

Experimental research on filtering fibers in a cyclone–porous barrier system

Properties of filtering materials used as porous barriers in air cleaners of motor vehicles have been analyzed in the paper. Relations that determine the filter life have been analyzed and the coefficient of dust absorption k_m of the filtering material has been determined. Methodology of research has been presented of a study air filter element made of filtering fiber used as a second filtering stage downstream of a single continuous cyclone. The results of the investigations into the characteristics of efficiency, accuracy and drag of the filtering fiber for different filtering rates have been discussed. Dust absorption coefficients k_m have been determined. Changes in the granulometric composition of dust downstream of the investigated filtering element have been presented. Benefits resulting from the application of a two-stage air filtering method have been indicated.

Key words: combustion engines, air filtering, filter characteristics, filtering fiber

Badania eksperymentalne włókniny filtracyjnej pracującej w systemie „cyklon–przegroda porowata”

W artykule zanalizowano właściwości materiałów filtracyjnych stosowanych jako przegrody porowate w filtrach powietrza pojazdów mechanicznych. Zanalizowano także zależność określającą czas pracy filtru powietrza oraz zdefiniowano współczynnik chłonności pyłu k_m materiału filtracyjnego. Przedstawiono metodykę badań wkładu badawczego wykonanego z włókniny pracującej jako drugi stopień filtracji za pojedynczym cyklonem przelotowym. Omówiono wyniki badań charakterystyk skuteczności i dokładności filtracji oraz oporów przepływu włókniny filtracyjnej dla różnych prędkości filtracji. Określono współczynniki chłonności pyłu k_m włókniny filtracyjnej. Zaprezentowano zmiany składu granulometrycznego pyłu za badawczym wkładem filtracyjnym. Wskazano korzyści wynikające z zastosowania dwustopniowej filtracji powietrza.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, filtracja powietrza, charakterystyki filtrów, włóknina filtracyjna

1. Introduction

Special vehicles (heavy trucks, military vehicles) are usually operated in off-road conditions and sandy terrain, where the dust level in the air is particularly high, often exceeding 1 g/m^3 . The said vehicles are usually fitted with high power diesel engines that have high air demand reaching $3500 \text{ m}^3/\text{h}$ [3, 4]. Ensuring high efficiency and accuracy of the air filtration for these engines is a complex design and operational issue.

In order to meet the requirements of the vehicle operators in terms of air cleaner efficiency and accuracy in intake air filtration, low drag and long life, a two-stage filtering system is used. The first stage of the filtration is a centrifugal deduster (monocyclone or multicyclone), and the second stage is a porous barrier installed in a serial configuration usually in the form of a cylindrical filtering element made from filtration paper. Centrifugal dedusters are characterized by a low and constant resistance, rather high filtering efficiency (approximately 70–90 %), accuracy that does not exceed $d_{zmax} = 35 \text{ }\mu\text{m}$ and the possibility of separating large mass of dust from highly contaminated intake air flows (dust concentration over 1 g/m^3).

Filtering papers ensure high efficiency (99.9 %) and accuracy of filtration $d_{zmax} = 2\text{--}5 \text{ }\mu\text{m}$ but they have a limited (approx 220 g/m^2) dust absorption capacity [1–3, 5, 6, 8]. Filtering fibers are most often used in filtering of intake air in passenger vehicles. They are characterized by similar efficiency and accuracy but their dust absorption rate is

1. Wstęp

Pojazdy specjalne (samochody ciężarowe, wojskowe) eksploatowane są najczęściej po bezdrożach i terenie piaszczystym, gdzie stężenie zapylenia powietrza jest szczególnie duże i często przekracza wartość 1 g/m^3 . Pojazdy te wyposażone są zwykle w silniki o ZS dużej mocy i dużym zapotrzebowaniu powietrza dochodzącym do $3500 \text{ m}^3/\text{h}$ [3, 4]. Zapewnienie wysokiej skuteczności oraz dokładności filtracji powietrza dla tych silników jest ważnym problemem konstrukcyjnym i eksploatacyjnym.

Aby spełnić wymagania eksploatatorów pojazdów dotyczące możliwie najwyższej skuteczności i dokładności filtracji powietrza wlotowego silnika, najniższych oporów przepływu oraz długiego czasu pracy filtrów, stosuje się dwustopniowe systemy filtracji. Pierwszym stopniem filtracji jest filtr bezwładnościowy (monocyklon lub multicyklon), a drugim – ustawiona za nim szeregowo przegroda porowata, najczęściej w postaci cylindrycznego wkładu wykonanego z papieru filtracyjnego. Filtry bezwładnościowe charakteryzują się niskim i stałym w czasie eksploatacji oporem przepływu, dość wysoką (ok. 70–90 %) skutecznością filtracji, dokładnością nieprzekraczającą $d_{zmax} = 35 \text{ }\mu\text{m}$ oraz możliwością odseparowania z dużych strumieni zanieczyszczonego powietrza wlotowego (stężenie zapylenia ponad 1 g/m^3) znacznej masy pyłu.

Papiery filtracyjne zapewniają wysoką skuteczność (99,9%) i dokładność filtracji $d_{zmax} = 2\text{--}5 \text{ }\mu\text{m}$, ale mają niewielką (ok. 220 g/m^2) chłonność pyłową [1–3, 5, 6, 8].

much higher. Works that present the application of fibers as the second stage of filtration in two-stage filtering systems however, are unknown.

In available literature, data are provided on the absorption of filtering papers determined using standard test dust. At Institute of Motor Vehicles and Transport at Military University of Technology, for several years now, research has been conducted on the dust absorption of filtering papers that receive dust of the fractional composition formed by the first stage centrifugal deduster. No information, however, is provided as to the dust absorption of filtering fibers determined under the conditions of two-stage filtering, which is why it is purposeful to conduct research that will allow determination of the same.

2. Characteristics of two-stage-filters

Multi-stage filters are used in the conditions of high dust level in the air and they are made of serially connected filters of different efficiency and drag. Monocyclone is a set of blades set at an inclination (fixed guide vane) to generate a swirl of intake air, putting the dust grains in the state of inertia as a result of which larger and heavier grains are directed at the inner wall of the filter case where they lose their velocity and drop to the settling tank. This is how they are separated from the air. The efficiency of dedusting through a monocyclone reaches 70 %, and the accuracy $d_{zmax} = 40\text{--}50\text{ }\mu\text{m}$ [1, 12].

A multicyclone is a set of several to several hundred minicyclones, whose inner diameters do not exceed $D = 40\text{ mm}$, made from plastics or steel sheets set parallel, one next to another and fixed on a joint, lower and upper plate. A multicyclone can be built from reverse flow cyclones with tangential and axial intakes or continuous cyclones (Fig. 1).

Multicyclones are characterized by the capability of separating a large mass of dust from large volumes of flowing air at a constant drag of 2–3 kPa throughout their service life. Their accuracy reaches 90 %, grain-trapping accuracy above 15–35 μm and they are maintenance free if dust is automatically removed from the settling tank [1, 3]. Two-stage filters ‘multicyclone–porous barrier’ systems are characterized by high accuracy and efficiency of filtration

Włókniny filtracyjne, stosowane głównie do filtracji powietrza wlotowego samochodów osobowych, charakteryzujące się porównywalną z papierami skutecznością i dokładnością filtracji mają znacznie większą chłonność pyłową. Nieznane są jednak opracowania przedstawiające zastosowanie włókniny jako drugi stopień filtracji w filtrach dwustopniowych. W dostępnej literaturze podawane są dane dotyczące chłonności papierów filtracyjnych określonej z wykorzystaniem standardowych pyłów testowych. W Instytucie Pojazdów Mechanicznych i Transportu WAT prowadzone są od wielu lat badania chłonności pyłowej papierów filtracyjnych, na które trafia pył o składzie frakcyjnym ukształtowanym przez pierwszy stopień filtracji – filtr bezwładnościowy. Brak jest natomiast informacji na temat chłonności pyłowej włóknin filtracyjnych określonej w warunkach pracy filtru dwustopniowego. Z tego względu celowe jest prowadzenie badań pozwalających określić jego wartość.

