



## Badania eksperymentalne papieru filtracyjnego do dwustopniowego filtra powietrza silnika pojazdu specjalnego

TADEUSZ DZIUBAK

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

**Streszczenie.** Omówiono warunki pracy dwustopniowego systemu filtracji powietrza wlotowego silnika. Przedstawiono właściwości materiałów filtracyjnych stosowanych na przegrody porowate filtrów powietrza pojazdów. Pokazano właściwości filtracyjne monocyklonów i multicyklonów. Omówiono zasady usuwania pyłu z osadnika multicyklonu. Przedstawiono metodykę badań papieru filtracyjnego pracującego w systemie cyklon–przegroda porowata. Określono skład frakcyjny pyłu w powietrzu przed i 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.

**Słowa kluczowe:** silniki spalinowe, dwustopniowy filtr powietrza, charakterystyki filtra, papier filtracyjny

**Symbole UKD:** 621.43

### 1. Wstęp

Zapewnienie odpowiedniej czystości powietrza wlotowego do silników pojazdów eksploatowanych w warunkach dużego (ponad  $1 \text{ g/m}^3$ ) zapylenia powietrza oraz długich przebiegów pojazdów limitowanych osiągnięciem oporu dopuszczalnego  $\Delta p_{\text{dop}}$  pozostaje nadal ważnym problemem eksploatacyjnym i konstrukcyjnym. Problem ten dotyczy głównie pojazdów specjalnych, a w tym wojskowych: czołgów, bojowych wozów piechoty, dział samobieżnych, samochodów ciężarowych i specjalnych.

Projektowanie filtra powietrza to przede wszystkim problem doboru takiej powierzchni papieru filtracyjnego  $F_C$ , aby przy maksymalnym zapotrzebowaniu

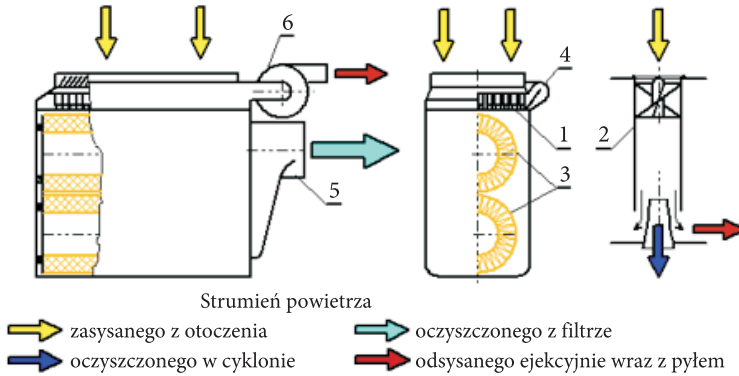
powietrza przez silnik  $Q_{Silmax}$ , prędkość przepływu powietrza przez papier filtracyjny nie przekroczyła dopuszczalnej prędkości filtracji  $v_{Fdop} = 0,03 \div 0,06$  m/s [1, 10, 17]. Przebieg pojazdu do chwili wykonania obsługiwanego (wymiany wkładu filtracyjnego) przy określonym, z warunku spadku 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  $k_m = 190 \div 220$  g/m<sup>2</sup> [4, 10]. W filtrze dwustopniowym pracującym w systemie „odpylacz bezwładnościowy–przegroda porowata” 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 lub monocyklonie [1, 8, 9, 13]. Z badań eksperymentalnych przegród filtracyjnych wynika, że wraz ze zmniejszaniem się rozmiaru ziaren pyłu trafiającego na papier filtracyjny jego jednostkowa chłonność obniża się, co uwidacznia się gwałtownym wzrostem oporów przepływu warstwy filtracyjnej [7, 12]. Zatem zmniejsza się czas pracy całego filtru powietrza oraz przebieg pojazdu do chwili osiągnięcia wartości  $\Delta p_{fdop}$ .

W dostępnej literaturze brakuje 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.

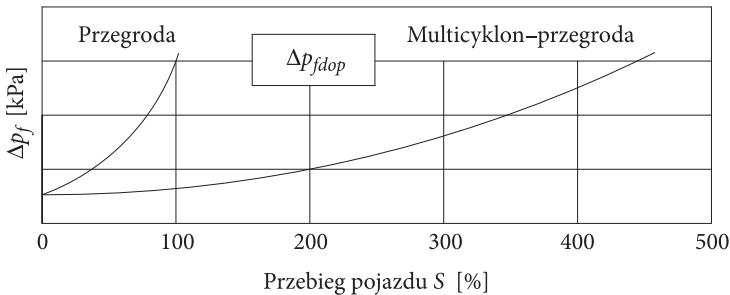
## 2. Filtracja powietrza w filtrze dwustopniowym

Pojazdy terenowe, w tym szczególnie wojskowe pojazdy mechaniczne, eksploatowane są po bezdrożach i na terenie piaszczystym, gdzie zapylenie powietrza jest szczególnie duże i często przekracza wartość 1 g/m<sup>3</sup>. Pojazdy te wyposażone są z reguły w silniki o ZS dużej mocy i dużym (na przykład czołg T-72 — 3300 m<sup>3</sup>/h) zapotrzebowaniu powietrza. Do silnika pojazdu gaśnicowego T-72 eksploatowanego ze średnią prędkością  $v = 20$  km/h po drogach poligonowych o stężeniu zapylenia  $s = 1$  g/m<sup>3</sup> dostaje się wraz z powietrzem w ciągu 1000 km przebiegu ponad 170 kg pyłu [7, 9]. Odseparowanie ze strumienia powietrza (z odpowiednio dużą skutecznością oraz dokładnością) tak znacznej masy jest poważnym problemem konstrukcyjnym i eksploatacyjnym. Z tego względu pojazdy eksploatowane w warunkach dużego stężenia zapylenia powietrza wyposaża się w filtry dwustopniowe, gdzie pierwszym stopniem oczyszczania jest odpylacz bezwładnościowy (multicyklon lub monocyklon), a drugim ustawiona szeregowo za nim przegroda porowata najczęściej w postaci cylindrycznego wkładu lub kilku wkładów ustawionych względem siebie równolegle (rys. 1).



