

## THE RESEARCH OF AIR FILTRATION PROCESS ON PAPER PARTITION IN THE "CYCLONE – POROUS PARTITION" SYSTEM

Tadeusz Dziubak

Military University of Technology  
Faculty of Mechanical Engineering  
Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warsaw, Poland  
Tel. +48 22 6837121, fax +48 22 6837602  
e-mail: t.dziubak@wme.wat.edu.pl

### Abstract

There are described operating conditions of two-stage engine inlet air filtration system. There are presented properties of filtration materials used for porous partitions of vehicle air filters. There is presented research method of filtration papers of two-stage filter. Air filtration thoroughness was evaluated by using of particle counter of Pamas firm. A stand to such filter papers characteristics research is designed. The basic stand element is separate cyclone and appropriately selected paper filter cartridge placed in series. The dust fractional composition in purified air after a cyclone was determined. There are presented research results of filtration efficiency and thoroughness characteristics and flow drag characteristics of filtration paper as a function of dust absorptiveness coefficient  $k_m$ . There was proved the impact of dust fractional composition on filtration paper absorptiveness change. Designed test stand to investigations of characteristics of paper filters is described. Results of preliminary researches are also presented. The scheme of the two-stage air filter, filtration efficiency and flow drag characteristics, the functional stand schema, the dust fractional composition in air after a cyclone, filtration efficiency and flow drag, characteristics of filtration paper, dust grain number in purified air, flow drag characteristics of filtration paper for different values of filtration velocity in the cyclone and without the cyclone are illustrated in the paper.

**Keywords:** two-stage filter, filter characteristics, filtration paper, dust absorptiveness coefficient

## BADANIE PROCESU FILTRACJI POWIETRZA NA PRZEGRODZIE PAPIEROWEJ W SYSTEMIE "CYKLON - PRZEGRODA POROWATA"

### Streszczenie

Omówiono warunki pracy dwustopniowego systemu filtracji powietrza wlotowego silnika. Przedstawiono właściwości materiałów filtracyjnych stosowanych na przegrody porowate filtrów powietrza pojazdów. Przedstawiono metodykę badań charakterystyk papierów filtracyjnych do filtru dwustopniowego. Zaprojektowano stanowisko do badań takich charakterystyk papierów filtracyjnych. Podstawowym elementem stanowiska jest pojedynczy cyklon i szeregowo ustawiony, odpowiednio dobrany wkład papierowy. Oceniono dokładność filtracji powietrza za pomocą licznika cząstek firmy Pamas. Określono skład frakcyjny pyłu w powietrzu oczyszczonym za cyklonem. Przedstawiono wyniki badań charakterystyk skuteczności i dokładności filtracji oraz oporów przepływu papieru filtracyjnego w funkcji współczynnika chłonności pyłu  $k_m$ . Wykazano wpływ składu frakcyjnego pyłu na zmiany chłonności papieru filtracyjnego. Przedstawiono wyniki badań rozpoznawczych. Schemat dwustopniowego filtru powietrza, charakterystyki skuteczności filtracji i oporu przepływu filtru, schemat stanowiska do badań papierów filtracyjnych, skład frakcyjny pyłu w powietrzu, charakterystyka skuteczności oporu przepływu i dokładności filtracji papieru filtracyjnego, liczba ziaren pyłu w powietrzu oczyszczonym, charakterystyka oporu przepływu wkładów z papieru filtracyjnego są zilustrowane w artykule.

**Słowa kluczowe:** filtr dwustopniowy, charakterystyki filtru, papier filtracyjny, współczynnik chłonności pyłu

### 1. Wstęp

Zapewnienie odpowiedniej czystości powietrza wlotowego do silników pojazdów specjalnych, a w tym wojskowych (czołgi, bwp, działa samobieżne), które eksploatowane są w warunkach

dużego (ponad  $1 \text{ g/m}^3$ ) zapylenia powietrza, pozostaje nadal ważnym problemem eksploatacyjnym i konstrukcyjnym.

Projektowanie filtru powietrza to przede wszystkim problem doboru takiej powierzchni papieru filtracyjnego  $F_C$ , aby przy maksymalnym zapotrzebowaniu powietrza przez silnik  $Q_{Silmax}$ , prędkość przepływu powietrza przez papier filtracyjny nie przekroczyła dopuszczalnej prędkości filtracji  $v_{F dop} = 0,03 - 0,06 \text{ m/s}$  [1, 8, 11]. Przebieg pojazdu do chwili wykonania obsługi (wymiany wkładu filtracyjnego) przy określonym, z warunku spadku mocy, oporze dopuszczalnym  $\Delta p_{dop}$  jest wynikiem warunków eksploatacji (masy pyłu zassanego wraz z powietrzem) i chłonności jednostkowej  $k_m$  zastosowanego papieru filtracyjnego.

