

BADANIA EKSPERYMENTALNE WŁÓKNINY FILTRACYJNEJ DO DWUSTOPNIOWEGO FILTRU POWIETRZA SILNIKA POJAZDU MECHANICZNEGO

TADEUSZ DZIUBAK¹, SEBASTIAN SZWEDKOWICZ²

Wojskowa Akademia Techniczna

Streszczenie

W artykule zostały przeanalizowane właściwości materiałów filtracyjnych stosowanych, jako przegrody porowate w filtrach powietrza współczesnych pojazdów mechanicznych. Przedstawiono zależność określającą czas pracy filtra powietrza oraz zdefiniowano współczynnik chłonności pyłu k_m materiału filtracyjnego. Omówiono metodykę badań wkładu wykonanego z włókniny filtracyjnej pracującego w warunkach odpowiadających pierwszemu oraz drugiemu stopniowi filtracji. Przeanalizowano wyniki badań charakterystyk skuteczności, dokładności filtracji i oporów przepływu. Określono współczynnik chłonności pyłu k_m włókniny filtracyjnej pracującej przy różnych prędkościach filtracji. Określono wpływ składu granulometrycznego (frakcyjnego) pyłu ukształtowanego przez cyklon przelotowy na charakterystyki badanej włókniny i wartość współczynnika chłonności pyłu k_m . Wskazano korzyści wynikające z zastosowania dwustopniowej filtracji powietrza.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, dwustopniowy filtr powietrza, materiały filtracyjne, skuteczność i dokładność filtracji powietrza, opór przepływu filtra, współczynnik chłonności pyłu

1. Wprowadzenie

Do filtracji powietrza wlotowego silników współczesnych samochodów osobowych i lekkich samochodów dostawczych stosuje się filtry jednostopniowe z przegrodą porowatą, którą jest najczęściej wkład papierowy lub włókninowy. Silniki samochodów ciężarowych, pojazdów specjalnych, w tym wojskowych (czołgi, transportery), eksploatowane są najczęściej na bezdrożach i w terenie piaszczystym, gdzie stężenie zapylenia powietrza jest szczególnie duże i często przekracza wartość 1 g/m^3 . Silniki tych pojazdów charakteryzują się dużą mocą (ponad 300 kW) oraz dużym (przekraczającym $1000 \text{ m}^3/\text{h}$) zapotrzebowaniem powietrza. Do filtra powietrza silnika samochodu ciężarowego o zapotrzebowaniu

¹ Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, ul. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: tdziubak@wat.edu.pl, tel. 22 683 71 21

² Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, ul. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: sshedkowicz@wat.edu.pl

1200 m³/h eksploatowanego po drogach gruntowych przy stężeniu zapylenia powietrza $s = 0,1 \text{ g/m}^3$ dostaje się wraz z powietrzem w ciągu 8 godzin pracy około 960 g pyłu. Aby spełnić wymagania odnośnie czystości powietrza i odpowiednio długich przebiegów, samochody ciężarowe i specjalne wyposaża się w dwustopniowe systemy filtracji. Pierwszym stopniem filtracji jest monocyklon lub multicyklon (filtry bezwładnościowe), a drugim przegrodą porowatą najczęściej w postaci cylindrycznego wkładu papierowego. Coraz częściej do filtracji powietrza wlotowego silników spalinowych pojazdów mechanicznych stosuje się materiały z dodatkiem nanowłókien. Nowatorskimi rozwiązaniami są wkłady filtracyjne „rdzeniowe” produkowane w technologii PowerCore. W dostępnej literaturze nie spotyka się natomiast opracowań opisujących zastosowanie w filtrach wielostopniowych włóknin filtracyjnych jako drugi bądź trzeci stopień filtracji.

Wzrastające wymagania dotyczące trwałości i niezawodności silników zmuszają do intensyfikacji prac konstrukcyjnych i badawczych dotyczących filtracji powietrza wlotowego do silników pojazdów mechanicznych mających na celu opracowanie filtrów o możliwie najwyższej skuteczności i dokładności, najniższych oporach przepływu oraz długim czasie pracy.

Multicyklony charakteryzują się niskim i jednocześnie stałym w trakcie eksploatacji oporem przepływu, dość wysoką skutecznością filtracji (cyklony przelotowe – około 87%, cyklony zwrotne – około 96%) oraz zdolnością odseparowania znacznych mas pyłu z dużych objętości przepływającego powietrza. [7]. Papiery filtracyjne zapewniają wysoką skuteczność i dokładność filtracji, ale posiadają niewielką chłonność pyłową nieprzekraczającą 220 g/m² [1-3, 5, 20]. Włókniny filtracyjne mają nieznacznie mniejszą skuteczność i dokładność filtracji niż papiery, ale charakteryzują się znacznie większą chłonnością pyłu [2, 4, 19].

W dostępnej literaturze krajowej i zagranicznej niewiele jest informacji dotyczących charakterystyk włóknin przeznaczonych do filtracji powietrza wlotowego silników spalinowych. Brak jest też danych wartości współczynnika chłonności pyłu włóknin stosowanych jako drugi stopień filtracji powietrza wlotowego silników spalinowych. Nie spotyka się informacji dotyczących wpływu składu granulometrycznego pyłu na charakterystyki włókniny filtracyjnej, a w szczególności na jej chłonność. Po „przejściu” pyłu przez cyklon, dzięki właściwościom filtracyjnym cyklonu (zatrzymanie ziaren pyłu o większych rozmiarach i masie) następuje zmiana składu granulometrycznego pyłu. Na przegrodę filtracyjną trafiają więc ziarna pyłu o znacznie mniejszych rozmiarach niż w przypadku pyłu zasysanego z otoczenia. Z danych przedstawionych w [3, 5, 6] wynika, że papiery filtracyjne osiągają znacznie mniejszą chłonność, gdy trafia na nie pył o małych rozmiarach (< 25 μm).

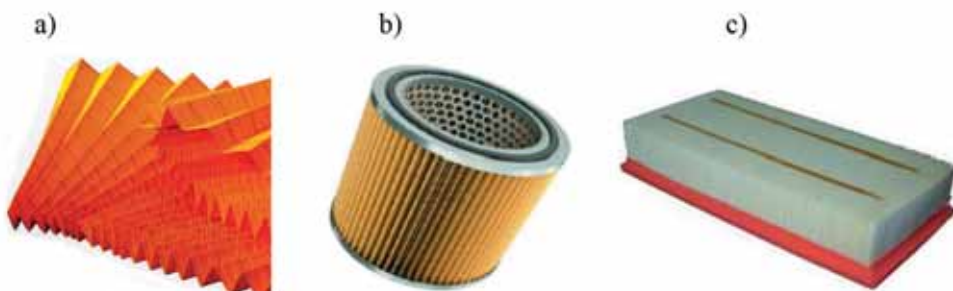
Dlatego celowe jest przeprowadzenie badań pozwalających uzyskać informacje niezbędne do prawidłowego określenia czasu pracy filtru, w którym przegrodę porowatą stanowi wkład wykonany z włókniny filtracyjnej, pracujący w warunkach odpowiadających drugiemu stopniowi filtracji – za filtrem bezwładnościowym.

2. Charakterystyka filtrów dwustopniowych

W warunkach dużego zapylenia powietrza stosuje się filtry wielostopniowe, składające się z szeregowo połączonych filtrów o różnej skuteczności i oporach przepływu. Pierwszym stopniem filtracji jest filtr bezwładnościowy (monocyklon lub multicyklon), a drugim ustawiona za nim szeregowo przegroda porowata, najczęściej w postaci cylindrycznego wkładu lub kilku wkładów ustawionych równolegle obok siebie [4, 6].

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]. Filtry typu „multicyklon – przegroda porowata” 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 ograniczona przyrostem oporu przepływu wkładu przegrodowego.

