



Badania eksperymentalne papieru filtracyjnego pracującego w systemie „cyklon–przegroda porowata”

TADEUSZ DZIUBAK, SEBASTIAN SZWEDKOWICZ

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

Streszczenie. Omówiono warunki pracy dwustopniowego systemu filtracji powietrza wlotowego silników spalinowych. Przeanalizowano właściwości materiałów filtracyjnych stosowanych jako przegrody porowate w filtrach powietrza pojazdów mechanicznych. Przedstawiono kryteria doboru papieru filtracyjnego pracującego jako drugi stopień filtracji powietrza. Przeanalizowano zależność określającą czas pracy filtra powietrza dwustopniowego. Zdefiniowano współczynnik chłonności pyłu k_m papieru filtracyjnego. Omówiono metodykę badań papieru filtracyjnego pracującego w systemie „cyklon przelotowy–przegroda porowata”. Zaprezentowano wyniki badań charakterystyk skuteczności i dokładności filtracji oraz oporów przepływu papieru filtracyjnego pracującego jako pierwszy i drugi stopień filtracji powietrza za cyklonem. Określono współczynniki chłonności pyłu k_m papieru filtracyjnego. Przedstawiono zmiany składu granulometrycznego pyłu za badawczym wkładem filtracyjnym.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, filtracja powietrza, charakterystyki filtrów, filtr dwustopniowy, papier filtracyjny

1. Wstęp

We współczesnych samochodach osobowych oraz lekkich samochodach dostawczych do filtracji powietrza stosuje się filtry jednostopniowe z przegrodą porowatą, którą jest najczęściej wkład papierowy. W samochodach ciężarowych i specjalnych, eksploatowanych w warunkach dużego zapylenia powietrza (stężenie około 1 g/m^3 i więcej), aby wydłużyć czas pracy wkładu filtracyjnego, stosuje się dwustopniowy system filtracji, gdzie pierwszym stopniem jest monocyklon lub multicyklon, a drugim przegroda porowata w postaci cylindrycznego wkładu papierowego.

Dobór wkładu filtracyjnego do filtra polega na określeniu powierzchni wytypowanego papieru wynikającej z kryterium dopuszczalnej prędkości filtracji $v_{F_{dop}} = 0,03-0,06$ m/s [1, 2, 6] oraz określonego zapotrzebowania powietrza przez silnik Q_{Sil} . Czas pracy filtra do uzyskania założonej wartości Δp_{fdop} zależy nie tylko od parametrów procesu filtracji strumienia powietrza na przegrodzie porowatej, lecz także od chłonności przegrody filtracyjnej wynikającej z jej struktury, a także od rozmiaru zatrzymywanych ziaren pyłu [6].

Do określenia wymaganego przebiegu pojazdu (czasu pracy filtra powietrza) w określonych warunkach eksploatacji niezbędna jest znajomość zdolności pochłaniania pyłu przez materiał filtracyjny. Właściwość tę charakteryzuje współczynnik chłonności pyłu k_m , którego wartość dla typowych papierów filtracyjnych na bazie celulozy i standardowych pyłów, o rozmiarach ziaren nieprzekraczających 80-100 μm , dochodzi najczęściej do 220 g/m^2 [6].

W dwustopniowym systemie filtracji powietrza do silnika na wkład filtracyjny trafia pył o znacznie mniejszych rozmiarach ziaren (nieprzekraczających $d_z = 15-25$ μm) [1, 7, 10], którego skład frakcyjny został zmieniony w pierwszym stopniu filtracji (multicyklonie bądź monocyklonie). Ma to zasadniczy wpływ na proces filtracji w przegrodzie porowatej. W efekcie następuje gwałtowniejszy (niż wtedy gdy na przegrodę dozowany jest pył o składzie standardowym) wzrost oporów przepływu, co skutkuje (przy ustalonej wartości oporu dopuszczalnego Δp_{fdop}) skróconym okresem użytkowania filtra powietrza.

Dla potrzeb projektowania dwustopniowego filtra powietrza niezbędna jest więc wiedza, w jakim stopniu zmodyfikowany skład frakcyjny pyłu wpływa na chłonność materiałów filtracyjnych. Taką informację można uzyskać podczas badań eksperymentalnych dwustopniowego filtra powietrza z wykorzystaniem obecnie funkcjonujących stanowisk i metod badawczych. Przeprowadzenie takich badań, gdy są to filtry pojazdów o dużym zapotrzebowaniu powietrza, na przykład filtry samochodów ciężarowych i specjalnych, jest bardzo pracochłonne, kosztowne i wymaga zużycia znacznej masy pyłu testowego. W pracach [6, 10] przedstawiono metodykę przeprowadzenia takich badań przy znacznym ograniczeniu czasu i kosztów badań. Jako pierwszy stopień filtracji wykorzystano pojedynczy cyklon zwrotny z wlotem stycznym, a jako drugi stopień filtracji przegrodę porowatą o odpowiednio dobranej powierzchni [6]. Natomiast w [10] zastosowano jako pierwszy stopień monocyklon o proporcjonalnie zmniejszonych wymiarach. W nowoczesnych samochodach ciężarowych jak i specjalnych multicyklony zbudowane są z cyklonów przelotowych, charakteryzujących się odmienną konstrukcją i innymi właściwościami filtracyjnymi, a przede wszystkim mniejszymi oporami przepływu w porównaniu do cyklonów zwrotnych. Dlatego celowe jest określenie wpływu zmiany składu frakcyjnego pyłu (spowodowanej działaniem cyklonu) na właściwości filtracyjne, a przede wszystkim na współczynnik chłonności przegrody porowatej pracującej jako drugi stopień filtracji.

2. Charakterystyka filtrów dwustopniowych

Jednostką napędową samochodów ciężarowych, pojazdów specjalnych, w tym wojskowych, są zazwyczaj w silniki o ZS o dużej mocy (czołg T-72 — $N_{Sil} = 574$ kW) oraz dużym zapotrzebowaniu powietrza (czołg T-72 — $Q_{Sil} = 3400$ m³/h). Pojazdy te eksploatowane są najczęściej w warunkach dużego zapylenia powietrza przekraczającego często 1 g/m³. Odseparowanie ze strumienia powietrza dużej masy zanieczyszczeń przy zachowaniu odpowiednio wysokiej skuteczności i dokładności filtracji jest poważnym problemem konstrukcyjnym i eksploatacyjnym. W warunkach dużego zapylenia powietrza stosuje się filtry wielostopniowe. Składają się one z szeregowo połączonych filtrów o różnej skuteczności i oporach przepływu. Pierwszym stopniem filtracji jest odpylacz bezwładnościowy (monocyklon lub multicyklon), a drugim jest ustawiona za nim szeregowo przegroda porowata najczęściej w postaci cylindrycznego wkładu lub kilku wkładów ustawionych równolegle obok siebie.