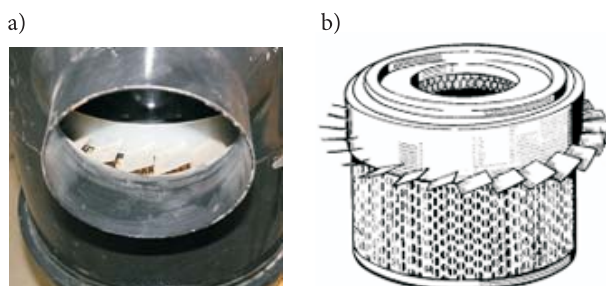
Rys. 1. Filtr powietrza czołgu Leopard 2: 1 — multicyklon; 2 — cyklon przelotowy; 3 — cylindryczne wkłady filtracyjne; 4 — osadnik pyłu; 5 — króciec wylotu czystego powietrza; 6 — wentylator układu odsysania pyłu

Sensowność stosowania filtrów dwustopniowych polega na wstępnym odseparowaniu w odpylaczu bezwładnościowym ziaren pyłu o większej masie i „pozostawieniu” w strumieniu powietrza ziaren pyłu o mniejszych rozmiarach i masie oraz odfiltrowaniu w przegrodowym (najczęściej z wkładem papierowym o odpowiednio dobranej powierzchni) filtrze powietrza mniejszych ziaren, co wydłuża (rys. 2) czas użytkowania systemu filtracji powietrza w silniku do osiągnięcia dopuszczalnej wartości oporu przepływu filtra powietrza  $\Delta p_{fdop}$ .



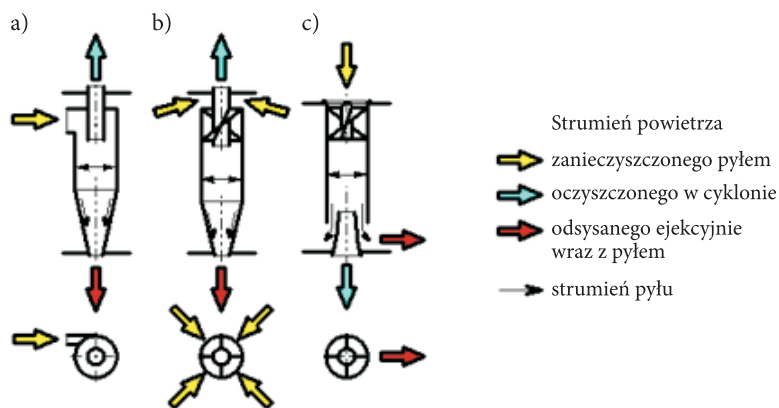
Rys. 2. Zmiana oporu przepływu jednostopniowego (przegrodowego) i dwustopniowego (multicyklon-przegroda) filtra powietrza w zależności od przebiegu pojazdu  $S$

Stosowany jako pierwszy stopień filtracji powietrza monocyklon (rys. 3) jest zespołem łopatek zamocowanych obwodowo wewnątrz obudowy filtra lub na zewnętrznej ścianie wkładu filtracyjnego (rys. 3). Ma on na celu zawrócenie strumienia powietrza wlotowego i nadanie siły bezwładności ziarnom pyłu, w wyniku czego następuje zmiana ich kierunku ruchu i wytrącenie z powietrza. Monocyklony charakteryzują się skutecznością odpylania  $\varphi = 50 \div 70\%$  i dokładnością  $d_z = 40 \div 50 \mu\text{m}$  [1].



Rys. 3. Monocyklon: a) zamocowany do obudowy filtra powietrza; b) stanowiący całość z wkładem filtracyjnym

Multicyklon jest to zespół kilku, kilkudziesięciu, a nawet kilkuset cyklonów o średnicach wewnętrznych nieprzekraczających  $D = 40$  mm, nazywanych też minicyklonami, rozmieszczonych obok siebie (połączenie równoległe) lub jeden za drugim (połączenie szeregowe). Łączenie cyklonów w multicyklon może być wykonane z cyklonów zwrotnych z wlotem stycznym i osiowym, jak i cyklonów przelotowych (rys. 4).



Rys. 4. Rodzaje cyklonów: a) zwrotny z wlotem stycznym; b) zwrotny z wlotem osiowym; c) przelotowy

Do filtracji powietrza wlotowego silników pojazdów eksploatowanych w warunkach dużego zapylenia powietrza znalazły zastosowanie multicyklony o połączeniu równoległym cyklonów, charakteryzujące się:

1. zdolnością odseparowania z dużych strumieni powietrza znacznej masy pyłu;
2. stałym w eksploatacji oraz małym ( $2 \div 3$  kPa) oporem przepływu;
3. skutecznością do 96% [1, 3, 5, 7];

4. dokładnością zatrzymywania ziaren powyżej  $15 \div 35 \mu\text{m}$  [1, 2, 6, 7, 13];
5. bezobsługowością — samoczynne usuwanie pyłu z osadnika.

Zasada oczyszczenia strumienia powietrza w cyklonie polega na wprowadzeniu go w ruch wirowy (obrotowy) powodujący (przy rozpatrywaniu ruchu ziarna w płaszczyźnie poziomej — prostopadłej do osi głównej cyklonu) powstawanie siły odśrodkowej  $F_d$  i siły aerodynamicznej  $F_R$  działającej na ziarno pyłu o masie  $m_p$ . Ziarna pyłu poruszają się po torze, którego kształt zależał będzie od wzajemnej relacji wartości obu sił. Zgodnie z prawem Newtona odniesionym do składowej promieniowej ruchu  $u_R$ , przy oporach skierowanych do wnętrza (osi) cyklonu równanie ruchu ziarna przyjmie postać:

$$m_p \cdot \frac{du_R}{dt} = F_d - F_R. \quad (1)$$

Ziarna pyłu o średnicach większych od pewnego granicznego wymiaru  $d_{pg}$ , dla których  $F_d > F_R$ , będą poruszały się po linii spiralnej i zostaną odrzucone na ścianki cyklonu i spadną do osadnika, a więc zostaną odseparowane. Natomiast ziarna pyłu o średnicach mniejszych od wymiaru  $d_{pg}$ , dla których zachodzi warunek  $F_d < F_R$ , będą dostawały się do środka cyklonu wraz z powietrzem.