2. Charakterystyka filtrów dwustopniowych

Filtry wielostopniowe stosowane są w warunkach dużego zapylenia powietrza i składają się z szeregowo połączonych filtrów o różnej skuteczności i oporach przepływu. Monocyklon to zespół łopatek ustawionych pochyło (nieruchoma kierownica), mających na celu zawirowanie strumienia powietrza wlotowego i nadanie ziarnom pyłu siły bezwładności, w wyniku czego ziarna o większych rozmiarach i większej masie są kierowane na ściankę wewnętrzną obudowy filtra, gdzie wytracają prędkość i opadają grawitacyjnie do osadnika, a więc są odseparowane z powietrza. Skuteczność odpylania powietrza w wyniku zastosowania monocyklonu osiąga wartości do 70 %, a dokładność $d_{zmax} = 40\text{--}50\text{ }\mu\text{m}$ [1, 12].

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

Multicyklony charakteryzują się zdolnością odseparowywania znacznej masy pyłu z dużych objętości przepływających

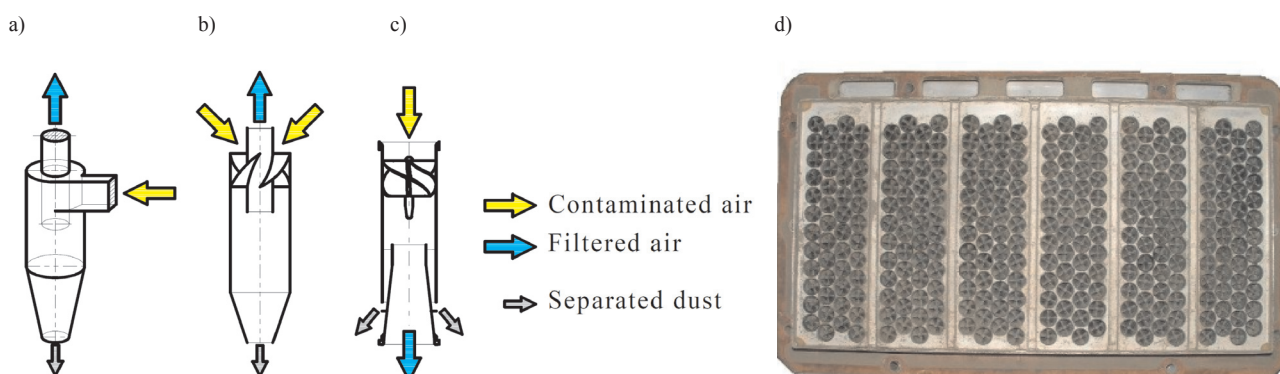


Fig. 1. Types of cyclones: a) reverse flow with a tangential intake, b) reverse flow with axial intake, c) continuous, d) multicyclone

Rys. 1. Rodzaje cyklonów: a) zwrotny z wlotem stycznym, b) zwrotny z wlotem osiowym, c) przelotowy, d) multicyklon

of mineral dust reaching 99.9 % and a long service life [1]. Their downside is their weight and size. The service life of such filtration systems is determined by the increment of resistance of the filtering element.

Filtering barriers of air cleaners in combustion engines are chiefly made from filtering paper. Filtering fibers are used for the production of air filter elements for passenger vehicles. For the production of filtering paper barriers, an additional layer of nano-fibers is increasingly often applied (fiber of very small diameters of approx. 50–500 nm). For comparison: the thickness of a cellulose fiber is – 10–20 μm (10 000–20 000 nm) or human hair – 20–80 μm (20 000–80 000 nm). Filtering materials vary in terms of their properties and structural parameters: GSM, thickness, air permeability, pore diameter and resistance to tear and burst. Example properties of papers and filtering fibers are shown in Table 1 and 2. Filtering papers, depending on the type and application are characterized by the GSM on the level of 115–240 g/m^2 , thickness 0.3–0.9 mm and average pore diameter of 40–95 μm [4]. The GSM of the filtering fibers, compared to paper is twice as high, the thickness is several times greater and the fibers are much less rigid [8, 9]. The latter is decisive of the fact that fibers are not used in filter elements of heavy-duty vehicles.

Filtration paper is formed as a pleated band (Fig. 1a) that can be further shaped into proper filter elements. The most popular is the v-shaped pleat. Most often, the filter elements are formed into round or oval based cylinders or panels (Fig. 2).

Due to low rigidity of the pleats made from filtering fibers, forming traditional filter elements is difficult, par-

cego powietrza przy stałym, podczas eksploatacji, małym oporze przepływu rzędu 2–3 kPa, skutecznością sięgającą 90 %, dokładnością zatrzymywania ziaren powyżej 15–35 μm oraz bezobsługowością w przypadku samoczynnego usuwania pyłu z osadnika [1, 3]. Filtry dwustopniowe typu multicyklon–przegroda porowata cechuje duża dokładność i skuteczność filtracji pyłu mineralnego dochodząca do 99,9 % oraz długi okres pracy [1]. Wadą ich jest natomiast duża masa własna oraz duże wymiary zewnętrzne. Trwałość takich systemów filtracji jest determinowana przyrostem oporów przepływu wkładu przegrodowego.

Przegrody filtracyjne filtrów powietrza wlotowego silników spalinowych pojazdów mechanicznych wykonywane są przede wszystkim z papierów filtracyjnych. Z włókien filtracyjnych produkowane są wkłady głównie do filtracji powietrza wlotowego samochodów osobowych. Coraz częściej do budowy przegród z papierów filtracyjnych stosowana jest dodatkowo warstwa z nanowłókien – włókna o bardzo małych średnicach, wynoszących około 50–500 nm; dla porównania: grubość włókna celulozowego – 10–20 μm (10 000–20 000 nm), grubość włosa ludzkiego – 20–80 μm (20 000–80 000 nm). Materiały filtracyjne różnią się właściwościami i parametrami struktury: gramaturą, grubością, przepuszczalnością powietrza, wymiarami porów oraz wytrzymałością na rozerwanie i przepuklenie. Przykładowe właściwości papierów i włókien filtracyjnych podano w tabelach 1 i 2. Papiery filtracyjne w zależności od gatunku i przeznaczenia charakteryzują się gramaturą na poziomie 115–240 g/m^2 , grubością 0,3–0,9 mm i średnim wymiarem porów w przedziale 40–95 μm [4]. Włókniyny filtracyjne w porównaniu z papierami charakteryzują się dwukrotnie

Table 1. Parameters of selected filtering papers by Hollingsworth & Vose [4]

Tabela 1. Parametry wybranych papierów filtracyjnych firmy Hollingsworth & Vose [4]

Filtering paper/papier filtracyjny	GSM/gramatura	Thickness/grubość	Air permeability/ przepuszczalność powietrza	Maximum pore diameter/ maks. średnica por	Average pore diameter/ średnia średnica por
	[g/m^2]	[mm]	Pa [l/s/m^2]	[μm]	[μm]
1363/19 VH 212	120	0.49	270	55	46
1613/20 VH 188	140	0.64	480	66	56
1594 VH 212	125	0.6	700	77	65
1258/15 VH 188	118	0.64	815	84	73
930/19 VH 188	129	0.6	880	95	88

Table 2. Parameters of filtering fibers manufactured by Korea Filtration Technologies Co. [9]

Tabela 2. Parametry włókien filtracyjnych produkowanych przez Korea Filtration Technologies Co [9]

Fiber/włóknina	Gramature/ gramatura	Thickness/grubość	Air permeability/ przepuszczalność powietrza	Resistance to stretching/ wytrzymałość na rozciąganie	Resistance to bending/ wytrzymałość na zginanie	Resistance to tear/ wytrzymałość na rozerwanie
	[g/m^2]	[mm]	[$\text{cm}^3/\text{cm}^2/\text{s}$]	[N/50 mm]	[N/30 mm]	[MPa]
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	80–10	> 98	1.47–2.94	0.59
AC-510	205	2.7–3.3	90–40	> 98	1.47–2.94	0.49

