu; 1, 2, ... 6 – numer kolumny (kolejny cyklon w rzędzie)



Rys. 17. Widok szczelin wylotowych pyłu cyklonów od strony kolektora odsysającego pył (rzęd nr I) multicyklonu: 1, 2, 3, ... , 6 – numer kolumny [8]

Wraz ze wzrostem masy pyłu dostarczonej z powietrzem do multicyklonu jego skuteczność filtracji systematycznie maleje, z tym, że im mniejsza jest wartość stopnia odsysania pyłu  $m_0$ , tym spadek skuteczności jest bardziej intensywny – rys. 18. Z chwilą rozpoczęcia pracy multicyklonu, przy stopniu odsysania pyłu  $m_0 = 20\%$ , jego skuteczność miała wartość  $\varphi_M = 86,25\%$ , a po dostarczeniu ponad 3 kg pyłu skuteczność zmalała 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.



Rys. 18. Skuteczność filtracji multicyklonu dla różnych stopni  $m_0$  efektywnego odsysania pyłu z osadnika [8]



Zaobserwowane zjawisko spadku skuteczności filtracji multicyklonu wraz z ilością masy pyłu dostarczanej z powietrzem do filtra jest skutkiem mniejszej skuteczności multicyklonu, niż wynikałoby to z zastosowanego stopnia odsysania dla pojedynczych cyklonów. Wpływ na to mają: zróżnicowanie wartości strumieni odsysania z poszczególnych cyklonów, wzajemne oddziaływanie zawirowanych strumieni wypływających z cyklonów oraz możliwość wystąpienia przepływów zwrotnych w cyklonach umiejscowionych na obrzeżu multicyklonu.

Czynniki te powodują

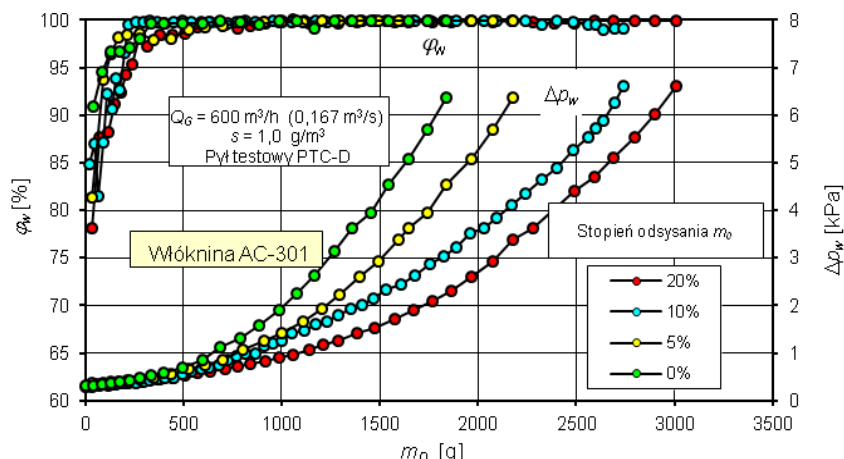
- 1) Trwałe osadzanie się pyłu na powierzchniach wewnętrznych elementów wylotowych cyklonu tworzących szczelinę, którą następuje wypływ odsysanego pyłu. Wraz z upływem czasu pracy multicyklonu masa osadów pyłowych w szczelinie jest coraz większa, co w efekcie powoduje utrudniony wypływ strumienia odsysania z cyklonu.
- 2) Trwałe osadzanie się pyłu na 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. 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. 19).



**Rys. 19. Widok szczelin wylotowych pyłu z cyklonów po zadozowaniu do filtra 2150 g pyłu i pracy ze stopniem odsysania pyłu  $m_o = 5\%$  – widok od strony kolektora odsysającego pył: 1, 2, 3, ... , 6 – numer kolejny cyklonu w kolumnie (strzałką zaznaczono cyklony, w których szczeliny zostały zablokowane pyłem) [8]**

Zjawiska te, zmniejszające skuteczność multicyklonu wraz z masą pyłu dostarczaną do filtra, zachodzą w cyklonach multicyklonu tym intensywniej, im mniejszą wartość ma stopień odsysania pyłu z osadnika. Wpływ tego zjawiska na charakterystyki przegrodowego wkładu filtracyjnego wykonanego z włókniny AC-301, będącego drugim stopniem filtracji za badanym multicyklonem, pokazano na rys. 20





