



Badania efektywności filtracji powietrza wlotowego silnika UTD-20 bojowego wozu piechoty

TADEUSZ DZIUBAK, GRZEGORZ TRAWIŃSKI

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

Streszczenie. Scharakteryzowano systemy filtracji powietrza wlotowego silników spalinowych pojazdów mechanicznych. Pokazano charakterystyczne cechy układu zasilania powietrzem silnika UTD-20 bojowego wozu piechoty BWP-1. Przedstawiono wyniki badań skuteczności odpylania i oporów przepływu standardowego filtra powietrza BWP-1. Wykazano konieczność zmian konstrukcyjnych układu zasilania powietrzem silnika UTD-20. Przeprowadzono analizę możliwości poprawy efektywności odpylania powietrza wlotowego silnika UTD-20 bojowego wozu piechoty — BWP-1. Zaproponowano dwustopniowy system filtracji powietrza wlotowego do silnika BWP-1. Zaprojektowano i wykonano konstrukcję drugiego stopnia filtracji powietrza — filtra przegrodowego. Wyznaczono charakterystyki skuteczności filtracji $\varphi = f(m_p)$ i oporu przepływu $\Delta p = f(m_p)$, $\Delta p = f(Q_G)$ zaprojektowanego filtra. Określono chłonność filtra dla nominalnego strumienia powietrza silnika BWP-1.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, dwustopniowe filtry powietrza, multicyklon, charakterystyki filtrów

Symbole UKD: 621.43

1. Wstęp

Podstawowym składnikiem czynnika roboczego każdego silnika spalinowego jest powietrze pobierane z atmosfery, które zawiera znaczne ilości zanieczyszczeń, szczególnie gdy pojazdy eksploatowane są po drogach nieutwardzonych i bezdrożach. Dotyczy to głównie samochodów specjalnych oraz pojazdów wojskowych (czołgi, bojowe wozy piechoty, działa samobieżne) wyposażonych w silniki o zapłonie samoczynnym (ZS) dużej mocy oraz silniki turbinowe. Maksymalne zapotrzebowanie powietrza Q_{Si} takich silników znacznie przekracza wartość 1 kg/s, na przykład dla

silnika czołgu T-72 wynosi $Q_{Sil} = 1,22 \text{ kg/s}$ ($3400 \text{ m}^3/\text{h}$). Jeżeli zapylenie powietrza ma wartość $s = 1 \text{ g/m}^3$, to silnik czołgu T-72 zasysa prawie 1 g pyłu w ciągu 1 s. Z tego względu pojazdy specjalne wyposaża się w filtry realizujące dwustopniową filtrację powietrza, gdzie pierwszym stopniem oczyszczania jest odpyłacz bezwładnościowy (multicyklon lub monocyklon), a drugim, ustawiona za nim szeregowo, przegroda porowata.

Multicyklony charakteryzują się skutecznością odpyłania dochodzącą do $\varphi = 96\%$ i dokładnością powyżej $d_z = (15 \div 30) \mu\text{m}$ [1, 4, 6, 17]. Dla monocyklonów parametry te wynoszą odpowiednio $\varphi = (50 \div 70)\%$ i $d_z = (40 \div 50) \mu\text{m}$ [1]. Materiały stosowane na przegrody porowate zapewniają wysoką (ponad 99%) skuteczność i dokładność (powyżej $3 \div 5 \mu\text{m}$) filtracji [1, 2, 4]. Największe zużycie elementów silnika (np. skójarzenie tłok–pierścienie tłokowe–cylinder) powodują ziarna pyłu o rozmiarach $2 \div 35 \mu\text{m}$ [1, 3, 8] i dlatego powinny być one zatrzymywane z największą skutecznością.

W układzie doprowadzenia powietrza do silnika UTD-20 bojowego wozu piechoty (BWP-1) jedynym filtrem jest multicyklon, który, jak wynika z powyższych informacji, nie zapewnia wymaganej skuteczności i dokładności filtracji powietrza wlotowego. Stąd wynikają podjęte działania mające na celu poprawienie efektywności filtracji powietrza wlotowego do tego silnika, a tym samym jego trwałości i niezawodności.