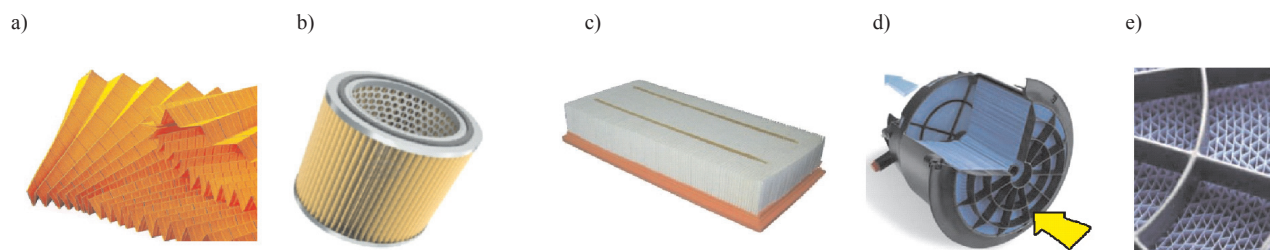


Fig. 2. Forms of the filter element: a) pleated band, b) cylindrical element, c) panel element, d) PowerCore, e) PowerCore – view from the front
Rys. 2. Kształtowanie wkładu filtracyjnego: a) plisowana taśma, b) wkład cylindryczny, c) wkład panelowy, d) PowerCore, e) PowerCore – widok od zola

ticularly in the case of high and long pleats. A solution to this is fitting of the pleated fiber in a rigid plastic frame (Fig. 3b). Another solution that increases the rigidity of synthetic fibers is pleating of the fibers together with special plastic meshes that protect the structure against damage during operation [13].

Panel filter elements manufactured in a wet press stamping process are also getting increasingly popular (Fig. 3c).



Fig. 3. The shapes of the fiber filter elements: a) pleated band, b) elements made from pleated fiber in a rigid frame, c) stamped panel element

Rys. 3. Kształtowanie wkładu filtracyjnego: a) plisowana taśma, b) wkład wykonany z plisowanej włókniny w sztywnej ramce, c) wkład panelowy w formie wypraski

The properties of the filter elements are characterized by the following parameters:

- filtration efficiency – the quotient of dust mass m_p trapped by the filter and mass of dust fed to the filter in time m_d ,
- drag – difference of the pressures p_1 downstream and p_2 upstream of the filter,
- filtering accuracy – maximum d_{zmax} size of the dust grain in the air downstream of the filter,
- absorption – mass of dust Δm trapped until the filter reaches a given drag (equal to 200 % of the value of the drag of a clean filter at nominal airflow).

The life of a filter, limited by the admissible drag Δp_{fidop} , is influenced not only by the parameters of the air filtration processes on the porous barrier but also by absorption of the barrier and its structure as well as the size of the dust grains [3–6].

Life τ of a two-stage air filter can be determined through an empirical dependence [1, 3]:

$$\tau = \frac{F_c \cdot k_m \cdot k_c}{Q_{max} \cdot s \cdot (1 - \Phi_M) \cdot \Phi_p} \quad [h], \quad (1)$$

większą gramaturą, kilkakrotnie większą grubością oraz zdecydowanie mniejszą sztywnością [8, 9]. Ta ostatnia właściwość decyduje o tym, że włókniny nie są stosowane do budowy wkładów filtracyjnych filtrów powietrza pojazdów ciężarowych.

Z materiałów tych kształtuje się plisowaną taśmę, z której następnie może być w różny sposób zmontowany wkład filtracyjny. Najbardziej rozpowszechnione jest ukształtowanie plis w kształcie litery V. Papierowe wkłady filtracyjne mają najczęściej konstrukcję cylindryczną o przekroju koła lub owalu oraz panelową (rys. 2).

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. Rozwiązaniem tego problemu jest montowanie plisowanej włókniny w sztywnej ramce wykonanej z tworzywa sztucznego (rys. 3b). Innym rozwiązaniem zwiększającym sztywność włókien syntetycznych jest plisowanie włókien wraz ze specjalnymi siatkami z tworzyw sztucznych, uzyskując tym samym zabezpieczenie przed uszkodzeniami podczas eksploatacji [13].

Popularne w ostatnim czasie są również panelowe wkłady filtracyjne wykonane z włókien filtracyjnych w postaci wyprasek formowanych na mokro (rys. 3c).

Właściwości filtru powietrza są charakteryzowane przez następujące parametry:

- skuteczność filtracji – iloraz masy pyłu m_p zatrzymanego przez filtr i masy pyłu m_d dostarczonego do filtru,
- opór przepływu – różnica ciśnień całkowitych p_1 przed filtrem i p_2 za filtrem,
- dokładność filtracji – maksymalny d_{zmax} rozmiar ziarna pyłu w powietrzu za filtrem,
- chłonność – masa pyłu Δm zatrzymanego do chwili osiągnięcia przez filtr określonej wartości oporu przepływu (równego 200 % wartości oporów przepływu dla czystego filtru przy nominalnym strumieniu powietrza).

Czas pracy filtru do uzyskania założonej wartości Δp_{fidop} zależy nie tylko od parametrów procesu filtracji strumienia powietrza na przegrodzie porowatej, ale także od chłonności przegrody filtracyjnej wynikającej z jej struktury oraz od rozmiaru zatrzymywanych ziaren pyłu [3–6]. Czas pracy τ dwustopniowego filtru powietrza można określić za pomocą empirycznej zależności (1) [1, 3], gdzie: F_c – powierzchnia materiału filtracyjnego II stopnia filtracji [m^2], k_m – współ-

where: F_c – area of the second stage filtration material [m^2], k_m – material absorption coefficient for adopted Δp_{fdop} [g/m^2], k_c – coefficient allowing for the difference between the parameters of the test and actual contaminants, Q_{max} – nominal engine air demand [m^3/h], s – concentration of dust in the intake air [g/m^3], φ_M – efficiency of the first stage filtration, φ_p – efficiency of the filter element.

Manufacturers of filtering materials only provide data describing their structure. They do not provide information on the filtration properties of the manufactured products, dust absorption coefficient k_m in particular. Filtration characteristics are determined experimentally using standard tests. The value of coefficient k_m is determined (assuming an even distribution of dust on the entire area of the filtering material) from relation [3]:

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

where: m_{cw} – total mass of dust trapped by the filter element for the adopted value of admissible drag Δp_{fdop} [g], F_w – active area of the filtering material [m^2].

Coefficient of dust absorption k_m for typical filtering materials based on cellulose determined by standard test dusts at a constant drag value Δp_{fdop} , reaches maximum values up to 220 g/m^2 [3, 5]. Coefficient of dust absorption k_m of the filtering fiber marked AC-301, currently the only fiber available in Poland used for filtering of engine intake air is $k_m = 343 \text{ g/m}^2$ as determined by the authors of the paper [8]. Dust absorption of fiber is hence almost twice as high compared to paper, which is its biggest advantage.

In a two-stage air filtering system the filtering element (second filtration stage) receives dust devoid of grains greater than $d_z = 15\text{--}25 \text{ }\mu\text{m}$ [2], which substantially influences the filtering process in the porous barrier. This results in a more abrupt increase in the drag (compared to when the barrier receives standard dust), which in turn results in a reduced service life (at constant admissible drag Δp_{fdop}). In [3, 5, 6] a drop in the value of coefficient of dust absorption k_m was observed of the filtering paper working downstream of the centrifugal deduster. The results presented in [3] indicate a 75 % drop in the value of coefficient k_m of the 796/1 VH186 paper working downstream of the reverse cyclone with tangential intake compared to paper that received dust of standard granulometric composition.

In the available literature there is no information on the value of coefficient of dust absorption k_m of the filtering fiber working as the second filtering stage downstream of the centrifugal filter. It is thus purposeful to conduct experimental research aiming at determination of this value. This objective can be completed using the already developed research methodology subsequently validated in [6].