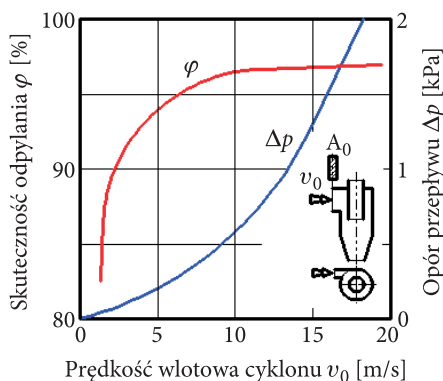
Ze zwiększaniem się wartości strumienia powietrza przepływającego przez cyklon, a tym samym (prędkości liniowej powietrza  $v$ ) rośnie siła odśrodkowa  $F_d$  działająca na ziarno pyłu, co powoduje wzrost skuteczności odpylania  $\varphi_C$ . Prędkość gazu w cyklonie reprezentowana jest najczęściej przez średnią prędkość w króćcu wlotowym  $v_0$ , która określana jest jako iloraz strumienia powietrza  $Q_0$  wpływającego do cyklonu i pola powierzchni  $A_0$  przekroju poprzecznego króćca wlotowego w jego najwęższym miejscu:

$$v_0 = \frac{Q_0}{A_0}. \quad (2)$$

Wyraźne zwiększenie skuteczności odpylania w cyklonie następuje tylko do pewnej granicy — około 10 m/s (rys. 5).

Dalszy wzrost prędkości powoduje szybki wzrost oporów przepływu  $\Delta p$ , będącego funkcją ( $\Delta p = f(v^2)$ ), nie wpływając niemal zupełnie na polepszenie skuteczności odpylania cyklonu  $\varphi$ , co wynika z szybszego wzrostu sił aerodynamicznych działających na ziarno w porównaniu z siłami bezwładności [1, 7, 14].

Istnieje więc pewien zakres prędkości wlotowej  $v_0$ , w granicach którego cyklon uzyskuje optymalne warunki pracy — zmiany skuteczności odpylania  $\varphi$  są stosunkowo niewielkie, a opór przepływu nie przekracza dopuszczalnych wartości. Zakres ten w starszych konstrukcjach cyklonów zawiera się w granicach 12 ÷ 20 m/s, a czasami dochodzi do 25 m/s [7]. W nowoczesnych rozwiązaniach konstrukcyjnych cyklonów prędkości wlotowe przyjmują wartości 8 ÷ 15 m/s [5, 14].



Rys. 5. Skuteczność odpylania gazu  $\varphi$  i opór przepływu  $\Delta p$  w funkcji prędkości  $v_0$  w króćcu wlotowym cyklonu

Odseparowany przez cyklony pył gromadzony jest w komorze osadnika multicyklonu (monocyklonu), skąd należy go systematycznie usuwać. Magazynowanie w osadniku dużej masy pyłu nie jest wskazane ze względu na konieczność stosowania osadnika o dużej pojemności, co zwiększa gabaryty filtru i utrudnia jego usytuowanie w pojeździe oraz występowanie powtórnego zassania pyłu (spadek skuteczności) podczas wstrząsów pojazdu i w przypadku zapełnienia osadnika pyłem, a także powoduje niepotrzebne obciążenie konstrukcji filtru dodatkową masą.

Usuwanie pyłu z komory osadnika może być realizowane:

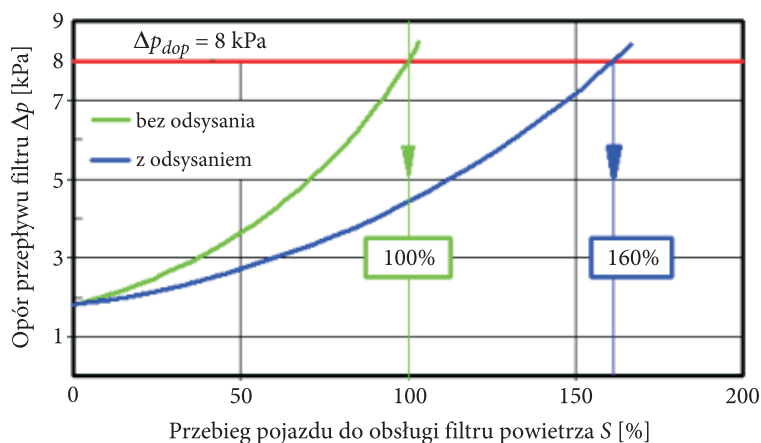
1. przez kierowcę przy każdorazowej obsłudze filtru powietrza;
2. samoczynnie poprzez gumowe stożki spustowe;
3. w sposób ciągły — usuwanie (poprzez odsysanie) strumieniem powietrza.

Miarą intensywności odsysania pyłu z osadnika multicyklonu (cyklonu) jest stopień odsysania  $m_0$  definiowany zwykle jako stosunek wielkości strumienia  $Q_S$  w układzie odsysania do wielkości strumienia wylotowego z multicyklonu (cyklonu), a w przypadku gdy multicyklon jest pierwszym stopniem oczyszczania powietrza w filtrze, do wielkości strumienia wylotowego z filtru powietrza  $Q_G$  — wlotowego do silnika [6, 7, 17]:

$$m_0 = \frac{Q_S}{Q_G} 100\%. \quad (3)$$

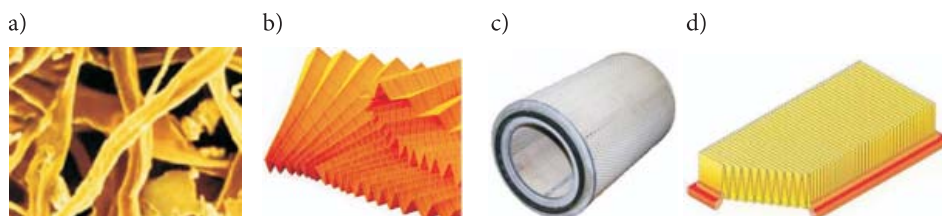
Odsysanie części powietrza (wraz z pyłem) z osadnika multicyklonu powoduje zauważalny wzrost skuteczności odpylania multicyklonu oraz wydłużenie czasu pracy filtru powietrza limitowanego ustaloną wartością oporu dopuszczalnego  $\Delta p_{\text{dop}}$  (rys. 6).