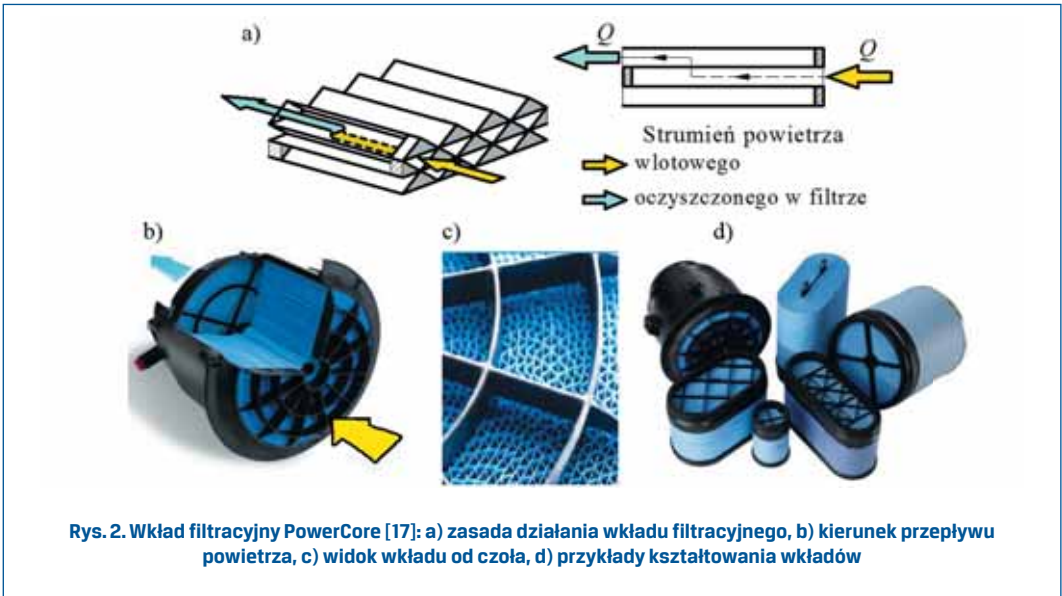
Przegrody filtracyjne filtrów powietrza wlotowego silników spalinowych pojazdów mechanicznych wykonywane są przede wszystkim z papierów filtracyjnych, produkowanych przez wyspecjalizowane firmy w wielu gatunkach, różniących się parametrami struktury i właściwościami: gramaturą, grubością, przepuszczalnością powietrza, wymiarami porów oraz wytrzymałością na rozerwanie i przepuklenie. Z papieru filtracyjnego kształtuje się plisowaną taśmę (rys. 1a), z której następnie może być w różny sposób zmontowany wkład filtracyjny. Najczęściej wkłady filtracyjne mają konstrukcję cylindryczną o przekroju koła lub owalu (rys. 1b) oraz panelową (rys. 1c) [1, 2, 9, 21, 22].



Rys. 1. Kształtowanie wkładu filtracyjnego: a) plisowana taśma, b) wkład cylindryczny, c) wkład panelowy

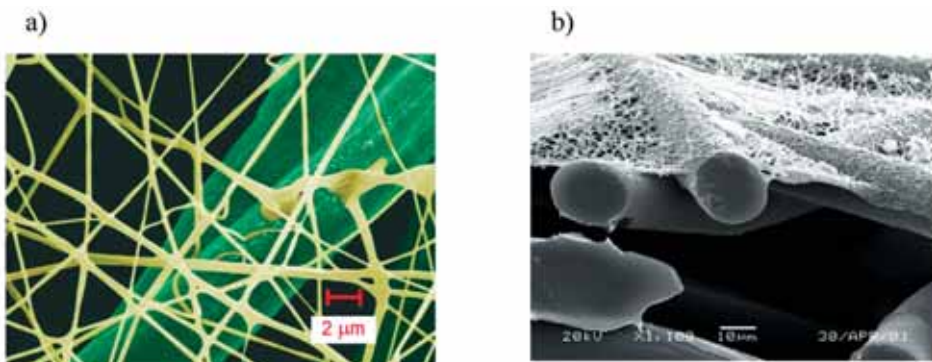
Cechą charakterystyczną nowoczesnych konstrukcji wkładów filtracyjnych i filtrów powietrza jest osiowy przepływ strumienia powietrza, co pozwala uniknąć turbulencji, a umożliwiając aerozolowi przepływ bezpośrednio do wylotu filtru, minimalizuje opory przepływu. Przykładem takiego rozwiązania jest wkład filtracyjny znany pod nazwą PowerCore firmy Donaldson. Wkłady filtracyjne wykonane w technologii PowerCore mają konstrukcję rdzenia powstałego poprzez naprzemiennie ułożenie warstw papieru gładkiego i plisowanego (rys. 2a). Powstałe w ten sposób kanały są naprzemiennie zaślepione,

w taki sposób, że jeżeli dany kanał jest wolny po stronie wlotu, to jest zablokowany po stronie wylotu i odwrotnie. Konstrukcja taka wymusza przepływ powietrza przez materiał filtracyjny do przyległych kanałów (rys. 2b).

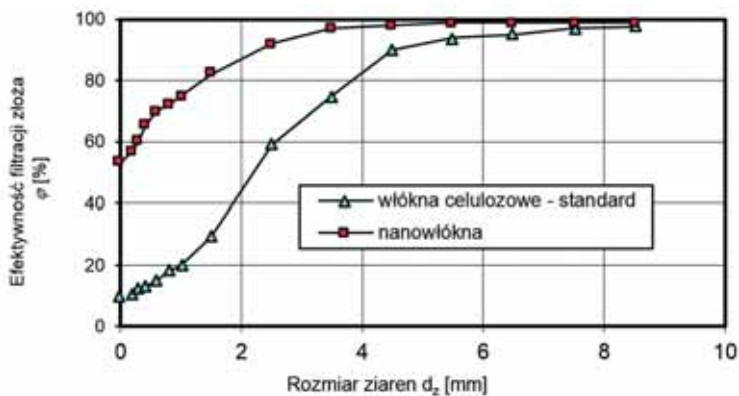


Przy tym samym strumieniu przepływającego powietrza, wkłady filtracyjne wykonane technologią PowerCore, są gabarytowo 2-3 razy mniejsze niż filtry z wkładami z plisowanego papieru filtracyjnego wykonanego tradycyjną metodą i bardziej efektywne ($\varphi_f = 99,99\%$) niż przeciętny konwencjonalny filtr osiągający skuteczność $\varphi_f = 99,85\%$ [17, 18].

Coraz częściej do budowy przegród z papierów filtracyjnych stosowana jest dodatkowo warstwa z nanowłókn. Pojęcie to odnosi się zazwyczaj do włókien o średnicy mniejszej niż $1\ \mu\text{m}$, które produkowane są z polimerów technologią „electrospinningu” (elektroprzędzenia) [10, 11, 14] lub „melt-blown” [15]. Do filtracji powietrza wlotowego silników pojazdów mechanicznych wykorzystywane są nanowłókna o średnicach około $50\ 500\ \text{nm}$. Nanowłókna mają właściwości znacznie różniące się od właściwości włókien standardowych – celulozowych. Ze względu na ograniczone właściwości mechaniczne cienkiej warstwy nanosieci, nakłada się ją na podłoże z konwencjonalnych materiałów filtracyjnych, które mają większą wytrzymałość i które umożliwiają użycie urządzeń do ich obróbki (rys. 3). Nanowłókna mogą być układane na jednej lub na dwu stronach podłoża, którym mogą być: poliester, nylon lub papier. Nałożona na podłoże o dużych porach nanosieć zatrzymuje cząstki o małych rozmiarach, szczególnie ziaren pyłu poniżej $5\ \mu\text{m}$ (rys. 4), bez istotnego wzrostu oporu przepływu na przegrodzie filtracyjnej [11].