Monocyklon to zespół łopatek (ustawionych pochyło) mających na celu zawirowanie strumienia powietrza wlotowego i nadanie ziarnom pyłu siły bezwładności, w wyniku czego ziarna o większych rozmiarach i masie są kierowane na ściankę wewnętrzną obudowy filtra, gdzie wytracają prędkość i opadają grawitacyjnie do osadnika, a więc są odseparowane z powietrza. Monocyklon w postaci łopatek zawirujących może być umieszczony:

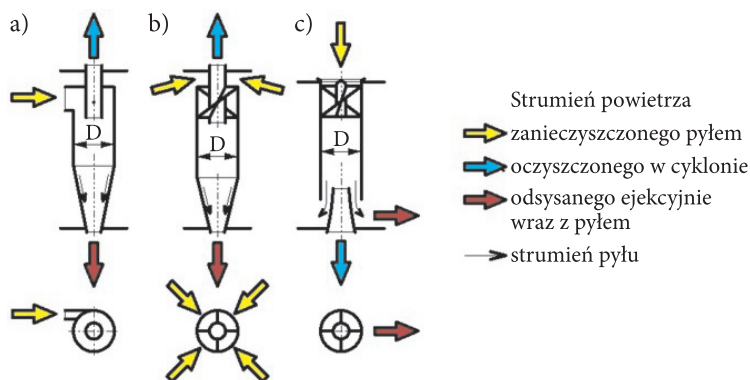
- na wkładzie filtracyjnym za pomocą cylindrycznej osłony i stanowi z nim jedną całość,
- wewnątrz obudowy filtra.

Skuteczność odpylania powietrza w wyniku zastosowania monocyklonu osiąga wartości 70%, a dokładność natomiast mieści się w zakresie 40-50 μm [1].

Multicyklon jest to zespół kilku lub kilkadziesiątu, a nawet kilkuset minicyklonów, których średnice wewnętrzne nie przekraczają $D = 40$ mm, wykonanych z tworzywa sztucznego lub blachy stalowej, ustawionych równolegle jeden obok drugiego i osadzonych we wspólnej płycie dolnej i górnej. Multicyklon może być zbudowany z cyklonów zwrotnych z wlotem stycznym, osiowym jak i cyklonów przelotowych (rys. 1).

Multicyklony charakteryzują się zdolnością odseparowywania znacznej masy pyłu z dużych objętości przepływającego powietrza przy stałym w trakcie eksploatacji, małym oporze przepływu rzędu 2-3 kPa, skutecznością sięgającą 96%, dokładnością zatrzymywania ziaren powyżej 15-35 μm oraz bezobsługowością w przypadku samoczynnego usuwania pyłu z osadnika [1, 3, 5]. Filtry typu „multicyklon-przegroda papierowa” cechuje duża skuteczność filtracji pyłu mineralnego sięgająca do 99,9% [1]. Wadą ich jest natomiast duża masa własna oraz duże wymiary zewnętrzne. Trwałość takich systemów filtracji jest determinowana przyrostem oporów przepływu wkładu papierowego.

W cyklonie w wyniku zawirowania strumienia powietrza ziarna pyłu pod wpływem siły bezwładności (zachowując swój ruch zbliżony do prostoliniowego, przy czym ich gęstość jest 2500 razy większa od gęstości powietrza) zostają odrzucone na



Rys. 1. Rodzaje cyklonów: a) zwrotny z wlotem stycznym; b) zwrotny z wlotem osiowym; c) przelotowy [5]

ścianki, po których zsuwają się do umieszczonego niżej zbiornika zanieczyszczeń [1, 3, 8]. Strumień powietrza wprawiany jest w ruch obrotowy w wyniku stycznego doprowadzenia go do cylindrycznej części cyklonu lub na skutek przepływu przez nieruchomy zawirowywacz.

Rozpatrując ruch ziarna w cyklonie, w płaszczyźnie prostopadłej do osi cyklonu działają na nie siła bezwładności F_d i aerodynamiczna siła oporu ośrodka F_r . Odśrodkowa siła bezwładności wyraża się zależnością [6]:

$$F_d = \frac{m_{zp} \cdot u_s^2}{r}, \quad (1)$$

gdzie: m_{zp} — masa cząstki pyłu;
 u_s — styczna składowa prędkości cząstki w danym punkcie;
 r — odległość od osi obrotu.

Siła ta powoduje ruch ziarna w kierunku ścianki cyklonu z prędkością u_r , któremu to ruchowi przeciwdziałła siła oporu ośrodka F_r określona zależnością [6]:

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

gdzie: A_p — powierzchnia projekcyjna ziarna (powierzchnia rzutu ziarna na płaszczyznę) w kierunku jego ruchu;
 u_r — składowa promieniowa prędkości ruchu ziarna;
 λ — współczynnik oporów tarcia.