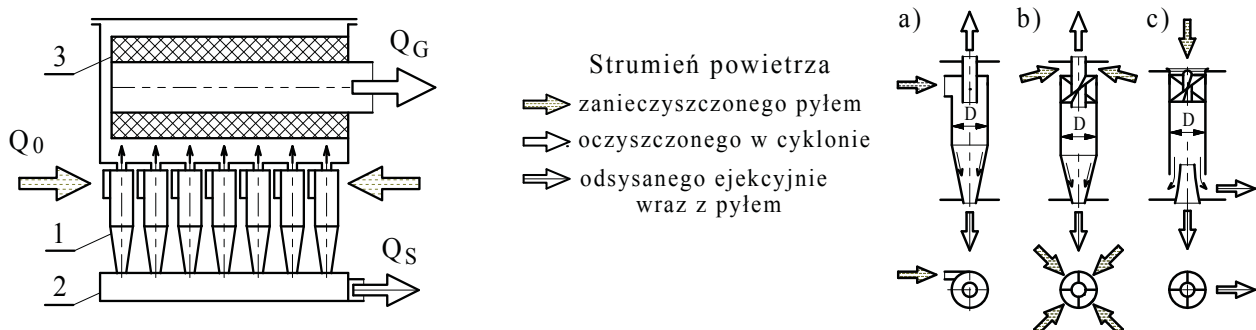
Chłonność jednostkowa papierów filtracyjnych dla pyłów o standardowym składzie frakcyjnym ( $d_z < 80 \mu\text{m}$ ), jaki trafia wraz z powietrzem na wkład filtru jednostopniowego jest znana i wynosi  $k_m = 190 \div 220 \text{ g/m}^2$  [4, 8, 14]. W filtrze dwustopniowym na wkład filtracyjny dostaje się pył o znacznie mniejszych rozmiarach ziaren (do  $d_z = 15 \div 25 \mu\text{m}$ ), którego skład frakcyjny został zmieniony w multicyklonie [1, 6, 7, 9]. Z badań eksperymentalnych przegród filtracyjnych wynika, że wraz ze zmniejszaniem się rozmiaru ziaren pyłu trafiającego na papier filtracyjny jego jednostkowa chłonność obniża się gwałtownie, co uwidacznia się gwałtownym wzrostem oporów przepływu warstwy filtracyjnej [1, 12]. Zmniejsza się więc czas pracy całego filtru powietrza oraz przebieg pojazdu do chwili osiągnięcia wartości  $\Delta p_{fdop}$ .

W dostępnej literaturze brak jest danych chłonności papierów filtracyjnych dla pyłów o składzie frakcyjnym innym niż standardowy. Znajomość tych charakterystyk jest niezbędna do właściwego doboru papieru filtracyjnego na II stopień filtracji powietrza. Dlatego też wskazane jest prowadzenie takich badań.

## 2. Filtracja powietrza w filtrze dwustopniowym

Do filtracji powietrza wlotowego silników pojazdów specjalnych eksploatowanych w warunkach dużego (ponad  $1 \text{ g/m}^3$ ) stężenia zapylenia powietrza stosuje się dwustopniowe filtry powietrza, pracujące w systemie odpylac bezwładnościowy (najczęściej multicyklon) i ustawiona szeregowo za nim przegroda porowata najczęściej w postaci cylindrycznego wkładu lub kilku wkładów ustawionych względem siebie równoległe – rys. 1.

Na przegrody porowate filtrów powietrza wlotowego współczesnych silników pojazdów mechanicznych, stosuje się głównie papier filtracyjny ukształtowany w plisy oraz włókniny o zmiennej gęstości upakowania, a także złoża z nanowłókien. Spotyka się jeszcze przegrody filtracyjne wykonane jako nieregularne złoża ze sprasowanego drutu metalowego lub tworzywa sztucznego nawilżonego olejem.



Rys. 1. Schemat dwustopniowego filtru powietrza: 1 – multicyklon (pierwszy stopień filtracji), 2 – osadnik pyłu 3 – przegroda porowata (drugi stopień filtracji); a – cyklon zwrotny z wlotem stycznym, b – z wlotem osiowym c – cyklon przelotowy

Fig. 1. The scheme of the two-stage air filter: 1 – multicyclone (first stage filtration), 2 – dust settler, 3 – porous barrier (second stage filtration), a – returnable cyclone with tangential inlet, b – with axial inlet, c – passage cyclone

Do silnika pojazdu gaśnicowego T-72 eksploatowanego ze średnią prędkością  $v=20$  km/h po drogach poligonowych o stężeniu zapylenia  $s=1\text{g/m}^3$  dostaje się wraz z powietrzem w ciągu 1000 km przebiegu ponad 170 kg pyłu, z czego multicyklon o skuteczności  $\varphi_m = 96\%$  zatrzymuje 163,2 kg pyłu. Jeżeli II-gim stopniem filtracji jest przegroda z papieru o skuteczności  $\varphi_p = 99,5\%$ , to zatrzymuje ona kolejne 6,76 kg pyłu. Zaprojektowanie filtra powietrza, a w tym przegrody porowatej do zatrzymania takiej masy pyłu jest dużym problemem, szczególnie gdy dotyczy to pojazdu wojskowego, w którym miejsce na filtr powietrza jest ograniczone.

Zatrzymany w cyklonach multicyklonu pył gromadzi się w wspólnym osadniku 1 - rys. 1. Magazynowanie w osadniku tak dużej masy pyłu nie jest wskazane ze względu na brak miejsca jak i niepotrzebne obciążanie konstrukcji filtra, a przede wszystkim ze względu na występowanie powtórnego zassania pyłu podczas wstrząsów pojazdu. Z tego względu w pojazdach specjalnych, w tym wojskowych pojazdach gaśnicowych, eksploatowanych w warunkach dużego zapylenia powietrza pył z osadnika filtra powietrza usuwa się na bieżąco (poprzez jego eiekcyjne odsysanie) dodatkowym strumieniem powietrza  $Q_s$  będącego częścią strumienia wlotowego do filtra.

Multicyklon jest zespołem kilkudziesięciu, a nawet kilkuset cyklonów zwrotnych z wlotem stycznym lub osiowym jak i cyklonów przelotowych (rys. 1a, b, c) o średnicach  $D$  nieprzekraczających 40 mm, rozmieszczonych równolegle obok siebie, końcami zamocowanych w płytach prostokątnych lub kołowych, charakteryzujący się:

- zdolnością odseparowania z dużych (np.: czołg T-72 – ponad 3400 m<sup>3</sup>/h) strumieni powietrza znacznej masy pyłu,
- stałym w eksploatacji oraz małym (2-3 kPa) oporem przepływu,
- skutecznością do 96% [1, 3, 5, 7],
- dokładnością zatrzymywania ziaren powyżej 20 - 35 μm [1, 2, 6],
- bezobsługowością – samoczynne usuwanie pyłu z osadnika.