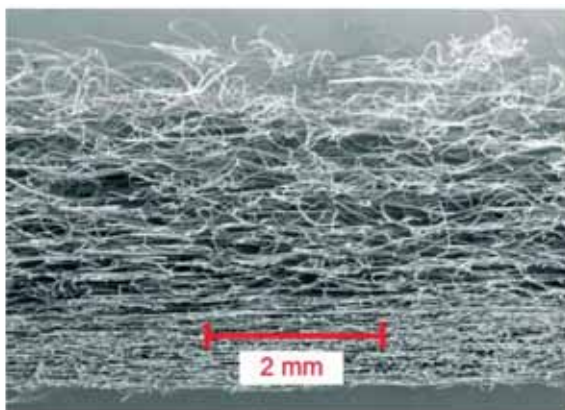


Rys. 3. Nanosieć naniesiona na złożę z włókien celulozy o średnicach około 10 μm : a) widok z góry [19], b) przekrój (średnice nanowłókien około 250 nm) [12]



Rys. 4. Skuteczność filtracji złoża wykonanego z włókien celulozowych o standardowej grubości oraz z nanowłókien zastosowanego w filtrze powietrza czołgu Abrams [11]

Do produkcji przegrodowych wkładów filtrów powietrza samochodów osobowych zwłaszcza produkcji azjatyckiej (Japonia, Korea Płd.) wykorzystywane są coraz częściej włókniny filtracyjne. Charakteryzują się one dwukrotnie większą gramaturą, kilkukrotnie większą grubością oraz zdecydowanie mniejszą sztywnością niż papiery filtracyjne [8, 13]. Nowoczesne włókniny filtracyjne mają strukturę gradientową o narastającym w kierunku przepływu powietrza upakowaniu włókien (rys. 5). Parametry włókien filtracyjnych produkowanych przez Korea Filtration Technologies Co. przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 5. Włóknina filtracyjna z narastającym upakowaniem [19]

Tabela 1. Właściwości włóknin filtracyjnych produkowanych przez Korea Filtration Technologies Co. [13]

Włóknina	Gramatura	Grubość	Przepuszczalność powietrza	Wytrzymałość na rozciąganie	Wytrzymałość na zginanie	Wytrzymałość na rozzerwanie
	[g/m ²]	[mm]	[cm ³ /cm ² /s]	[N/50 mm]	[N/30 mm]	[MPa]
AC-1800	290	2,8-3,6	50-85	>98	1,96-3,62	0,49
AC-3800	240	3,15-3,85	65-90	>98	1,96-3,62	0,39
AC-3421	230	2,43-2,97	55-70	>147	1,47-2,94	0,59
AC-303	250	2,7-3,3	75-95	>98	1,47-2,25	0,59
AC-301	210	2,43-2,86	80-110	>98	1,47-2,94	0,59
AC-510	205	2,7-3,3	90-140	>98	1,47-2,94	0,49
AC-180	300	2,61-3,19	45-60	>196	1,47-3,43	0,78
AC-250P/C	270	2,7-3,6	55-70	>98	1,47-2,94	0,78
AC-250G	270	2,88-3,52	55-75	>98	1,47-2,94	0,78
Metoda badawcza	ASTM D 6242-1998	ASTM D 5729-1997	ASTM D737-1996	ASTM D 5053-1995	ASTM D 5732-1995	ASTM D 3786-2001

Ze względu na niewielką sztywność plis wykonanych z włókien filtracyjnych konstruowanie tradycyjnych wkładów filtrów powietrza jest problematyczne, zwłaszcza w przypadku plis o znacznej wysokości oraz długości taśmy (rys. 6a). Rozwiązaniem tego problemu jest montowanie plisowanej włókniny w sztywnej ramce wykonanej z tworzywa sztucznego (rys. 6b).



Rys. 6. Kształtowanie wkładu filtracyjnego z włóknin: a) plisowana taśma, b) wkład wykonany z plisowanej włókniny w sztywnej ramce, c) wkład panelowy w formie wypraski

Tak wykonane wkłady filtracyjne są małych rozmiarów i mają zastosowanie w samochodach osobowych. Innym rozwiązaniem zwiększającym sztywność włókien syntetycznych jest plisowanie włókien wraz ze specjalnymi siatkami z tworzyw sztucznych co umożliwia zabezpieczenie przed uszkodzeniami podczas eksploatacji [8]. Popularne w ostatnim czasie są również panelowe wkłady filtracyjne wykonane z włókien filtracyjnych w postaci wyprasek formowanych na mokro (rys. 6c). Wkłady tego typu znajdują zastosowanie w filtrach powietrza samochodów osobowych.

Właściwości filtra powietrza są charakteryzowane przez następujące parametry:

- skuteczność filtracji – iloraz masy pyłu m_p zatrzymanego przez filtr i masy pyłu m_d dostarczonego do filtra:

$$\varphi = \frac{m_p}{m_d} \cdot 100\%, \quad (1)$$

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

$$\Delta p_f = p_1 - p_2, \quad (2)$$

- 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 filtra przy nominalnym strumieniu powietrza) [16].

Czas pracy filtra do uzyskania założonej wartości Δp_{fdop} zależy nie tylko od parametrów procesu filtracji strumienia powietrza na przegrodzie, ale także od jej chłonności wynikającej z jej struktury, a także od rozmiaru zatrzymywanych ziaren pyłu [3, 4, 5]. Czas pracy τ dwustopniowego filtra powietrza można określić za pomocą empirycznej zależności [1, 3]:

$$\tau = \frac{F_c \cdot k_m \cdot k_c}{Q_{max} \cdot s \cdot (1 - \varphi_M) \cdot \varphi_w} \quad [\text{h}], \quad (3)$$

gdzie: F_c – powierzchnia materiału filtracyjnego drugiego stopnia filtracji [m^2];

k_m – współczynnik chłonności pyłu materiału 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_w – skuteczność wkładu filtracyjnego.

Do określenia międzyobsługowego przebiegu filtru powietrza (czasu jego pracy) w określonych warunkach eksploatacji niezbędna jest znajomość zdolności pochłaniania pyłu przez materiał filtracyjny charakteryzowanej przez współczynnik chłonności pyłu k_m . Producenci materiałów filtracyjnych podają jedynie dane opisujące ich strukturę, nie podają natomiast informacji dotyczących właściwości filtracyjnych produkowanych materiałów, a w szczególności współczynnika chłonności pyłu k_m . Charakterystyki filtracyjne wyznaczane są w trakcie badań eksperymentalnych na podstawie standardowych testów badawczych. Wartość współczynnika k_m określana jest (przy założeniu równomiernego rozkładu pyłu na całej powierzchni czynnej materiału filtracyjnego) z zależności:

$$k_m = \frac{m_{cw}}{F_w} \quad [\text{g}/\text{m}^2], \quad (4)$$

gdzie: m_{cw} – całkowita masa pyłu zatrzymana przez wkład filtracyjny dla przyjętej wartości oporu dopuszczalnego Δp_{fdop} [g]; F_w – powierzchnia czynna materiału filtracyjnego [m^2].

Podawana w literaturze krajowej i zagranicznej wartość współczynnika chłonności pyłu k_m papierów filtracyjnych określona z wykorzystaniem standardowego pyłu testowego dochodzi do $220 \text{ g}/\text{m}^2$ [1-3, 5]. Podawana dotychczas w literaturze chłonność nowoczesnych włókien filtracyjnych o strukturze gradientowej jest znacznie wyższa niż w przypadku papierów i wynosi $0,9 \div 1,1 \text{ kg}/\text{m}^2$ [2]. Wysoka chłonność włókniny filtracyjnej wynika z jej trzykrotnie większej grubości.

W dwustopniowych systemach filtracji powietrza wlotowego do silnika na wkład filtracyjny trafia pył pozbawiony cząstek o rozmiarach powyżej $15 \div 25 \mu\text{m}$, którego skład został ukształtowany przez pierwszy stopień filtracji (monocyklon lub multicyklon), co ma zasadniczy wpływ na proces filtracji w przegrodzie porowatej. Skutkuje to wzrostem intensywności narastania oporu przepływu, a w konsekwencji skróceniem okresu użytkowania filtru limitowanego osiągnięciem oporu dopuszczalnego Δp_{fdop} .

W celu określenia rzeczywistego czasu pracy filtru dwustopniowego do chwili osiągnięcia założonego oporu dopuszczalnego Δp_{fdop} niezbędna jest wiedza, w jakim stopniu zmieniony przez filtr bezwładnościowy skład frakcyjny pyłu wpływa na chłonność materiału filtracyjnego.