Zgodnie z prawem Newtona można sformułować równanie ruchu ziarna pyłu w cyklonie, które ma postać [6]:

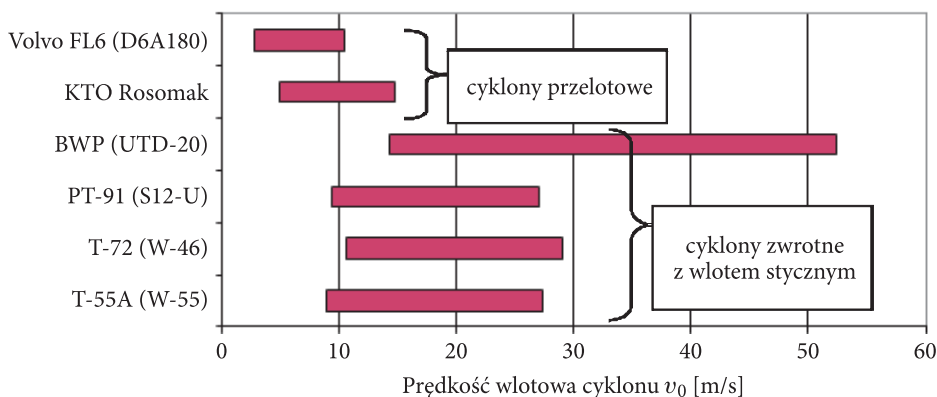
$$m_{zp} \cdot \frac{du_r}{dt} = \frac{m_{zp} \cdot u_s^2}{r} - F_r. \quad (3)$$

Jeżeli spełniony jest warunek $F_d > F_r$, to ziarna będą kierowane na ścianki cyklonu, gdzie wytracą prędkość i siłą grawitacji opadną do osadnika. W przeciwnym wypadku ziarna pyłu dostawać się będą do środka cyklonu wraz z powietrzem. W przypadku kiedy siły F_d i F_r będą sobie równe, ziarno pyłu teoretycznie będzie poruszało się po okręgu o promieniu r .

Wzrost wartości strumienia powietrza przepływającego przez cyklon (a tym samym prędkości liniowej powietrza) powoduje wzrost siły odśrodkowej F_d działającej na ziarno pyłu, a w efekcie wzrost skuteczności odpylania φ . Prędkość gazu w cyklonie reprezentowana jest najczęściej przez średnią prędkość w króćcu wlotowym v_0 , która określona jest jako iloraz strumienia powietrza Q_0 wpływającego do cyklonu i pola powierzchni A_0 przekroju poprzecznego króćca wlotowego [7]:

$$v_0 = \frac{Q_0}{A_0}. \quad (4)$$

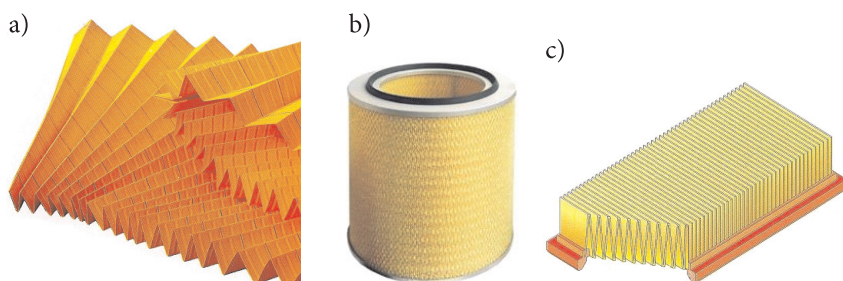
Wzrost prędkości v_0 ponad określoną dla danego cyklonu wartość powoduje gwałtowne narastanie oporu przepływu Δp będącego funkcją $\Delta p = f(v^2)$, nie podnosząc przy tym skuteczności odpylania cyklonu φ , co jest wynikiem szybszego wzrostu sił aerodynamicznych działających na ziarno w porównaniu do sił bezwładności. Istnieje zatem pewien zakres prędkości wlotowej v_0 , w granicach którego cyklon uzyskuje optymalne warunki pracy — wysoki poziom skuteczności odpylania przy oporze przepływu nieprzekraczającym wartości dopuszczalnych. W starszych konstrukcjach cyklonów zwrotnych z wlotem stycznym zakres ten zawiera się w granicach 12-20 m/s, a czasami go przewyższa (rys. 2). Współczesne rozwiązania konstrukcyjne cyklonów przelotowych pozwalają obniżyć tę prędkość do 8-15 m/s [2, 6]. Odseparowany przez cyklony pył jest gromadzony w osadniku pyłu, skąd powinien być systematycznie usuwany.



Rys. 2. Wartości prędkości wlotowych do cyklonów

Obecnie do produkcji przegród filtracyjnych powietrza wlotowego silników spalinowych pojazdów mechanicznych stosuje się przede wszystkim papiery filtracyjne produkowane w wielu gatunkach przez wyspecjalizowane firmy, różnią się one następującymi parametrami: gramaturą, grubością, przepuszczalnością powietrza, wymiarami porów oraz wytrzymałością na rozerwanie i przepuklenie.

Papier filtracyjny kształtuje się w formie plisowanej taśmy (rys. 3a), z której następnie może być w różny sposób zmontowany wkład filtracyjny. Najczęściej wkłady filtracyjne ukształtowane są w cylindry o podstawie koła lub owalu (rys. 3b) oraz jako panelowe (rys. 3c). Najbardziej rozpowszechnione jest ukształtowanie plis w kształcie litery „V”.



Rys. 3. Kształtowanie wkładu filtracyjnego: a) plisowana taśma; b) wkład cylindryczny; c) wkład panelowy [5]

Światowe firmy (na przykład Donaldson, Mann-Hummel) zajmujące się problematyką filtracji powietrza wlotowego do silników wykorzystują do budowy przegród filtracyjnych nanowłókna. Ten nowoczesny materiał filtracyjny produkowany jest technologią „elektroprzędzenia”, umożliwiającą wytwarzanie włókien o średnicach w zakresie 1-2000 nm [6]. Z nanowłókien formowane są tak zwane nonosieci mogące mieć grubość 1-5 μm , charakteryzujące się tym samym małymi oporami przepływu [9].

Zastosowanie nanowłókien zdecydowanie podnosi skuteczność filtracji, w szczególności ziaren pyłu o wymiarach poniżej 5 μm , nie podnosząc przy tym w sposób znaczący spadku ciśnienia na przegrodzie filtracyjnej [6].

Właściwości filtru powietrza są charakteryzowane przez następujące parametry:

- skuteczność filtracji — iloraz masy pyłu m_p zatrzymanego przez filtr i masy pyłu m_d dostarczonego do filtru:

$$\varphi = \frac{m_p}{m_d}, \quad (5)$$

- opór przepływu — różnica ciśnień całkowitych p_1 przed i p_2 za filtrem:

$$\Delta p_f = p_1 - p_2, \quad (6)$$

- dokładność filtracji — maksymalny d_{zmax} rozmiar ziarna pyłu w powietrzu za filtrem,
- chłonność — masa pyłu Δm zatrzymanego do chwili osiągnięcia przez filtr określonej wartości oporu przepływu (równego 200% wartości oporów przepływu dla czystego filtru przy nominalnym strumieniu powietrza).

