

Dr hab. inż. Tadeusz DZIUBAK, prof. WAT
Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia Techniczna
ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2
00-908 Warszawa
Tel: 022 68 37 121
e-mail: tdziubak@wat.edu.pl

Mgr inż. Sebastian SZWEDKOWICZ
Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia Techniczna
ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2
00-908 Warszawa
e-mail: sszwedkowicz@wat.edu.pl

Właściwości eksploatacyjne włókninowych przegród filtracyjnych powietrza wlotowego silników spalinowych pracujących w układach jedno- i dwustopniowych

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

Streszczenie. Przedstawiono parametry podstawowych materiałów filtracyjnych powietrza wlotowego silników pojazdów mechanicznych. Omówiono właściwości eksploatacyjne filtra powietrza i określające je podstawowe parametry. Przedstawiono wpływ warunków filtracji jednostopniowej i dwustopniowej na właściwości eksploatacyjne, a w tym na chłonność materiału filtracyjnego. Opracowano metodykę i warunki badań włóknin filtracyjnych pracujących w warunkach filtracji jednostopniowej i dwustopniowej. Wyznaczono charakterystyki skuteczności filtracji i oporów przepływu włóknin filtracyjnych w zależności od współczynnika chłonności pyłu. Dla dopuszczalnej wartości oporu przepływu wyznaczono wartości współczynnika chłonności pyłu badanych włóknin. Wykazano wpływ składu frakcyjnego pyłu za filtrem bezwładnościowym na zmniejszenie wartości współczynnika chłonności pyłu włóknin pracujących w warunkach filtracji dwustopniowej. Przedstawiono korzyści w postaci wydłużenia czasu eksploatacji i minimalizacji zużycia elementów silnika wynikające z stosowania filtra bezwładnościowego, jako pierwszego stopnia filtracji powietrza.

1. Wprowadzenie

Współczesne silniki spalinowe charakteryzuje praca przy coraz większych obciążeniach mechanicznych i cieplnych ich elementów, lecz mimo to oczekuje się od nich coraz większej niezawodności i trwałości. W sprostaniu tym wymogom dużą rolę odgrywa czystość płynów eksploatacyjnych, a w szczególności powietrza wlotowego do silników spalinowych.

Zapewnienie odpowiedniej czystości powietrza wlotowego do silników spalinowych pojazdów mechanicznych i maszyn roboczych, a tym samym zminimalizowanie zużycia skojarzeń ciernych oraz uzyskanie dużej trwałości i niezawodności zespołów, było zawsze i pozostaje nadal ważnym problemem eksploatacyjnym i konstrukcyjnym, szczególnie gdy

pojazdy eksploatowane są w warunkach dużego (około 1 g/m^3) stężenia zapylenia powietrza. Dotyczy to głównie pojazdów specjalnych i wojskowych (czołgi, bojowe wozy piechoty, działa samobieżne, samochody specjalne), wyposażonych w silniki o ZS dużej mocy, których maksymalne zapotrzebowanie powietrza Q_{sil} znacznie przekracza wartość 1 kg/s . Na przykład do układu zasilania powietrzem silnika czołgu T-72 (o objętości skokowej $V_{ss} = 38,8 \text{ dm}^3$) jadącego z prędkością $v = 20 \text{ km/h}$ po drogach poligonowych, przy stężeniu zapylenia powietrza $s = 1 \text{ g/m}^3$, dostaje się wraz z powietrzem w ciągu 1000 km przebiegu ponad 170 kg pyłu. Dla porównania silnik samochodu osobowego ($V_{ss} = 1,5 \text{ dm}^3$) podczas jazdy z prędkością 60 km/h po drogach utwardzonych ($s = 10 \text{ mg/m}^3$) zasysa wraz z powietrzem w ciągu 20 tys. km ponad $0,6 \text{ kg}$ pyłu. Z danych tych wynika, że filtr powietrza samochodu osobowego i pojazdu specjalnego nie może być tej samej konstrukcji i działać na tej samej zasadzie.

Dlatego samochody ciężarowe i pojazdy specjalne wyposaża się w dwustopniowe systemy filtracji powietrza wlotowego silników, w których pierwszym stopniem jest filtr bezwładnościowy, a drugim papierowy wkład filtracyjny. Stosowane powszechnie do filtracji powietrza wlotowego silników papiery filtracyjne charakteryzują się odpowiednio wysoką skutecznością filtracji, ale także małą wartością współczynnika chłonności pyłu ($k_m = (200 \div 240) \text{ g/m}^2$). Gdy na wkład papierowy trafia pył po przejściu przez filtr bezwładnościowy, jego chłonność maleje nieomal czterokrotnie [10].

Nowoczesne technologie produkcji włókien spowodowały, że coraz częściej są one stosowane, jako materiały filtracyjne powietrza wlotowego silników pojazdów mechanicznych. Ze skąpych danych firm produkujących włókniny wynika, że charakteryzują się one znacznie większym niż papiery filtracyjne współczynnikiem chłonności pyłu $k_m = (450 \div 500) \text{ g/m}^2$ [30]. Nie są dostępne dane informujące o skuteczności, dokładności oraz trwałości wkładów filtracyjnych z włókien. Stąd wynika konieczność przeprowadzenia odpowiednich badań.

2. Zanieczyszczenia powietrza i ich wpływ na trwałość silnika

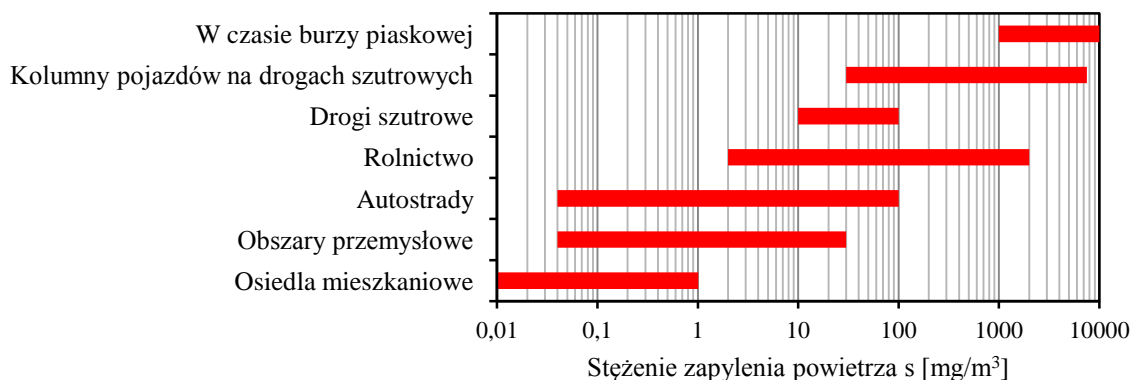
Powietrze atmosferyczne zasysane przez silniki spalinowe pojazdów mechanicznych zawiera znaczne ilości zanieczyszczeń, będące wynikiem [4, 5, 23]:

- działania przyrody – ponad 85% ogólnej masy zanieczyszczeń (pyły, zarodniki roślinne, bakterie, sole oraz gazy, np.: tlenek węgla, dwutlenek siarki, trójtlenek siarki),
- unoszenia z podłoża pyłów mineralnych przez ruch pojazdów mechanicznych lub przez wiatr – pył drogowy,
- emisji spalin przez silniki pojazdów mechanicznych (pył, sadza, związki ołowiu, ciężkie węglowodory, cząstki stałe PM oraz gazy) [4, 23],
- emisji przez pojazdy mechaniczne pyłów pochodzących z zużycia materiałów ciernych okładzin hamulców oraz tarcz sprzęgłowych, opon i nawierzchni jezdni [5]
- działalności przemysłu.

W zależności od wymiarów cząstek pyłu wyróżnia się [4]:

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

Eksploatatorów pojazdów mechanicznych dotyczą głównie te zanieczyszczenia, które zasysane wraz z powietrzem zarówno przez tłokowe jak i turbinowe silniki spalinowe powodują przyspieszone zużycie elementów ograniczając ich niezawodność i trwałość. Powszechnym szkodliwym dla eksploatowanych urządzeń technicznych zanieczyszczeniem powietrza jest pył drogowy, który unoszony jest z powierzchni ziemi podczas ruchu pojazdów mechanicznych lub przez wiatr, a następnie zasysany jest wraz z powietrzem do cylindrów silników. Większość pyłów występujących w przyrodzie, a w tym i pył drogowy, to pyły polidyspersyjne o zróżnicowanych właściwościach fizykochemicznych. W powietrzu atmosferycznym znajdują się zanieczyszczenia o rozmiarach ziaren w zakresie (0,001 ÷ 1000) μm . Stężenie zapylenia powietrza, określające masę zanieczyszczeń (wyrażoną w gramach bądź miligramach) zawartą w jednym metrze sześciennym powietrza jest uzależnione od wielu czynników takich jak: rodzaj podłoża, warunki klimatyczne, rodzaj układu jezdni, wysokość nad podłożem, rodzaj gleb i zakładów przemysłowych. Wartości stężenia zapylenia powietrza w zależności od warunków eksploatacji przedstawiono na rysunku 1 [2].