Informację taką można uzyskać w trakcie badań eksperymentalnych kompletnych dwustopniowych filtrów powietrza z wykorzystaniem obecnie funkcjonujących stanowisk i metod badawczych. Przeprowadzenie takich badań w przypadku filtrów pojazdów o dużym zapotrzebowaniu powietrza jest kosztowne, pracochłonne i wymaga zużycia znacznej ilości pyłu testowego. Przedstawiona w pracach [5, 6] metodyka pozwala na przeprowadzenie takich badań przy znacznym ograniczeniu ich czasu i kosztów. Jako pierwszy stopień filtracji wykorzystano pojedynczy cyklon zwrotny z wlotem stycznym [5] bądź cyklon przelotowy [6], a jako drugi stopień filtracji przegrodę porowatą o proporcjonalnie zmniejszonej powierzchni gwarantującej zachowanie wartości dopuszczalnej prędkości filtracji. Podobną metodykę zastosowano w pracy [21], gdzie, jako pierwszy stopień filtracji zastosowano odpowiednio skonstruowany, niewielkich rozmiarów, monocyclon.

Brak jest natomiast informacji, w jakim stopniu zmieniony przez filtr bezwładnościowy skład granulometryczny pyłu wpływa na wartość współczynnika chłonności pyłu włóknin filtracyjnych. Dlatego celowe jest przeprowadzenie odpowiednich badań pozwalających określić wpływ składu granulometrycznego pyłu na wartość współczynnika chłonności pyłu włókniny filtracyjnej.

3. Cel i zakres badań

Celem badań było uzyskanie charakterystyk filtracyjnych badanej włókniny filtracyjnej pracującej, jako filtr jednostopniowy oraz w warunkach odpowiadających drugiemu stopniowi filtracji za cyklonem przelotowym oraz wyznaczenie jej współczynnika chłonności pyłu km. Przedmiotem badań była włóknina filtracyjna AC-301 firmy Korea Filtration Technologies Co. (tab. 2) ukształtowana w cylindryczne wkłady filtracyjne.

Zakres badań obejmował określenie charakterystyk: skuteczności, dokładności filtracji i oporów przepływu wkładu filtracyjnego, w funkcji współczynnika chłonności pyłu k_m (masy m_z) pyłu testowego PTC-D (krajowy zamiennik pyłu AC-Fine) zatrzymanego przez wkład oraz w funkcji masy m_d pyłu zadozowanego do układu:

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

Tabela 2. Parametry badanej włókniny filtracyjnej [13]

Parametr	Jednostka	Wartość
Gramatura	[g/m ²]	210 ± 10%
Grubość	[mm]	2,34÷2,86
Przepuszczalność powietrza	[cm ³ /cm ² /s]	80÷110 przy 120 Pa
Wytrzymałość na rozciąganie	[N/50 mm]	>98
Wytrzymałość na zginanie	[N/30 mm]	1,47÷2,94

Charakterystyki zostały wykonane dla wkładów z włókniny filtracyjnej pracujących w warunkach pracy filtru jednostopniowego oraz dla wkładów z włókniny pracujących za filtrem bezwładnościowym – cyklonem przelotowym przy trzech charakterystycznych wartościach prędkości filtracji odpowiadających:

- $v_{F1} = 0,08$ m/s – prędkości filtracji typowej dla papierów filtracyjnych,
- $v_{F3} = 0,27$ m/s – prędkości zbliżonej do podawanej (przez Mann+Hummel), jako maksymalna dla włókien filtracyjnych,
- $v_{F2} = 0,17$ m/s – prędkości pośredniej.

Badania włókniny pracującej w warunkach filtracji jednostopniowej prowadzono przy stężeniu zapylenia $s = 0,5$ g/m³, a w przypadku włókniny pracującej za cyklonem przelotowym, stężenie pyłu na wlocie do cyklonu ustalono na $s = 1$ g/m³. Stosowano pył testowy PTC-D będący krajowym zamiennikiem pyłu AC-Fine, którego skład chemiczny i granulometryczny podano w normie PN-S-34040 [16].

Podczas badań włókniny pracującej w warunkach odpowiadających drugiemu stopniowi filtracji zastosowano ciągłe, eiekcyjne odsysanie odseparowanego przez cyklon pyłu. Przyjęto stopień odsysania pyłu, definiowany, jako iloraz wartości strumienia powietrza odsysanego z osadnika cyklonu i wartości strumienia powietrza wypływającego z cyklonu (czystego), równy $m_o = 10\%$.

4. Metodyka i warunki badań włókniny filtracyjnej

W celu określenia wartości współczynnika chłonności pyłu k_m niezbędna jest znajomość masy pyłu m_{cv} zatrzymanego na powierzchni 1 m² włókniny filtracyjnej do osiągnięcia przyjętego oporu dopuszczalnego Δp_{fdop} . Zaczerpnięta z prac [3, 5, 6] metodyka umożliwiła wyznaczenie współczynnika k_m oraz charakterystyk filtracyjnych wycinka włókniny filtracyjnej w postaci wkładu badawczego, pracującego zarówno w warunkach odpowiadającym pierwszemu jak i drugiemu stopniowi filtracji.

Badania przeprowadzono na stanowisku (rys. 7), którego głównym elementem jest segment filtracyjny zbudowany z pojedynczego cyklonu przelotowego będącego elementem multicyklonu filtru powietrza samochodu ciężarowego oraz ustawionego za nim szeregowo cylindrycznego badawczego wkładu filtracyjnego, wykonanego z badanej włókniny filtracyjnej. Wkład filtracyjny zamknięto w metalowej, szczelnej obudowie, do której dołączono przewód rurowy doprowadzający strumień powietrza wraz z pyłem. Dozowany pył trafia prosto na wkład filtracyjny W trakcie badań włókniny w warunkach filtracji dwustopniowej w miejsce przewodu rurowego wstawiano cyklon przelotowy wraz z obudową osadnika pyłu. Badawczy wkład filtracyjny wykonany został na bazie wkładu filtracyjnego o symbolu AP 019 firmy WIX Filtron, przy czym zmianie uległa liczba plis, a tym samym powierzchnia materiału filtracyjnego.

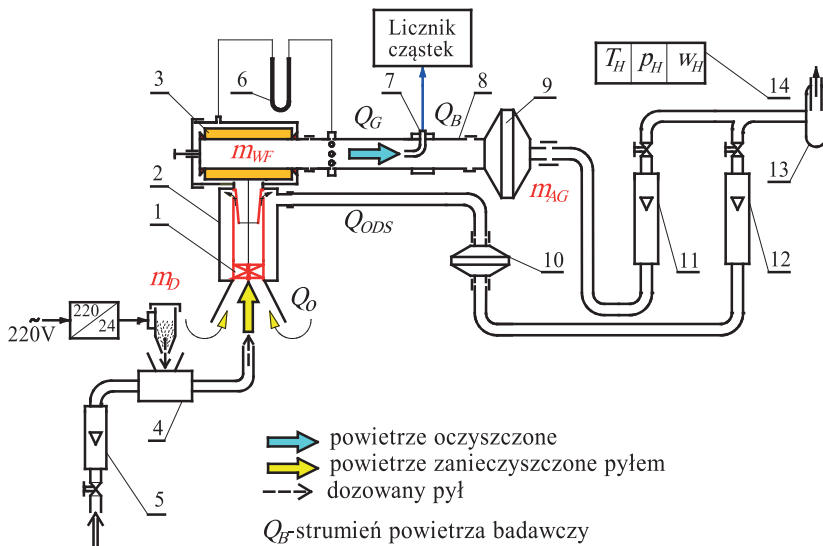
Powierzchnia F_w badanej włókniny dobrana została tak, aby dla maksymalnej wartości strumienia powietrza Q_{Gmax} wypływającego z pojedynczego cyklonu określonego zależnością

(5), prędkość filtracji v_F nie przekroczyła podawanej przez Mann+Hummel maksymalnej prędkości filtracji $v_{F, \max} = 0,33 \text{ m/s}$ [2]:

$$Q_{G \max} = \frac{Q_{sil \max}}{n}, \quad (5)$$

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

Istotnym elementem stanowiska pomiarowego jest licznik cząstek stałych Pamas - 2132. Umożliwia on rejestrację liczby i średnicy d_z ziaren pyłu w strumieniu powietrza za badawczym wkładem filtracyjnym, w zakresie $0,7 \div 100 \mu\text{m}$ podzielonym na 32 przedziały pomiarowe, będące zakresami ograniczonymi średnicami ($d_{z \min} \div d_{z \max}$). Szerokość przedziałów można zaprogramować dowolnie. Sensor urządzenia przystosowany jest do pracy przy stężeniu zanieczyszczeń nieprzekraczającym $s = 0,25 \text{ g/m}^3$. Do analizy składu granulometrycznego pyłu znajdującego się w strumieniu powietrza licznik cząstek wykorzystuje zjawisko rozpraszania wiązki promieniowania laserowego o długości fali 680 nm. Liczbę zliczeń składających się na cykl pomiarowy można zaprogramować dowolnie. Wyniki przedstawiane są w postaci tabel zawierających granice przedziałów pomiarowych oraz liczbę ziaren pyłu o rozmiarach mieszczących się w tych granicach. Sonda pomiarowa licznika cząstek umieszczona jest w osi przewodu pomiarowego w odpowiedniej odległości za badawczym wkładem filtracyjnym i skierowana wlotem w kierunku napływu strumienia powietrza Q_G .