3. Aim and scope of research

The aim of the research was to obtain the filtration characteristics of the fiber working as the second filtration stage downstream of the continuous cyclone and determining its coefficient of dust absorption k_m under the conditions of two-stage filtering. The object of the research was filtering

czynnik chłonności 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_p – skuteczność wkładu filtracyjnego.

Producenci materiałów filtracyjnych podają jedynie dane opisujące ich strukturę, brak jest 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 (2) [3], 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].

Współczynnik k_m chłonności pyłu dla typowych materiałów filtracyjnych na bazie celulozy określony za pomocą standardowych pyłów testowych, przy ustalonej wartości oporu przepływu Δp_{fdop} , osiąga maksymalne wartości do 220 g/m^2 [3, 5]. Współczynnik chłonności pyłowej k_m włókniny filtracyjnej o oznaczeniu AC-301, będącej obecnie w naszym kraju jedyną włókniną filtracyjną wykorzystywaną do filtracji powietrza wlotowego silników spalinowych, określony przez autorów artykułu, wynosi $k_m = 343 \text{ g/m}^2$ [8]. Chłonność pyłowa włóknin jest zatem niemal dwukrotnie większa od chłonności papierów, co stanowi jej podstawową zaletę.

W dwustopniowym systemie filtracji powietrza na wkład filtracyjny, będący drugim stopniem filtracji, trafia pył pozabawiony ziaren o rozmiarach większych niż $d_z = 15\text{--}25 \text{ }\mu\text{m}$ [2], co ma zasadniczy wpływ na proces filtracji w przegrodzie porowatej. Powoduje to gwałtowniejszy (niż wtedy, gdy na przegrodę dozowany jest pył o składzie standardowym) wzrost oporów przepływu, co skutkuje (przy ustalonej wartości oporu dopuszczalnego Δp_{fdop}) skróconym okresem użytkowania filtru powietrza. W pracach [3, 5, 6] przedstawiono zaobserwowany spadek wartości współczynnika chłonności pyłowej k_m papieru filtracyjnego pracującego za filtrem bezwładnościowym. Wyniki badań podane w pracy [3] wskazują na 75-procentowy spadek wartości współczynnika k_m papieru 796/1 VH186 pracującego za cyklonem zwrotnym z wlotem stycznym w stosunku do papieru, na który trafiał pył o standardowym składzie granulometrycznym.

W dostępnej literaturze brak jest informacji na temat wartości współczynnika k_m chłonności pyłowej włókniny filtracyjnej pracującej jako drugi stopień filtracji za filtrem bezwładnościowym. Zasadne jest zatem przeprowadzenie badań eksperymentalnych mających na celu określenie jego wartości. Cel ten można osiągnąć, wykorzystując opracowaną uprzednio i zweryfikowaną w pracy [6] metodykę badań.

3. Cel i zakres badań

Celem badań było uzyskanie charakterystyk filtracyjnych włókniny pracującej jako drugi stopień filtracji za cyklonem

fiber marked AC-301 by Korea Filtration Technologies Co. (tab. 1) in the form of cylindrical filter elements.

The scope of the research covered the determination of the following characteristics: efficiency, filtering accuracy and filter drag as a function of dust absorption coefficient k_m and as a function of mass of dust m_d fed to the cyclone-barrier system:

- filtering efficiency $\varphi_w = f(k_m)$, $\varphi_w = f(m_d)$,
- filtering accuracy $d_{zmax} = f(k_m)$, $d_{zmax} = f(m_d)$,
- drag $\Delta p_w = f(k_m)$, $\Delta p_w = f(m_d)$.

In the investigations of the filtering fiber working downstream of the continuous cyclone the authors planned the assessment of the said characteristics of efficiency, accuracy and drag for three filtering rates:

- 1) $v_{F1} = 0.08$ m/s – filtering rate typical of filtering papers,
- 2) $v_{F3} = 0.27$ m/s – rate close to that specified by the manufacturer (Mann+Hummel) as maximum for filtering fibers,
- 3) $v_{F2} = 0.17$ m/s – medium rate.

The criterion for the end of the tests was the moment when the filter element reached the adopted admissible drag $\Delta p_{dop} = 5$ kPa.

4. Research methodology and conditions

The investigations were carried out on a test stand (Fig. 4) whose main element is the filtering segment built from a single continuous cyclone constituting a part of a multicyclone of a truck and an encased cylindrical filter element located serially past it, made from the tested fiber.

Surface F_w of the tested fiber was selected in such a way that for the maximum value of the airflow from a single cyclone the filtration rate v_F did not exceed the filtration rate $v_F = 0.33$ m/s specified by Mann + Hummel [2]. Particle

przelotowym oraz wyznaczenie jej współczynnika chłonności pyłowej k_m w warunkach pracy filtru dwustopniowego. Przedmiotem badań była włókna filtracyjna AC-301 firmy Korea Filtration Technologies Co. (tab. 1) ukształtowana w cylindryczne wkłady filtracyjne.

Zakres badań obejmował określenie charakterystyk: skuteczności, dokładności filtracji i oporów przepływu wkładu filtracyjnego, w funkcji współczynnika chłonności pyłowej k_m oraz w funkcji masy pyłu m_d dostarczonej do układu cyklon–przegroda:

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

W zakresie badań włókny filtracyjnej pracującej za cyklonem przelotowym przewidziano wykonanie wymienionych charakterystyk skuteczności i dokładności filtracji oraz oporów przepływu przy trzech wartościach prędkości filtracji:

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

Jako kryterium zakończenia badań ustalono chwilę osiągnięcia przez wkład filtracyjny założonej wartości oporu dopuszczalnego $\Delta p_{dop} = 5$ kPa.

4. Metodyka i warunki badań

Badania przeprowadzono na stanowisku (rys. 4), 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 włókny filtracyjnej, zamkniętego w metalowej obudowie.

Powierzchnia F_w badanej włókny dobrana została tak, aby dla maksymalnej wartości strumienia powietrza wypływającego z pojedynczego cyklonu prędkość filtracji v_F nie przekroczyła podawanej przez Mann+Hummel prędkości filtracji $v_F = 0,33$ m/s [2]. Licznik cząstek stałych Pamas-2132 umożliwia rejestrację liczby i rozmiarów ziaren pyłu w strumieniu powietrza za badawczym wkładem filtracyjnym, w zakresie 0,7–100 μm , podzielonym na 32 przedziały pomiarowe, będące zakresami ograniczonymi średnicami (d_{zmin} – d_{zmax}).

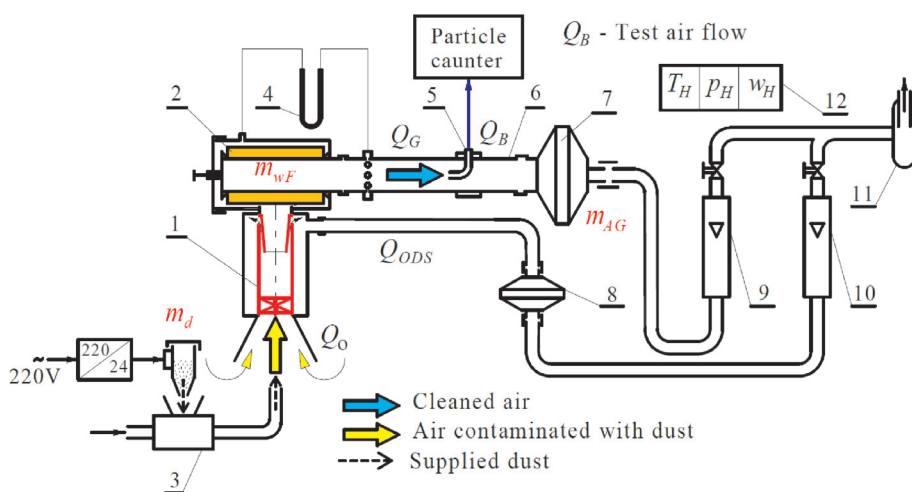


Fig. 4. Functional schematics of the test stand for the filtration fibers in the “cyclone–porous barrier” system: 1 – cyclone, 2 – study filter element, 3 – dust dispenser, 4 – fluid manometer, 5 – dust probe, 6 – measurement duct, 7 – absolute filter of the main duct, 8 – absolute filter of the extraction flow, 9 – rotameter of the main flow, 10 – rotameter of the extraction flow, 11 – extraction fan, 12 – thermohigrobarometer

Rys. 4. Schemat funkcjonalny stanowiska do badań włókien filtracyjnych w systemie „cyklon – przegroda”: 1 – cyklon, 2 – wkład badawczy, 3 – dozownik pyłu, 4 – manometr cieczowy, 5 – sonda pyłowa, 6 – przewód pomiarowy, 7 – filtr absolutny przewodu głównego, 8 – filtr absolutny strumienia odsysania, 9 – rotametr strumienia głównego, 10 – rotametr strumienia odsysania, 11 – wentylator ssawny, 12 – termohigrobarometr

counter (Pamas-2132) enables the recording of the number and size of the dust grains in the airflow downstream of the filtration element in the range 0.7–100 μm divided into 32 measurement intervals, constituting the ranges limited with diameters ($d_{\text{zmin}} - d_{\text{zmax}}$).