Na czas pracy filtru do osiągnięcia dopuszczalnego oporu przepływu Δp_{fdop} będącego kryterium zakończenia jego eksploatacji wpływa nie tylko chłonność przegrody filtracyjnej, lecz także skład granulometryczny pyłu, jaki na nią trafia. Producenci papierów filtracyjnych podają jedynie dane opisujące ich strukturę, brakuje natomiast informacji dotyczących właściwości filtracyjnych produkowanych papierów. Relacje pomiędzy strukturą papieru a jego charakterystykami filtracyjnymi są ustalane eksperymentalnie z wykorzystaniem standardowych testów badawczych [5].

Brakuje danych dotyczących chłonności papierów filtracyjnych dla pyłów o składzie granulometrycznym innym niż standardowy. Znajomość tych charakterystyk jest niezbędna do właściwego doboru papieru filtracyjnego pracującego jako drugi stopień filtracji powietrza i określenia czasu pracy filtru. Uzyskanie takich charakterystyk jest możliwe do uzyskania w trakcie badań eksperymentalnych kompletnych filtrów powietrza. Przeprowadzenie takich badań, zwłaszcza w przypadku filtrów dwustopniowych, jest pracochłonne i kosztowne. Czas pracy τ dwustopniowego filtru powietrza można określić za pomocą empirycznej zależności [1, 8]:

$$\tau = \frac{F_C \cdot k_m \cdot k_C}{Q_{max} \cdot s \cdot (1 - \varphi_M) \cdot \varphi_P} \quad [h], \quad (7)$$

gdzie: F_C — powierzchnia papieru filtracyjnego II stopnia filtracji [m^2];
 k_m — współczynnik chłonności papieru filtracyjnego dla przyjętego Δp_{fdop} [g/m^2];
 k_C — współczynnik uwzględniający różnicę między parametrami zanieczyszczeń testowych a rzeczywistych;
 Q_{max} — nominalne zapotrzebowanie powietrza przez silnik [m^3/h];
 s — stężenie zapylenia powietrza zasysanego przez silnik [g/m^3];
 φ_M — skuteczność pierwszego stopnia filtracji;
 φ_P — skuteczność wkładu filtracyjnego.

Warunkiem poprawności stosowania podanego wzoru jest znajomość współczynnika chłonności pyłu k_m papieru filtracyjnego pracującego jako drugi stopień filtracji za odpylaczem bezwładnościowym, określonego (przy założeniu równomiernego rozkładu pyłu na całej powierzchni czynnej papieru filtracyjnego wkładu badawczego) zależnością [6]:

$$k_m = \frac{m_{cw}}{F_W} \quad [\text{g/m}^2], \quad (8)$$

gdzie: m_{cw} — całkowita masa pyłu zatrzymana przez wkład filtracyjny dla przyjętej wartości oporu dopuszczalnego ΔP_{fdop} [g];
 F_W — powierzchnia czynna papieru filtracyjnego [m²].

Wyznaczenie współczynnika chłonności pyłowej k_m dla papieru filtracyjnego pracującego w systemie „multicyklon–przegroda porowata” z wykorzystaniem funkcjonujących obecnie metod badawczych dla rzeczywistych wartości stężenia zapylenia i zapotrzebowania powietrza przez silnik jest szczególnie pracochłonne i kosztowne [6, 10].

W pracach [6, 10] przedstawiono mniej kosztowną i nieskomplikowaną metodę określania charakterystyk dwustopniowych filtrów powietrza poprzez wydzielenie segmentu filtru w postaci pojedynczego cyklonu i ustawionego za nim szeregowo badawczego wkładu filtracyjnego będącego odpowiednio dobranym wycinkiem rzeczywistego wkładu filtracyjnego. Wydzielony z filtru dwuczściowy segment nazwano „zestawem filtracyjnym”.

Jeśli podczas badań „zestawu filtracyjnego” zachowane zostaną warunki pracy badawczego wkładu filtracyjnego i cyklonu, takie jak występują podczas pracy kompletnego filtru powietrza w rzeczywistych wymiarach, to uzyskane wyniki można traktować jako charakterystyki wkładu filtracyjnego rzeczywistej wielkości.

3. Metodyka i warunki badań papierów filtracyjnych pracujących w układzie „cyklon–przegroda porowata”

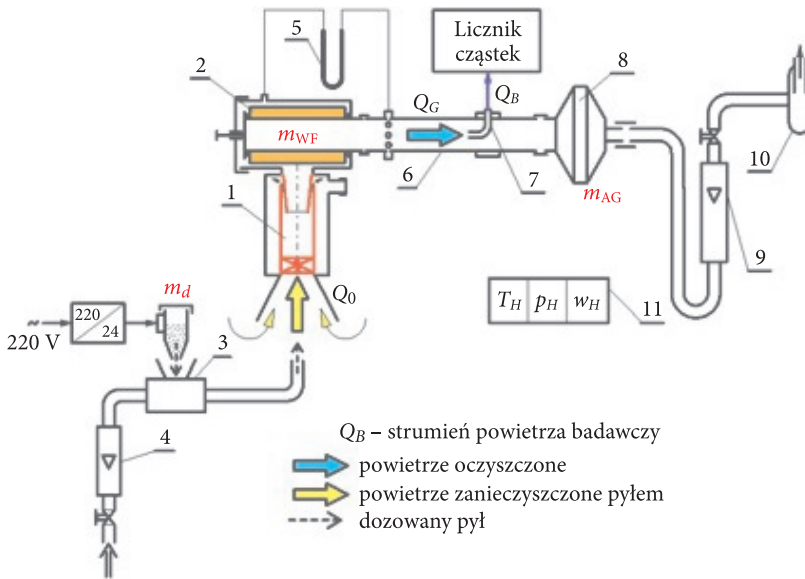
W celu określenia wartości współczynnika chłonności pyłu k_m niezbędna jest znajomość masy pyłu m_{cw} zatrzymanego na powierzchni 1 m² papieru filtracyjnego do osiągnięcia przyjętego oporu dopuszczalnego ΔP_{fdop} . Zaczerpnięta z pracy [6] metodyka umożliwi wyznaczenie współczynnika k_m oraz charakterystyk filtracyjnych wycinka papieru filtracyjnego w postaci wkładu badawczego przeznaczonego na drugi stopień filtracji powietrza za odpylaczem bezwładnościowym.