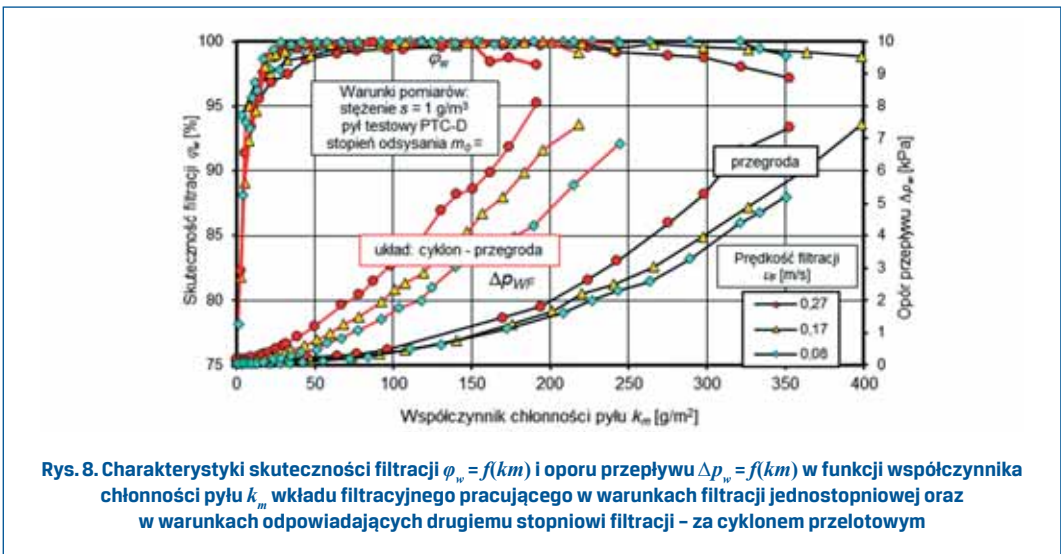
Rys. 7. Schemat funkcjonalny stanowiska do badań włóknin filtracyjnych w systemie „cyklon - przegroda”:
 1 - cyklon, 2 - osadnik pyłu, 3 - wkład badawczy, 4 - dozownik pyłu, 5 - rotometr sprężonego powietrza,
 6 - manometr ciecowy, 7 - przewód pomiarowy, 8 - sonda pyłowa, 9 - filtr absolutny przewodu głównego,
 10 - filtr absolutny strumienia odsysania, 11 - rotometr strumienia głównego, 12 - rotometr strumienia
 odsysania, 13 - wentylator ssawny, 14 - termohigrobarometr

Pozostałe elementy stanowiska to dozownik pyłu, manometr cieczowy typu U-rurka, rotametry pływakowe typu RIN służące do regulacji badawczego strumienia powietrza, termohigrobarometr pozwalający określić ciśnienie, temperaturę i wilgotność powietrza oraz filtry absolutne zabezpieczające przed przedostawaniem się pyłu do rotametrów.

Charakterystyki filtracyjne badanej włókniny filtracyjnej określano metodą wagową w kolejnych j cyklach pomiarowych, których czas trwania (czas równomiernego dozowania i rozprowadzania pyłu testowego w powietrzu wlotowym) przyjęto: $t_{1pom} = 3$ min – w początkowym okresie filtracji i $t_{2pom} = 6$ min – po ustabilizowaniu się skuteczności filtracji φ_w . Badania prowadzono co najmniej do chwili osiągnięcia przez wkład filtracyjny założonej wartości oporu dopuszczalnego $\Delta p_{fdop} = 5$ kPa. Po każdym cyklu pomiarowym rejestrowano opór przepływu oraz określano: z zależności 1 skuteczność filtracji, a z zależności 4 współczynnik chłonności pyłu k_m włókniny filtracyjnej. Pomiaru składu granulometrycznego, a tym samym dokładności filtracji d_{zmax} włókniny filtracyjnej dokonywano w ostatniej minucie trwania danego cyklu pomiarowego.

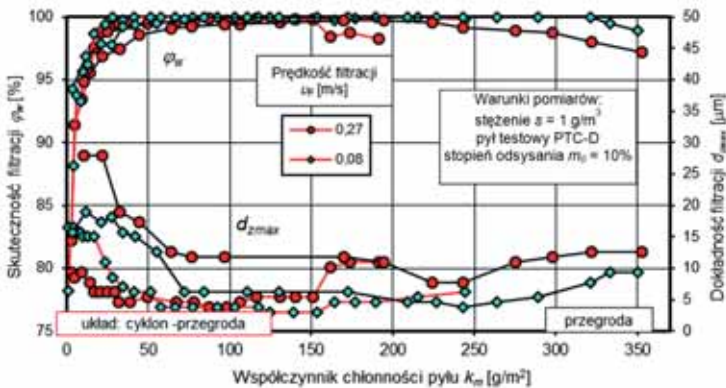
5. Analiza wyników badań

Wyniki badań charakterystyk: skuteczności $\varphi_w = f(k_m)$ i dokładności filtracji $d_z = f(k_m)$ oraz oporów przepływu $\Delta p_w = f(k_m)$ wkładu filtracyjnego (w funkcji współczynnika chłonności pyłu k_m) pracującego w warunkach pracy filtru jednostopniowego oraz w warunkach filtracji odpowiadających drugiemu stopniowi filtracji (za minicyklonem przelotowym) przy trzech różnych prędkościach filtracji vF przedstawiono na rys. 8 i 9.



Rys. 8. Charakterystyki skuteczności filtracji $\varphi_w = f(k_m)$ i oporu przepływu $\Delta p_w = f(k_m)$ w funkcji współczynnika chłonności pyłu k_m wkładu filtracyjnego pracującego w warunkach filtracji jednostopniowej oraz w warunkach odpowiadających drugiemu stopniowi filtracji – za cyklonem przelotowym

Skuteczność filtracji φ_w oraz opór przepływu Δp_w badanej włókniny narastają wraz ze wzrostem masy pyłu m_z zatrzymanego przez wkład filtracyjny, a tym samym współczynnika k_m chłonności pyłu. W początkowym okresie pracy wkładu wzrost skuteczności filtracji jest dość gwałtowny. W literaturze okres ten, trwający od chwili rozpoczęcia eksploatacji wkładu do chwili uzyskania przez materiał filtracyjny ustalonej wartości skuteczności filtracji, przyjęto nazywać okresem filtracji nieustalonej. Następujący po nim okres filtracji ustalonej charakteryzuje się wysoką skutecznością filtracji przekraczającą $\varphi_w = 99\%$ oraz jej bardzo powolnym narastaniem. Uzyskane przebiegi charakterystyk skuteczności φ_w , dokładności filtracji oraz oporów przepływu Δp_w wkładów filtracyjnych pracujących w warunkach filtru jedno jak i dwustopniowego są podobne co do kształtu, lecz różne co do wartości.