Na filtracyjne przegrody porowate filtrów powietrza wlotowego współczesnych silników pojazdów mechanicznych stosuje się głównie papiery filtracyjne, które produkowane są w wielu gatunkach przez wyspecjalizowane firmy. Papiery filtracyjne



Rys. 6. Zmiana oporu filtra powietrza z efektywnym usuwaniem pyłu i bez usuwania [15]

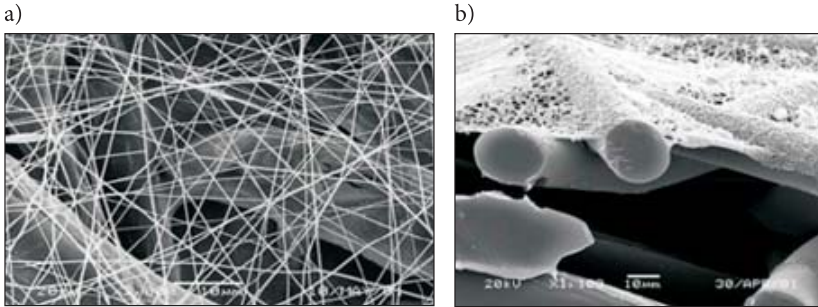
kształtuje się w formie plisowanej taśmy (rys. 7b), z której następnie wykonywany jest wkład filtracyjny, kształtowany najczęściej w cylindry o podstawie koła lub owalu oraz jako prostopadłościowe panele (rys. 7c, d).



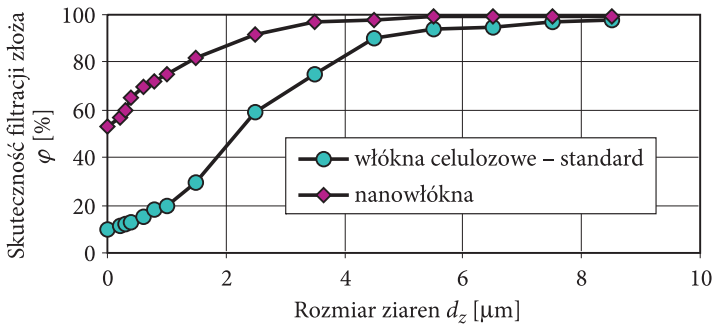
Rys. 7. Rodzaje papierowych wkładów filtracyjnych filtrów powietrza: a) struktura papieru filtracyjnego; b) papier po plisowaniu; c) cylindryczny o podstawie koła; d) panelowy

Coraz częściej do budowy przegród filtracyjnych stosowane są nanowłókna produkowane technologią „electrospinningu” lub metodą meltblown, która umożliwia wytwarzanie włókien o średnicach w zakresie  $1\div 2000 \text{ nm}$ . Nanowłókna są formowane w tak zwaną nanosieć, która może mieć grubość  $1\div 5 \mu\text{m}$  (rys. 8), przez co charakteryzuje się małymi oporami przepływu [11].

Zastosowanie nanowłókien zdecydowanie podnosi skuteczność filtracji, szczególnie ziaren pyłu poniżej  $5 \mu\text{m}$  (rys. 9), bez istotnego wzrostu spadku ciśnienia na przegrodzie filtracyjnej. Nanowłókninowe medium filtracyjne wraz z systemem impulsowego oczyszczania wkładu zostało zastosowane do filtracji powietrza dla turbiny będącej jednostką napędową czołgu Abrams [18].

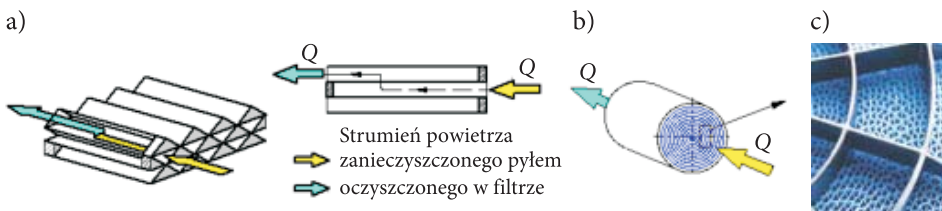


Rys. 8. Nanosieć o średnicach włókien około 250 nm (0,25  $\mu\text{m}$ ) naniesiona na złożę z włókien celulozy o średnicach około 10  $\mu\text{m}$  [11]: a) widok z góry; b) przekrój



Rys. 9. Skuteczność filtracji złoża wykonanego z włókien celulozowych oraz z nanowłókien [11]

Firma Donaldson stosuje od wielu lat odmienną konstrukcję i technologię wykonania wkładu filtracyjnego znanego pod nazwą „PowerCore” (rys. 10). Wkład filtracyjny zbudowany jest w formie rdzenia z kilkunastu nałożonych na siebie i odizolowanych warstw plisowanego papieru. Plisy tworzą kanały, które są na przemian uszczelnione, co wymusza przepływ powietrza przez materiał filtracyjny do przyległego kanału. Przy tym samym strumieniu przepływającego powietrza,



Rys. 10. Wkład filtracyjny „PowerCore” [16]: a) zasada działania wkładu filtracyjnego; b) kierunek przepływu powietrza; c) widok od zwoła



filtry wykonane technologią „PowerCore”, są gabarytowo 2-3 razy mniejsze niż filtry z wkładami z plisowanego papieru filtracyjnego wykonanego tradycyjną metodą i bardziej efektywne ( $\varphi_f = 99,99\%$ ) niż przeciętny konwencjonalny filtr —  $\varphi_f = 99,85\%$  [4, 16].

Na przegrody filtracyjne stosowane są też włókniny filtracyjne mające strukturę charakteryzującą się narastającym upakowaniem włókien w kierunku napływu powietrza. Dzięki temu przy skuteczności filtracji powyżej  $\varphi = 99,9\%$  takie włókniny osiągają zdolność pochłaniania pyłu  $\Delta m = 0,9 \div 1,1 \text{ kg/m}^2$  [4].

Spotyka się jeszcze przegrody filtracyjne wykonane jako nieregularne złożę ze sprasowanego drutu metalowego lub tworzywa sztucznego nawilżonego olejem.