Badania przeprowadzono na stanowisku (rys. 4), którego głównym elementem jest segment filtracyjny zbudowany z pojedynczego cyklonu przelotowego będącego elementem multicyklonu badanego filtru powietrza oraz ustawionego za nim szeregowo cylindrycznego wkładu filtracyjnego wykonanego z badanego papieru filtracyjnego.

Powierzchnia F_W badanego papieru została dobrana tak, aby dla maksymalnej wartości strumienia powietrza wypływającego z pojedynczego cyklonu określonego poniższą zależnością prędkość filtracji v_F nie przekroczyła 0,06 m/s.

$$Q_{G\max} = \frac{Q_{sil\max}}{n}, \quad (9)$$

gdzie: $Q_{sil\max}$ — maksymalne zapotrzebowanie powietrza przez silnik;
 n — liczba cyklonów kompletnego multicyklonu.



Rys. 4. Schemat funkcjonalny stanowiska do badań papierów filtracyjnych w systemie „cyklon–przełota”: 1 — cyklon; 2 — wkład badawczy; 3 — dozownik pyłu; 4 — rotametr pomiaru sprężonego powietrza do dozownika; 5 — manometr cieczowy; 6 — przewód pomiarowy; 7 — sonda pyłowa; 8 — filtr absolutny przewodu głównego; 9 — rotametr strumienia głównego; 10 — wentylator ssawny; 11 — termohigrobarometr

Stanowisko pomiarowe wyposażone zostało w licznik cząstek umożliwiający rejestrację liczby i rozmiarów ziaren pyłu w strumieniu powietrza za badawczym wkładem filtracyjnym, w zakresie 0,7-100 μm podzielonym na 32 przedziały pomiarowe będące zakresami ograniczonymi średnicami ($d_{z\min}$ - $d_{z\max}$).

Charakterystyki filtracyjne badanych papierów filtracyjnych określono metodą wagową w kolejnych cyklach pomiarowych o określonym czasie trwania, stosując pył testowy PTC-D przy stężeniu w powietrzu wlotowym do cyklonu $s = 1 \text{ g/m}^3$.

4. Cel i zakres badań

Celem badań było określenie wpływu składu granulometrycznego pyłu, zmniejszonego przez cyklon przelotowy, na współczynnik chłonności pyłowej k_m badanego papieru filtracyjnego pracującego jako drugi stopień filtracji. Przedmiotem badań

był papier filtracyjny 1703 VH206 firmy Hollingsworth & Vose (parametry struktury papieru podano w tabeli 1) ukształtowany w cylindryczne wkłady filtracyjne.

Zakres badań obejmował określenie, przy stałej prędkości filtracji $v_F = 0,06$ m/s, charakterystyk: skuteczności, dokładności filtracji i oporów przepływu wkładu filtracyjnego (w funkcji masy pyłu m_z zatrzymanego przez wkład filtracyjny i masy pyłu m_d zadozowanego do układu) pracującego jako pierwszy oraz jako drugi stopień filtracji za cyklonem o postaci:

- skuteczności filtracji $\varphi_w = f(m_z)$, $\varphi_w = f(m_d)$,
- dokładności filtracji $d_{zmax} = f(m_z)$, $d_{zmax} = f(m_d)$,
- oporów przepływu $\Delta p_w = f(m_z)$, $\Delta p_w = f(m_d)$.

TABELA 1

Parametry badanego papieru filtracyjnego

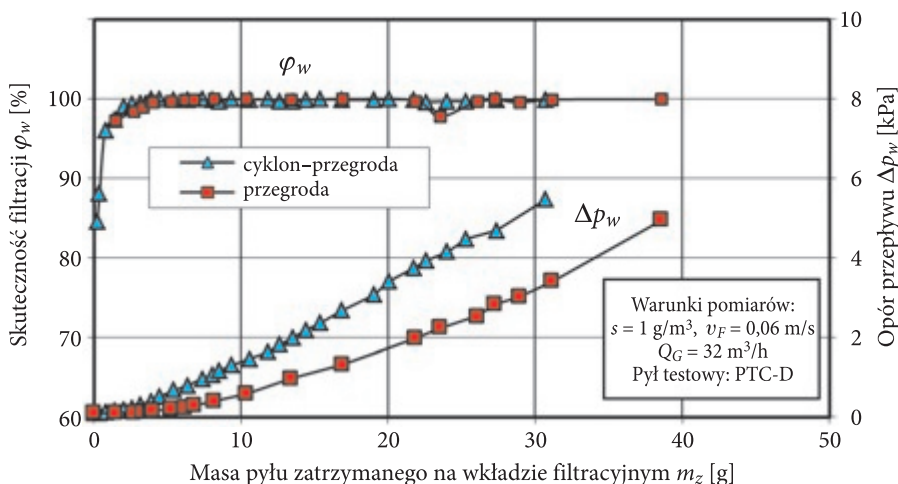
Parametr	Jednostka	Wartość
Gramatura	[g/m ²]	137
Grubość	[mm]	0,56
Przepuszczalność powietrza	[l/m ² /s]	270 przy 2 mbar, A = 20 cm ²
Maksymalna średnica porów	[μm]	60
Średnia średnica porów	[μm]	52,5

Badania prowadzono do chwili osiągnięcia przez wkład filtracyjny założonej wartości oporu dopuszczalnego $\Delta p_{dop} = 5$ kPa, a następnie określano współczynnik chłonności pyłu k_m papieru filtracyjnego.