Rys. 9. Charakterystyki dokładności filtracji $d_{zmax} = f(k_m)$ oraz skuteczności filtracji $\varphi_w = f(k_m)$ w funkcji współczynnika chłonności pyłu k_m wkładu filtracyjnego pracującego w warunkach filtracji jednostopniowej oraz w warunkach odpowiadających drugiemu stopniowi filtracji - za cyklonem przelotowym

W przypadku badanych włókien przyjęto jako początek okresu filtracji ustalonej chwilę osiągnięcia skuteczności filtracji na poziomie $\varphi_w = 99,5\%$. Początkowa skuteczność filtracji określona po pierwszym cyklu pomiarowym w przypadku włókien pracujących w warunkach filtracji jednostopniowej osiągnęła wartość około $\varphi_w = 95\%$. Ta sama włóknina, kiedy trafiał na nią pył po przejściu przez cyklon przelotowy osiągała, przy zbliżonym współczynniku chłonności pyłu k_m , nieznacznie niższe wartości. Ma to związek ze składem granulometrycznym pyłu jaki na nią trafiał. Jednak już po przekroczeniu współczynnika $k_m = 15 \text{ g/m}^2$ skuteczność filtracji włókniny pracującej jako drugi stopień filtracji przewyższa skuteczność filtracji włókniny pracującej w warunkach filtracji jednostopniowej.

Włóknina na którą trafiał pył o standardowym składzie granulometrycznym osiągnęła (w zależności od prędkości filtracji zmiennej w zakresie $v_F = 0,08 \div 0,27 \text{ m/s}$) ustaloną skuteczność filtracji $\varphi_w = 99,5\%$ przy współczynniku chłonności pyłu na poziomie $k_m = 72 \div 91 \text{ g/m}^2$. Włóknina pracująca jako drugi stopień filtracji za minicyklonem przelotowym skuteczność filtracji na poziomie $\varphi_w = 99,5\%$ osiągnęła przy współczynniku $k_m = 25 \div 30 \text{ g/m}^2$.

W początkowym okresie pracy wkładu odpowiadającym warunkom pracy filtru jedno-stopniowego, średnice przepuszczonych ziaren pyłu wynosiły $d_{zmax} = 15 \div 28 \mu\text{m}$, przy czym wartości wyższe dotyczą większych prędkości filtracji. W początkowym okresie pracy wkładów odpowiadających warunkom filtracji dwustopniowej rozmiary ziaren d_{zmax} przepuszczonych przez wkład filtracyjny przyjmują znacznie mniejsze maksymalne wartości: przy prędkości filtracji $0,27 \text{ m/s}$ – $d_{zmax} = 4,6 \div 9,4 \mu\text{m}$ oraz $d_{zmax} = 6,2 \div 16,6 \mu\text{m}$ przy prędkości filtracji $0,08 \text{ m/s}$. Jest to spowodowane tym, że pył po przejściu przez cyklon pozbawiony jest większości cząstek o wymiarach powyżej $15 \div 20 \mu\text{m}$. Wzrost dokładności filtracji układu „cyklon – przegroda porowata” wraz ze wzrostem prędkości filtracji jest związany z charakterystyką zastosowanego cyklonu – wzrostem jego skuteczności i dokładności wraz ze wzrostem strumienia powietrza [7].

Wraz z przyrostem masy pyłu na wkładzie filtracyjnym średnice ziaren d_{zmax} przepuszczonych przez układ przyjmują coraz mniejsze maksymalne wartości i stabilizują się na poziomie $d_{zmax} = 5 \div 7 \mu\text{m}$ w przypadku włókniny pracującej za minicyklonem przelotowym oraz $d_{zmax} = 6,2 \div 11,8 \mu\text{m}$ w sytuacji gdy pył trafiał bezpośrednio na włókninę. Rozpoczyna się wówczas zasadniczy (II) okres pracy wkładu, którego czas zależy od prędkości filtracji i kończy się w chwili nagłego spadku dokładności i skuteczności filtracji. Następujący po nim trzeci (III) okres pracy włóknin charakteryzuje się więc powolnym spadkiem skuteczności filtracji oraz pojawianiem się w strumieniu powietrza za badanym wkładem filtracyjnym ziaren pyłu o coraz większych rozmiarach.

W przypadku badanych włóknin przyjęto jako granicę rozdziału okresów II i III chwilę uzyskania przez włókninę skuteczności filtracji $\varphi_w = 99,5\%$. Wartość tę badana włóknina pracująca w warunkach filtracji jedno-stopniowej przy prędkości filtracji $v_F = 0,27 \text{ m/s}$ osiągnęła przy współczynniku chłonności pyłu $k_m = 240,5 \text{ g/m}^3$. Im mniejsza prędkość filtracji tym spadek skuteczności (początek III okresu pracy wkładu) występuje przy większej wartości współczynnika k_m . Przy prędkości filtracji $v_F = 0,17 \text{ m/s}$ – $k_m = 297,3 \text{ g/m}^3$, a przy $v_F = 0,08 \text{ m/s}$ – $k_m = 350,5 \text{ g/m}^3$ [8].

W trakcie badań włókniny pracującej za cyklonem, spadek skuteczności filtracji zaobserwowano po osiągnięciu współczynnika $k_m = 155 \text{ g/m}^2$ przy prędkości filtracji $v_F = 0,27 \text{ m/s}$ oraz $k_m = 208 \text{ g/m}^2$ przy prędkości filtracji $v_F = 0,17 \text{ m/s}$. Przy najniższej prędkości filtracji $v_F = 0,08 \text{ m/s}$ nie zaobserwowano spadku skuteczności filtracji do ustalonego poziomu $99,5\%$.

Intensywność narastania oporu przepływu Δp_w zwiększa się wraz ze wzrostem prędkości filtracji v_F , zarówno w warunkach pracy odpowiadającym filtracji jedno-stopniowej jak i dwustopniowej. Najbardziej intensywny wzrost oporów przepływu zaobserwowano przy prędkości filtracji $v_F = 0,27 \text{ m/s}$, a najwolniejszy przy prędkości filtracji $v_F = 0,08 \text{ m/s}$, co jest zgodne z ogólnymi warunkami przepływu przez przegrodę porowatą. To właśnie opór przepływu limituje czas pracy filtru powietrza. W warunkach eksploatacji dopuszczalny opór przepływu, w zależności od filtru powietrza i pojazdu, ustalany przez producenta przyjmuje wartości w zakresie $5 \div 7 \text{ kPa}$. Podczas badań współczynniki chłonności pyłu k_m włóknin określano przy oporze przepływu $\Delta p_w = 5 \text{ kPa}$.

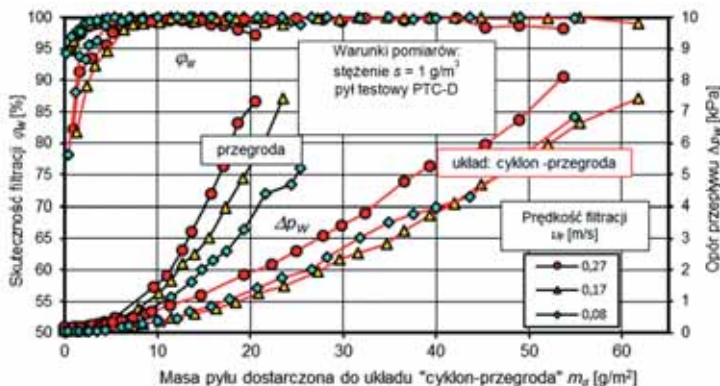
Z rysunku 8 wynika, że współczynniki chłonności pyłu włókniny pracującej jako drugi stopień filtracji przyjmują wartości o około 50% mniejsze niż w przypadku gdy włóknina

spełniała rolę pierwszego stopnia filtracji strumienia powietrza zanieczyszczonego pyłem o standardowym składzie frakcyjnym. Dla takich warunków współczynniki chłonności pyłu przyjmują wartości: $k_m = 290 \text{ g/m}^2$ przy prędkości filtracji $v_F = 0,27 \text{ m/s}$, $k_m = 330 \text{ g/m}^2$ przy $v_F = 0,17 \text{ m/s}$ oraz $k_m = 343 \text{ g/m}^2$ przy $v_F = 0,08 \text{ m/s}$. W przypadku gdy na włókninę trafiał pył o składzie frakcyjnym zmienionym przez cyklon wartości te były mniejsze i wynosiły odpowiednio: $k_m = 135 \text{ g/m}^2$ przy $v_F = 0,27 \text{ m/s}$, $k_m = 164,3 \text{ g/m}^2$ przy $v_F = 0,17 \text{ m/s}$ oraz $k_m = 203,2 \text{ g/m}^2$ przy $v_F = 0,08 \text{ m/s}$. Według badań przedstawionych w [3] papiery filtracyjne, przy zbliżonej prędkości filtracji $v_F = 0,06 \text{ m/s}$, jak badane włókniny, osiągają znacznie mniejsze wartości współczynnika chłonności pyłu nieprzekraczające 40 g/m^2 .