2. Charakterystyka systemów filtracji powietrza wlotowego do silników spalinowych pojazdów mechanicznych

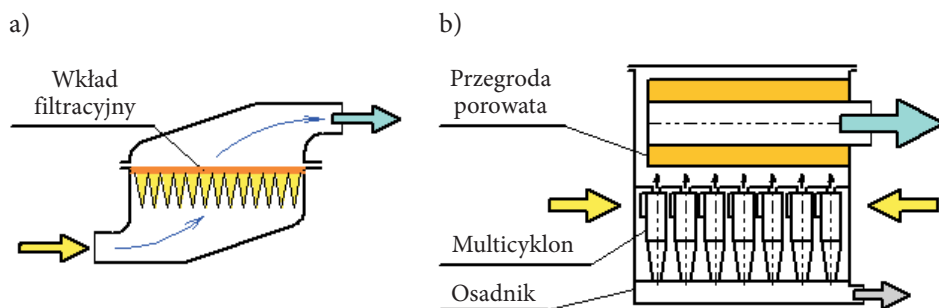
Konstrukcja filtru powietrza jest uzależniona od przeznaczenia pojazdu (wartości stężenia zapylenia powietrza) i wymaganego okresu obsługowego. Filtry powietrza do silników spalinowych pojazdów mechanicznych różnią się zasadą działania, budową, rodzajem stosowanych materiałów filtracyjnych oraz skutecznością filtracji.

Do filtracji powietrza wlotowego silników samochodów osobowych, które eksploatowane są w warunkach małego zapylenia powietrza ($s = 0,001 \div 0,005 \text{ g/m}^3$) stosowane są filtry jednostopniowe, gdzie elementem filtracyjnym jest przegroda porowata — najczęściej filtracyjny wkład papierowy (rys. 1a).

Pojazdy eksploatowane w warunkach dużego zapylenia powietrza ($s > 1 \text{ g/m}^3$) wyposaża się w dwustopniowe filtry powietrza (rys. 1b), gdzie filtracja może być realizowana w następujących systemach filtracji:

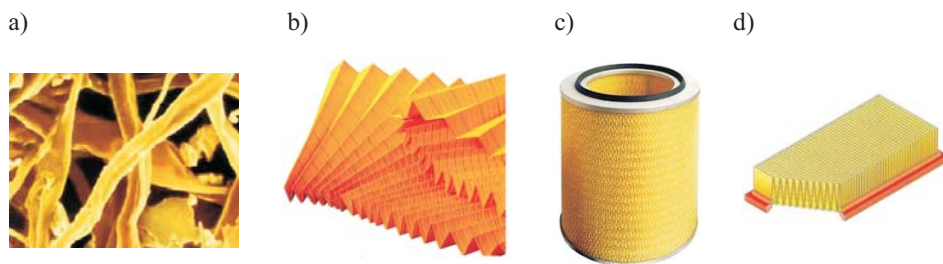
- multicyklon — przegroda porowata,
- monocyklon — przegroda porowata.

Dominującym materiałem filtracyjnym powietrza wlotowego współczesnych silników pojazdów mechanicznych są papiery filtracyjne o strukturze porowatej



Rys. 1. Systemy filtracji powietrza do tłokowych silników spalinyowych: a) jednostopniowy; b) dwustopniowy

(rys. 2a), które są produkowane w wielu różnorodnych gatunkach przez wyspecjalizowane firmy, a ich podstawowymi parametrami są: gramatura, grubość, przepuszczalność powietrza, wytrzymałość na rozerwanie, sztywność, wytrzymałość na przepuklenie, wymiary porów. Papier filtracyjny kształtuje się w formie plisowanej taśmy (rys. 2b), z której następnie może być w różny sposób zmontowany wkład filtracyjny kształtowany najczęściej w cylindry o podstawie koła lub owalu oraz jako panele (rys. 2c, d).