Właściwości filtra powietrza określają następujące powszechnie stosowane charakterystyki:

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

$$\varphi = \frac{m_p}{m_d}, \quad (4)$$

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

$$\Delta p_f = p_1 - p_2. \quad (5)$$

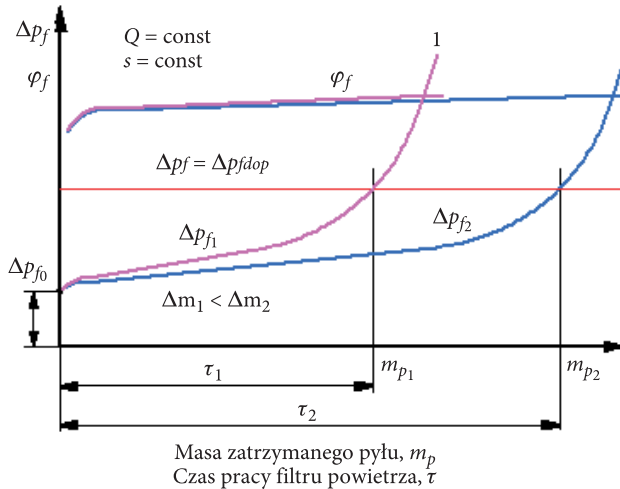
- **dokładność filtracji** — maksymalny  $d_{zmax}$  rozmiar ziarna pyłu w powietrzu za filtrem.

- **chłonność** — masa pyłu  $\Delta m$  zatrzymanego do chwili osiągnięcia przez filtr określonej wartości oporu przepływu, najczęściej wartości oporu dopuszczalnego  $\Delta p_{fdop}$ .

Chłonność  $\Delta m$  przegrody filtracyjnej oraz skład granulometryczny pyłu, który na nią napływa decyduje (niezależnie od warunków eksploatacji — zapylenia powietrza) o czasie pracy filtra powietrza, limitowanego uzyskaniem wartości dopuszczalnej oporu przepływu  $\Delta p_{dop}$  będącej kryterium zakończenia eksploatacji filtra (rys. 11).

Producenci papierów filtracyjnych podają tylko dane opisujące ich strukturę, na przykład: grubość, wymiary porów, gramatura, wytrzymałość mechaniczna, opór przepływu (przepuszczalność), gęstość. Brakuje danych określających właściwości filtracyjne produkowanych papierów. Dlatego dla potrzeb poprawnego projektowania filtra powietrza relacje między strukturą papieru filtracyjnego i jego charakterystykami filtracyjnymi ustalane są eksperymentalnie z wykorzystaniem standardowych testów badawczych.

Brak jest jednak 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



Rys. 11. Charakterystyki skuteczności filtracji  $\varphi_f = f(m_p)$  i oporu przepływu  $\Delta p_f = f(m_p)$  filtru dla różnej chłonności  $\Delta m$  przegrody

i wyznaczenia czasu pracy filtru. Charakterystyki takie są możliwe do uzyskania podczas badań eksperymentalnych kompletnych filtrów powietrza na pojeździe lub w czasie badań laboratoryjnych. Badania te są jednak bardzo drogie, pracochłonne i skomplikowane szczególnie w stosunku do filtrów dwustopniowych. Z danych literaturowych [1, 10] wynika, że czas pracy  $\tau$  dwustopniowego filtru powietrza można określić z zależności empirycznej.

$$\tau_p = \frac{F_C \cdot k_m \cdot k_C}{Q_{\max} \cdot s \cdot (1 - \varphi_M) \cdot \varphi_p}, \quad (6)$$

gdzie:  $F_C$  — powierzchnia papieru filtracyjnego II stopnia filtracji,  
 $k_m$  — współczynnik chłonności papieru filtracyjnego dla przyjętej wartości  $\Delta p_{\text{dop}}$ ;  
 $k_C$  — współczynnik uwzględniający różnicę między parametrami zanieczyszczeń testowych a rzeczywistych;  
 $Q_{\max}$  — nominalne zapotrzebowanie powietrza przez silnik;  
 $s$  — stężenie zapylenia powietrza zasysanego do filtru;  
 $\varphi_M$  — 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 (przy założeniu równomiernego rozkładu pyłu na całej powierzchni czynnej papieru filtracyjnego wkładu badawczego) zależnością:

$$k_m = \frac{m_{CW}}{F_W} \quad [\text{g/m}^2], \quad (7)$$

gdzie:  $m_{CW}$  — całkowita masa pyłu zatrzymanego przez wkład filtracyjny dla przyjętej wartości oporu dopuszczalnego  $\Delta p_{\text{dop}}$ ;  
 $F_W$  — powierzchnia czynna papieru filtracyjnego.

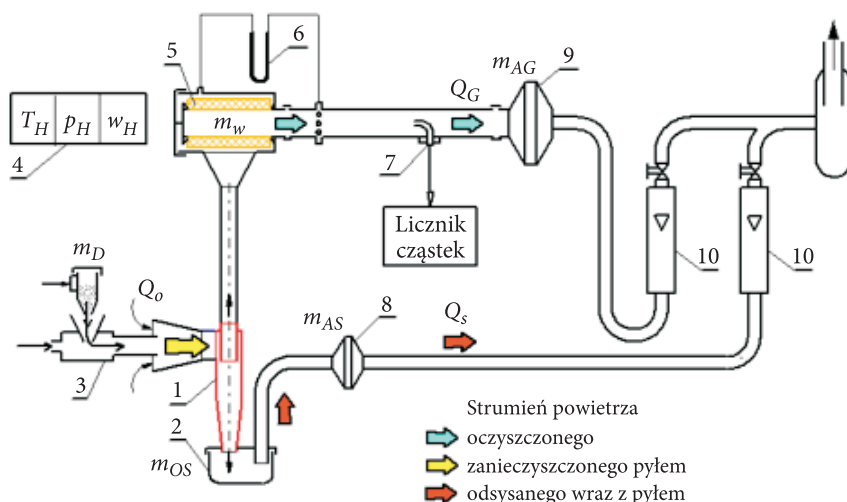
Wyznaczenie takich charakterystyk dla dwustopniowych filtrów powietrza pojazdów mechanicznych pracujących w systemie „multicyklon–przegroda porowata” z wykorzystaniem stosowanych obecnie metod badawczych dla rzeczywistych wartości stężenia zapylenia i zapotrzebowania powietrza przez silnik jest szczególnie pracochłonne i bardzo kosztowne.