Zmniejszenie wartości współczynnika k_m chłonności pyłu włókniny pracującej jako drugi stopień filtracji za cyklonem osiowym przelotowym tłumaczyć należy tym, że pył po przejściu przez cyklon jest pozbawiony ziaren pyłu o największych rozmiarach przekraczających $d_{zmax} = 15\div 20 \mu\text{m}$, co ma wpływ na warunki pracy przegrody filtracyjnej. Ziarna pyłu o niewielkich średnicach znacznie łatwiej wnikają w strukturę materiału filtracyjnego i szczelniej ją wypełniają niż ziarna pyłu o większych rozmiarach. Wolne przestrzenie pomiędzy aglomeratami pyłu powstałymi z ziaren o niewielkich rozmiarach są mniejsze niż w przypadku dużych ziaren pyłu, co skutkuje większą prędkością przepływu areozolu, a tym samym zwiększonym oporem przepływu.

Zastosowanie filtrów bezwładnościowych jako pierwszy stopień filtracji skutkuje intensywniejszym narastaniem oporu przepływu oraz zmniejszeniem wartości współczynnika chłonności pyłu włókniny filtracyjnej k_m , co znacząco skraca czas pracy filtru. Wydawało by się więc, że niecelowe jest stosowanie systemu filtracji „filtr bezwładnościowy – przegroda porowata”.

Analiza charakterystyk skuteczności filtracji i oporu przepływu w funkcji masy pyłu dostarczonego wraz z powietrzem do filtru (rys. 10) pokazuje jednak, że czas pracy do osiągnięcia oporu dopuszczalnego $\Delta p_{fdop} = 5 \text{ kPa}$ włókniny pracującej w systemie „cyklon – przegroda porowata” jest niespełna trzykrotnie dłuższy (niezależnie od prędkości filtracji) w stosunku do czasu pracy wkładu filtracyjnego, na który trafiał pył bezpośrednio z otoczenia.



Rys. 10. Charakterystyki skuteczności filtracji $\phi_w = f(m_d)$ i oporu przepływu $\Delta p_w = f(m_d)$ włókninowego wkładu filtracyjnego w funkcji masy pyłu m_d dostarczonego do filtru

Tłumaczyć to należy tym, że w wyniku zastosowania dwustopniowego systemu filtracji „cyklon – przegroda porowata” zdecydowana większość pyłu (w przypadku badanego zestawu około 87%) jest odseparowana przez pierwszy stopień filtracji. Na wkład filtracyjny trafia więc tylko 13% masy pyłu, jaka została wprowadzona do zestawu filtracyjnego.

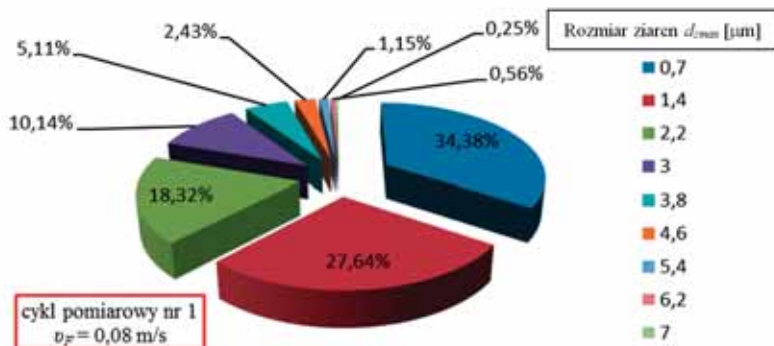
Tym samym (niezależnie od prędkości filtracji) nastąpiło wydłużenie o ponad 100% czasu pracy wkładu pracującego jako drugi stopień filtracji.

Na rysunkach 11÷14 przedstawiono zmianę składu granulometrycznego pyłu w strumieniu powietrza za wkładem filtracyjnym, pracującym w warunkach filtracji dwustopniowej, przy prędkości filtracji $v_F = 0,08$ m/s, w charakterystycznych cyklach pomiarowych odpowiadających okresom I i II pracy wkładu. Skład frakcyjny przedstawiono w postaci procentowego udziału U_{pi} ziaren pyłu poszczególnych grup wymiarowych określonego z zależności:

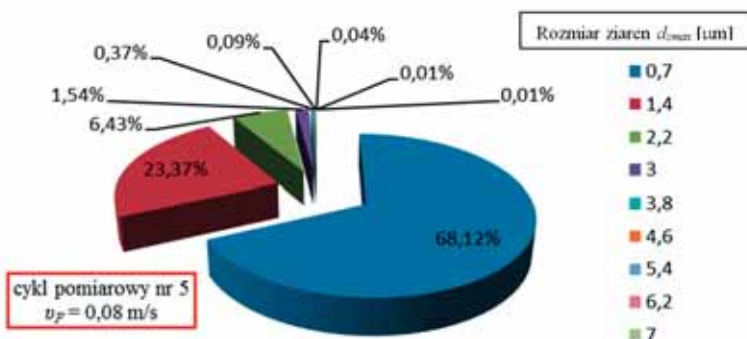
$$Up_i = \frac{N_i}{N} = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^{32} N_i}, \quad (6)$$

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

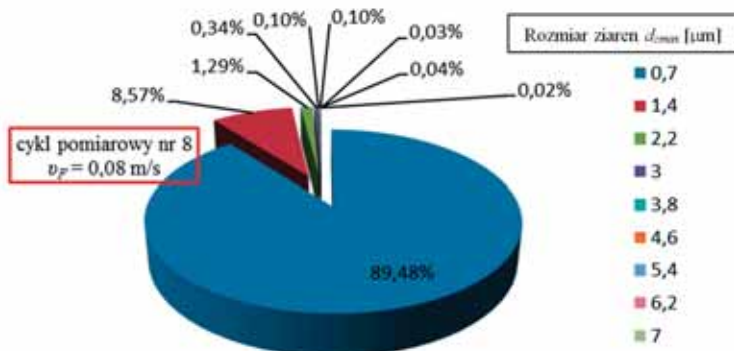
Wraz ze wzrostem masy pyłu zatrzymanego na badawczym wkładzie filtracyjnym pracującym w warunkach odpowiadających zarówno filtracji jednostopniowej jak i dwustopniowej, w powietrzu za wkładem obserwowano systematyczny wzrost udziału procentowego cząstek pyłu o małych rozmiarach – poniżej $d_{zmax} = 1,4$ μm . Podczas cyklu badawczego nr 1 udział tych cząstek za wkładem pracującym, jako drugi stopień filtracji, przy prędkości filtracji $v_F = 0,08$ m/s wyniósł $U_{p1} = 34,38\%$, a w czasie cyklu pomiarowego nr 5 udział ten ma wartość $U_{p5} = 68,12\%$. W cyklu pomiarowym nr 8, który odpowiada okresowi stabilnej pracy wkładu, udział cząstek o rozmiarach poniżej 1,4 μm wynosi $U_{p8} = 89,48\%$ i utrzymuje się na tym poziomie do końca czasu pracy wkładu, osiągając w cyklu pomiarowym nr 14 udział wynoszący $U_{p14} = 90,49\%$. Zaobserwowano gwałtowny spadek udziału cząstek o większych rozmiarach, przykładowo w trakcie cyklu pomiarowego nr 1 udział cząstek o średnicach $d_{zmax} = 2,2\div 3$ μm wynosi $U_{p1} = 18,32\%$, podczas gdy w trakcie cyklu pomiarowego nr 11 udział wszystkich cząstek o średnicy powyżej $d_{zmax} = 2,2$ μm ma wartość $U_{p14} = 1,34\%$.