Właściwości filtra powietrza określają następujące powszechnie stosowane charakterystyki:

- **skuteczność filtracji** - iloraz masy pyłu  $m_{ZF}$  zatrzymanego przez filtr i masy  $m_{DF}$  dostarczonego do filtra:

$$\varphi = \frac{m_{ZF}}{m_{DF}}, \quad (1)$$

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

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

- **dokładność filtracji** - maksymalny  $d_{zmax}$  rozmiar ziarna pyłu w powietrzu za filtrem,
- **chłonność** - masa pyłu  $\Delta m$  zatrzymanego do chwili osiągnięcia przez filtr określonej wartości oporu przepływu, najczęściej wartości oporu dopuszczalnego  $\Delta p_{fdop}$ .

Od filtrów powietrza wlotowego silników wymaga się:

- wysokiej (99,9%) skuteczności filtracji,
- dużej (powyżej 5 μm) dokładności filtracji,
- długich okresów międzyobsługowych,
- małych przyrostów oporów przepływu w czasie,
- dopuszczalnego oporu przepływu nie przekraczającego więcej niż 6-7 kPa, a tylko wyjątkowo w wozach bojowych 12kPa.

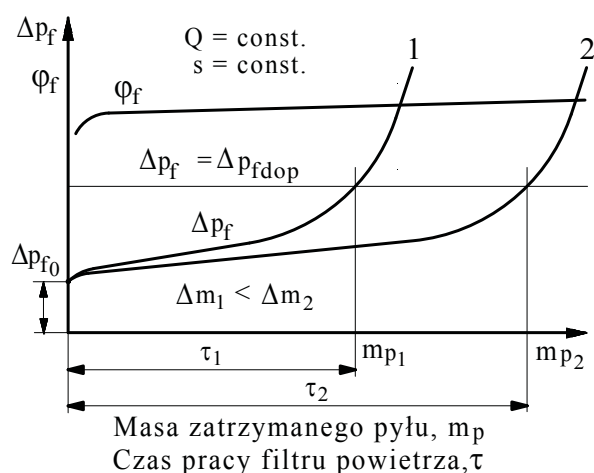
Wymagania te są przeciwstawne, a więc trudne do spełnienia.

Filtracja w filtrze dwustopniowym (multicyklon-przegroda) obejmuje:

- zasysanie powietrza zanieczyszczonego pyłem o rozmiarach ziaren do 100μm,
- zatrzymywanie w cyklonach ziaren pyłu powyżej 15 - 30μm oraz ich magazynowanie w osadniku,
- usuwanie pyłu z osadnika,
- napływ na przegrodę porowatą ziaren pyłu poniżej 15 - 25μm,

- zatrzymywanie na przegrodzie porowatej ziaren pyłu (powyżej  $5\mu\text{m}$ ), co powoduje wzrost oporu przepływu  $\Delta p$  aż do osiągnięcia oporu dopuszczalnego  $\Delta p_{fdop}$  będącego kryterium zakończenia eksploatacji filtra powietrza.

Czas pracy filtra do uzyskania  $\Delta p_{dop}$ , którego wartość określana jest przez konstruktora i wynika z 3% spadku mocy silnika, zależy nie tylko od warunków eksploatacji (zapylenia powietrza), ale i od chłonności  $\Delta m$  przegrody filtracyjnej oraz od składu granulometrycznego pyłu, który na nią napływa – rys. 2. Czas pracy  $\tau$  filtra powietrza można określić podczas badań eksploatacyjnych lub laboratoryjnych. Są to jednak przedsięwzięcia kosztowne i pracochłonne, szczególnie w stosunku do filtrów dwustopniowych.



Rys. 2. Charakterystyki skuteczności filtracji  $\varphi_f = f(m_p)$  i oporu przepływu  $\Delta p_f = f(m_p)$  filtra dla różnej chłonności  $\Delta m$  przegrody porowatej

Fig. 2. Filtration efficiency  $\varphi_f = f(m_p)$  and flow drag  $\Delta p_f = f(m_p)$  characteristics for different absorbing capacity  $\Delta m$  of porous barrier

Z danych literaturowych wynika, że czas pracy  $\tau$  dwustopniowego filtra powietrza można określić z zależności empirycznej [1, 10].

$$\tau_p = \frac{F_C \cdot k_m \cdot k_C}{Q_{\max} \cdot s \cdot (1 - \varphi_M) \cdot \varphi_p}, \quad (3)$$

gdzie:

$F_C$  - powierzchnia papieru filtracyjnego II-go stopnia filtracji,

$k_m$  - współczynnik chłonności papieru filtracyjnego dla przyjętej wartości  $\Delta p_{dop}$ ,

$k_C$  - współczynnik uwzględniający różnicę między parametrami zanieczyszczeń testowych a rzeczywistych,

$Q_{\max}$  - nominalne zapotrzebowanie powietrza przez silnik,  $s$  – stężenie zapylenia powietrza zasysanego do filtra,

$\varphi_M$  - skuteczność pierwszego stopnia filtracji (multicyklonu),  $\varphi_p$  – skuteczność wkładu filtracyjnego.