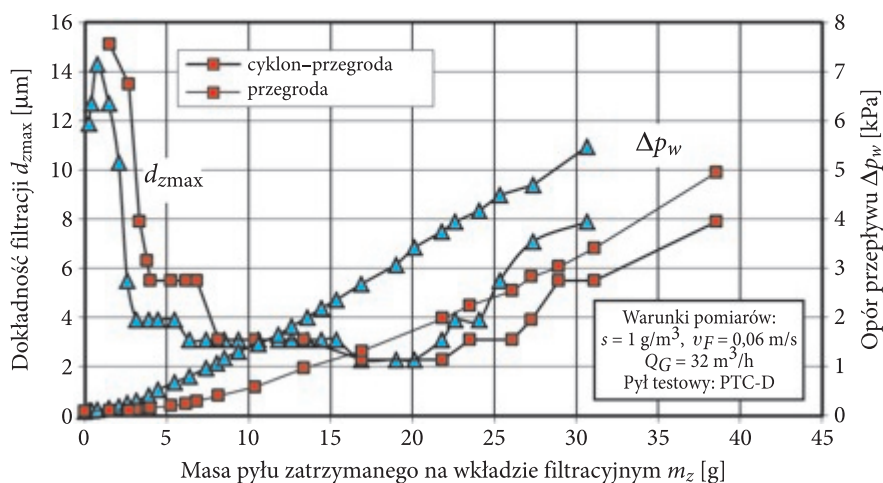
5. Analiza wyników badań

Wyniki badań charakterystyk: skuteczności i dokładności filtracji oraz oporów przepływu wkładu filtracyjnego (w funkcji masy pyłu m_z zatrzymanego przez wkład filtracyjny) pracującego jako pierwszy oraz jako drugi stopień filtracji za cyklonem przedstawiono na rysunkach 5 i 6.

Wraz ze wzrostem masy pyłu zatrzymanego przez wkład filtracyjny pracujący w układzie „cyklon–przegroda”, a tym samym współczynnika k_m chłonności pyłu (rozumianego jako iloraz masy pyłu zatrzymanego przez wkład filtracyjny i powierzchni papieru filtracyjnego tego wkładu), skuteczność filtracji φ_w oraz opór przepływu Δp_w cały czas systematycznie rosną. W początkowym okresie pracy wkładu, do chwili osiągnięcia skuteczności filtracji $\varphi_w = 99,5\%$, wzrost skuteczności jest dość gwałtowny. W tym okresie średnice ziaren d_{zmax} przepuszczonych przez wkład filtracyjny przyjmują maksymalne wartości 15 μm. Wraz z przyrostem masy



Rys. 5. Charakterystyki skuteczności filtracji $\varphi_w = f(m_z)$ i oporu przepływu $\Delta p_w = f(m_z)$ w funkcji masy pyłu zatrzymanego przez papier filtracyjny pracujący w układzie „cyklon–przegroda” i bez cyklonu



Rys. 6. Charakterystyki dokładności filtracji $d_{zmax} = f(m_z)$ oraz oporu przepływu $\Delta p_w = f(m_z)$ w funkcji masy pyłu zatrzymanego przez papier filtracyjny pracujący w układzie „cyklon–przegroda” i bez cyklonu

pyłu na wkładzie średnice ziaren d_{zmax} przyjmują coraz mniejsze wartości i stabilizują się na poziomie 3-4 μm . Rozpoczyna się wówczas zasadniczy (stabilny) okres pracy wkładu, trwający do chwili nagłego spadku dokładności filtracji. Przebieg charakterystyk skuteczności φ_w , dokładności filtracji oraz oporu przepływu Δp_w wkładu filtracyjnego uzyskanych w warunkach pracy jako pierwszy stopień filtracji jest podobny co do przebiegu, lecz różny co do wartości.

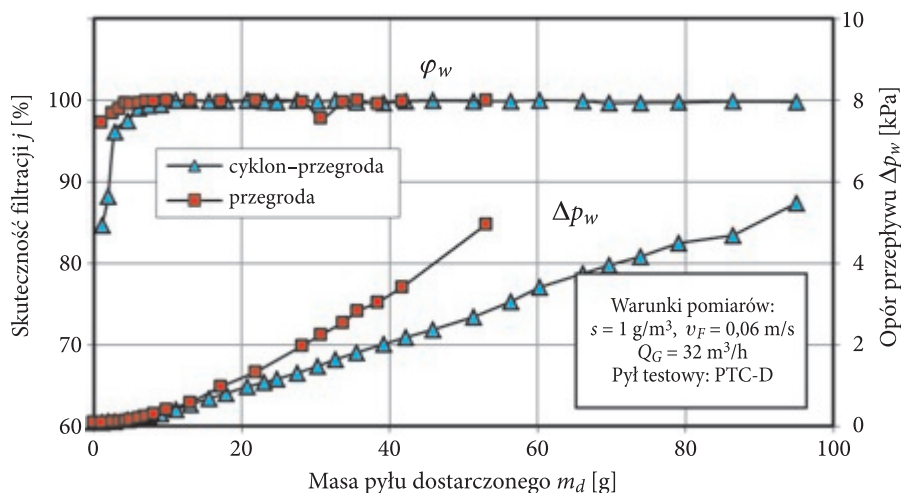
Taki przebieg charakterystyk dokładności filtracji i oporów przepływu należy tłumaczyć tym, że osadzone w przegrodzie pierwsze ziarna pyłu są źródłem powstania wtórnych elementów struktury. Obok osadzania ziaren pyłu na włóknach, istnieje również osadzanie na wcześniej zatrzymanych ziarnach. Powstają rozrastające się często do znacznych rozmiarów aglomeraty, które zapełniają wolne przestrzenie między włóknami, co powoduje, że zatrzymywane są coraz mniejsze ziarna, ale jednocześnie następuje utrudniony przepływ aerozolu, czym należy tłumaczyć wzrost oporów przepływu wraz ze wzrostem masy zatrzymanego przez wkład pyłu. Zmniejszenie się dokładności filtracji, co uwidacznia się pojawianiem w oczyszczonym powietrzu ziaren pyłu o rozmiarach powyżej 5 μm , po zatrzymaniu przez wkład określonej masy pyłu tłumaczyć można wystąpieniem tzw. zjawiska „przebiccia”, które polega na odrywaniu się (w wyniku dużych prędkości przepływu) ziaren pyłu od podłoża i przemieszczaniu w głąb materiału, aż na stronę wylotową papieru.

Opór przepływu Δp_w , będący kryterium wymiany wkładu filtracyjnego, narasta zdecydowanie szybciej w przypadku gdy na przegrodę filtracyjną trafia pył o składzie frakcyjnym zmienionym przez cyklon. Współczynnik chłonności pyłowej k_m badanego papieru filtracyjnego, przy wartości oporu $\Delta p_w = 5 \text{ kPa}$, osiąga odpowiednio wartości: 278 g/m^2 dla pyłu standardowego oraz 210 g/m^2 , gdy wkład papierowy pracował jako drugi stopień filtracji.