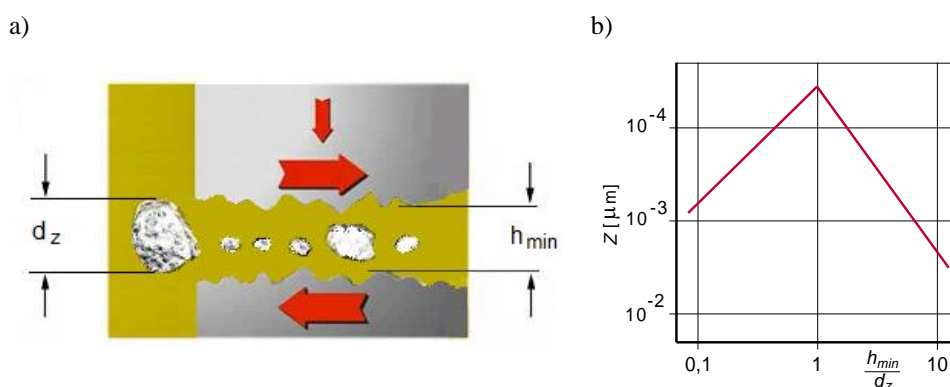


Rys. 1. Stężenie zapylenia powietrza w zależności od warunków eksploatacji [2]

Czerpnie powietrza układów dolotowych silników spalinowych zasysają wraz z powietrzem zanieczyszczenia o rozmiarach ziaren nieprzekraczających $d_z = (80 \div 100) \mu\text{m}$. Część zanieczyszczeń powietrza, które dostaną się do cylindrów silnika poprzez układ zasilania powietrzem zostaje spalona, część jest usuwana wraz ze spalinami, pozostałość, głównie pył mineralny – około (10 ÷ 20)%, osiada na ściankach tulei cylindrowej tworząc wraz z olejem rodzaj pasty ścierniej. Osiadły na tulei cylindrowej pył wnika pomiędzy powierzchnie skojarzenia tłok – pierścienie – cylinder (T-P-C) powodując ich przyspieszone zużycie. W trakcie ruchu tłoka w kierunku dolnego martwego punktu (DMP) pył wraz z olejem jest zgarniany jest do miski olejowej, a stamtąd rozprowadzany przez magistralę olejową do smarowanych olejem skojarzeń silnika, powodując tym samym ich przyspieszone zużycie.

W wielu pracach poświęconych badaniom wpływu zanieczyszczeń płynów eksploatacyjnych za zużycie elementów silnika tłokowego stwierdzono, że największe zużycie powodują ziarna pyłu o rozmiarach równych minimalnej grubości filmu olejowego pomiędzy współpracującymi powierzchniami (rys. 2) [1, 12, 13].

Grubość filmu olejowego nie jest wartością stałą, lecz zmienia się w zależności od warunków pracy silnika, a głównie jego obciążenia. Przykładowo w skojarzeniu T-P-C grubość filmu zdeterminowana prędkością tłoka, lepkością oleju i obciążeniem silnika przyjmuje pomiędzy zwrotami zewnętrznymi, dolnym (DMP) i górnym martwym punktem (GMP) maksymalne wartości w granicach $(0,3 \div 7) \mu\text{m}$ [7, 12, 13]. W punktach zwrotnych prędkość tłoka maleje do zera, co jest jednym z powodów ograniczenia grubości filmu olejowego, a nawet jego zaniku i największego zużycia w tych miejscach [7, 13, 18; 19].



Rys. 2. Wpływ grubości filmu olejowego na zużycie skojarzenia: a) działanie cząstek stałych na parę trybologiczną, b) zależność zużycia Z skojarzenia od ilorazu h_{min}/d_z [12]

Istotny wpływ na intensywność zużywania się współpracujących elementów silnika ma także twardość ziaren pyłu, która jest uzależniona od jego składu chemicznego. Głównym składnikiem pyłu drogowego zasysanym wraz z powietrzem do silnika jest krzemionka, której udział w ogólnej masie pyłu może sięgać 90%. Twardość ziaren krzemionki, określana w dziesięciostopniowej skali Mohsa wynosi 7, a więc więcej niż twardość materiałów konstrukcyjnych stosowanych do budowy silników spalinowych. Przykład przedwczesnego zużycia silników zabudowanych w ciężarowych samochodach samowyładowczych pracujących przy wywozie piasku, których przebiegi eksploatacyjne wynosiły maksymalnie do około $(30 \div 40)$ tys. km z uwagi na przedwczesne zużycie skojarzenia T-P-C przedstawiono w [26].

3. Parametry charakteryzujące pracę filtra powietrza

Filtr powietrza, aby móc realizować usuwanie zanieczyszczeń z powietrza wlotowego do silnika pojazdu mechanicznego, musi mieć odpowiednie właściwości eksploatacyjne, które określają następujące podstawowe parametry: skuteczność filtracji, opór przepływu, dokładność filtracji [27].

Skuteczność filtracji φ określa zdolność filtra do jakościowego i ilościowego zatrzymania zanieczyszczeń ze strumienia powietrza. Wyznaczana jest najczęściej, jako iloraz masy m_{PF} pyłu testowego zatrzymanego przez filtr i masy m_{PD} pyłu testowego doprowadzanego do filtra w strumieniu powietrza w jednostce czasu.

$$\varphi = \frac{m_{PF}}{m_{PD}} \cdot 100\% . \quad (1)$$

Opór przepływu filtru powietrza Δp_f określa się jako różnicę ciśnień całkowitych mierzonych bezpośrednio na wlocie p_{c1} i wylocie p_{c2} powietrza z filtru.

$$\Delta p_f = p_{c1} - p_{c2} \text{ [kPa]}. \quad (2)$$

W szczególnym przypadku, jeżeli przewody dolotowy i wylotowy znajdują się na jednakowym poziomie i mają jednakowe średnice $D_1 = D_2$, a tym samym prędkości przepływu powietrza mają te same wartości, wtedy opór przepływu wyraża się różnicą ciśnień statycznych i przyjmuje postać:

$$\Delta p_f = \Delta p_s = p_{s1} - p_{s2} \text{ [kPa]}. \quad (3)$$

Dokładność filtracji oznacza minimalny rozmiar ziarna pyłu d_{zmin} [μm] zatrzymanego przez filtr podczas przepływu przez niego określonej objętości powietrza lub maksymalny rozmiar ziarna pyłu d_{zmax} , który przechodzi przez filtr.

Współczynnik chłonności pyłu k_m jest ilorazem całkowitej masy pyłu m_{CwF} , jaka została zatrzymana przez wkład filtracyjny dla przyjętej wartości Δp_{fdop} i pola powierzchni czynnej papieru filtracyjnego F_w przy założeniu równomiernego rozkładu pyłu na całej powierzchni czynnej papieru F_w :

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

Charakterystyki przegrodowych filtrów powietrza silników pojazdów mechanicznych są funkcją parametrów: przepływającego powietrza, pyłu i struktury warstwy filtracyjnej. W praktyce charakterystyki filtrów powietrza wyznacza się najczęściej w zależności od jednego parametru w warunkach laboratoryjnych na standardowych stanowiskach z wykorzystaniem znormalizowanych testów badawczych oraz pyłu testowego.

W filtrze dwustopniowym pracującym w systemie „multicyklon- przegroda porowata” materiał filtracyjny podlega zanieczyszczeniu pyłem, który po „przejściu” przez filtr bezwładnościowy (multicyklon), ma skład granulometryczny znacznie różniący się od tego, którym charakteryzował się pył zasysany z powietrzem wlotowym do filtru. W zależności od warunków przepływu aerozolu w cyklonach, w powietrzu oczyszczonym (wylotowym z cyklonów) znajdują się ziarna pyłu o rozmiarach poniżej (15÷30) μm . Wynika to z informacji literaturowych [1, 16, 17, 22] jak i badań pojedynczego cyklonu wykonanych przez autorów. Tak, więc na wkład filtracyjny ustawiony szeregowo za multicyklonem przedostają się ziarna pyłu o rozmiarach poniżej tego zakresu. Natomiast filtr jednostopniowy zasysa z otoczenia wraz z powietrzem ziarna pyłu o rozmiarach znacznie większych, chociaż nieprzekraczających wartości 80 μm . W związku z tym proces filtracji w pierwszym jak i w drugim przypadku może przebiegać zupełnie inaczej. Dlatego dla potrzeb projektowania wkładu filtracyjnego filtru dwustopniowego należy dysponować właściwościami eksploatacyjnymi materiału filtracyjnego odpowiednimi dla warunków pracy drugiego stopnia filtru powietrza. Charakterystyki takie są możliwe do uzyskania podczas badań eksperymentalnych, ale wymagana jest tu specjalna metodyka, która zapewni odpowiednie dla II-go stopnia, warunki pracy wkładu filtracyjnego.