Problemem poprawności stosowania tego wzoru jest znajomość wartości współczynnika chłonności pyłu  $k_m$  papieru pracującego w systemie "multicyklon - przegroda porowata", zdefiniowanego zależnością:

$$k_m = \frac{m_{CW}}{F_W} \text{ g/m}^2, \quad (4)$$

gdzie:

$m_{CW}$  - masa zatrzymanego pyłu przez wkład filtracyjny dla przyjętej wartości oporu dopuszczalnego  $\Delta p_{dop}$ ,

$F_W$  - powierzchnia czynna papieru filtracyjnego.

Papiery filtracyjne produkowane są w wielu gatunkach przez wyspecjalizowane firmy. Producenci papierów filtracyjnych podają tylko dane opisujące ich strukturę jak na przykład: grubość, wymiary porów, gramatura, wytrzymałość mechaniczna, opór przepływu (przepuszczalność), gęstość. Brak jest danych określających właściwości filtracyjne produkowanych papierów. Dlatego relacje między strukturą papieru filtracyjnego i jego charakterystykami filtracyjnymi są ustalane eksperymentalnie. Dla potrzeb poprawnego projektowania filtru dwustopniowego współczynnik chłonności  $k_m$  należy określić doświadczalnie, co wymaga opracowania odpowiedniej metodyki.

### 3. Metodyka badań papierów filtracyjnych

Wyznaczenie współczynnika chłonności pyłu  $k_m$  wymaga określenia masy pyłu  $m_{CW}$  zatrzymanego na powierzchni  $1 \text{ m}^2$  papieru filtracyjnego dla przyjętej wartości oporu dopuszczalnego  $\Delta p_{dop}$ . Opracowana metodyka i zbudowano stanowisko (rys 3) umożliwiające wyznaczenie współczynnika  $k_m$  oraz podstawowych charakterystyk wycinka papieru filtracyjnego przewidywanego do zastosowania na II-gi stopień filtru powietrza pracującego w systemie „multicyklon – wkład papierowy”. Głównym elementem stanowiska jest segment filtracyjny składający się z pojedynczego cyklonu będącym elementem multicyklonu projektowanego filtru powietrza i szeregowo ustawionego za nim wkładu filtracyjnego o cylindrycznym kształcie, wykonanego z badanego papieru filtracyjnego.

Powierzchnię papieru  $F_W$  badanego wkładu należy dobrać tak, aby dla maksymalnej wartości strumienia powietrza wypływającego z pojedynczego cyklonu  $Q_{Gmax}$ , a wynikającego z maksymalnego zapotrzebowania powietrza  $Q_{Silmax}$  przez silnik, dla którego projektowany jest filtr, spełniony był warunek dopuszczalnej (maksymalnej) prędkości filtracji  $u_{Fdop} \leq 0,06 \text{ m/s}$ .

Zatrzymany przez cyklon pył osiada w osadniku skąd usuwany jest efektywnie strumieniem odsysania  $Q_S$  o stanowiącego 20% strumienia wylotowego z cyklonu  $Q_G$ .

Stanowisko wyposażono w licznik cząstek umożliwiającą rejestrację liczby i rozmiarów ziaren pyłu w strumieniu powietrza za cyklonem lub badawczym wkładem filtracyjnym w zakresie  $0,7 - 100 \text{ }\mu\text{m}$  w  $i = 32$  przedziałach pomiarowych, będących zakresami ograniczonymi średnicami ( $d_{zimin} - d_{zimax}$ ).

Charakterystyki badanego papieru filtracyjnego należy określać metodą wagową w kolejnych cyklach pomiarowych o określonym czasie trwania (czas równomiernego dozowania pyłu testowego) stosując stężenie zapylenia powietrza na wlocie do cyklonu (w zakresie do  $s = 3 \text{ g/m}^3$ ) oraz pył testowy PTC-D.

### 4. Badania eksperymentalne

Celem badań było zweryfikowanie zaproponowanej metody badań papierowej przegrody filtracyjnej – II-go stopnia filtracji w systemie „cyklon-przegroda porowata”.

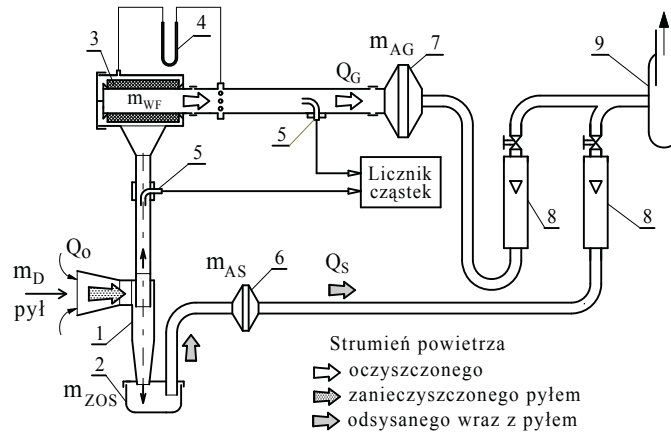
Przedmiotem badań były wkłady filtracyjne wykonane z dwóch różniących się parametrami struktury papierów filtracyjnych firmy J.C. BINZER o symbolach 796/1 VH 186 (Nr1) i 844 VH 86/4 (Nr2) - tabela 1. Zakres badań obejmował badania wstępne i zasadnicze.

#### Badania wstępne:

- 1) Określenie charakterystyk składu frakcyjnego pyłu w powietrzu wlotowym i wylotowym z cyklonu  $Up = f(d_z)$  jako udział liczby  $N_i$  ziaren pyłu z przedziału średnic ( $d_{zimin} \div d_{zimax}$ ) do całkowitej liczby ziaren  $N$ .

$$Up_i = \frac{N_i}{N} 100\% . \quad (5)$$

Badania wykonano dla dwóch wartości strumienia powietrza:  $Q_{Gmin} = 22 \text{ m}^3/\text{h}$  i  $Q_{Gmax} = 34 \text{ m}^3/\text{h}$  wynikających z zapotrzebowania powietrza przez silnik czołgu T-72 w zakresie eksploatacyjnej prędkości obrotowej 1600 - 2000 obr/min i liczby cyklonów w multicyklonie.