Rys. 2. Rodzaje papierowych wkładów filtracyjnych filtrów powietrza: a) struktura papieru filtracyjnego; b) papier po plisowaniu; c) układ cylindryczny o podstawie koła; d) wkład panelowy

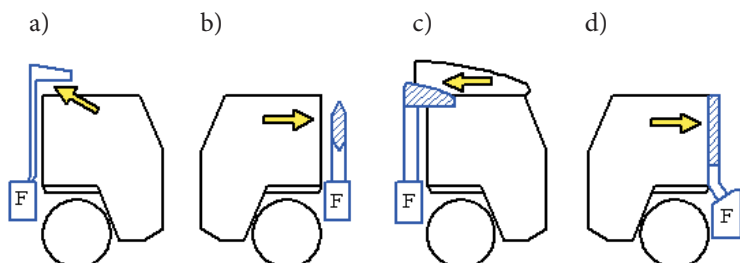
Wkład filtracyjny kształtuje się tak, aby uzyskać największy stosunek pola powierzchni i zajmowanej objętości przy jednoczesnym zachowaniu warunku maksymalnej prędkości przepływu powietrza przez papier — prędkości filtracji v_F . Maksymalna wartość prędkości filtracji v_F nie powinna być większa niż $0,08 \div 0,1$ m/s [4, 11].

Na przegrody porowate stosowane są też włókniny. Coraz częściej też do budowy przegród filtracyjnych używa się nanowłókien, produkowanych technologią „electrospinningu” lub metodą meltblown, które umożliwiają wytwarzanie włókien o średnicach w zakresie $1 \div 2000$ nm [13]. Nanowłókna są formowane w tak zwaną nanosieć, która może mieć grubość $1 \div 5$ μm , przez co charakteryzuje się małymi

oporami przepływu [12, 13]. Ze względu na ograniczone właściwości mechaniczne cienkiej warstwy nanosieci nakłada się ją na podłoże z konwencjonalnych materiałów filtracyjnych (celuloza), które mają większą wytrzymałość. Nanowłókninowe medium filtracyjne wraz z systemem impulsowego oczyszczania wkładu zostało zastosowane do filtracji powietrza dla turbiny będącej jednostką napędową czołgu Abrams [12, 16]. Zastosowanie nanowłókien zdecydowanie podnosi skuteczność filtracji, szczególnie ziaren pyłu o rozmiarach mniejszych niż $5\ \mu\text{m}$, bez istotnego wzrostu spadku ciśnienia na przegrodzie filtracyjnej [16]. Firma Donaldson stosuje od wielu lat odmienną konstrukcję i technologię wykonania wkładu filtracyjnego znanego pod nazwą „PowerCore”. Wkład filtracyjny zbudowany jest w formie rdzenia z kilkunastu nałożonych na siebie i odizolowanych warstw plisowanego papieru. Filtry wykonane tą technologią 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, 15].

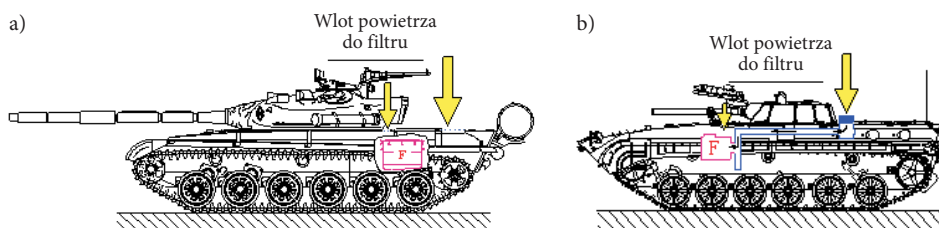
Filtry powietrza silników pojazdów osobowych, ze względu na małe wymiary, montowane są w przedziale silnikowym. Wkład filtracyjny wykonany jest w postaci prostokątnego panelu, natomiast powietrze do filtra zasysane jest najczęściej bezpośrednio z otoczenia czerpnię usytuowaną z przodu pojazdu.