4. Charakterystyka materiałów filtracyjnych powietrza wlotowego

Najliczniejszą grupą filtrów powietrza pojazdów mechanicznych i maszyn roboczych są filtry przegrodowe, które ze względu na rodzaj materiału filtracyjnego dzielą się na: powierzchniowe, objętościowe i powierzchniowo – objętościowe.

Papiery filtracyjne (materiały powierzchniowo-objętościowe) są dominującym materiałem filtracyjnym, który stosowany jest do filtracji płynów eksploatacyjnych pojazdów mechanicznych. Producenci materiałów filtracyjnych opisując ich strukturę podają tylko wybrane parametry. Ze względu na to, że firmy produkujące papiery filtracyjne stosują różne metody do określania ich parametrów, trudno jest je porównywać. Ogólnie papiery filtracyjne charakteryzują następujące parametry [8, 11, 14]:

- skuteczność filtracji do $\varphi = 99,99\%$,
- gramatura – $(115 \div 240) \text{ g/m}^2$,
- grubość złoża – $(0,3 \div 0,9) \text{ mm}$,
- wymiar porów – $(40 \div 95) \mu\text{m}$,
- średnica włókien – $(10 \div 20) \mu\text{m}$,
- współczynnik chłonności pyłu – do $(200 \div 240) \text{ g/m}^2$,
- opór przepływu,
- przepuszczalność powietrza.

W dostępnej literaturze krajowej i zagranicznej podawane jest coraz więcej informacji opisujących podstawowe właściwości eksploatacyjne papierów filtracyjnych z dodatkiem nanowłókien w zastosowaniu do filtracji powietrza wlotowego silników spalinowych pojazdów pracujących w trudnych warunkach. [11, 14, 15]. W literaturze podawane są wartości skuteczności i dokładności filtracji oraz wartości współczynnika chłonności pyłu, jednak nie zawsze podawane są warunki, w jakich zostały one wyznaczone. Przykładowo w [11] podano masę pyłu jaka została zatrzymana na wkładach wykonanych z papierów filtracyjnych oraz papierów z warstwą nanowłókien do chwili osiągnięcia wartości oporu przepływu $\Delta p_w = 7,5 \text{ kPa}$ przy strumieniu powietrza $1360 \text{ m}^3/\text{h}$. Wkład wykonany z papieru PA1885 do chwili osiągnięcia wartości $\Delta p_w = 7,5 \text{ kPa}$ zatrzymał 2415 g pyłu, a ten sam papier mający warstwę nanowłókien zatrzymał w tym czasie 3770 g pyłu, a więc o ponad 50% więcej. Nie podano natomiast wartości pola powierzchni materiału filtracyjnego, wobec czego wyznaczenie prędkości filtracji oraz współczynnika chłonności pyłu jest niemożliwe. W [14] podano wartości współczynnika chłonności pyłu papieru filtracyjnego ($k_m = 28 \text{ g/m}^2$) oraz papieru z warstwą nanowłókien ($k_m = 78 \text{ g/m}^2$) wyznaczone z wykorzystaniem pyłu testowego AC Fine ($d_{zmax} = 80 \mu\text{m}$). Wartości współczynnika chłonności pyłu tych samych materiałów filtracyjnych, ale określone z wykorzystaniem cząstek chlorku sodu (o rozmiarach nieprzekraczających $d_z = 0,4 \mu\text{m}$) przyjmują wartości znacznie mniejsze, odpowiednio $k_m = 4 \text{ g/m}^2$ i $k_m = 21 \text{ g/m}^2$. Nie podano natomiast, w jakich warunkach (przy jakim oporze przepływu) wartość współczynnika chłonności została wyznaczona. Zastosowanie warstwy nanowłókien spowodowało w przypadku pyłu AC Fine niemal dwukrotny wzrost współczynnika chłonności pyłu, natomiast w przypadku chlorku sodu wzrost współczynnika chłonności pyłu był ponad czterokrotny. Wartość współczynnika chłonności pyłu papieru filtracyjnego wyznaczonego z wykorzystaniem pyłu o bardzo małych rozmiarach

($d_{zmax} = 0,4 \mu\text{m}$) jest siedmiokrotnie mniejsza niż w przypadku pyłu o rozmiarach dużych ($d_{zmax} = 80 \mu\text{m}$).

Podstawowymi materiałami filtracyjnymi o działaniu objętościowym stosowanymi do filtracji powietrza w pojazdach mechanicznych są syntetyczne włókniny filtracyjne. Tkane materiały włókniste charakteryzują się łatwym do oszacowania rozkładem rozmiarów por oraz możliwością uzyskania pożądanej wartości skuteczności filtracji poprzez zmianę parametrów przędzenia. Materiały tego typu charakteryzują się także łatwością czyszczenia z uwagi na powierzchniowy charakter filtracji. Tkane materiały filtracyjne wykonywane są z jednego gatunku włókien, z wielu gatunków włókien oraz jako układy warstwowe [6].

Nietkane materiały filtracyjne charakteryzują się przede wszystkim większą porowatością i związaną z tym większą przepuszczalnością powietrza (mniejszy opór przepływu). Osiągają one także większe wartości skuteczności filtracji, a dzięki równomiernemu rozkładowi masy zatrzymanego pyłu w całej grubości materiału mogą osiągać duże wartości współczynnika chłonności pyłu. Nieuporządkowane warstwy włókniste formowane są poprzez zgrzewanie lub poprzez igłowanie (zaczepienie mechaniczne) [6].

Rozwój metod formowania włókien (melt-blown, elektroprzędzenie) oraz niskie koszty ich produkcji sprawiają, że włókniny o strukturze nieuporządkowanej (nietkane) są coraz częściej wykorzystywane, jako materiały filtracyjne przegrodowych wkładów filtrów powietrza w pojazdach mechanicznych oraz w instalacjach przemysłowych i sanitarnych [6].

Niewiele jest publikacji, w których przedstawiono wyniki badań włóknin z wykorzystaniem zanieczyszczeń o rozmiarach odpowiadających rozmiarom ziaren pyłu zasysanego przez filtry powietrza pojazdów mechanicznych ($d_{zmax} = 80 \mu\text{m}$).

Badania włóknin są prowadzone z reguły na standardowych stanowiskach badawczych, gdzie badana włóknina ukształtowana jest w postaci płaskiego wycinka materiału zamkniętego w szczelnym pojemniku. Wkłady filtrów powietrza wykonywane są zarówno w przypadku papierów filtracyjnych, jak i włóknin, z plisowanej taśmy materiału filtracyjnego. Wykorzystywana w większości przypadków metodyka badań nie uwzględnia wpływu ukształtowania materiału filtracyjnego na uzyskiwane wartości skuteczności filtracji oraz współczynnika chłonności pyłu. Ukształtowana w postaci plisy włóknina filtracyjna pod wpływem przepływającego powietrza ulega odkształceniom i przemieszczeniom, które mają wpływ na warunki tworzenia się „placka filtracyjnego” a tym samym na osiąganą wartość skuteczności filtracji i oporu przepływu [20].

Podawane w literaturze wartości skuteczności filtracji włóknistych materiałów filtracyjnych dotyczą zazwyczaj skuteczności początkowej. Nieliczne są charakterystyki skuteczności filtracji i oporu przepływu włóknin filtracyjnych w zależności od masy pyłu zatrzymanego. Czasami charakterystyki skuteczności filtracji przedstawiane są w zależności od czasu pracy włókniny filtracyjnej, lecz bez podania warunków badań (stężenie zapylenia, natężenie przepływu, pole powierzchni materiału, prędkość filtracji). Badania takie stanowią porównanie różnych gatunków włóknin, ale nie dostarczają informacji dotyczącej wartości współczynnika chłonności pyłu, który jest niezbędny do właściwego określenia czasu pracy materiału w określonych warunkach [21].