Cel ten można osiągnąć metodą nieskomplikowaną i mniej kosztowną — przez badanie, wydzielonego z filtra dwustopniowego, segmentu w postaci pojedynczego cyklonu i ustawionego za nim szeregowo badawczego wkładu filtracyjnego będącego wycinkiem rzeczywistego wkładu filtracyjnego o odpowiednio dobranej powierzchni materiału filtracyjnego. Wydzielony z filtra dwuczściowy segment nazwano „zestawem filtracyjnym”.

Zachowując podczas badań „zestawu filtracyjnego” takie warunki pracy badawczego wkładu filtracyjnego i cyklonu, jakie występują podczas pracy kompletnego filtra powietrza, można uzyskane charakterystyki badawczego wkładu filtracyjnego (wycinka wkładu filtracyjnego) potraktować jako charakterystyki wkładu filtracyjnego w rzeczywistej wielkości. Założenie takie jest możliwe ze względu na przyjęty w definicji współczynnika  $k_m$  równomierny rozkład pyłu na całej powierzchni czynnej papieru filtracyjnego wkładu oraz fakt, że możliwa jest minimalizacja zróżnicowania charakterystyk w poszczególnych cyklonach całego multicyklonu. Wyznaczenie w powyższy, niekonwencjonalny sposób charakterystyk materiału filtracyjnego z przeznaczeniem na II stopień filtracji powietrza wymaga opracowania odpowiedniej metodyki oraz jej weryfikacji.

### 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  $\Delta p_{\text{dop}}$ . Opracowana metodyka i zbudowane stanowisko (rys. 12) umożliwiają wyznaczenie współczynnika  $k_m$  oraz podstawowych charakterystyk wycinka papieru filtracyjnego przewidywanego do zastosowania na II stopień filtra powietrza pracującego w systemie „multicyklon–wkład papierowy”. Głównym elementem stanowiska jest segment filtracyjny składający się z pojedynczego cyklonu będący elementem multicyklonu projektowanego filtra powietrza



Rys. 12. Schemat funkcjonalny stanowiska do badań papierów filtracyjnych w systemie „cyklon–przegroda porowata”: 1 – cyklon; 2 – osadnik pyłu; 3 – dozownik pyłu; 4 – przyrząd do pomiaru temperatury, ciśnienia i wilgotności powietrza; 5 – wkład filtracyjny; 6 – manometr wodny typu U-rurka; 7 – sonda licznika cząstek; 8, 9 – filtry absolutne; 10 – rotametry

i szeregowo ustawionego za nim wkładu filtracyjnego o cylindrycznym kształcie, wykonanego z badanego papieru filtracyjnego.

Powierzchnię papieru  $F_W$  badanego wkładu dobrano 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  $v_{Fdop} \leq 0,06$  m/s.

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

Charakterystyki cyklonu i badanego papieru filtracyjnego określano metodą wagową w kolejnych cyklach pomiarowych o określonym czasie trwania (czas równomiernego dozowania pyłu testowego PTC-D), stosując stężenie zapylenia powietrza na wlocie do cyklonu  $s = 1 \text{ g/m}^3$ .

#### 4. Badania eksperymentalne

Celem badań było zweryfikowanie zaproponowanej metody badań papierowej przegrody filtracyjnej z przeznaczeniem na II stopień filtracji powietrza w systemie „multicyklon–przegroda porowata” filtru powietrza silnika czołgu T-72.

Przedmiotem badań były wkłady filtracyjne wykonane z dwóch różniących się parametrami struktury papierów filtracyjnych firmy J. C. BINZER (tab. 1) o symbolach 796/1 VH 186 (Nr 1) i 844 VH 86/4 (Nr 2). Zakres badań obejmował badania wstępne i zasadnicze.

TABELA 1

Parametry badanych papierów filtracyjnych firmy J. C. BINZER Papierfabrik

			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

### Badania wstępne:

Badania wstępne obejmowały określenie charakterystyk składu frakcyjnego pyłu PTC-D 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  $N$ .

$$Up_i = \frac{N_i}{N} 100\%. \quad (8)$$

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, stosując stężenie zapylenia powietrza na wlocie do cyklonu  $s = 1 \text{ g/m}^3$  i stopień efektywnego odsysania pyłu z osadnika cyklonu  $m_0 = 8\%$ .

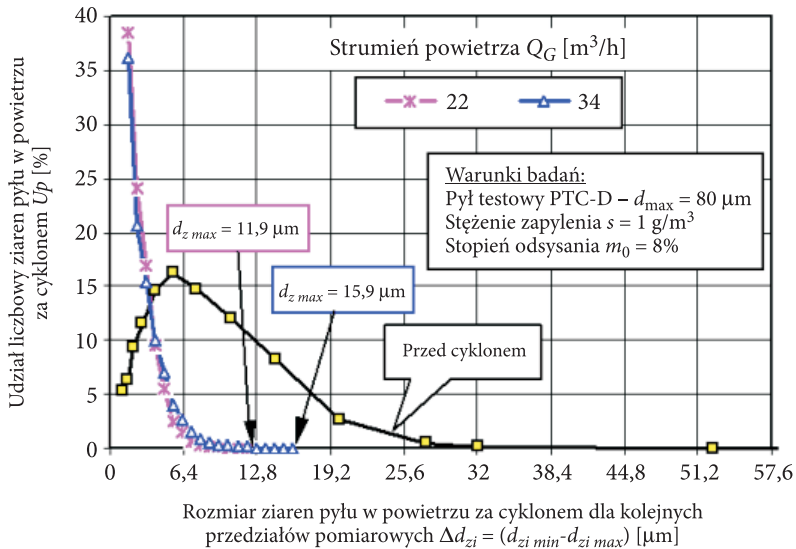
### Badania zasadnicze obejmowały:

- 1) Określenie dla dwóch prędkości filtracji ( $v_{Fmin} = 0,035 \text{ m/s}$  i  $v_{Fmax} = 0,06 \text{ m/s}$ ) charakterystyk wkładu filtracyjnego (II 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  $\Delta p_w = f(k_m)$ .
- 2) Określenie charakterystyk papieru filtracyjnego Nr 1, na który dozowany jest pył PTC-D o składzie standardowym.