The filtration efficiency was determined with the weighted method in the subsequent measurement cycles of a predefined duration (in the initial period of the filter operation it was $\tau = 3$ and $\tau = 6$ minutes upon stabilizing of the parameters of the tested fiber) as the ratio of dust m_{wF} trapped by the filter and the mass of dust m_{d} fed to the filter:

$$\varphi_{\text{w}} = \frac{m_{\text{wF}}}{m_{\text{d}}} \quad (3)$$

The filter drag was determined as the differences of static pressures p_1 upstream and p_2 downstream of the filter:

$$\Delta p_{\text{w}} = p_1 - p_2 \quad (4)$$

The accuracy of the filtration was determined as the maximum size of the dust grain d_{zmax} downstream of the filter.

During the tests, the concentration of test dust PTC-D in the intake air was maintained at the level of $s = 1 \text{ g/m}^3$. The chemical and granulometric composition of the test dust was given in [10]. During the tests of the fiber operating as the second stage of filtration ejective dust extraction at the rate equal to $m_0 = 10\%$ was applied.

5. Analysis of the results

The results of the investigations of the characteristics of efficiency $\varphi = f(k_{\text{m}})$ and accuracy $d_{\text{z}} = f(k_{\text{m}})$ of filtration and drag $\Delta p_{\text{w}} = f(k_{\text{m}})$ of the filter element (as a function of coefficient of dust absorption k_{m}) operating under the conditions of second filtration stage downstream of the minicyclone at three different filtration rates v_{f} have been presented in Figs 5 and 6.

In the initial period of operation of the filter element, the increase in the filtration efficiency is rather abrupt. In literature, this period, continuing until the moment when the filtering material obtains the predefined filtration efficiency, is referred to as unstable filtration period. The subsequent period of stable filtration is characterized by high efficiency exceeding 99 % and its very slow increment.

For the tested fibers, the authors adopted the moment of reaching by the filter of the filtration efficiency of 99.5 % as the beginning of the filtration period. The initial filtration efficiency determined after the first measurement cycle of the fiber operating downstream of the cyclone reached the value of 80 % and the value of 99.5 % was observed on the level of 25–30 g/m^2 , at coefficient k_{m} depending on the filtration rate v_{f} .

In the initial period of operation of the filter element, the diameters of the grains slipped by

Skuteczność filtracji określano metodą wagową w kolejnych cyklach pomiarowych o określonym czasie trwania, wynoszącym w początkowym okresie pracy wkładu $\tau = 3$ minuty oraz $\tau = 6$ minut po ustabilizowaniu się parametrów badanej włókniny, jako iloraz masy pyłu m_{wF} zatrzymanego przez filtr i masy pyłu m_{d} dostarczonego do filtru – wzór (3).

Opór przepływu wkładu filtracyjnego określano jako różnicę ciśnień statycznych p_1 przed filtrem i p_2 za filtrem – wzór (4).

Dokładność filtracji określano jako maksymalny d_{zmax} rozmiar ziarna pyłu w powietrzu za filtrem.

Podczas badań utrzymywano stężenie pyłu testowego PTC-D w zasysanym do filtra badawczego powietrzu na poziomie $s = 1 \text{ g/m}^3$. Skład chemiczny i granulometryczny pyłu testowego podano w publikacji [10]. Podczas badań włókniny pracującej jako drugi stopień filtracji stosowano eiekcyjne odsysanie pyłu z cyklon przy stopniu odsysania równym $m_0 = 10\%$.

5. Analiza wyników badań

Wyniki badań charakterystyk skuteczności $\varphi = f(k_{\text{m}})$ i dokładności $d_{\text{z}} = f(k_{\text{m}})$ filtracji oraz oporów przepływu $\Delta p_{\text{w}} = f(k_{\text{m}})$ wkładu filtracyjnego (w funkcji współczynnika chłonności pyłowej k_{m}) pracującego w warunkach odpowiadających drugiemu stopniowi filtracji za minicyklonem przelotowym przy trzech różnych prędkościach filtracji v_{f} przedstawiono na rys. 5 i 6.

W początkowym okresie pracy wkładu wzrost skuteczności filtracji jest dość gwałtowny. W literaturze okres ten, trwający do chwili uzyskania przez materiał filtracyjny ustalonej wartości skuteczności filtracji, nazywa się okresem filtracji nieustalonej. Następujący po nim okres filtracji ustalonej charakteryzuje się wysoką skutecznością filtracji przekraczającą 99 % oraz jej bardzo powolnym narastaniem.

Dla badanych włókien przyjęto jako początek okresu filtracji ustalonej chwilę osiągnięcia skuteczności filtracji na poziomie 99,5 %. Początkowa skuteczność filtracji określona po

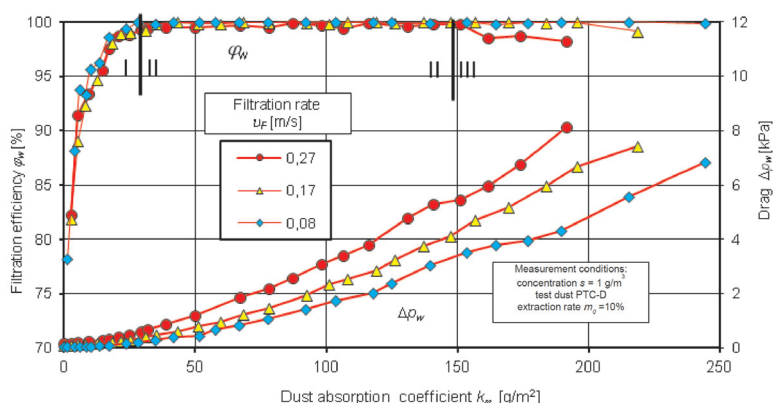


Fig. 5. Characteristics of filtration efficiency $\varphi_{\text{w}} = f(k_{\text{m}})$ and drag $\Delta p_{\text{w}} = f(k_{\text{m}})$ as a function of coefficient of dust absorption k_{m} of the filter element operating downstream of the continuous cyclone

Rys. 5. Charakterystyki skuteczności filtracji $\varphi_{\text{w}} = f(k_{\text{m}})$ i oporu przepływu $\Delta p_{\text{w}} = f(k_{\text{m}})$ w funkcji współczynnika chłonności k_{m} wkładu filtracyjnego pracującego za cyklonem przelotowym