We współczesnych samochodach ciężarowych filtry powietrza, ze względu na duże gabaryty, umieszcza się najczęściej z tyłu kabiny kierowcy (blisko silnika), nisko nad jezdnią, mocując je do ramy lub kabiny (rys. 3). Zapewnia to łatwy dostęp podczas prac obsługowych, a filtr nie jest narażony na oddziaływanie drgań silnika, lecz tylko drgania nadwozia. Czerpnię filtra powietrza lokalizuje się najczęściej nad kabiną w miejscu zapewniającym zasysanie powietrza o jak najmniejszym stężeniu zapylenia. Czerpnię i filtr łączy się przewodem mającym duży przekrój poprzeczny i zakola wykonane dużymi promieniami.



Rys. 3. Schematy typowego usytuowania czerpni powietrza i filtra w wybranych pojazdach ciężarowych: a) Jelcz C-424; b) Volvo FL8; c) Volvo FH16/520; d) Iveco Euro Cargo 8060

W wojskowych pojazdach gaśnicowych (czołgi, transportery, bojowe wozy piechoty) filtry powietrza umieszcza się wewnątrz szczelnego pancerza (rys. 4).



Rys. 4. Miejsce poboru powietrza oraz schemat lokalizacji filtru: a) w czołgu T-72; b) w bojowym wozie piechoty BWP-1

Pobór powietrza przez filtr następuje wtedy z przestrzeni przedziału napędowego, dokąd napływa przez specjalny otwór w pancerzu oraz przez chłodnicę — czołg T-72. W bojowym wozie piechoty BWP-1 powietrze do filtru doprowadzane jest specjalnym kanałem znad powierzchni pancierza, a w warunkach zimowych dodatkowo przez chłodnicę.

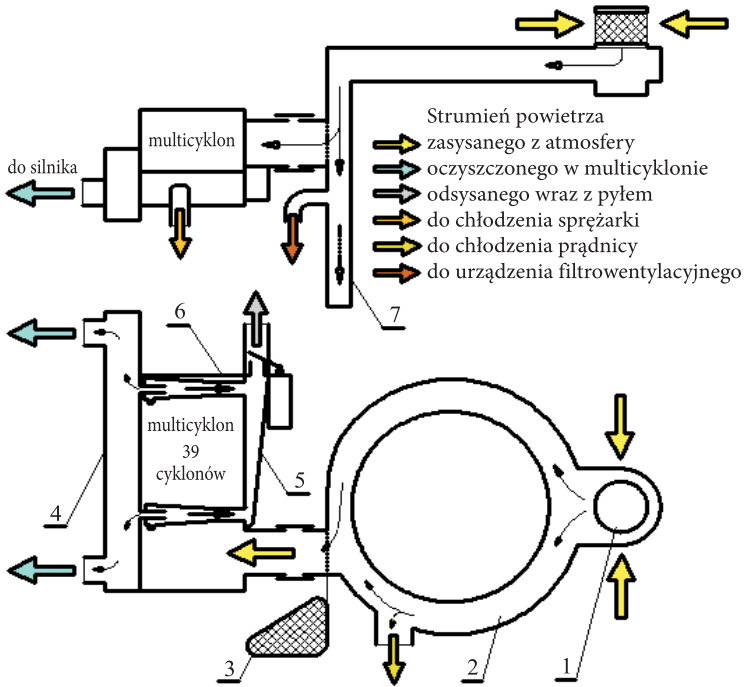
W obecnej chwili najszersze zastosowanie w układach zasilania powietrzem współczesnych pojazdów eksploatowanych w warunkach dużych stężeń zapylenia powietrza (w kraju jak i za granicą) ma system filtracji „multicyklon-wkład papierowy”. System ten znajduje się między innymi w układzie zasilania powietrzem silników: działa samobieżnego 2S-1, autobusu Autosan, w czołgach Leopard i Abrams oraz w samochodach ciężarowych, na przykład Volvo, Scania, DAF.

3. Charakterystyka układu zasilania powietrzem silnika UTD-20 bojowego wozu piechoty BWP-1

Układ zasilania powietrzem silnika UTD-20 BWP-1 (rys. 5) charakteryzuje się skomplikowaną budową i znaczną długością oraz złożonością kształtów poszczególnych jego części składowych. Filtrem powietrza jest multicyklon.