Rys. 20. Skuteczność filtracji i opory przepływu wkładu pracującego (włóknina AC-301), jako drugi stopień filtracji za multicyklonem dla różnych stopni  $m_0$  efektywnego odsysania pyłu z osadnika [8]

Wraz ze wzrostem masy pyłu dostarczonej do filtru, opór przepływu  $\Delta p_w$  wkładu cały czas systematycznie rośnie, co zgodne jest z teorią filtracji w filtrach przegrodowych. Intensywność wzrostu oporu przepływu  $\Delta p_w$  jest tym większa im mniejsza jest wartość stopnia odsysania pyłu  $m_0$ . Dlatego wartość oporu dopuszczalnego  $\Delta p_{wdop} = 6 \text{ kPa}$  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  $\Delta p_{wdop} = 6 \text{ kPa}$  po dostarczeniu do układu  $m_D = 2,9 \text{ kg}$  pyłu. Przy stopniu odsysania  $m_0 = 10\%$  jest to wartość  $m_D = 2,7 \text{ kg}$ , a dla  $m_0 = 5\%$  tylko  $m_D = 2,1 \text{ kg}$  pyłu. Praca multicyklonu bez odsysania pyłu z osadnika powoduje, że wkład filtracyjny uzyskuje opór przepływu  $\Delta p_{wdop} = 6 \text{ kPa}$  po dostarczeniu do układu  $m_D = 1,8 \text{ kg}$  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 wartości  $\Delta p_{fdop}$  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 – zwiększaniem masy pyłu dostarczonego do układu.

## 5. Możliwości organizacji procesu odsysania pyłu z filtrów multicyklonowych silników pojazdów mechanicznych

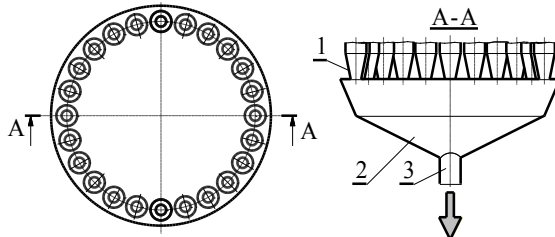
Jak wykazały dotychczasowe doświadczenia, zasadniczą przyczyną nierównomierności strumieni odsysających z cyklonów może być zróżnicowanie oporów przepływu tych strumieni w osadniku filtra, na odcinku cyklon – króciec odsysania, dla poszczególnych cyklonów. Wynika ono przede wszystkim z niejednakowych długości wspomnianych odcinków, zdeterminowanych położeniem cyklonu względem króćca odsysania oraz oddziaływaniem ścian osadnika na strumienie odsysane z cyklonów położonych w ich

poblizu, a także ewentualnym występowaniem obszarów zawirowań w sumarycznym strumieniu odsysanym w osadniku.

Prowadzone z udziałem autora prace teoretyczno – eksperymentalne [5, 6] oraz analizy i badania własne [12, 14, 15, 17-20], doprowadziły do ustalenia trzech podstawowych sposobów prowadzących do uzyskania względnej równomierności strumieni odsysanych z pojedynczych cyklonów:

- zachowanie symetrii położenia wszystkich cyklonów w odniesieniu do króćca odsysania,
- wytworzenie jednakowych oporów przepływu strumieni odsysanych przez celowe, odpowiednio dobrane ich dławienie z tych cyklonów, dla których opory przepływu są mniejsze niż dla pozostałych,
- sposób kombinowany – będący odpowiednim konstrukcyjnym połączeniem obu wymienionych zabiegów.

Jedyną możliwością uzyskania symetrii położenia jest umieszczenie wszystkich cyklonów wzdłuż obwodu koła. To sprawia, że w środkowej części płyty pozostaje niewykorzystana powierzchnia, tym większa im więcej cyklonów wchodzi w skład filtra – rys. 21. Konsekwencją symetrycznej budowy multicyklonu o dużej liczbie cyklonów są duże wymiary płyty osadnika, na której zamocowane są cyklony. W komorach silnikowych pojazdów nie ma zwykle nadmiaru wolnej przestrzeni, stąd też wynika mała praktyczna przydatność tego rodzaju budowy multicyklonu.