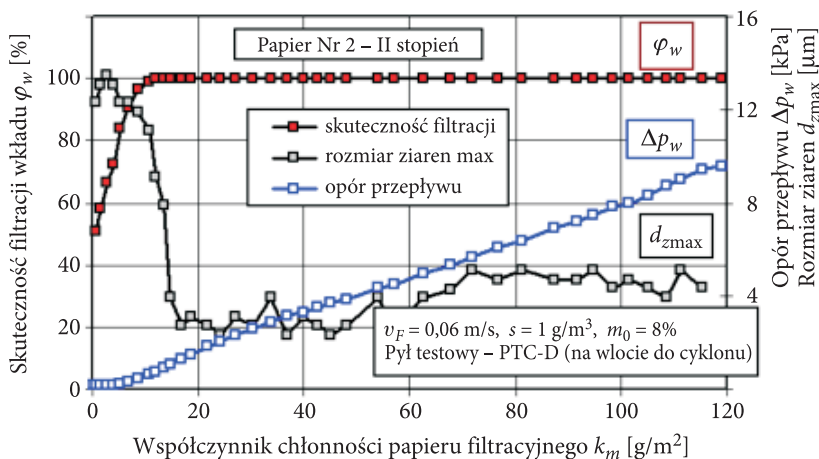
#### 4. Analiza wyników badań

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 rysunku 13.



Rys. 13. 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

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 udziały liczbowe  $U_p$  są coraz mniejsze aż do osiągnięcia wartości minimalnej (rys. 13), która określa udział pojedynczego ziarna pyłu o maksymalnym rozmiarze  $d_{zmax}$  w ogólnej liczbie ziaren pyłu  $N$ . Dla strumienia powietrza  $Q_G = 22 m^3/h$  oraz  $Q_G = 34 m^3/h$  rozmiar maksymalnego ziarna ma odpowiednio wartość  $d_{zmax} = 11,9 \mu m$ ,  $d_{zmax} = 15,9 \mu m$ . Ziarna pyłu o takich maksymalnych rozmiarach dostają się wraz z powietrzem na papier filtracyjny będący drugim stopniem filtracji.



Rys. 14. Charakterystyka skuteczności filtracji  $\varphi_w = f(k_m)$ , 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  $k_m$

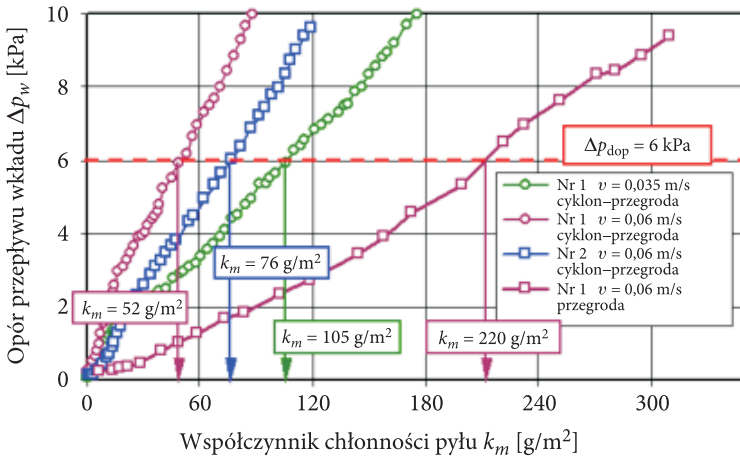
Wraz ze wzrostem (współczynnika chłonności pyłu  $k_m$ ) masy zatrzymanego przez wkład filtracyjny pyłu skuteczność filtracji  $\varphi_w$  oraz opór przepływu  $\Delta p_w$  papierów pracujących w systemie „cyklon–przegroda porowata” cały czas systematycznie rosną, przy czym w początkowym okresie filtracji wzrost skuteczności jest gwałtowny, co ma niewątpliwie związek ze zmniejszaniem się rozmiarów ziaren maksymalnych od  $d_{zmax} = 13,8$  μm do  $d_{zmax} = 5$  μm. Wtedy skuteczność filtracji papieru stabilizuje się na poziomie  $\varphi_w = 99,5 \div 99,9\%$  (rys. 14).

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 rozmiar maksymalnego ziarna  $d_{zmax}$ , co świadczy o wzroście dokładności filtracji. Stabilizacja dokładności filtracji na poziomie 2,3-5,1 μm następuje po osiągnięciu przez papier współczynnika chłonności  $k_m = 12,09$  g/m<sup>3</sup> i ma ścisły związek ze stabilizacją skuteczności filtracji.

Zmiana prędkości filtracji na mniejszą (z  $v_{Fmax} = 0,06$  m/s na  $v_{Fmin} = 0,035$  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. 15).

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 ( $v_{Fmax} = 0,06$  m/s) opór



Rys. 15. Charakterystyka oporu przepływu  $\Delta p_w = f(k_m)$  wkładów z papieru filtracyjnego Nr 1 i Nr 2 dla różnych prędkości filtracji w systemie: cyklon–przegroda i bez cyklonu

przepływu wkładu przyjmuje wartości tym większe im średnice porów papieru są mniejsze (rys. 15).

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 zanieczyszczonego pyłem standardowym niż pyłem, którego skład granulometryczny został zmieniony w cyklonie.

Dla tej samej wartości oporu dopuszczalnego  $\Delta p_{\text{dop}} = 6 \text{ kPa}$  papier filtracyjny, na który dozowany był pył, którego skład frakcyjny został zmieniony w cyklonie (rozmiary ziaren nie przekraczają  $d_{z\text{max}} = 17 \mu\text{m}$ ), osiąga współczynnik chłonności czterokrotnie mniejszy niż papier, na który dozowany był bezpośrednio pył o składzie standardowym. Dla papieru Nr 1 w chwili osiągnięcia  $\Delta p_{\text{dop}} = 6 \text{ kPa}$  współczynniki chłonności mają odpowiednio wartości  $k_m = 52 \text{ g/m}^2$  i  $k_m = 220 \text{ g/m}^2$ . W rzeczywistości czas pracy filtra dwustopniowego, którego wkład filtracyjny został zaprojektowany na podstawie znajomości wartości współczynnika chłonności  $k_m$  standardowych papierów filtracyjnych, co praktycznie jest stosowane, będzie czterokrotnie krótszy.