W dostępnych pracach poświęconych włókninom filtracyjnym przedstawiano najczęściej wpływ wybranego parametru włókniny (grubość, gęstość upakowania włókien) bądź aerozolu (rozmiar ziaren, prędkość filtracji) na uzyskiwane wartości skuteczności

filtracji [6, 21]. W nielicznych tylko źródłach podawane są wartości współczynnika chłonności pyłu włóknin i są one bardzo rozbieżne. Przykładowo w pracy [28] jako wartość współczynnika chłonności niekalandrowanej włókniny o grubości 3,2 mm, wyznaczonej przy oporze przepływu 0,3 kPa, podano $k_m = (54,5 \div 89,3) \text{ g/m}^2$, a tej samej włókniny poddanej kalandrowaniu $k_m = (85,5 \div 112,3) \text{ g/m}^2$. W [8] natomiast jako wartość współczynnika chłonności pyłu warstwowej włókniny filtracyjnej podano $k_m = (900 \div 1100) \text{ g/m}^2$, nie podano natomiast przy jakiej wartości oporu przepływu wyznaczono wartość tego współczynnika. Według [30] współczynniki chłonności pyłu włóknin filtracyjnych przekraczają wartość $(400 \div 480) \text{ g/m}^2$, brak jest natomiast informacji dotyczących warunków badań i zastosowanego pyłu testowego.

Skuteczność filtracji włóknin filtracyjnych można zwiększyć poprzez zwilżenie włókien olejem. Powoduje to trwalsze związanie zanieczyszczeń z włóknem, z którym weszły w kontakt ograniczając tym samym zjawisko reemisji przyczyniające się do obniżania skuteczności filtracji. Zwilżenie włókien olejem powoduje także zmniejszenie intensywności narastania oporu przepływu włókniny w funkcji masy zatrzymanego pyłu. Według autorów prac [24, 25] zwilżenie włókien olejem spowodowało, przy prędkości przepływu aerozolu 0,11 m/s, dwukrotnie mniejszą intensywność narastania oporów przepływu.

Parametry wybranych gatunków włóknin filtracyjnych produkowanych przez Korea Filtration Technologies Co.[29] przedstawiono w tabeli 1, a parametry włóknin filtracyjnych oferowanych przez firmę Retop Fibre [30] przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 1

Właściwości włóknin filtracyjnych produkowanych przez Korea Filtration Technologies Co. [29]

Lp.	Parametry	Jednostki	Oznaczenie włókniny			
			AC-1800	AC-3800	AC-301	AC-180
1	Gramatura	g/m^2	290	240	210	300
2	Grubość	mm	2,8 ÷ 3,6	3,15 ÷ 3,85	2,43 ÷ 2,86	2,61 ÷ 3,19
3.	Przepuszczalność powietrza	$\text{cm}^3/\text{cm}^2/\text{s}$	50 ÷ 85	65 ÷ 90	80 ÷ 110	45 ÷ 60
4.	Wytrzymałość na rozciąganie	N/50 mm	>98	>98	>98	>98
5	Wytrzymałość na zginanie	N/30 mm	1,96 ÷ 3,62	1,96 ÷ 3,62	1,47 ÷ 2,94	1,47 ÷ 3,43
6	Wytrzymałość na rozrywanie	MPa	0,49	0,39	0,59	0,78

Włókniny filtracyjne pomimo dużych wartości osiąganych skuteczności filtracji (powyżej 99%) oraz dużych wartości współczynnika chłonności pyłu stosowane są bardzo rzadko do filtracji powietrza wlotowego silników samochodów osobowych.

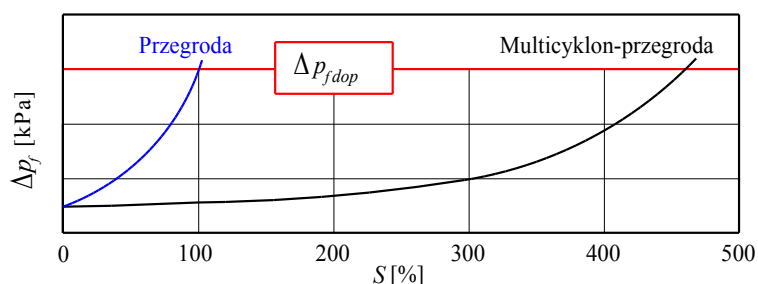
W przypadku samochodów ciężarowych i pojazdów specjalnych pracujących z reguły w warunkach dużego stężenia pyłu w powietrzu, wyposaża się je w filtry z dwustopniowym systemem filtracji, które zapewniają odpowiednio długie międzyobsługowe.

Sensowność stosowania filtrów dwustopniowych polega na wstępnym odseparowaniu w filtrze bezwładnościowym ziaren pyłu o większej masie i „pozostawieniu” w powietrzu ziaren pyłu o mniejszych rozmiarach $d_z < (20 \div 35) \mu\text{m}$ i masie oraz odfiltrowaniu w przegrodowym (najczęściej z wkładem papierowym o odpowiednio dobranej powierzchni) filtrze powietrza mniejszych, powyżej $d_z = (2 \div 5) \mu\text{m}$, ziaren pyłu.

Właściwości włóknin filtracyjnych oferowanych przez Retop Fibre [30]

Lp.	Parametry	Jednostki	Oznaczenie włókniny			
			AC-205	AC203S	GH250-OE	GP20T
1	Gramatura	g/m ²	220±20	220±20	250±30	130±15
2	Grubość	mm	2.8±0.3	2.8±0.3	5.0±0.5	0.7±0.10
3	Skuteczność filtracji	%	≥97	≥96	≥94	≥99.5
4.	Przepuszczalność powietrza	dm ³ /m ² /s	≥110	≥1100	≥1600	≥400
5	Wymiar porów	μm	120 ÷ 140	120 ÷ 140	180 ÷ 200	50 ÷ 70
6	Wytrzymałość na rozciąganie	N/50 mm	≥210	≥210	≥130	≥100
7	Współczynnik chłonności pyłu	g/m ²	≥450	≥450	≥500	≥90
8	Wytrzymałość na rozrywanie	N	>110	>110	>110	>40
9	Odporność temperaturowa	°C	>150	>150	>120	>110

Tym samym czas użytkowania systemu filtracji powietrza w silniku do osiągnięcia dopuszczalnej wartości oporu przepływu (maksymalny opór przepływu filtru powietrza dla danego typu silnika ustalony przez producenta i wynikający z 3% spadku mocy silnika) jest znacznie dłuższy niż samego filtru przegrodowego w tych samych warunkach zapylenia (rys. 3). Dla silników o ZS pojazdów ciężarowych i specjalnych opór dopuszczalny przyjmuje wartości (5 ÷ 7) kPa.



Rys. 3. Opór przepływu filtru powietrza jednostopniowego (przegroda porowata) i dwustopniowego pracującego w systemie „multicyklon-przegroda porowata” w zależności od przebiegu pojazdu S [10]

Brak jest natomiast rozwiązań konstrukcyjnych wielostopniowych filtrów powietrza silników samochodów ciężarowych i pojazdów specjalnych z wykorzystaniem włókninowych wkładów filtracyjnych. Wynika to, między innymi, z braku wystarczającej znajomości parametrów włóknin filtracyjnych, a głównie współczynnika chłonności pyłu określonego w warunkach filtracji dwustopniowej. Zastosowanie włóknin do filtracji powietrza wlotowego silników spalinowych samochodów ciężarowych mogłoby w znacznym stopniu zmniejszyć częstotliwość obsługiwanie filtrów powietrza. Do prawidłowego zaprojektowania dwustopniowego filtru powietrza niezbędna jest znajomość współczynnika chłonności pyłu materiału filtracyjnego wyznaczonego w warunkach filtracji dwustopniowej. W dostępnej literaturze wartości takie podawane są tylko dla papierów filtracyjnych.

Niniejsza praca przedstawia empiryczną ocenę, w zakresie skuteczności filtracji, chłonności pyłu oraz oporu przepływu wybranej włókniny filtracyjnej dla warunków eksploatacji charakterystycznych jak dla pojazdów terenowych.

5. Cel, metodyka i warunki badań

Celem badań było wyznaczenie właściwości eksploatacyjnych dwóch gatunków włókien filtracyjnych pracujących w warunkach filtracji jednostopniowej i dwustopniowej przy ustalonej prędkości filtracji i ustalonym stopniu efektywnego odsysania pyłu z osadnika multicyklonu.

Pierwszy etap badań obejmował wyznaczenie charakterystyk: skuteczności filtracji oraz oporów przepływu dwóch gatunków włókien filtracyjnych pracujących w warunkach odpowiadających drugiemu stopniowi filtracji, w zależności od współczynnika chłonności pyłu w postaci:

- skuteczność filtracji $\varphi_{w2} = f(k_{m2})$,
- opór przepływu $\Delta p_{w2} = f(k_{m2})$.