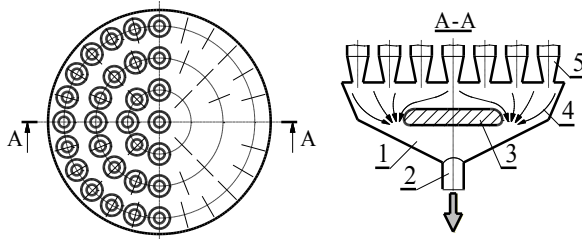
**Rys. 21. Schemat osadnika z zachowaniem symetrii położenia wszystkich cyklonów w odniesieniu do króćca odsysania: 1 – cyklon, 2 – osadnik, 3 – króciec przewodu odsysania**

Wyrównywanie oporów przepływu strumieni odsysających cyklonów przez dławienie i ukierunkowanie strumieni wybranych można realizować następującymi sposobami:

- przez umieszczenie w osadniku multicyklonu pośredniego wlotu do króćca odsysania,
- przez podział komory osadnika na niezależne kanały,
- za pomocą elementów dławiących przepływ strumienia odsysania umieszczonych na wylotach wybranych cyklonów.

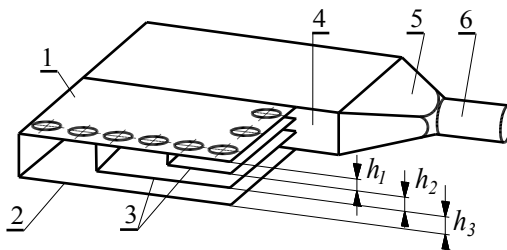
Wlot pośredni strumieni odsysania z cyklonów w osadniku pyłu można utworzyć przez wprowadzenie do osadnika ukształtowanej przegrody (deflektora), nad wlotem króćca odsysania. Powinien on zapewnić pożądany rozkład linii prądu strumieni odsysania wypływających z pojedynczych cyklonów. Przykład takiego rozwiązania pokazano na przykładzie osiowosymetrycznego osadnika – rys. 22.

Trzeba podkreślić, że opisane rozwiązanie konstrukcyjne jest trudne do opracowania gdyż wymaga zastosowania złożonego modelu obliczeniowego, a następnie skomplikowanych i czasochłonnych badań eksperymentalnych.



**Rys. 22. Schemat osadnika z wlotem pośrednim do przewodu odsysania: 1 – osadnik, 2 – króciec przewodu odsysania, 3 – przegroda (deflektor), 4 – linie prądu strumienia, 5 – cyklon**

Kolejny sposób prowadzący do uśrednienia wartości strumienia odsysania z pojedynczych cyklonów, polega na podziale osadnika kilkoma przegrodami i utworzeniu w ten sposób niezależnych, odizolowanych od siebie kanałów odsysania wewnątrz osadnika, przyporządkowanych określonym grupom pojedynczych cyklonów – rys. 23. Wysokości kanałów  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ , utworzonych przez przegrody w osadniku należy dobrać pod względem uzyskania jednakowych oporów przepływu przez kanały. Osiągnięcie pełnej zgodności oporów, przez dobór geometrii kanałów wyłącznie na drodze obliczeniowej, nie jest możliwe z uwagi na dość złożony przepływ. Dlatego ostatecznego doboru wysokości kanałów należy dokonać w czasie badań eksperymentalnych.



**Rys. 23. Schemat ideowy podziału osadnika na niezależne kanały: 1 – płyta mocowania cyklonów, 2 – dno osadnika, 3 – przegrody, 4 – ściana pionowa, 5 – kanał przejściowy, 6 – króciec odsysania**

Każdy z indywidualnych kanałów odsysania w osadniku powinien obejmować niezbyt liczną grupę cyklonów. Na szerokości kanału mogą być 3...4 cyklony, a na długości 1...4, w zależności od wysokości kanału w miejscu, w którym następuje odsysanie z cyklonów. Jeżeli na szerokości filtra jest więcej cyklonów, to należy komorę osadnika podzielić (rys. 28) szczelną ścianą pionową 4, tak by w segmentach powstałych z podziału szerokości mieściła się wymagana liczba cyklonów. Każdemu segmentowi winien być przyporządkowany oddzielny króciec odsysania.