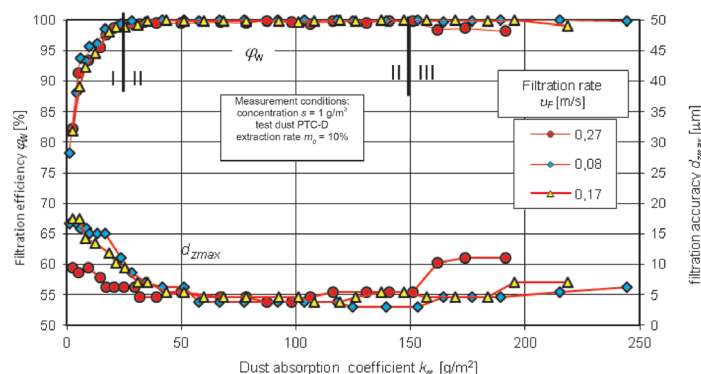


Fig. 6. Characteristics of the filtration accuracy $d_{zmax} = f(k_m)$ and efficiency $\phi_w = f(k_m)$ as a function of coefficient of dust absorption k_m of the filter element operating downstream of the continuous cyclone

Rys. 6. Charakterystyki dokładności filtracji $d_{zmax} = f(k_m)$ oraz skuteczności filtracji $\phi_w = f(k_m)$ w funkcji współczynnika chłonności k_m wkładu filtracyjnego pracującego za cyklonem przelotowym

the filter operating downstream of the continuous cyclone assumed the maximum values in the range $d_{zmax} = 4.6\text{--}9.4\text{ }\mu\text{m}$ at the filtration rate of $v_F = 0.27\text{ m/s}$, $d_{zmax} = 7\text{--}17.4\text{ }\mu\text{m}$ at the filtration rate of 0.17 m/s and $d_{zmax} = 6.2\text{--}16.6$ at the filtration rate $v_F = 0.08\text{ m/s}$. The reduction of the size of the particles slipped through the cyclone-barrier system along the growth of filtration rate v_F – is related to the characteristics of the applied cyclone – increase in its efficiency and accuracy as a function of the airflow [7]. As the dust mass grew on the filter element, grain diameters d_{zmax} assumed increasingly lower values and stabilized on the level of $5\text{--}7\text{ }\mu\text{m}$. Then the proper (II) period of filtration begins for which the filtration rate has a different value and lasts until the moment when the accuracy and efficiency level drops suddenly. The third (III) period of the fiber operation is characterized by a slow reduction of the efficiency and accuracy of filtration.

For the tested fibers, the authors adopted the moment of reaching by the filter of the filtration efficiency of $\phi_w = 99.5\%$ as the boundary between period II and III. During the test of the fiber operating downstream of the cyclone, the drop in the filtration efficiency was observed upon reaching of the coefficient $k_m = 155\text{ g/m}^2$ at the rate of $v_F = 0.27\text{ m/s}$ and $k_m = 208\text{ g/m}^2$ at the rate $v_F = 0.17\text{ m/s}$. At the lowest filtration rate of $v_F = 0.08\text{ m/s}$ no drop in the efficiency to the predefined 99.5% was observed.

The rate of drag increment Δp_w increases along the filtration rate v_F . The greatest drag increment rate was observed for the filtration rate of $v_F = 0.27\text{ m/s}$ and the lowest for $v_F = 0.08\text{ m/s}$, which is in agreement with the general conditions of flow through porous barriers. The coefficient of dust absorption k_m (second stage filtration fiber) determined at $\Delta p_w = 5\text{ kPa}$ assumed the values in the range $k_m = 135\text{--}203.2\text{ g/m}^2$. The lowest value of this coefficient $k_m = 135\text{ g/m}^2$ was obtained for the filtration rate $v_F = 0.27\text{ m/s}$. At the filtration rate of $v_F = 0.17\text{ m/s}$ the value $k_m = 164.3\text{ g/m}^2$ was obtained and at $v_F = 0.08\text{ m/s}$ the coefficient of absorption was $k_m = 203.2\text{ g/m}^2$. Hence, the reduction of the filtration rate v_F from 0.27 m/s to 0.08 m/s resulted in a 50% increase in the coefficient of dust absorption k_m . The values of coefficient

pierwszym cyklu pomiarowym włókniny pracującej za cyklonem osiągnęła wartość około 80% , a ustaloną wartość skuteczności filtracji równą 99.5% zaobserwowano, w zależności od prędkości filtracji v_F przy współczynniku k_m na poziomie $25\text{--}30\text{ g/m}^2$.

W początkowym okresie pracy wkładu średnice ziaren przepuszczonych przez wkład filtracyjny pracujący za cyklonem przelotowym przyjmują maksymalne wartości w zakresie $d_{zmax} = 4.6\text{--}9.4\text{ }\mu\text{m}$ przy prędkości filtracji $v_F = 0.27\text{ m/s}$, $d_{zmax} = 7\text{--}17.4\text{ }\mu\text{m}$ przy prędkości filtracji 0.17 m/s oraz $d_{zmax} = 6.2\text{--}16.6$ przy prędkości filtracji $v_F = 0.08\text{ m/s}$. Zmniejszanie się rozmiarów cząstek przepuszczonych przez układ „cyklon–przegroda” wraz ze wzrostem prędkości filtracji v_F jest związane z charakterystyką zastosowanego cyklonu – wzrostem jego skuteczności i dokładności filtracji w funkcji strumienia powietrza [7]. Wraz z przyrostem masy pyłu na wkładzie średnice ziaren d_{zmax} przyjmują coraz mniejsze wartości i stabilizują się na poziomie $5\text{--}7\text{ }\mu\text{m}$. Rozpoczyna się wówczas zasadniczy (II) okres pracy wkładu, który dla każdej prędkości filtracji ma inną wartość i trwa do chwili nagłego spadku dokładności i skuteczności filtracji. Trzeci (III) okres pracy włókna charakteryzuje się więc powolnym spadkiem skuteczności i dokładności filtracji.

Dla badanych włókien przyjęto jako granicę rozdziału okresów II i III chwilę uzyskania przez włókninę skuteczności filtracji $\phi_w = 99.5\%$. Podczas 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 . Największą intensywność wzrostu oporów przepływu zaobserwowano przy prędkości filtracji $v_F = 0.27\text{ m/s}$, najmniejszą przy prędkości $v_F = 0.08\text{ m/s}$, co jest zgodne z ogólnymi warunkami przepływu przez przegrodę porowatą. Określony przy $\Delta p_w = 5\text{ kPa}$ współczynnik chłonności pyłowej k_m włókniny, badanej w warunkach odpowiadających drugiemu stopniowi filtracji, przyjmuje wartości w zakresie $k_m = 135\text{--}203.2\text{ g/m}^2$. Najmniejszą wartość współczynnika chłonności pyłu $k_m = 135\text{ g/m}^2$ uzyskano przy prędkości filtracji $v_F = 0.27\text{ m/s}$. Przy prędkości filtracji $v_F = 0.17\text{ m/s}$ uzyskano wartość $k_m = 164.3\text{ g/m}^2$, a przy $v_F = 0.08\text{ m/s}$ współczynnik chłonności wyniósł $k_m = 203.2\text{ g/m}^2$. Zatem zmniejszenie prędkości filtracji v_F z 0.27 m/s do 0.08 m/s spowodowało wzrost współczynnika chłonności pyłu k_m o 50% . Wartości współczynnika k_m włókniny filtracyjnej pracującej przy tych samych prędkościach filtracji, określone w warunkach filtracji jednostopniowej z wykorzystaniem pyłu testowego o standardowym składzie granulometrycznym, podane w pracy [8], mają odpowiednio większe wartości $k_m = 290\text{--}343\text{ g/m}^2$.

k_m of the filtration fiber operating at the same filtration rates, determined under the conditions of a single stage filtration using the test dust of a standard granulometric composition given in [8] have larger values of $k_m = 290\text{--}343 \text{ g/m}^2$.

The obtained course of the characteristics of efficiency, accuracy and drag can be substantiated by the fact that dust grains trapped in the porous barrier are secondary components of the filtration material. Further dust grains are trapped not only on the fibers but also on the large agglomerates made from the earlier trapped grains. The growing agglomerates fill the free space between the fibers, which results in trapping of increasingly smaller dust grains but at the same time obstructs the flow of aerosol which explains the growing drag as the dust mass trapped in the filter increases.