Zakres badań drugiego etapu obejmował wyznaczenie charakterystyk: skuteczności filtracji oraz oporów przepływu włókniny pracującej w warunkach filtracji jednostopniowej, tej włókniny, która w pierwszym etapie badań wykazała korzystniejsze właściwości eksploatacyjne.

Przedmiotem badań były dwa wkłady filtracyjne wykonane z dostępnych w kraju włókien (tab. 3). W nawiasach podano nazwy robocze włókien.

- dwuwarstwowa włóknina AC-301 (AC) firmy Korea Filtration Technologies Co.,
- jednowarstwowa włóknina BWF-02 E200B (B2) firmy EkoKarpaty.

Tabela 3

Parametry włókniny filtracyjnej AC – 301 i BWF – 02 E200B

Parametr	Jednostka	Wartość	
		AC-301	BWF-02 E200B
Gramatura	[g/m ²]	210 ± 10%	200 ± 15
Grubość	[mm]	2,34 ÷ 2,86	2,00 ± 0,1
Przepuszczalność powietrza	[dm ³ /m ² /s]	800 ÷ 1100 przy 120 Pa	> 2300 przy 200 Pa
Wytrzymałość na rozciąganie	[N/50 mm]	> 98	–
Wytrzymałość na zginanie	[N/30 mm]	1,47 ÷ 2,94	–
Opory przepływu	[Pa]	–	120 ÷ 130
Skład surowcowy	–	–	Poliester 100%

Wkłady filtracyjne z badanymi włókninami zbudowano na bazie produkowanego seryjnie papierowego wkładu filtracyjnego filtrów powietrza samochodów ciężarowych. Pole powierzchni włókniny wyznaczono z kryterium dopuszczalnej prędkości filtracji [1, 8].

$$v_{Fdop} = \frac{Q_G}{3600 \cdot F_w} \text{ [m/s]}. \quad (5)$$

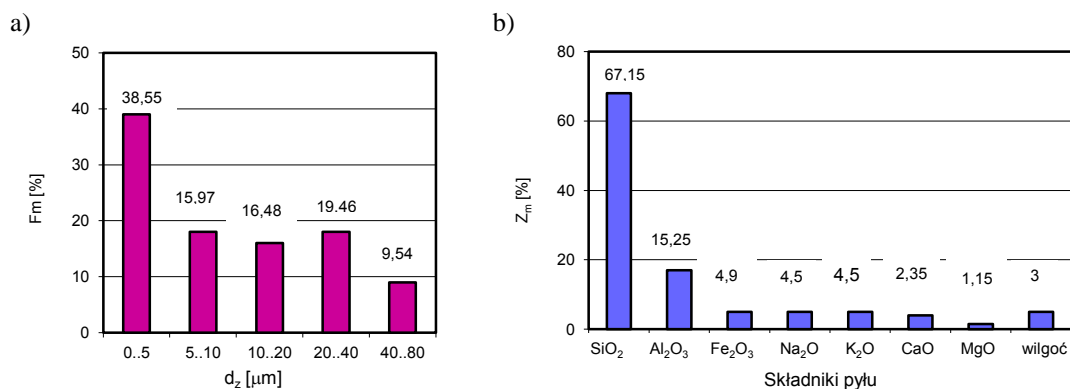
gdzie: Q_G – objętościowe natężenie przepływu powietrza przepływającego przez wkład filtracyjny [m^3/h] określone zgodnie z zasadami podanymi w [3], F_w – pole powierzchni czynnej materiału filtracyjnego [m^2].

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

$$Q_S = Q_G \cdot m_0. \quad (6)$$

Przyjmując, tak jak dla papierów filtracyjnych, dopuszczalną wartość prędkości filtracji $u_{F dop} = 0,08 \text{ m/s}$, pole powierzchni włókniny filtracyjnej wynosi $F_w = 2,0 \text{ m}^2$.

Badania prowadzono dla stałego strumienia powietrza przepływającego przez filtr $Q_G = 600 \text{ m}^3/\text{h}$ i strumienia odsysania $Q_S = 60 \text{ m}^3/\text{h}$, przy założonym stężeniu zapylenia powietrza na wlocie do multicyklonu $s = 1 \text{ g/m}^3$, a w przypadku filtracji jednostopniowej przy stężeniu zapylenia powietrza $s = 0,5 \text{ g/m}^3$, stosując pył testowy PTC-D, będący krajowym zamiennikiem pyłu AC-Fine, którego skład granulometryczny i chemiczny podano na rys. 4.



Rys. 4. Pył testowy PTC-D zastosowany do badań: a) skład granulometryczny, b) skład chemiczny [27]

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

Po każdym j cyklu pomiarowym wyznaczano:

- skuteczność filtracji φ_w badanego wkładu filtracyjnego z zależności:

$$\varphi_{wj} = \frac{m_{wj}}{m_{Dj}} \cdot 100\% , \quad (7)$$

gdzie: m_{wj} – masa pyłu zatrzymanego przez wkład filtracyjny, m_{Dj} – masa pyłu doprowadzonego do wkładu filtracyjnego (masa opuszczająca multicyklon) w czasie trwania cyklu pomiarowego określona z zależności:

$$m_{Dj} = m_{wj} + m_{AGj}, \quad (8)$$

gdzie: m_{AG} – masa pyłu zatrzymanego przez filtr absolutny.

- opór przepływu:

$$\Delta p_{wj} = \frac{\Delta h_{wj}}{1000} (\rho_m - \rho_H) g \quad [\text{kPa}], \quad (9)$$

gdzie: Δh_w – wartość spadku ciśnienia statycznego odczytanego (w mm H₂O) z manometru wodnego typu U-rurka, ρ_m – gęstość cieczy manometrycznej (H₂O) w temperaturze pomiaru t_H , ρ_H – gęstość powietrza atmosferycznego w kg/m³, g – lokalne przyspieszenie ziemskie.

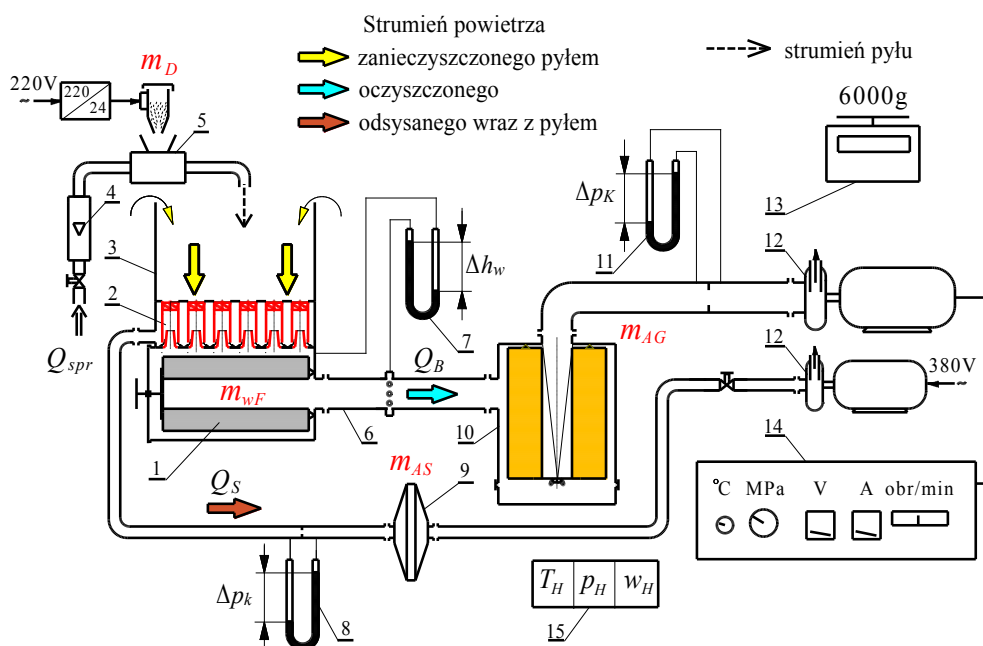
- współczynnik chłonności pyłu $k_{m(1-j)}$:

$$k_{m(1-j)} = \frac{m_{w(1-j)}}{F_w} \quad [\text{g/m}^2], \quad (10)$$

gdzie: $m_{w(1-j)}$ – sumaryczna masa pyłu zatrzymana przez wkład filtracyjny.

Badania kończono z chwilą osiągnięcia przez badawczy wkład filtracyjny oporu przepływu 5 kPa będącego najczęściej stosowaną wartością oporu dopuszczalnego filtrów powietrza samochodów członowych.

Badania wkładów filtracyjnych przeprowadzono na stanowisku (rys. 5), które umożliwia wykonywanie podstawowych charakterystyk skuteczności filtracji i oporu przepływu dla strumienia powietrza do 1500 m³/h, przy stopniu efektywnego odsysania do 20% i stężeniu zapylenia do 3 g/m³.