Rys. 3. Schemat funkcjonalny stanowiska do badań papierów filtracyjnych w systemie „cyklon – przegroda porowata”: 1 – cyklon, 2 – osadnik pyłu, 3 – filtracyjny wkład papierowy, 4 – manometr wodny typu U-rurka  
5 – sonda pyłowa licznika cząstek, 6, 7 – filtry absolutne, 8 – rotametry, 9 – wentylator ssawny

Fig. 3. The scheme of the stand to test filter papers operating in “cyclone – porous barrier” system: 1 – cyclone, 2 – dust settler, 3 – filtration paper pack, 4 – manometer, 5 – dust probe of a particles counter, 6, 7 – absolute filters, 8 – rotameters, 9 – suction fan

### Badania zasadnicze:

- określenie dla dwóch prędkości filtracji ( $v_{Fmin} = 0,035$  m/s i  $v_{Fmax} = 0,06$  m/s) charakterystyk wkładu filtracyjnego (II-gi stopień filtracji powietrza), na który trafia pył PTC-D o składzie frakcyjnym zmienionym w cyklonie:
  - skuteczności filtracji  $\varphi_w = f(k_m)$ ,
  - dokładności filtracji  $d_{zmax} = f(k_m)$ ,
  - oporów przepływu  $\Delta p_w = f(k_m)$ .
- Określenie charakterystyk papieru filtracyjnego Nr1 (I-szy stopień filtracji powietrza), na który dozowany jest pył PTC-D o składzie standardowym.

Tabela 1. Parametry badanych papierów filtracyjnych firmy J.C. BINZER Papierfabrik  
Table 1. Parameters of tested filtration papers from the J.C. BINZER Papierfabrik

Lp.	Parametry	Jednostki	Oznaczenie papieru	
			796/1 VH 186 (Nr 1)	844 VH 86/4 (Nr 2)
1	Gramatura	g/m <sup>2</sup>	204	108
2	Grubość - obciążenie 2 N/cm <sup>2</sup>	mm	0,9	0,67
3	Opór przepływu przy 400 cm <sup>3</sup> /s, A = 10 cm <sup>2</sup>	mbar	6,7	1,04
4	Wytrzymałość na rozrywanie	kPa	385	212
6	Zawartość żywicy	%	18,8	17
8	Wartość średnia średnicy por	μm	42	76

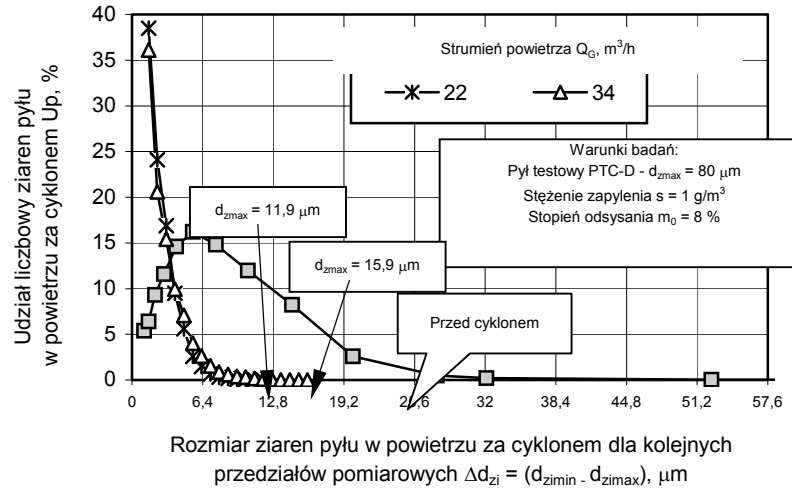
### Warunki badań:

- strumień powietrza  $Q_G = 22$  m<sup>3</sup>/h,  $Q_G = 34$  m<sup>3</sup>/h,
- stopień efektywnego odsysania pyłu z osadnika cyklonu  $m_0 = 8\%$ ,
- stężenie zapylenia powietrza na wlocie do cyklonu  $s = 1$  g/m<sup>3</sup>,
- pył testowy PTC-D,
- zakres mierzonych rozmiarów ziaren pyłu  $d_z = 0,7 - 100$  μm,
- liczba przedziałów pomiarowych - 32,
- wartość zakresu przedziału średnic ( $d_{zimin} - d_{zimax}$ ) – 0,8 μm.

### 4. Analiza wyników badań

Skład frakcyjny pyłu  $U_p = f(d_z)$  w powietrzu za cyklonem D-40 dla różnych wartości strumienia  $Q_G$  oraz w powietrzu wlotowym do cyklonu pokazano na rys. 4.