Ten sposób kształtowania osadnika, w przeciwieństwie do poprzedniego, jest znacznie łatwiejszy do zaprojektowania. Tworzenie niezależnych kanałów nadaje się w szczególności do modyfikowania osadników w istniejących już, eksploatowanych filtrach, które nie zapewniają spodziewanej skuteczności odpylania.

## 6. Posumowanie

Do filtracji powietrza wlotowego silników pojazdów mechanicznych eksploatowanych w warunkach dużego stężenia pyłu w powietrzu ( $s = 1 \text{ g/m}^3$  i powyżej) stosowane są filtry dwustopniowe, gdzie pierwszym stopniem filtracji powietrza jest filtr bezwładnościowy (multicyklon), a drugim papierowy wkład filtracyjny. Odseparowany przez cyklony multicyklonu pył jest gromadzony w wspólnym kolektorze (pojemniku), zwanym osadnikiem pyłu, skąd następnie jest usuwany eiekcyjnie strumieniem odsysającym. Najbardziej racjonalną i powszechnie stosowaną metodą wymuszenia strumienia odsysającego pył z osadnika filtru bezwładnościowego jest wykorzystanie strumienia spalin wypływających z silnika lub strumienia sprężonego powietrza.

Usuwanie (poprzez odsysanie) z osadnika filtru bezwładnościowego (multicyklonu) odseparowanego przez cyklony i zgromadzonego tam pyłu powoduje zauważalny wzrost skuteczności filtracji, ale tylko do wartości stopnia odsysania równego  $m_0 = (8\div 15)\%$ . Tym samym następuje wydłużenie (nawet o 50%) czasu pracy filtru powietrza limitowanego ustaloną wartością oporu dopuszczalnego  $\Delta p_{fdop}$ .

Eiekcyjny sposób usuwania pyłu z osadnika multicyklonu filtru dwustopniowego spełnia swoje zadanie, ale jest niedoskonały.

Jeżeli kilkadziesiąt jednakowych, ustawionych równolegle cyklonów, tworzących multicyklon ma wspólny osadnik pyłu, to filtr ten wykazuje, dla tych samych warunków przepływu aerozolu, mniejszą skuteczność filtracji niż pojedyncze cyklony. Przyczyną tego zjawiska może być zakłócenie procesu filtracji w wyniku nierównomierności rozdziału aerozolu na wszystkie cyklony i występowanie przepływów zwrotnych między nimi. W dostępnej literaturze brak jest analiz teoretycznych i badań eksperymentalnych wyjaśniających ten problem.

W multicyklonie zbudowanym z dużej liczby (50÷100 sztuk i więcej) cyklonów i mających wspólny osadnik pyłu, zastosowanie tylko jednego lub dwóch króćców odsysających pył z osadnika, powoduje, że odległości otworów wylotowych strumieni odsysanych z poszczególnych cyklonów od króćca układu odsysającego są niejednakowe. Powoduje to w naturalny sposób różnice między wartościami strumieni odsysanych z pojedynczych cyklonów rozmieszczonych na dużej powierzchni. Ma to negatywny wpływ na pracę pojedynczych cyklonów i całego multicyklonu. Widać to w postaci systematycznie malejącej (wraz z ilością masy pyłu dostarczonej z powietrzem – czasem pracy pojazdu) skuteczności filtracji multicyklonu. Z tym, że im mniejsza jest wartość stopnia odsysania pyłu  $m_0$ , tym spadek skuteczności jest bardziej intensywny.

Spowodowane jest to szczególną konstrukcją multicyklonu oraz niedoskonałością układu odsysania pyłu z osadnika. 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 może spowodować 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.

Następuje też bardziej intensywny przyrost oporu przepływu wkładu filtracyjnego będącego drugim (za multicyklonem) stopniem filtracji. Intensywność wzrostu oporu przepływu  $\Delta p_w$  wkładu filtracyjnego pracującego, jako drugi stopień filtracji jest tym większa im mniejsza jest skuteczność i dokładność 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, co zwiększą liczbę obsługuwanych, a tym samym koszty eksploatacji.