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

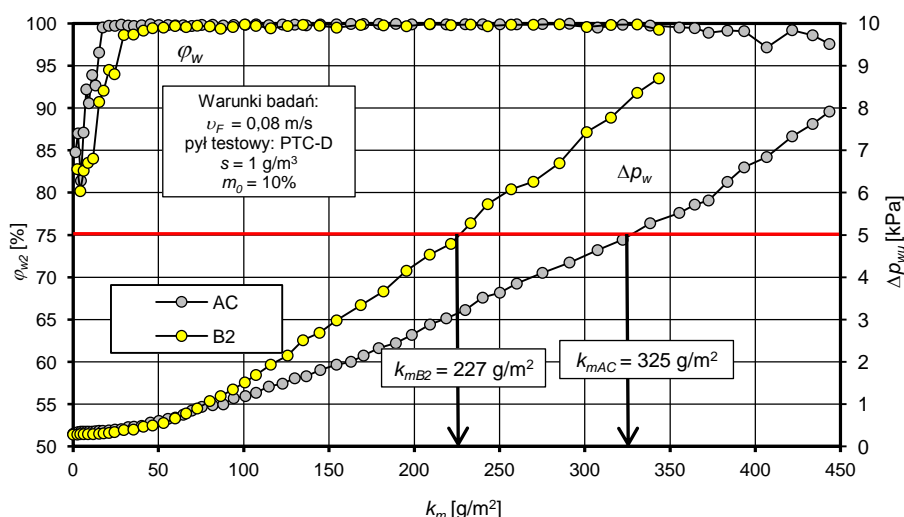
Bezpośrednio za badanym wkładem filtracyjnym znajduje się przewód pomiarowy, do którego w odległości $6D_w$ od płaszczyzny czołowej obudowy wkładu (gdzie D_w - średnica wewnętrzna przewodu wylotowego z badawczego wkładu papierowego), podłączony jest

koniec przewodu manometru wodnego typu U-rurka służącego do pomiaru oporu przepływu Δp_w (spadku ciśnień statycznych) wkładu filtracyjnego.

Przewód pomiarowy zakończony jest filtrem, który zabezpiecza przed przedostawaniem się pyłu do kryzy pomiarowej, a jednocześnie jest filtrem mierniczym służącym do wyznaczenia masy pyłu przepuszczonego przez badawczy wkład filtracyjny i w konsekwencji do określenia skuteczności filtracji wkładu.

6. Analiza wyników badań

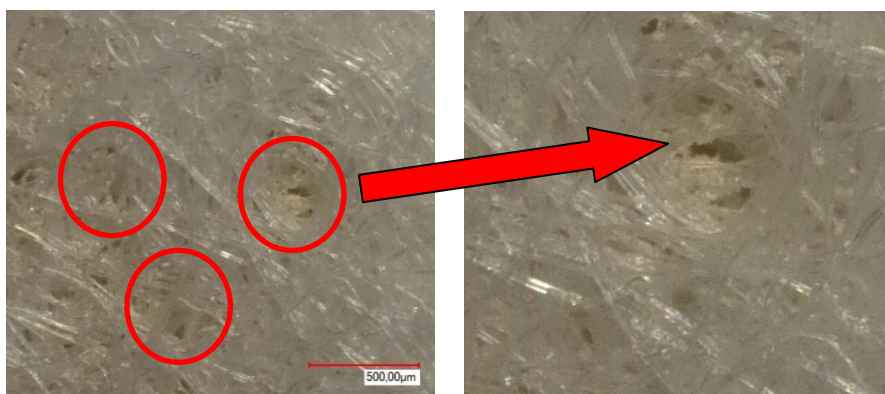
Charakterystyki skuteczności filtracji i oporu przepływu wkładów filtracyjnych wykonanych z włókniny AC i B2 pracujących w warunkach filtracji dwustopniowej za multicyklonem w funkcji współczynnika chłonności pyłu przedstawia rys. 6. Ze względu na osiągnięte wartości skuteczności filtracji, czas pracy badanych włóknin można podzielić umownie na dwa okresy. Pierwszy (początkowy), charakteryzujący się małą wartością skuteczności filtracji, która systematycznie i gwałtownie wzrasta wraz z ilością masy pyłu zatrzymanego przez papier filtracyjny. Okres ten trwa od chwili rozpoczęcia procesu filtracji do osiągnięcia przez włókninę określonej wartości skuteczności filtracji. Następujący po nim okres filtracji zasadniczej charakteryzuje się dużymi (powyżej 99%) i ciągle, ale powolnie rosnącymi wartościami skuteczności filtracji. W przypadku badanych włóknin przyjęto strefę rozdziału obu okresów z chwilą uzyskania przez włókniny skuteczności filtracji 99,5% [8]. Po pierwszym cyklu pomiarowym skuteczność włókniny filtracyjnej AC osiąga wartość $\varphi_{w2} = 84,8\%$, a włókniny B2 $\varphi_{w2} = 80,2\%$ (rys. 6). Pierwszy okres filtracji (osiągnięcie założonej skuteczności filtracji $\varphi_w = 99,5\%$) dla włókniny AC trwa do chwili osiągnięcia współczynnika chłonności $k_{m2} = 17,3 \text{ g/m}^2$. W przypadku włókniny B2 czas trwania tego okresu jest ponad dwukrotnie dłuższy i kończy się z chwilą osiągnięcia współczynnika $k_{m2} = 35,4 \text{ g/m}^2$.



Rys. 6. Charakterystyki skuteczności filtracji φ_w i oporów przepływu Δp_w w zależności od współczynnika chłonności pyłu k_m wkładów wykonanych z włóknin filtracyjnych AC i B2 pracujących w układzie filtracyjnym „multicyklon-przegroda włókninowa”

Początkowy okres pracy wkładu włókninowego jest bardzo niekorzystny dla dwóch współpracujących tarcioelementów, gdyż w tym czasie do cylindrów silnika, wraz z powietrzem, napływa znaczna masa zanieczyszczeń, których rozmiary ziaren przyjmują wartości $d_z = (2 \div 5) \mu\text{m}$ [10]. Może to być przyczyną przyspieszonego zużycia elementów skojarzeń silnika. Tak więc nowo zamontowany w filtrze wkład włókninowy (papierowy) dopiero po przekroczeniu pewnego przebiegu pojazdu zapewnia wymaganą skuteczność i dokładność filtracji powietrza. Niecelowym zabiegiem jest więc częsta i nieuzasadniona wymiana wkładów filtracyjnych.

W zasadniczym okresie pracy skuteczność filtracji badanych włókien przyjmuje wartości z zakresu $\varphi_{w2} = (99,5 \div 99,97)\%$. Duże wartości skuteczności filtracji włóknina AC utrzymuje do chwili osiągnięcia wartości współczynnika chłonności pyłu $k_{m2} = 364 \text{ g/m}^2$. Powyżej tej wartości następuje w pojedynczych punktach pomiarowych spadek skuteczności filtracji do wartości $(97 \div 98)\%$, co świadczyć może o wyczerpaniu się chłonności materiału filtracyjnego i występowaniu zjawiska przebicia. Polega ono na odrywaniu się od podłoża (w wyniku dużych prędkości przepływu oraz dużej różnicy ciśnień przed i za wkładem) ziaren pyłu jak i całych ich aglomeratów i przemieszczaniu w głąb materiału, aż na stronę wylotową materiału filtracyjnego. Przykładowe miejsca, w których pył przedostawał się przez materiał filtracyjny przedstawiono na rysunku 7. W przypadku włókniny B2 spadek skuteczności filtracji wystąpił nieznacznie wcześniej bo przy wartości współczynnika chłonności pyłu $k_{m2} = 343 \text{ g/m}^2$.