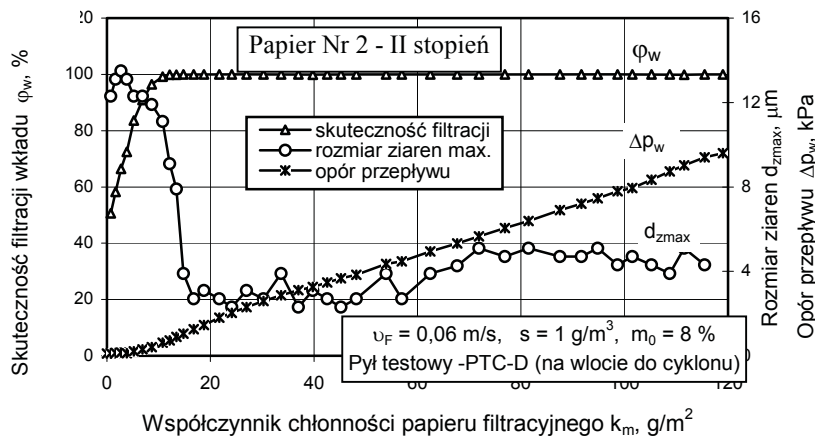
Dla stałej wartości strumienia  $Q_G$  oraz stopnia odsysania  $m_0$  obserwuje się wraz ze wzrostem rozmiarów ziaren pyłu systematyczny spadek liczby ziaren pyłu w powietrzu za cyklonem, a tym samym ich udział liczbowy  $Up$  są coraz mniejsze aż do osiągnięcia wartości minimalnej (rys 4), która określa udział pojedynczego ziarna pyłu o maksymalnym rozmiarze  $d_{zmax}$  w ogólnej liczbie ziaren pyłu  $N$ . Dla strumienia powietrza  $Q_G = 22 \text{ m}^3/\text{h}$  oraz  $Q_G = 34 \text{ m}^3/\text{h}$  rozmiar maksymalnego ziarna ma odpowiednio wartość  $d_{zmax} = 11,9 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $d_{zmax} = 15,9 \text{ }\mu\text{m}$ . Na papier filtracyjny dostają się więc ziarna pyłu poniżej tych rozmiarów.



Rys. 4. Skład frakcyjny pyłu  $Up = f(d_z)$  w powietrzu za cyklonem D-40 dla różnych wartości strumienia  $Q_G$  oraz w powietrzu wlotowym do cyklonu

Fig. 4. The dust fractional composition  $Up = f(d_z)$  in air after a cyclone D-40 for different values of air flow  $Q_G$  and in the inlet air of cyclone

Wraz ze wzrostem masy zatrzymanego przez wkład filtracyjny pyłu (współczynnika chłonności pyłu  $k_m$ ) skuteczność filtracji  $\phi_w$  oraz opór przepływu  $\Delta p_w$  papierów pracujących w systemie „cyklon-przegroda porowata” cały czas systematycznie rosną, przy czym w początkowym okresie filtracji wzrost skuteczności jest gwałtowny, co ma niewątpliwie związek ze zmniejszaniem się rozmiarów ziaren maksymalnych od  $d_{zmax} = 13,8 \mu\text{m}$  do  $d_{zmax} = 5 \mu\text{m}$ . Wtedy skuteczność filtracji papieru stabilizuje się na poziomie  $\phi_w = 99,5 - 99,9 \%$  - rys. 5.

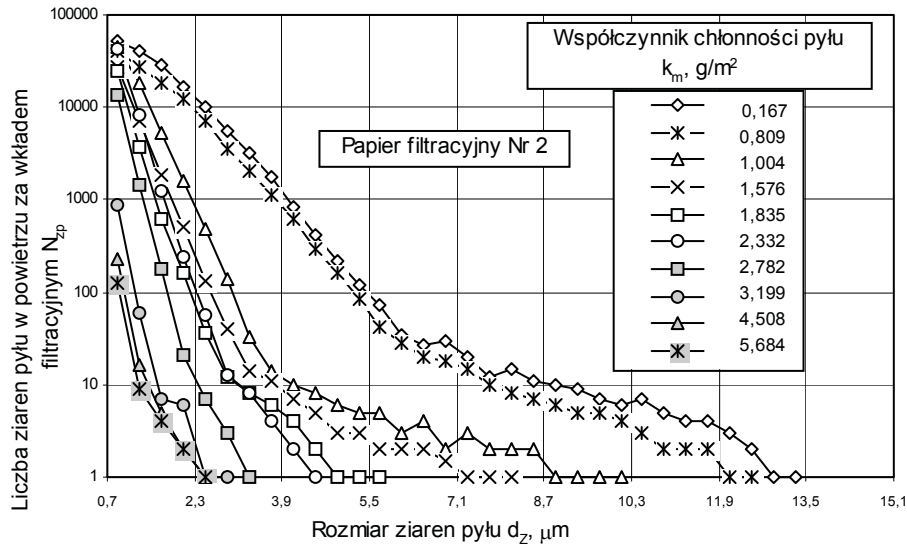


Rys. 5. Charakterystyka skuteczności filtracji  $\phi_w = f(k_m)$ , oporu przepływu  $\Delta p_w = f(k_m)$  i dokładności filtracji  $d_{zmax} = f(k_m)$  papieru filtracyjnego Nr 2 w funkcji współczynnika chłonności pyłu  $k_m$ .

Fig. 5. Filtration efficiency  $\phi_w = f(k_m)$  and flow drag  $\Delta p_w = f(k_m)$  and filtration thoroughness  $d_{zmax} = f(k_m)$  characteristics of filtration paper Nr 2 as a function of dust absorptiveness coefficient  $k_m$

Dla stałej wartości strumienia  $Q_G$  w powietrzu przefiltrowanym liczba ziaren pyłu  $N_i$  maleje wraz ze wzrostem ich rozmiarów  $d_z$  aż do osiągnięcia liczby  $N_{min} = 1$ . Jest to ziarno pyłu o największym rozmiarze  $d_z = d_{zmax}$  i charakteryzuje dokładność filtracji papieru.

Wraz ze wzrostem zatrzymanej przez papier masy pyłu w powietrzu przefiltrowanym maleje liczba ziaren (rys. 6) oraz rozmiar maksymalnego ziarna  $d_{zmax}$ , co świadczy o wzroście dokładności filtracji. Stabilizacja dokładności filtracji na poziomie 2,3 – 5,1  $\mu\text{m}$  następuje po osiągnięciu przez papier współczynnika chłonności  $k_m = 5,684\text{g/m}^3$  i ma ścisły związek z stabilizacją skuteczności filtracji.