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. Taka konstrukcja może zapewnić uzyskanie jednakowych wartości strumieni odsysanych z wszystkich cyklonów. Najbardziej racjonalną i możliwą do praktycznego zastosowania metodą zapewniającą równomierną wartość strumieni odsysania z pojedynczych cyklonów jest metoda jednakowych oporów przepływu strumieni odsysanych. Pożądane efekty uzyskuje się poprzez odpowiednią zmianę struktury osadnika pyłu multicyklonu polegającą na podziale przestrzeni osadnika na niezależne segmenty i kanały obejmujące określoną liczbę cyklonów.

W bezwładnościowych filtrach cyklonowych zbudowanych z kilkudziesięciu cyklonów możliwe jest stosowanie różnych sposobów organizowania efektywnego odsysania. Wybór określonej metody i zastosowanego sposobu, zmierzającego do zapewnienia jednakowych wartości strumieni odsysania ze wszystkich pojedynczych cyklonów, zależy nie tylko od ich efektywności, ale także od formy multicyklonu, liczby cyklonów i konfiguracji odpylacza, ograniczeń przestrzennych w miejscu jego zainstalowania oraz od możliwości przeprowadzenia odpowiedniego zakresu badań.

The full text of the article is available in polish online on the website

<http://archiwummotoryzacji.pl>

Tekst artykułu w polskiej wersji językowej dostępny jest na stronie

<http://archiwummotoryzacji.pl>

## Literatura

- [1] Baczewski K, Hebda M. Filtracja płynów eksploatacyjnych. Radom MCNEMT, 1991/92.
- [2] Cenrtisep Air Cleaner, Materiały informacyjne firmy PALL Corporation, USA 2004.
- [3] Diesel Engine Air Filtration: Materiały informacyjne firmy PALL Corporation, USA, 2004.

- [4] Durst M, Klein G, Moser N. Filtration in Fahrzeugen. Materiały informacyjne firmy Mann+Hummel GMBH. Ludwigsburg Niemcy 2005.
- [5] Dzierżanowski P., Dziubak T.: Możliwości wykorzystania strumienia spalin wylotowych silnika tłokowego do odsysających układów eiekcyjnych odpylaczy bezwładnościowych powietrza wlotowego, Zakopane KONES '96.
- [6] Dzierżanowski P., Dziubak T.: Układ filtrujący powietrza z eiekcyjnym odsysaniem pyłu silnika samochodu ciężarowego, VI Międzynarodowe Sympozjum Instytutu Pojazdów Mechanicznych WAT, Warszawa – Rynia 1996.
- [7] Dzierżanowski P.: Bezwładnościowy odpylacz modułowy, Biuletyn WAT, vol. XXXV, nr 2 (402), 1986.
- [8] Dziubak T.: The effects of dust extraction on multi-cyclone and non-woven fabric panel filter performance in the air filters used in special vehicles. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2016; 18 (3): 348–357.
- [9] Dziubak T.: Operating fluids contaminants and their effect on the wear of elements of a motor vehicle's combustion engine, The Archives of Automotive Engineering - Archiwum motoryzacji, vol. 72, No. 2, 2016, str. 43-72.
- [10] Dziubak T., Szwedkowicz S.: Experimental research on nonwoven filter fabric for intake air filtration in the IC engine of an off-road vehicle. The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji, Vol 66, No 4, 2014: 3-22.
- [11] Dziubak T., Badania eksperymentalne cyklonów przelotowych filtrów powietrza silników spalinowych. Biuletyn WAT 2 (670) 2013, vol. LXII. (201-217).
- [12] Dziubak T.: The assessment of the possibilities of improvement of the extraction evenness, in multicyclone dedusters fitted in special vehicles, Combustion Engines, No. 4/2012 (151).
- [13] Dziubak T. Filtracja powietrza wlotowego do silników spalinowych pojazdów mechanicznych. Warszawa, WAT 2012: 122-127.
- [14] Dziubak T.: Analiza możliwości poprawy równomierności odsysania pyłu z odpylacza multicyklonowego. Silniki Spalinowe, nr 4/2011 (147), str. 69-78.
- [15] Dziubak T.: Analiza procesu filtracji powietrza wlotowego do silników pojazdów specjalnych, rozprawa habilitacyjna, WAT, Warszawa 2008.
- [16] Dziubak T.: Badania eksperymentalne cyklonu przelotowego do dwustopniowego filtru powietrza silnika czołgowego, Biuletyn WAT, vol. LI, nr 5, (597), 2002.
- [17] Dziubak T.: Badanie możliwości poprawy efektywności filtracji wielostopniowych filtrów powietrza wojskowych pojazdów mechanicznych, Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego KBN nr 0 T00A 003 14, WAT, Warszawa 2001.
- [18] Dziubak T.: Problemy odsysania pyłu z multicyklonu filtru powietrza silnika pojazdu mechanicznego eksploatowanego w warunkach dużego zapylenia powietrza, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN, z. 1 (125), 2001.
- [19] Dziubak T.: Badania możliwości poprawy efektywności odsysania pyłu z odpylacza multicyklonowego silnika wojskowego pojazdu gąsienicowego, Biuletyn WAT vol. XLIX, nr 7, (575), 2000.
- [20] Dziubak T.: Badania eksperymentalne eiekcyjnego układu odsysania zanieczyszczeń z filtru powietrza, Biuletyn WAT, XLVII, 10 (554), 1998.
- [21] Dziubak T.: Zapylenie powietrza wokół pojazdu terenowego, Wojskowy Przegląd Techniczny, nr 3, 1990.
- [22] Fitch J.: Clean Oil Reduces Engine Fuel Consumption, Practicing Oil Analysis Magazine, 11-12, 2002.