A drop in the efficiency and accuracy of filtration in the final stage of the filter element operation i.e. upon trapping of a predefined mass of dust manifests itself by the appearance of dust grains of increasingly large size in the air downstream of the filter element. This phenomenon is referred to as ‘burst’, which consists in detaching of the grains or entire agglomerates from the surface as a result of high velocities and moving towards the outlet part of the filtering material. The occurrence of the burst phenomenon is more likely for high flow velocities, which is why it occurs early for the filtration rate of $v_F = 0.27 \text{ m/s}$ and is the latest for the rate of $v_F = 0.08 \text{ m/s}$.

The use of centrifugal filters as the first stage of filtration results in the dust grains of the size $15\text{--}20 \mu\text{m}$ hitting the second stage – the porous barrier thus reducing the coefficient of dust absorption of the filtering fiber k_m [3, 5, 6]. The analysis of the characteristics of filtration efficiency and drag as a function of mass of the dust fed to the filter (Fig. 7) shows that the operation time until the cyclone-barrier system reaches the admissible drag is longer than it is in the case when the filter element operates in a single stage filtration.

This can be explained by the fact that, following the application of a centrifugal filter as the first filtration stage upstream of the barrier, the majority of the delivered dust (in the case of the tested system it was approximately 87 %) is separated by the cyclone. Hence, the filter element receives only 13 % of the dust mass that was introduced into the ‘cyclone-barrier’ system [7].

Figures 8–10 show the granulometric composition of dust in the air downstream of the filter operating downstream of the axial continuous cyclone as percentage changes of share of the dust grains of individual size groups for three test cycles at the filtration rate of $v_F = 0.17 \text{ m/s}$. The percentage share Up_i was determined from the relation:

$$Up_i = \frac{N_i}{N} = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^{32} N_i}, \quad (5)$$

Uzyskany przebieg charakterystyk skuteczności i dokładności filtracji oraz oporów przepływu tłumaczyć należy tym, że zatrzymywane w przegrodzie ziarna pyłu są źródłem powstawania wtórnych elementów struktury materiału filtracyjnego. Kolejne ziarna pyłu są zatrzymywane nie tylko na włóknach, ale również na powstałych, z zatrzymanych wcześniej ziaren, aglomeratach mogących rozrastać się do znacznych rozmiarów. Rozrastające się w wyniku zatrzymywania coraz większej masy pyłu aglomeraty wypełniają wolne przestrzenie między włóknami, co powoduje zatrzymywanie coraz mniejszych ziaren pyłu, ale jednocześnie utrudnia przepływ aerozolu, i tym tłumaczyć należy wzrost oporów przepływu wraz ze wzrostem pаса pyłu zatrzymanego na wkładzie.

Spadek dokładności i skuteczności filtracji w końcowym etapie pracy wkładu, tj. po zatrzymaniu określonej masy pyłu, uwidacznia się pojawianiem w strumieniu powietrza za filtrem ziaren pyłu o coraz większych rozmiarach. Należy to tłumaczyć wystąpieniem tzw. zjawiska przebiccia, które polega na odrywaniu się od podłoża (w wyniku dużych prędkości przepływu) ziaren pyłu, bądź całych aglomeratów

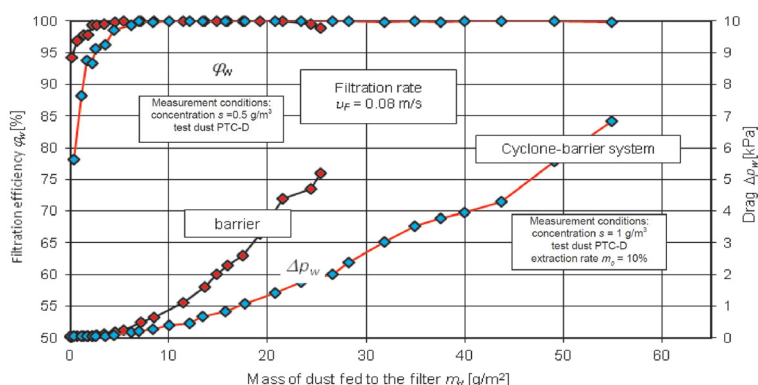


Fig. 7. Characteristics of filtration efficiency $\phi_w = f(m_d)$ and drag $\Delta p_w = f(m_d)$ of a fiber filtering element as a function of dust mass m_d fed to the ‘cyclone-barrier’ system

Rys. 7. 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 dostarczonej do układu „cyklon-włóknina filtracyjna”

i przemieszczaniu się ich na stronę wylotową materiału filtracyjnego. Wystąpienie zjawiska przebiccia jest bardziej prawdopodobne w przypadku większych prędkości przepływu, dlatego najszybciej występuje ono przy prędkości filtracji $v_F = 0.27 \text{ m/s}$, a najpóźniej przy $v_F = 0.08 \text{ m/s}$.

Zastosowanie filtrów bezwładnościowych jako pierwszy stopień filtracji powoduje, że na przegrodę filtracyjną stanowiącą drugi stopień filtracji trafiają jedynie ziarna pyłu o rozmiarach nieprzekraczających $15\text{--}20 \mu\text{m}$, zmniejszając tym samym współczynnik chłonności pyłowej włókniny filtracyjnej k_m [3, 5, 6]. Jednak analiza charakterystyk skuteczności filtracji i oporu przepływu w funkcji masy pyłu dostarczonego do filtru (rys. 7) wskazuje, że czas pracy do osiągnięcia oporu dopuszczalnego zestawu „cyklon-przegroda” jest dłuższy w stosunku do czasu pracy wkładu w warunkach filtracji jednostopniowej.

where: N_i – number of dust grains from an i -th size interval, N – total number of dust grains downstream of the filter element.

As the mass of dust trapped on the test filter element operating under the conditions of second filtration stage increased, a gradual increase in the percentage share of dust grains of the size below $1.4 \mu\text{m}$ was observed. During the first test cycle the share of these particles was 31.44 % and in cycle 15 corresponding to the proper (stable) period of filter operation the grains of this size totaled at 92.66 %. An abrupt drop in the share of particles of greater size was observed i.e. during the first measurement cycle the share of particles of the diameter of $2.2\text{--}3 \mu\text{m}$ was 16.84 % while in cycle 15 the share of all particles of the size greater than $2.2 \mu\text{m}$ was 0.74 %. Analyzing the fractional composition downstream of the filter element in cycle 18 we again see an increase in the share of particles of greater diameter, which is a result of the foregoing phenomenon of burst of the filter element and grabbing of the trapped dust particles by the flow of aerosol.

6. Conclusions

1. Coefficient of dust absorption k_m of the filtering fiber operating under the conditions of second stage filtration

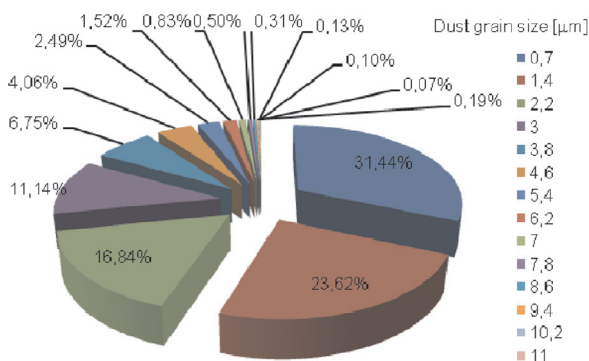


Fig. 8. Granulometric composition of dust downstream of the filter element during measurement cycle 1

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

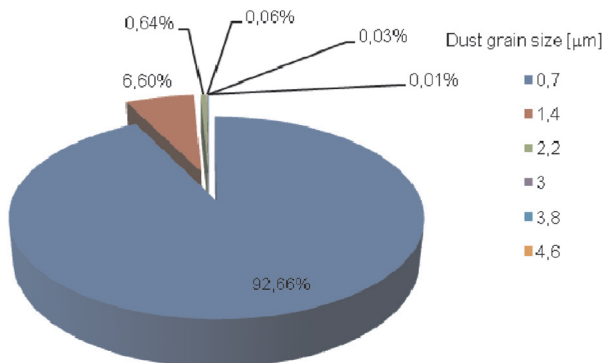


Fig. 9. Granulometric composition of dust downstream of the filter element during measurement cycle 15

Rys. 9. Skład granulometryczny pyłu za wkładem filtracyjnym podczas cyklu pomiarowego nr 15

Tłumaczyć to należy tym, że w wyniku zastosowania filtru bezwładnościowego, jako pierwszy stopień filtracji przed przegrodowym wkładem filtracyjnym, większość zadozowanego pyłu (dla badanego zestawu około 87 %) jest odseparowana przez cyklon. Na wkład filtracyjny trafia więc tylko 13 % masy pyłu, jaka została wprowadzona do układu filtracyjnego „cyklon–przegroda” [7].