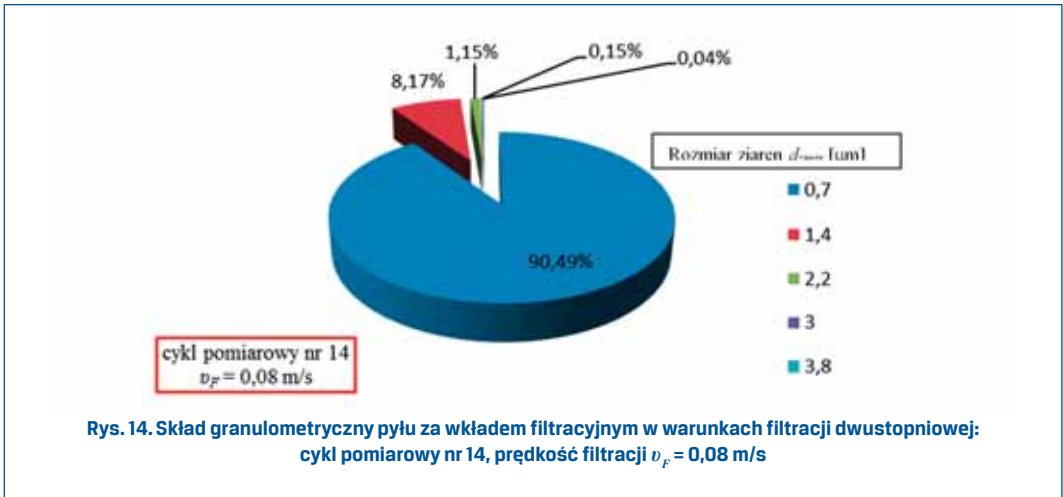
Rys. 11. Skład granulometryczny pyłu za wkładem filtracyjnym pracującym w warunkach filtracji dwustopniowej: cykl pomiarowy nr 1, prędkość filtracji $v_f = 0,08$ m/s



Rys. 12. Skład granulometryczny pyłu za wkładem filtracyjnym w warunkach filtracji dwustopniowej: cykl pomiarowy nr 5, prędkość filtracji $v_f = 0,08$ m/s



Rys. 13. Skład granulometryczny pyłu za wkładem filtracyjnym w warunkach filtracji dwustopniowej: cykl pomiarowy nr 8, prędkość filtracji $v_f = 0,08$ m/s



Analizując skład granulometryczny pyłu za wkładem filtracyjnym w trakcie końcowych cykli pomiarowych, przy wyższych prędkościach filtracji, widać ponowny wzrost udziału cząstek o większych średnicach, co jest spowodowane zjawiskiem tzw. „przebicia” wkładu filtracyjnego i porywaniem przez strumień aerozolu zatrzymanych wcześniej cząstek pyłu.

Wnioski

1. Współczynniki chłonności pyłu k_m włókniny filtracyjnej pracującej, jako drugi stopień filtracji za cyklonem przelotowym, wyznaczone na podstawie przedstawionej metodyki, przyjmują w chwili osiągnięcia oporu przepływu $\Delta p_w = 5$ kPa i dla prędkości z zakresu $v_F = 0,08 \div 0,27$ m/s, odpowiednio wartości $k_m = 203 \div 135$ g/m². Wartości te są kilkakrotnie większe niż wartości papierów filtracyjnych badanych w zbliżonych warunkach, co wynika głównie z znacznie większej grubości włókien ($g = 2,4 \div 3,9$ mm) niż papierów ($g = 0,6 \div 0,9$ mm).
2. Współczynniki chłonności pyłu k_m włókniny pracującej jako drugi stopień filtracji za cyklonem przelotowym przyjmują wartości o około 50% mniejsze niż w przypadku włókniny pracującej w warunkach filtracji jednostopniowej ($k_m = 343 \div 290$ g/m²), na którą trafia pył o standardowym składzie granulometrycznym.
3. Zastosowanie filtra bezwładnościowego, jako pierwszy stopień filtracji skutkuje wydłużeniem czasu eksploatacji wkładu włókninowego pomimo zmniejszenia wartości współczynnika chłonności pyłu k_m , co jest spowodowane mniejszą (około 90%) masą pyłu skierowanego na wkład filtracyjny.
4. Ze względu na znacznie większą (pięciokrotnie) chłonność pyłową włókien pracujących, jako drugi stopień filtracji niż papierów filtracyjnych pracujących w takich samych warunkach, czas pracy wkładu filtracyjnego wykonanego z włókniny (do osiągnięcia dopuszczalnego oporu przepływu $\Delta p_w = 5$ kPa) będzie odpowiednio dłuższy.

LITERATURA

- [1] BACZEWSKI K., HEBDA M.: *Filtracja płynów eksploatacyjnych*, MCNEMT, Radom, 1991/92.
- [2] DURST M., KLEIN G., MOSER N.: *Filtration in Fahrzeugen*, Materiały informacyjne firmy Mann+Hummel GmbH, Ludwigsburg, Niemcy, 2005.
- [3] DZIUBAK T.: *Analiza procesu filtracji powietrza wlotowego do silników pojazdów specjalnych*, Rozprawa habilitacyjna, WAT, Warszawa, 2008.
- [4] DZIUBAK T.: *Filtracja powietrza wlotowego do silników spalinowych pojazdów mechanicznych*, WAT, Warszawa, 2012.
- [5] DZIUBAK T.: *Badania eksperymentalne papieru filtracyjnego do dwustopniowego filtra powietrza silnika pojazdu specjalnego*, Biuletyn WAT, vol. LIX, nr. 3, 2010.
- [6] DZIUBAK T., SZWEDKOWICZ S.: *Badania eksperymentalne papieru filtracyjnego pracującego w systemie „cyklon – przegroda porowata”*, Biuletyn WAT, vol. LXII, nr. 1, 2013.
- [7] DZIUBAK T., SZWEDKOWICZ S.: *Badania eksperymentalne cyklonów przelotowych filtrów powietrza silników spalinowych*, Biuletyn WAT, vol. LXII, nr. 2, 2013.
- [8] DZIUBAK T., SZWEDKOWICZ S.: *Badania eksperymentalne włókniny do filtracji powietrza wlotowego silników spalinowych pojazdów mechanicznych*, Silniki spalinowe, 155(4), 2013.
- [9] FLECK S., HEIM M., BECK A., MOSER N., DURST M.: *Realitätsnahe Prüfung von Motoransaugluftfiltern*, MTZ 05/2009 Jahrgang 70.
- [10] GRAFE T. H., GRAHAM K. M.: *Nanofiber Webs from Electrospinning. Nonwovens in Filtration*, 5th International Conference, Stuttgart, Germany, March 2003.
- [11] 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.
- [12] GRAHAM K., OUYANG M., RAETHER T., GRAFE T., MC DONALD B., KNAUF P.: *Polymeric Nanofibers in Air Filtration Applications*, 5th Annual Technical Conference & Expo of the American Filtration & Separations Society, Galveston, Texas, April 9-12, 2002.
- [13] Korea Filtration Technologies Co.: *Performance mill sheet*, materiały udostępnione przez WIX Filtron, Gostyń, 2013.
- [14] KOSMIDER K., SCOTT J.: *Polymeric Nanofibres Exhibit an Enhanced Air Filtration Performance*, Filtration & Separation, vol. 39, no 6, 2002.
- [15] NORTON T.: *Hybrid membrane technology. A new nanofibre media platform*, Filtration & Separation, vol. 44, no 2, 2007.
- [16] PN-S-34040, *Filtry powietrza. Wymagania i badania*, PKN (Polski Komitet Normalizacyjny), 1996.
- [17] *PowerCore™, Innovative Air Filter Technology*, Materiały informacyjne firmy Donaldson, 2014.
- [18] *Power Core G2 and Ultra-Web® Filtration Technology*, Materiały informacyjne firmy Donaldson, 2014.
- [19] SANDERS R., BÜHLER A., DURST M., MOSER N., PELZ A.: *Effiziente Motorluftfiltration durch den Einsatz von Nanofasern*, MTZ 68, no 2, 2007.
- [20] SCHLOSS M.: *Upgrading indoor air filtration: The right decision, the right time*, Filtration & Separation, vol. 44, no 1, 2007.
- [21] SZWEDKOWICZ S.: *Projekt wstępny metodyki badań chłonności pyłowej materiałów filtracyjnych filtrów powietrza pojazdów mechanicznych*, praca dyplomowa, kierownik T. Dziubak, WAT, Warszawa, 2010.
- [22] TRAUB M.: *Mahle Symmetrix Hohe Filterleistung auf kleinem Bauraum*, MTZ, 68, no 2, 2007.