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  $R^2$  (tab. 2).

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



TABELA 2

Równania regresji oporu przepływu  $\Delta p_w$  wkładów filtracyjnych w układzie „cyklon–przegroda porowata”

Lp.	Warunki badań	Postać równania	$R^2$
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

porowata”. Badania sprowadzałyby się wtedy do eksperymentalnego wyznaczenia znacznie mniejszej liczby (na przykład trzech) punktów pomiarowych zamiast kilkudziesięciu.

## 5. Podsumowanie

Opracowana i zweryfikowana metodyka badań właściwości materiałów filtracyjnych w zbliżonych do rzeczywistych warunkach pracy II stopnia filtru (wkładu filtracyjnego), będąca oryginalnym osiągnięciem autora, umożliwia wyznaczenie współczynnika chłonności  $k_m$  oraz innych parametrów niezbędnych do właściwego zaprojektowania wkładu filtracyjnego filtru 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 filtru powietrza oraz obniża koszty. Niska ( $\varphi = 55 \div 77\%$ ) 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 filtru 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 filtru do chwili osiągnięcia oporu dopuszczalnego, a tym samym na przebieg pojazdu.

Badania w zakresie określenia charakterystyk skuteczności  $\varphi_w = f(k_m)$ , dokładności filtracji  $d_{z\text{max}} = f(k_m)$  oraz oporów przepływu  $\Delta p_w = f(k_m)$  powtórzono na drugim egzemplarzu wkładu filtracyjnego wykonanego z papieru Nr 1 i Nr 2. Powtarzalność otrzymanych wyników jest podstawą do stwierdzenia, że opracowana metodyka jest prawidłowa, a uzyskane wyniki wiarygodne.

Artykuł wpłynął do redakcji 20.07.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano we wrześniu 2009 r.

#### LITERATURA

- [1] K. BACZEWSKI, M. HEBDA, *Filtracja płynów eksploatacyjnych*, MCNEMT, Radom, 1991/92.
- [2] *Cenrtisep Air Cleaner*, Materiały informacyjne firmy PALL Corporation, USA, 2004.
- [3] *Diesel Engine Air Filtration*, Materiały informacyjne firmy PALL Corporation, USA, 2004.
- [4] M. DURST, G. KLEIN, N. MOSER, *Filtration in Fahrzeugen*, Materiały informacyjne firmy Mann+Hummel GMBH, Ludwigsburg, Niemcy, 2005.
- [5] P. DZIERŻANOWSKI, W. KORDZIŃSKI, J. OTYŚ, S. SZCZECIŃSKI, R. WIATREK, *Napędy lotnicze. Turbinowe silniki śmigłowe i śmigłowcowe*, WKŁ, Warszawa, 1985.
- [6] P. DZIERŻANOWSKI, T. DZIUBAK, *Układ filtrujący powietrza z efekcyjnym odsysaniem pyłu silnika samochodu ciężarowego*, VI Międzynarodowe sympozjum IPM, Warszawa-Rynia, 1996.
- [7] T. DZIUBAK, *Analiza procesu filtracji powietrza wlotowego do silników pojazdów specjalnych*, rozprawa habilitacyjna, WAT, Warszawa, 2008.
- [8] T. DZIUBAK, *Możliwości modyfikacji konstrukcji cyklonu zwrotnego z wlotem stycznym*, Biul. WAT, 55, 2, 2006.
- [9] T. DZIUBAK, *Problemy filtracji powietrza w silnikach spalinowych pojazdów eksploatowanych w warunkach dużego zapylenia powietrza*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN, 4 (124), 2000.
- [10] H. ERDMANNSDÖRFER, *Trocklenluftfilter für Fahrzeugmotoren-Auslegungs — und Leistungsdaten*, MTZ, 43, 7/8, 1982.
- [11] T. GRAFE, M. GOGINS, M. BARRIS, J. SCHAEFER, R. CANEPA, *Nanofibers in Filtration Applications in Transportation*, Filtration 2001 International Conference and Exposition, Chicago, Illinois, December 3-5, 2001.
- [12] T. JAROSZCZYK, B. A. PARDUE, CH. E. HOLM, *Recent advances in engine air cleaners design and evaluation*, Journal of KONES Internal Combustion Engines, 11, 1-2, 2004.
- [13] T. JAROSZCZYK, *Problemy filtracji powietrza w silnikach spalinowych eksploatowanych w ciężkich warunkach*, Silniki spalinowe, 2, 1978.
- [14] J. JUDA, M. NOWICKI, *Urządzenia odpylające*, PWN, Warszawa, 1986.
- [15] H. MELZER, W. BROX, *Ansauggerauschdampfer und Luftfilter für BMW 524 td*, MTZ, 45, 5, 1984.
- [16] PowerCore™, *Innovative Air Filter Technology*, www.donaldson.com.
- [17] И. Г. Рузаев, Ф. Р. Стрыковский, *Исследование комбинированной системы очистки воздуха двигателей*, Автомобильная промышленность, 8, 1979.
- [18] J. W. SCHAEFFER, L. M. OLSON, *Air Filtration Media for Transportation Applications*, Filtration & Separation, 35, 2, 1998.

T. DZIUBAK

#### **Experimental research of air two-stage paper filter of special vehicle engine**

**Abstract.** Operating conditions of two-stage engine inlet air filtration system are described. Properties of filtration materials used for porous partitions of vehicle air filters are presented. Also filtration properties of monocycluses and multicycluses have been presented. We discussed the principles of dust removing from multicyclone dust settler. The methodology of paper filter research operating in cyclone-porous barrier system is given. The dust fractional composition in air before cyclones and

in purified air after cyclones was determined. There are presented the research results of filtration efficiency and thoroughness characteristics and flow drag characteristics of filtration paper as a function of the dust absorptiveness coefficient  $k_m$ . The impact of dust fractional composition on filtration paper absorptiveness change has been shown.

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

**Universal Decimal Classification:** 621.43