Na rysunkach 8–10 przedstawiono, dla trzech wybranych cykli badawczych przy prędkości filtracji $v_f = 0,17 \text{ m/s}$, skład granulometryczny pyłu w powietrzu za badawczym wkładem filtracyjnym pracującym za cyklonem osiowym przelotowym jako procentowe zmiany udziału ziaren pyłu poszczególnych grup wymiarowych. Udział procentowy Up_i określono z zależności (5), 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 drugiemu stopniowi filtracji, w powietrzu za wkładem obserwowano systematyczny wzrost udziału procentowego cząstek pyłu o rozmiarach poniżej $1,4 \mu\text{m}$. Podczas pierwszego cyklu badawczego udział tych cząstek wyniósł 31,44 %, natomiast w trakcie cyklu nr 15 odpowiadającego już zasadniczemu (stabilnemu) okresowi pracy wkładu ziarna pyłu o tych wymiarach stanowiły 92,66 % ogólnej liczby cząstek. Zaobserwowano gwałtowny spadek udziału cząstek o większych rozmiarach; przykładowo w trakcie pierwszego cyklu pomiarowego udział cząstek o średnicach $2,2\text{--}3 \mu\text{m}$ wynosił 16,84 %, podczas gdy w trakcie cyklu nr 15 udział wszystkich cząstek o średnicy powyżej $2,2 \mu\text{m}$ wyniósł 0,74 %. Analizując skład frakcyjny pyłu za wkładem filtracyjnym podczas cyklu nr 18 zauważa się ponowny wzrost udziału cząstek o większych średnicach, co jest spowodowane omówionym zjawiskiem „przebicia” wkładu filtracyjnego i porywaniem przez strumień aerozolu zatrzymanych wcześniej cząstek pyłu.

6. Wnioski

1. Współczynnik chłonności k_m włókniny filtracyjnej pracującej w warunkach odpowiadających drugiemu stopniowi filtracji przyjmuje w chwili osiągnięcia oporu przepływu

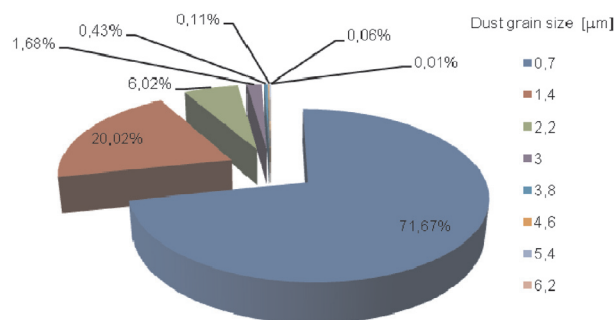


Fig. 10. Granulometric composition of dust downstream of the filter element during measurement cycle 26

Rys. 10. Skład granulometryczny pyłu za wkładem filtracyjnym podczas cyklu pomiarowego nr 26

assumes the values of 203–135 g/m² as of the moment of reaching the drag of $\Delta p_w = 5$ kPa for the rate of $v_F = 0.08$ –0.27 m/s. These values are much higher than for the filtration papers ($k_m = 43$ –78 g/m²) for which the same research methodology was applied.

2. Coefficients of dust absorption k_m of the filtering fiber downstream of the cyclone assume values of approx. 50 % lower than for the fiber operating under the conditions of single stage filtration ($k_m = 343$ –290 g/m²) on which dust of standard fractional composition is delivered.
3. Applying cyclones as the first stage of filtration extended the service life of the fiber filter element until the adopted value of 5 kPa of the admissible drag was reached. Under actual operating conditions, this results in the extension of the air cleaner service intervals.
4. The presence of larger grains in the dedusted air in the initial period of operation may be impactful on the accelerated wear of engine subassemblies.
5. The appearance of dust grains of increasingly larger size downstream of the filter in the final stage of the filter service life results from the phenomenon of ‘bursting’ that is caused by high flow velocities through the filter resulting from the clogging of the free space in the filtering material with dust. The service life of a filtering material limited by the obtainment of an admissible drag should be selected in such a way as to avoid the period of filter operation when bursting occurs.
2. Współczynniki chłonności pyłu k_m włókniny filtracyjnej pracującej za cyklonem przyjmują wartości o około 50 % niższe niż dla włókniny pracującej w warunkach filtracji jednostopniowej ($k_m = 343$ –290 g/m²), na którą trafia pył o standardowym składzie frakcyjnym.
3. Zastosowanie cyklonu jako pierwszy stopień filtracji spowodowało wydłużenie czasu pracy wkładu włókninowego do chwili osiągnięcia założonej wartości (5 kPa) dopuszczalnego oporu przepływu. W warunkach eksploatacji skutkuje to wydłużeniem przebiegu pojazdu pomiędzy kolejnymi obsługiwaniem filtru powietrza.
4. Obecność, w strumieniu powietrza oczyszczonego, większych ziaren pyłu w początkowym okresie pracy wkładu może mieć wpływ na przyspieszone zużycie elementów silnika.
5. Pojawianie się w powietrzu za filtrem (w końcowym etapie pracy wkładu) ziaren pyłu o coraz większych rozmiarach wynika z tzw. zjawiska przebiccia, które jest spowodowane dużymi prędkościami przepływu przez medium filtracyjne, wynikłego z zapełnienia pyłem wolnych przestrzeni materiału filtracyjnego. Czas pracy wkładu filtracyjnego limitowany osiągnięciem oporu dopuszczalnego powinien być tak dobrany, aby nie obejmował tego okresu pracy wkładu.

Bibliography/Literatura

- [1] Baczewski K., Hebda M.: Filtracja płynów eksploatacyjnych, MCNEMT, Radom 1991/1992.
- [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 spalinych pojazdów mechanicznych, WAT, Warszawa 2012.
- [5] Dziubak T.: Badania eksperymentalne papieru filtracyjnego do dwustopniowego filtru 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 spalinych, Biuletyn WAT, vol. LXII, nr 2, 2013.
- [8] Dziubak T., Szwedkowicz S.: Badania eksperymentalne włókniny do filtracji powietrza wlotowego silników spalinych pojazdów mechanicznych, Combustion Engines nr 4/2013 (155), 2013.
- [9] Korea Filtration Technologies Co.: Performance mill sheet, materiały udostępnione przez WIX Filtron, Gostyń.
- [10] PN-S-34040, Filtry powietrza. Wymagania i badania, PKN, 1996.
- [11] Szczeciński S. i in.: Turbinowe napędy samochodów, WKŁ, Warszawa 1974.
- [12] Szwedkowicz S.: Projekt wstępny metodyki badań chłonności pyłowej materiałów filtracyjnych filtrów powietrza pojazdów mechanicznych, praca dyplomowa, WAT, Warszawa 2010.
- [13] WIX Filtron, Katalog filtrów, Gostyń 2012.

Tadeusz Dziubak, DSc., DEng. – Professor at the Faculty of Mechanics Military University of Technology, Warsaw, Poland.

Dr hab. inż. Tadeusz Dziubak – profesor na Wydziale Mechanicznym Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie.

e-mail: tdziubak@wat.edu.pl



Sebastian Szwedkowicz, MEng. – PhD student in Faculty of Mechanical Engineering at Military University of Technology.

Mgr. inż. Sebastian Szwedkowicz – doktorant na Wydziale Mechanicznym Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie.

e-mail: sszedkowicz@wat.edu.pl