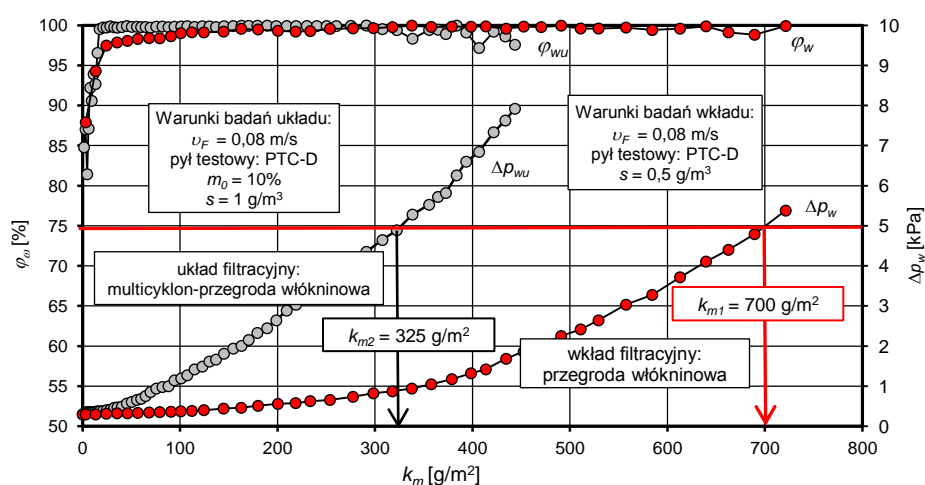


Rys. 7. Widoczne miejsca przebicia włókniny

Wraz ze wzrostem masy pyłu zatrzymanego przez włókninę filtracyjną systematycznie rośnie opór przepływu wkładów filtracyjnych, z tym, że intensywność wzrostu jest większa dla wkładu wykonanego z włókniny B2. Po osiągnięciu przez wkłady filtracyjne dopuszczalnej wartości oporu przepływu $\Delta p_w = 5 \text{ kPa}$ współczynnik chłonności pyłu włókniny AC ma wartość $k_{m2} = 325 \text{ g/m}^2$, a włókniny B2 wartość znacznie mniejszą $k_{m2} = 227 \text{ g/m}^2$, co wynika ze znacznie mniejszej masy pyłu zatrzymanej przez te włókninę. Zjawisko to należy tłumaczyć mniejszą grubością włókniny B2, a tym samym mniejszą chłonnością. Współczynnik chłonności pyłu papierów filtracyjnych pracujących w warunkach filtracji dwustopniowej przyjmuje wartości znacznie mniejsze ($k_m = 50 \div 80 \text{ g/m}^2$), niż badanych włókien.

Analizę porównawczą właściwości eksploatacyjnych włókniny filtracyjnej AC pracującej w warunkach filtracji jednostopniowej i dwustopniowej „multicyklon-przegroda

włókninowa” przedstawiono na rys. 8. Skuteczność filtracji oraz opór przepływu włókninowego wkładu filtracyjnego pracującego w warunkach filtracji jednostopniowej (gdy na włókninę trafiał pył o standardowym składzie granulometrycznym) narasta z mniejszą intensywnością niż wkładu z tej samej włókniny AC, ale pracującego w układzie „multicyklon-przegroda włókninowa”. Jest to spowodowane tym, że pył „po przejściu” przez cyklony pozbawiony jest ziaren o rozmiarach powyżej $(20 \div 35) \mu\text{m}$, co wynika z dokładności filtracji minicyklonów [1, 10, 17, 22]. Zatem na wkład filtracyjny trafiają jedynie ziarna pyłu o najmniejszych rozmiarach, które znacznie szczelniej wypełniają wolne przestrzenie między włóknami, przez co wzrost prędkości przepływu tym spowodowany, a tym samym wzrost oporów przepływu jest intensywniejszy.



Rys. 8. Charakterystyki skuteczności filtracji φ_w i oporów przepływu Δp_w włókniny filtracyjnej AC-301 pracującej w warunkach filtracji jednostopniowej i dwustopniowej w układzie „multicyklon-przegroda włókninowa”

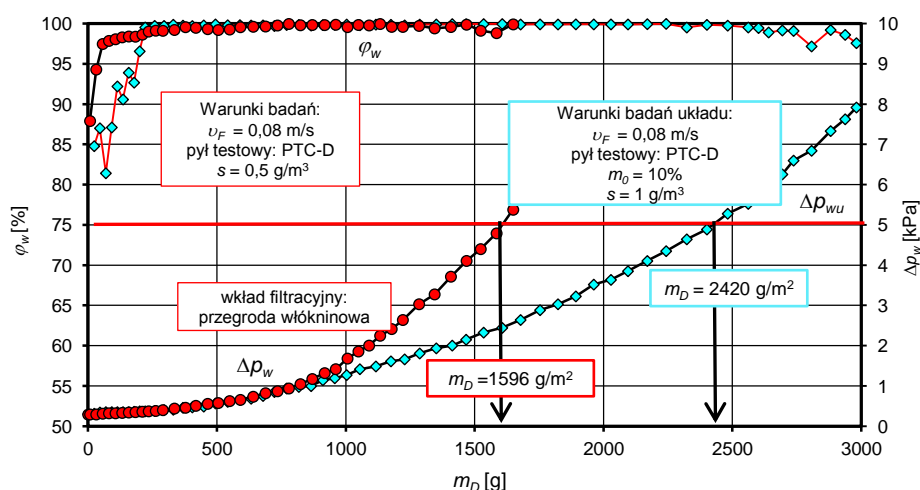
Dopuszczalną wartość oporu przepływu $\Delta p_w = 5 \text{ kPa}$ włókninowy wkład filtracyjny pracujący w warunkach filtracji jednostopniowej osiągnął przy współczynniku chłonności pyłu $k_{m1} = 700 \text{ g/m}^2$, a więc przy dwukrotnie większej wartości niż w warunkach filtracji dwustopniowej – $k_{m2} = 325 \text{ g/m}^2$. Tak więc chłonność włókniny filtracyjnej, na którą napływa pył, który zmienił skład granulometryczny w filtrze bezwładnościowym ($d_z < 20 \div 35 \mu\text{m}$) jest o 50% mniejsza niż włókniny, na którą napływa pył bezpośrednio z otoczenia ($d_z < 80 \mu\text{m}$). Jest to zgodne z informacjami podawanymi w pracach dotyczących badań papierów filtracyjnych [10, 14].

Znacznie mniejsza chłonność włókniny filtracyjnej, na którą napływa pył, który zmienił swój skład granulometryczny w filtrze bezwładnościowym, nie oznacza skrócenia czasu użytkowania dwustopniowego systemu filtracji powietrza (skrócenia przebiegu pojazdu) do osiągnięcia dopuszczalnej wartości oporu przepływu filtra powietrza Δp_{fdop} . Mimo, że wraz z powietrzem do układu dostarczona została większa masa pyłu (rys. 9), czas użytkowania dwustopniowego systemu filtracji powietrza „multicyklon-przegroda włókninowa” τ_{p2} jest znacznie dłuższy. Czas ten można określić z zależności [1]:

$$\tau_{p2} = \frac{F_C \cdot k_{m2} \cdot k_C}{Q_{Silmax} \cdot s \cdot (1 - \varphi_M) \cdot \varphi_w}, \quad (11)$$

gdzie: F_C – całkowite pole powierzchni filtracyjnej II-go stopnia filtracji, k_{m2} – współczynnik chłonność włókniny, k_C – współczynnik uwzględniający różnicę między parametrami zanieczyszczeń testowych a rzeczywistych, Q_{max} – objętościowe natężenie przepływu powietrza przez silnik, s – średnie stężenie pyłu w powietrzu zasysanym do filtru, φ_M – skuteczność pierwszego stopnia filtracji (multicyklonu), φ_w – skuteczność włókniny filtracyjnej.

Dla następujących danych: $F_C = 2 \text{ m}^2$, $k_{m2} = 325 \text{ g/m}^2$; $k_C = 1$; $Q_{max} = 600 \text{ m}^3/\text{h}$; $s = 1 \text{ g/m}^3$; $\varphi_M = 0,8$; $\varphi_w = 0,99$; czas pracy dwustopniowego systemu filtracji ma wartość $\tau_{p2} = 5,47 \text{ h}$. Dla tej samej włókniny, ale pracującej w systemie filtracji jednostopniowej czas pracy filtru osiąga wartość $\tau_{p2} = 2,37 \text{ h}$, a więc dwukrotnie mniej, co zgodne jest z danymi na rys. 3.



Rys. 9. Charakterystyki skuteczności filtracji φ_w i oporów przepływu Δp_w włókniny filtracyjnej AC-301 pracującej w warunkach filtracji jednostopniowej i dwustopniowej w układzie „multicyklon-przegroda włókninowa” wyznaczone w zależności od masy pyłu m_D dostarczonej do filtru

6. Podsumowanie

Do filtracji powietrza wlotowego współczesnych silników samochodów osobowych coraz częściej, oprócz papierów filtracyjnych, stosowane są włókny. Brak jest natomiast jakichkolwiek informacji dotyczących zastosowania włóknin, jako drugiego stopnia filtracji w filtrach wielostopniowych samochodów ciężarowych i pojazdów specjalnych. Wynika to z braku znajomości właściwości eksploatacyjnych włóknin filtracyjnych, a w szczególności współczynnika chłonności pyłu. Jego wartość, w przypadku pracy włókniny, jako drugiego stopnia filtracji (za filtrem bezwładnościowym) przyjmuje mniejsze wartości niż wtedy, gdy pracuje ona w warunkach filtracji jednostopniowej. Ma to bezpośredni wpływ na czas pracy filtru do chwili osiągnięcia oporu dopuszczalnego, a tym samym na przebieg pojazdu.