Rys. 6. Liczba ziaren pyłu w powietrzu oczyszczonym (za wkładem filtracyjnym Nr 2) w funkcji rozmiaru ziaren pyłu dla różnych wartości współczynnika chłonności  $k_m$

Fig. 6. Dust grain number in purified air (after filter pack Nr 2) as a function grain dust size for different values of dust absorptiveness coefficient  $k_m$

Niska skuteczność papieru filtracyjnego ( $\varphi = 55\%$ ) oraz obecność dużych ziaren pyłu (do  $d_z = 14\ \mu\text{m}$ ) w powietrzu oczyszczonym w początkowym okresie pracy ma miejsce po wymianie zanieczyszczonego wkładu filtracyjnego na nowy może mieć wpływ na przyspieszone zużycie głównie skojarzenia T-P-C. Największą skuteczność filtracji na poziomie  $\varphi = 99,9\%$  oraz dużą dokładność osiąga filtr w końcowym okresie pracy - przed wymianą wkładu.

Zmiana prędkości filtracji na mniejszą (z  $v_{Fmax} = 0,06\ \text{m/s}$  na  $v_{Fmin} = 0,035\ \text{m/s}$ ) przy zachowaniu pozostałych warunków badań, nie powoduje zasadniczych zmian charakterystyk skuteczności  $\varphi_w = f(k_m)$  i dokładności filtracji  $d_{zmax} = f(k_m)$ , natomiast występuje mniejsza intensywność wzrostu oporu przepływu  $\Delta p_w = f(k_m)$  będąca głównie efektem mniejszej masy pyłu dozowanej na wkład filtracyjny – rys. 7.

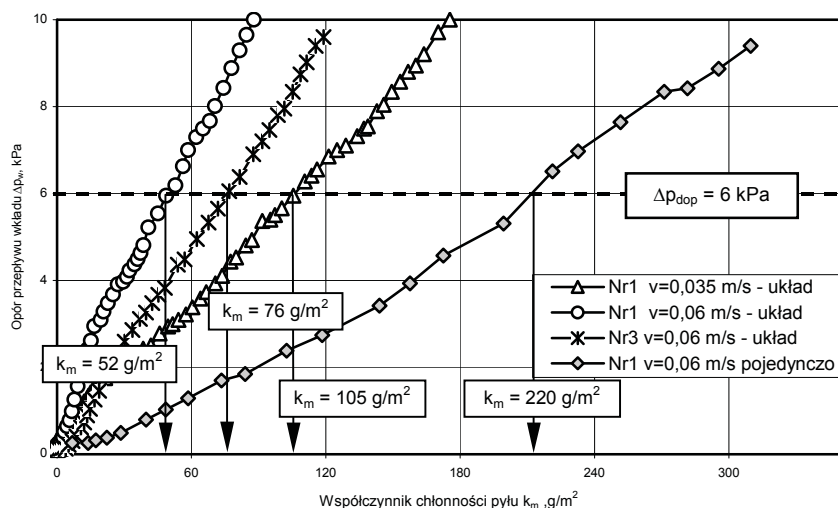
Dla papieru filtracyjnego Nr 1 charakteryzującego się innymi wartościami parametrów struktury niż papier Nr 2 zasadniczej zmianie ulega przebieg charakterystyk oporów przepływu. Dla tej samej wartości prędkości filtracji ( $v_{Fmax} = 0,06\ \text{m/s}$ ) opór przepływu wkładu przyjmuje wartości tym większe im średnice porów papieru są mniejsze - rys. 7.

W przypadku gdy na wkład filtracyjny wykonany z tego samego papieru Nr 2 dozowany jest pył PTC-D o składzie standardowym ( $d_z < 80\ \mu\text{m}$ ) zasadniczej zmianie ulega przede wszystkim przebieg charakterystyki oporów przepływu  $\Delta p_w = f(k_m)$ . Obserwuje się znacznie mniejszą intensywność wzrostu oporu przepływu papieru zanieczyszczanego pyłem standardowym niż pyłem, którego skład granulometryczny został zmieniony w cyklonie.

Dla tej samej wartości oporu dopuszczalnego  $\Delta p_{dop} = 6\ \text{kPa}$  papier filtracyjny, na który dozowany był pył, którego skład frakcyjny został zmieniony w cyklonie (rozmiary ziaren nie przekraczają  $d_z = 17\ \mu\text{m}$ ) osiąga współczynnik chłonności czterokrotnie mniejszy niż papier, na



który dozowany był bezpośrednio pył o składzie standardowym. Dla papieru Nr 1 w chwili osiągnięcia  $\Delta p_{dop} = 6$  kPa współczynniki chłonności mają odpowiednio wartości  $k_m = 52$  g/m<sup>2</sup> i  $k_m = 220$  g/m<sup>2</sup>. W rzeczywistości czas pracy filtru dwustopniowego, którego wkład filtracyjny został zaprojektowany na podstawie znajomości wartości współczynnika chłonności  $k_m$  standardowych papierów filtracyjnych, co praktycznie jest stosowane, będzie czterokrotnie krótszy.