Tłumaczyć to można tym, że pył po przejściu przez odpylacz, w odróżnieniu od pyłu standardowego, pozbawiony jest cząstek pyłu o wymiarach przekraczających 25-35 μm [6]. Ziarna pyłu o niewielkich rozmiarach znacznie łatwiej wnikają w strukturę papieru filtracyjnego i szczelniej go wypełniają w porównaniu z ziarnami o większych średnicach. Wolne przestrzenie powstałe pomiędzy zakotwiczonymi cząstkami pyłu o małych rozmiarach są znacznie mniejsze niż w przypadku dużych ziaren pyłu, co sprawia, że prędkość przepływu aerozolu przez nie jest większa, a tym samym opór przepływu wzrasta.

Z analizy powyższych wykresów wynika, że stosowanie odpylaczy bezwładnościowych jako pierwszy stopień filtracji powoduje zatrzymywanie dużych, a przepuszczanie ziarna pyłu o małych rozmiarach poniżej 25-35 μm , zmniejszając tym samym chłonność pyłową papieru pracującego jako drugi stopień filtracji. Jednak analiza charakterystyk skuteczności filtracji i oporu przepływu w funkcji masy pyłu dostarczonego do filtru (rys. 7) pokazuje, że czas pracy do osiągnięcia oporu dopuszczalnego zestawu cyklon–przegroda porowata jest o około 46% dłuższy w stosunku do czasu pracy wkładu w warunkach pierwszego stopnia.

Tłumaczyć to należy tym, że w przypadku zastosowania odpylacza bezwładnościowego jako pierwszego stopnia filtracji przed papierowym wkładem filtracyjnym, zdecydowana większość dostarczonego pyłu (w przypadku badanego zestawu około 67%) jest zatrzymywana przez cyklon. Na wkład filtracyjny trafia więc tylko 33% masy pyłu, jaka została wprowadzona do układu filtracyjnego „układ–przegroda”, i jest znacznie mniejsza niż w przypadku, gdyby na wkład filtracyjny trafiła cała masa pyłu.



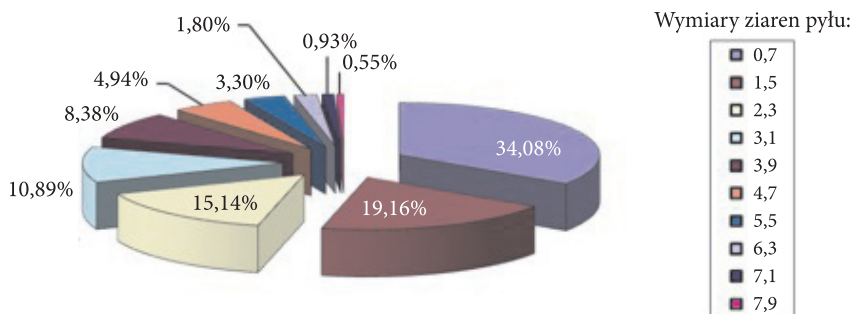
Rys. 7. Charakterystyki skuteczności filtracji $\varphi_w = f(m_d)$ i oporu przepływu $\Delta p_w = f(m_d)$ papieru filtracyjnego w funkcji masy pyłu dostarczonego do układu

Na rysunkach 8-10 przedstawiono procentowe zmiany udziału ziaren pyłu poszczególnych grup wymiarowych w powietrzu za badawczym wkładem filtracyjnym dla wybranych cykli badawczych. Udział procentowy Up_i określono z zależności:

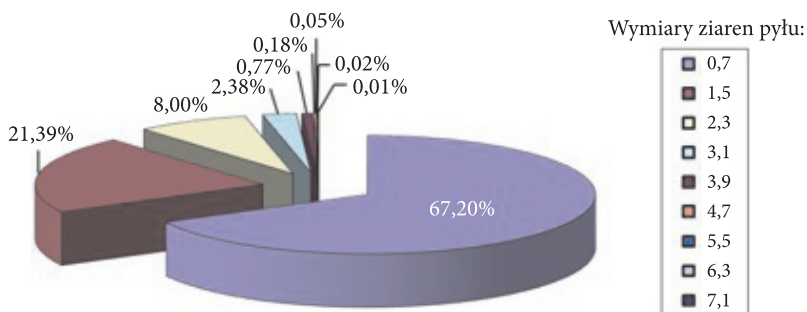
$$Up_i = \frac{N_i}{N} = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^{32} N_i}, \quad (10)$$

gdzie: N_i — liczba ziaren pyłu z i -tego przedziału wymiarowego;
 N — całkowita liczba ziaren pyłu za wkładem filtracyjnym.

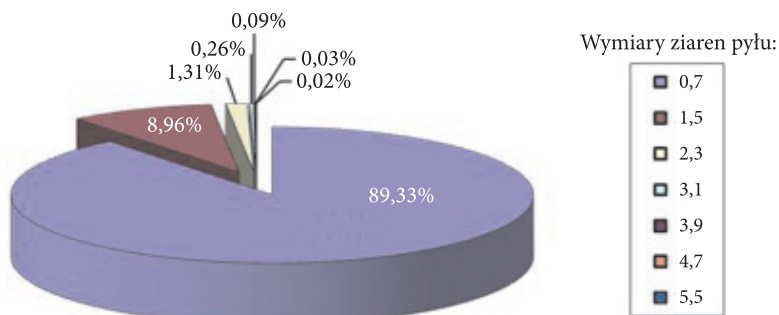
Wraz ze wzrostem masy pyłu zatrzymanego na wkładzie filtracyjnym w powietrzu za badanym wkładem następował wzrost udziału procentowego cząstek pyłu o najmniejszych rozmiarach 0,7-1,5 μm . W przypadku gdy na wkład filtracyjny trafiał pył o standardowym składzie frakcyjnym, podczas pierwszego cyklu badawczego udział tych cząstek wynosił 34,08%, w trakcie trzeciego cyklu odnotowano 67,20%, a podczas szóstego udział cząstek pyłu o tych wymiarach sięgał 89,33%. Gwałtownie zmniejsza się udział ziaren pyłu o większych rozmiarach. Na przykład udział ziaren pyłu o rozmiarach 2,3-3,1 μm podczas pierwszych sześciu cykli badawczych zmniejszył się z 15,1% do 1,3%. Skład granulometryczny pyłu za wkładem filtracyjnym zmienia się w sposób analogiczny w przypadku, gdy na wkład trafia pył po przejściu przez odpylacz bezwładnościowy, co związane jest z tym, że w obu przypadkach wkład wykonany został z tego samego papieru filtracyjnego.