Przeprowadzone badania dwóch włóknin filtracyjnych AC-301 i BWF – 02 E200B pracujących w warunkach filtracji dwustopniowej (za multicyklonem) wykazały, że współczynnik chłonności pyłu, dla ustalonej wartości dopuszczalnego oporu przepływu $\Delta p_{fdop} = 5 \text{ kPa}$, przyjmuje różne, w zależności od parametrów struktury badanej włókniny,

wartości, odpowiednio: $k_{m2} = 325 \text{ g/m}^2$ i $k_{m2} = 227 \text{ g/m}^2$. Dla tej samej wartości oporu dopuszczalnego papiery filtracyjne, będące II-gim stopniem filtracji (za cyklonem) osiągają współczynniki chłonności w zakresie $k_{m2} = (50 \div 80) \text{ g/m}^2$ [9], a więc kilkakrotnie mniejsze, co wynika głównie z mniejszej grubości papieru filtracyjnego.

Badania włókniny filtracyjnej AC-301 pracującej w warunkach filtracji jednostopniowej (na włókninę dozowany był pył PTC-D o składzie standardowym i rozmiarach ziaren nie przekraczających $d_z < 80 \mu\text{m}$) wykazały, że zasadniczej zmianie ulega przede wszystkim charakterystyka oporów przepływu $\Delta p_w = f(k_m)$. Obserwuje się znacznie mniejszą intensywność wzrostu oporu przepływu włókniny, na którą dozowany jest pył o standardowym składzie granulometrycznym niż włókniny, która zanieczyszczana jest pyłem wypływającym z multicyklonu, a więc o znacznie mniejszych rozmiarach ziaren (rys. 9). Wyznaczony w tych warunkach i dla wartości oporu przepływu $\Delta p_{fdop} = 5 \text{ kPa}$ współczynnik chłonności pyłu włókniny AC-301 przyjmuje wartość $k_{m1} = 700 \text{ g/m}^2$, a więc dwukrotnie większą niż wtedy, gdy włóknina pracowała w warunkach filtracji dwustopniowej.

W rzeczywistości czas pracy filtru dwustopniowego, którego wkład filtracyjny zostałby zaprojektowany z użyciem wartości współczynnika chłonności k_{m1} wynikającego z pracy włókniny w warunkach filtracji jednostopniowej, co praktycznie jest stosowane podczas projektowania wkładów z papierów filtracyjnych, będzie dwukrotnie krótszy.

Mała ($\varphi_{w2} = (80 \div 84)\%$) skuteczność włóknin filtracyjnych oraz obecność dużych ziaren pyłu w powietrzu oczyszczonym w początkowym, ale krótkim okresie pracy może mieć wpływ na przyspieszone zużycie głównie skojarzenia T-P-C. W rzeczywistych warunkach taki stan pracy filtru powietrza występuje po wymianie zanieczyszczonego wkładu filtracyjnego na nowy.

Największą skuteczność filtracji (99,9%) osiąga filtr w końcowym okresie pracy, czyli wtedy, gdy jego opór przepływu zbliża się do wartości oporu dopuszczalnego, będącego kryterium wymiany wkładu filtracyjnego. Ze względu na dużą wartość skuteczności zatrzymywanych zanieczyszczeń wkład filtracyjny powinien więc być eksploatowany jak najdłużej. Jednak wraz ze wzrostem masy pyłu zatrzymanego na wkładzie filtracyjnym rośnie nie tylko skuteczność, ale też i opór przepływu filtru powietrza, co może być przyczyną spadku mocy silnika i zwiększonego zużycia paliwa. Dlatego producenci współczesnych samochodów osobowych zalecają wymianę wkładu filtracyjnego po określonym przebiegu ((30 ÷ 60) tys. km) lub stosują czujniki dopuszczalnego oporu.

LITERATURA

- [1] Baczewski K, Hebda M. Filtracja płynów eksploatacyjnych. Radom: MCNEMT, 1991/92.
- [2] Barbolini M, Di Pauli F, Traina M. Simulation der Luftfiltration zur Auslegung von Filterelementen. MTZ 2014; 11: 53-56.
- [3] Calculating Engine Airflow. www.donaldson.com

- [4] Chłopek Z. Testing of hazards to the environment caused by particulate matter during use of vehicles. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2012; 2: 160-170.
- [5] Chłopek Z, Jakubowski A. The examination of the reduction of particulate matter emission from motor vehicle braking system. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2010; 4: 39-36.
- [6] Das A, Alagirusamy R, Nagendra K R. Filtration characteristics of spun-laid nonwoven fabrics, *Indian Journal of Fibre & Textile Research* 2009; 34: 253-257.
- [7] Duchowski J, Collins K. Cleanlines Requirements for Journal Bearing Lubrication. *Practicing Oil Analysis Magazine* 2000; 7.
- [8] Durst M, Klein G, Moser N. Filtration in Fahrzeugen. Ludwigsburg: Mann+Hummel GMBH, 2005.
- [9] Dziubak T. The test stand of air tillers cyclones of vehicles operating in high dustiness condition. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2003; 4: 31-46.
- [10] Dziubak T, Szwedkowicz S. Experimental research on filtering fibers in a cyclone-porous barrier system. *Combustion Engines* 2014; 3: 45-55.
- [11] Extreme Performance Air Filters with ProTura Nanofiber Technology, Kearney: Baldwin Filters, 2014.
- [12] Fitch J. Clean Oil Reduces Engine Fuel Consumption. *Practicing Oil Analysis Magazine* 2005; 9.
- [13] Golloch R, Kessen U, Merker G P. Tribologische Untersuchungen an der Kolbengruppe eines NFZ-Dieselmotors. *MTZ* 2002; 6: 494-501.
- [14] Heavy-Duty Air Filter Media Applications. East Walpole: Holingsworth & Vose, 2011.
- [15] Jaroszczyk T, Fallon S. L, Janikowski E, Kendall O D. Nanofiber Media Performance in Application to Motor Vehicle Air Filtration. *Nanofibers for the 3rd Millennium – Nano for Life*. Praga, 2009.
- [16] Jaroszczyk T. Air Filtration in Heavy-Duty Motor Vehicle Applications. *Proc. Dust Symposium III Vicksburg MS*, September 15-17. 1987.
- [17] Jo Y, Tien Ch, Ray M B. Development of a post cyclone to improve the efficiency of reverse flow cyclone. *Powder Technology* 2000; 1-2: 97-108.
- [18] Koszałka G, Niewczas A. Wear profile of the cylinder liner in a motor truck diesel engine. *Journal of KONES* 2007; 4: 183-190.
- [19] Koszałka G. Predicting the durability of the piston-rings-cylinder, assembly of a diesel engine using a piston ring pack model. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2011;. 3: 40-44.
- [20] Коренев М С, Рузаев И Г. Фильтровальный материал из синтетических волокон для воздухоочистителей. *Автомобильная промышленность* 1982; 9.
- [21] Kothari V. K, Das A, Singh S. Filtration behavior of woven and nonwoven fabrics. *Indian Journal of Fibre & Textile Research* 2007; 32: 214-220.
- [22] Lim K S, Kim H S, Lee K W. Characteristics of the collection efficiency for a cyclone with different vortex finder shapes. *Journal of Aerosol Science* 2004; 6: 743-754.
- [23] Merkisz J, Lijewski P, Fuć P, Weymann S. Exhaust emission tests from non-road vehicles conducted with the use of PEMS analyzers. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2013; 4: 364-368.

- [24] Muller T K, Meyer J, Thebault E, Kasper G. Impact of an oil coating on particle deposition and dust holding capacity of fibrous filters. *Powder Technology* 2014; 253: 247-255.
- [25] Muller T K, Meyer J, Thebault E, Kasper G. Dust capacity increase of air filters by oil pre-treatment. *Aerosol Technology* 2014.
- [26] Niewczas A, Wrona J, Wrona R. Zanieczyszczenia oleju smarującego oraz ich wpływ na trwałość silnika spalinowego. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* 2010; 6: 1-5.
- [27] PN-S-34040, Filtry powietrza. Wymagania i badania. PKN, 1996.
- [28] Sakthivel S, Ehzil Anban J J, Ramachandran T.: Development of Needle-Punched Nonwoven Fabrics from Reclaimed Fibers for Air Filtration Applications. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* 2014; 9: 149-154.
- [29] WIX Filtron, materiały udostępnione przez Filtron, Gostyń, 2013.
- [30] www.retopfibre.en.alibaba.com.