Rys. 7. Charakterystyka oporu przepływu  $\Delta p_w = f(k_m)$  wkładów z papieru filtracyjnego Nr1 i Nr2 dla różnych prędkości filtracji w systemie: cyklon-wkład i bez cyklonu

Fig. 7. Flow drag  $\Delta p_w = f(k_m)$  characteristics of filtration paper packs Nr1 i Nr2 for different values of filtration velocity in cyclone – pack system and without a cyclone

Wyniki badań eksperymentalnych oporu przepływu  $\Delta p_w$  aproksymowano liniowymi równaniami regresji metodą najmniejszych kwadratów za pomocą oprogramowania komputera. Uzyskano bardzo dobrą zgodność opisu wyników taką funkcją, o czym świadczy wartość współczynnika regresji  $R^2$  – tabela 2.

Tab. 2. Równania regresji oporu przepływu  $\Delta p_w$  wkładów filtracyjnych w układzie „cyklon – przegroda porowata”  
Tab. 2. Regression equations of flow drag  $\Delta p_w$  filtration packs in “cyclone – porous barrier” system

Lp.	Warunki badań	Postać równania	R <sup>2</sup>
1	papier Nr 1 $v_F = 0,035$ m/s	$\Delta p_w = 0,0529 k_m + 0,3894$	0,9974
2	papier Nr 1 $v_F = 0,06$ m/s	$\Delta p_w = 0,1048 k_m + 0,7699$	0,9923
3	papier Nr 2 $v_F = 0,06$ m/s	$\Delta p_w = 0,795 k_m + 0,0237$	0,9983

Liniowy związek między oporem przepływu  $\Delta p_w$  papieru filtracyjnego a współczynnikiem chłonności  $k_m$  ułatwia znacznie metodę wyznaczania wartości  $k_m$  papierów filtracyjnych przewidywanych do pracy w systemie „multicyklon-przegroda porowata”.

## 5. Podsumowanie

Opracowana i zweryfikowana metodyka badań właściwości materiałów filtracyjnych w zbliżonych do rzeczywistych warunków pracy II-go stopnia filtru (wkładu filtracyjnego), będąca

oryginalnym osiągnięciem autora umożliwia wyznaczenie współczynnika chłonności  $k_m$  oraz innych parametrów niezbędnych do właściwego zaprojektowania wkładu filtracyjnego filtra dwustopniowego.

Wyznaczenie współczynnika chłonności  $k_m$  papieru filtracyjnego na podstawie badań segmentu filtracyjnego zbudowanego z pojedynczego cyklonu i papierowego wkładu badawczego ułatwia znacznie proces projektowania filtra powietrza oraz obniża koszty. Niska ( $\varphi = 55 - 77\%$ ) skuteczność papieru filtracyjnego oraz obecność dużych (do  $d_z = 14\ \mu\text{m}$ ) 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 filtra powietrza występuje po wymianie zanieczyszczonego wkładu filtracyjnego na nowy.

Papiery filtracyjne w systemie „multicyklon-przegroda porowata” osiągają współczynnik chłonności czterokrotnie mniejszy niż te same papiery pracujące w jednostopniowym systemie filtracji, na co niewątpliwie ma wpływ skład granulometryczny pyłu. Ma to bezpośredni wpływ na czas pracy filtra do chwili osiągnięcia oporu dopuszczalnego, a tym samym na przebieg pojazdu.

Badania w zakresie określenia charakterystyk skuteczności  $\varphi_w = f(k_m)$ , dokładności filtracji  $d_{zmax} = f(k_m)$  oraz oporów przepływu  $\Delta p_w = f(k_m)$  powtórzono na drugim egzemplarzu wkładu filtracyjnego wykonanego z papieru Nr1 i Nr2. Powtarzalność otrzymanych wyników jest podstawą do stwierdzenia, że opracowana metodyka jest prawidłowa, a uzyskane wyniki wiarygodne.

## 6. Literatura

- [1] Baczewski, K., Hebda, M., *Filtracja płynów eksploatacyjnych*, MCNEMT, Radom 1991/1992.
- [2] *Cenrtisep Air Cleaner*, Materiały informacyjne firmy PALL Corporation, USA 2004.
- [3] *Diesel Engine Air Filtration*, Materiały informacyjne firmy PALL Corporation. USA, 2004.
- [4] Durst, M., Klein, G., Moser, N., *Filtration in Fahrzeugen*, Materiały informacyjne firmy Mann+Hummel GMBH. Ludwigsburg, Niemcy 2005.
- [5] Dzierżanowski, P., Kordziński, W., Otyś, J., Szczeciński, S., Wiatrek, R., *Napędy lotnicze. Turbinowe silniki śmigłowe i śmigłowcowe*, WKŁ, Warszawa 1985.
- [6] Dziubak, T., *Możliwości modyfikacji konstrukcji cyklonu zwrotnego z wlotem stycznym*, Biuletyn WAT, LV, 2 (642), 2006.
- [7] Dziubak, T., *Problemy filtracji powietrza w silnikach spalinowych pojazdów eksploatowanych w warunkach dużego zapylenia powietrza*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN, Z. 4 (124), 2000.
- [8] Erdmannsdörfer, H., *Trockenluftfilter für Fahrzeugmotoren-Auslegungs - und Leistungsdaten*, MTZ, 43, (1982), No 7/8 1982.
- [9] Jaroszczyk, T., *Problemy filtracji powietrza w silnikach spalinowych eksploatowanych w ciężkich warunkach*, Silniki Spalinowe, Nr 2, 1978.
- [10] Melzer, H., Brox, W., *Ansauggerauschdampfer und Luftfilter für BMW 524 td*, MTZ, 45 (1984), No 5 1984.
- [11] Schaeffer, J. W., Olson, L. M., *Air Filtration Media for Transportation Applications*, Filtration & Separation, Vol. 35, No 2, 1998.
- [12] Taufkirch, G., *Papierluftfilter in der Einsatzpraxis von Nutzfahrzeugen*, MTZ, 58, No 4, 1997.