- [23] Grafe T., Gogins M., Barris M., Schaefer J., Canepa R.: Nanofibers in Filtration Applications in Transportation, Filtration 2001 International Conference and Exposition, Chicago, Illinois, December 3-5, 2001.
- [24] Graham K., Ouyang M., Raether T., Grafe T., McDonald B., Knauf P.: Polymeric Nanofibers in Air Filtration Applications, 5<sup>th</sup> Annual Technical Conference & Expo of the American Filtration & Separations Society, Galveston, Texas, April 9-12, 2002.
- [25] Greenfield R.R.: The Use of Cyclones for Control of Solids Emission from Fluidised Bed Boilers, Filtration & Separation, vol. 22, no 1, 1986.
- [26] Jaroszczyk T., Fallon S. L., Schwartz S. W.: Development of high dust capacity, high efficiency engine air filter with nanofibers, Journal of KONES Powertrain and Transport, vol. 15, no. 3, 2008.
- [27] Jaroszczyk T.: Air Filtration in Heavy-Duty Motor Vehicle Applications, Proc. Dust Symposium III Vicksburg MS, September 15-17, 1987.
- [28] Jaroszczyk T.: Problemy filtracji powietrza w silnikach spalinowych eksploatowanych w ciężkich warunkach, Silniki spalinowe, nr 2, 1978.
- [29] Kim H. T., Zhu Y., Hinds W. C., Lee K.W.: Experimental study of small virtual cyclones as particle concentrators, Journal of Aerosol Science, vol. 33, no 5, 2002.
- [30] Mann+Hummel Air Cleaners, [www.mann-hummel.com](http://www.mann-hummel.com).
- [31] Siuta T. Studium problem usprawnienia procesu filtrowania paliwa w silniku wysokoprężnym, Seria Mechanika (Monografia 330), Politechnika Krakowska, 2006.
- [32] Schaeffer J. W., Olson L. M.: Air Filtration Media for Transportation Applications, Filtration & Separation, vol. 35, no 2, 1998.
- [33] Szczeciński S. i inni.: Turbinowe napędy samochodów, WKŁ, Warszawa 1974.
- [34] Truhan J.: Filter Performance as the Engine Sees It, Filtration & Separation, vol. 34, no 12, 1997.
- [35] Ward G.: Nanofibres: media at the nanoscale, Filtration & Separation, vol. 42, no 7, 2005.
- [36] Warych J.: Oczyszczanie gazów – procesy i aparatura, WNT, Warszawa 1998.
- [37] [www.pall.com/pdfs/Aerospace-Defense-Marine/Mil\\_Mi\\_Centrisep\\_Brochure\\_AEMILMIENb\\_.pdf](http://www.pall.com/pdfs/Aerospace-Defense-Marine/Mil_Mi_Centrisep_Brochure_AEMILMIENb_.pdf)
- [38] [www.pall.com/pdfs/Aerospace-Defense-Marine/AECH47SEN.pdf](http://www.pall.com/pdfs/Aerospace-Defense-Marine/AECH47SEN.pdf).