Rys. 8. Skład granulometryczny pyłu za badawczym wkładem filtracyjnym podczas cyklu pomiarowego nr 1



Rys. 9. Skład granulometryczny pyłu za badawczym wkładem filtracyjnym podczas cyklu pomiarowego nr 2



Rys. 10. Skład granulometryczny pyłu za badawczym wkładem filtracyjnym podczas cyklu pomiarowego nr 6

6. Podsumowanie

Współczynnik chłonności k_m papieru filtracyjnego wyznaczony z wykorzystaniem metodyki opartej o badanie wydzielonego segmentu filtracyjnego zbudowanego z pojedynczego cyklonu oraz wkładu badawczego o odpowiedniej powierzchni

papieru filtracyjnego osiąga współczynnik chłonności pyłowej k_m znacznie niższy ($k_m = 210 \text{ g/m}^2$) niż ten sam papier pracujący w jednostopniowym systemie filtracji ($k_m = 278 \text{ g/m}^2$), na co ma wpływ skład granulometryczny pyłu i właściwości filtracyjne papieru.

Przebieg uzyskanych charakterystyk papieru filtracyjnego $\varphi_z = f(m_z)$ i $\Delta p_z = f(m_z)$ jest zgodny z informacjami podawanymi w literaturze [5, 6, 10], co stanowi podstawę do stwierdzenia, że stosowana metodyka badań jest uniwersalna, a uzyskane wyniki badań ułatwią projektowanie i dobór (do określonych warunków pracy) wkładu filtru powietrza przewidywanego jako drugi stopień filtracji.

W początkowym okresie pracy wkładu filtracyjnego (na przykład po jego wymianie na nowy) skuteczność filtracji osiąga nieznaczne wartości (85%), a średnice ziaren pyłu $d_{z\max}$ przepuszczonych przez wkład filtracyjny przyjmują maksymalne wartości $15 \mu\text{m}$, co może być przyczyną przyspieszonego zużycia elementów silnika.

Pojawianie się w oczyszczonym powietrzu (w końcowym etapie pracy wkładu filtracyjnego) ziaren pyłu powyżej $5 \mu\text{m}$ wynika z tzw. zjawiska przebiccia, które spowodowane jest dużymi prędkościami przepływu powietrza przez medium filtracyjne, wynikłymi z wypełnienia pyłem porów papieru i dużych oporów przepływu tym spowodowanych. Opór dopuszczalny filtru powietrza powinien być więc tak dobrany, aby nie obejmował tego okresu pracy filtru powietrza.

Artykuł wpłynął do redakcji 27.04.2012 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w grudniu 2012 r.

LITERATURA

- [1] K. BACZEWSKI, M. HEBDA, *Filtracja płynów eksploatacyjnych*, MCNEMT, Radom, 1991/92.
- [2] M. DURST, G. KLEIN, N. MOSER, *Filtration in Fahrzeugen*, Materiały informacyjne firmy Mann + Hummel GMBH, Ludwigsburg, Niemcy, 2005.
- [3] P. DZIERŻANOWSKI, W. KORDZIŃSKI, J. OTYŚ, S. SZCZECIŃSKI, R. WIATREK, *Napędy lotnicze. Turbinowe silniki śmigłowe i śmigłowcowe*, WKŁ, Warszawa, 1985.
- [4] T. DZIUBAK, *The problems of the inlet a filtration in the special vehicles combustion engines*, III Międzynarodowy Kongres Silników Spalinowych, Silniki Spalinowe Nr 2009-SC1, Opole 22-24.06.2009, 115-123.
- [5] T. DZIUBAK, *Badania eksperymentalne papieru filtracyjnego do dwustopniowego filtru powietrza silnika pojazdu specjalnego*, Biul. WAT, 59, 3, 2010.
- [6] T. DZIUBAK, *Analiza procesu filtracji powietrza wlotowego do silników pojazdów specjalnych*, Rozprawa habilitacyjna, WAT, Warszawa, 2008.
- [7] T. DZIUBAK, *Możliwość modyfikacji konstrukcji cyklonu zwrotnego z wlotem stycznym*, Biul. WAT, 55, 2, 2006.
- [8] T. DZIUBAK, P. DZIERŻANOWSKI, *Układ filtrujący powietrza z efekcyjnym odsysaniem pyłu silnika samochodu ciężarowego*, VI Międzynarodowe sympozjum IPM, Warszawa-Rynia, 1996.
- [9] T. GRAFE, M. GOGINS, M. BARRIS, J. SCHAEFER, R. CANEPA, *Nanofibers in Filtration Applications in Transportation*, Filtration 2001 International Conference and Exposition, Chicago, Illinois, December 3-5, 2001.

- [10] S. SZWEDKOWICZ, *Projekt wstępny metodyki badań chłonności pyłowej materiałów filtracyjnych filtrów powietrza pojazdów mechanicznych*, Praca dyplomowa (kierownik T. Dziubak), Warszawa, 2010.

T. DZIUBAK, S. SZWEDKOWICZ

**Experimental research of filtration paper operating
in “cyclone-porous barrier” system**

Abstract. Operating conditions of a two-stage engine inlet air filtration system are described. Properties of filtration materials used for porous partitions of vehicle air filters are analysed. The criteria of the selection of filtration paper operating as the second stage of the air filtration are presented. A relationship defining the operating time of a two-stage air filter is analysed. The dust absorbency coefficient k_m of the filtration paper is defined. A research methodology of the paper filter operating in a “through cyclone-porous barrier” system is discussed. There are also presented the research results of efficiency and thoroughness characteristics of filtration as well as flow drag characteristics of filtration paper operating as both the first and the second stage of filtration behind the cyclone. The dust absorbency coefficient k_m of the filtration paper is determined. Changes of dust granulometric composition behind filtration paper are shown.

Keywords: combustion engines, air filtration, two-stage air filter, filter characteristics, filter paper