Powietrze atmosferyczne zasysane jest do układu czerpnię 1 (rys. 5) umieszczoną nad górną płytą pancerną za wieżą. W czasie eksploatacji wozu w okresie zimowym do filtru powietrza napływa dodatkowo, przez specjalny otwór w górnej płycie obudowy filtru, ciepłe powietrze ze skrzyni ejektora układu chłodzenia. Czerpnia powietrza jest połączona z pierścieniową magistralą powietrza 2, rozmieszczoną wokół łożyska wieży, a następnie z osadnikiem zanieczyszczeń 7 w przegrodzie przedziału napędowego. Często zmieniające się objętości i przekroje układu zasilania powietrzem silnika UTD-20, rozdzielanie i łączenie się jego głównego strumienia są przyczyną zmian prędkości przepływającego powietrza i źródłem zwiększonych oporów przepływu.

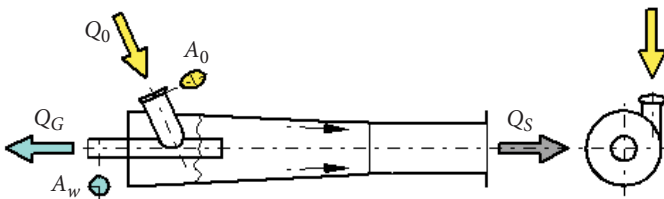
Multicyklon zabudowany jest w szczelnej, przypominającej prostopadłościan skrzyni, w której poziomo w trzech rzędach usytuowane są (po 13 cyklonów w każ-



Rys. 5. Układ zasilania powietrzem bojowego wozu piechoty BWP-1: 1 — czerpnia powietrza; 2 — magistrala podwieżowa; 3 — siatka filtracyjna; 4 — kolektor wylotowy powietrza oczyszczonego; 5 — osadnik pyłu; 6 — filtr powietrza — multicyklon; 7 — osadnik zanieczyszczeń

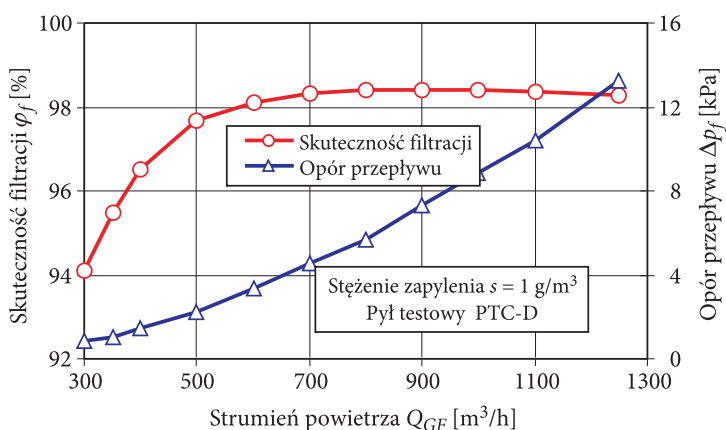
dym) cyklony zwrotne z wlotem stycznym (rys. 6). Dopływ powietrza do multicyklonu następuje króćcem wlotowym 1 oraz otworem wlotu ciepłego powietrza 2.

Oczyszczone w cyklonach powietrze napływa do zbiorczego kolektora 5, skąd dwoma cylindrycznymi króćcami 6 napływa do kolektorów silnika. Zatrzymany przez cyklony pył magazynowany jest w osadniku pyłu 4, skąd (na bieżąco) w wyniku efekcyjnego działania spalin usuwany jest na zewnątrz pojazdu.



Rys. 6. Schemat funkcjonalny cyklonu zwrotnego z wlotem stycznym filtru powietrza BWP-1: Q_0 — strumień powietrza wlotowego; Q_G — strumień powietrza wylotowego; Q_S — strumień odsysania; A_0, A_w — pole powierzchni przekroju poprzecznego otworu króćca wlotowego i otworu króćca rurki wylotowej

Z charakterystyk skuteczności odpylenia $\varphi_f = f(Q_{GF})$ oraz oporów przepływu $\Delta p_f = f(Q_{GF})$ filtru powietrza BWP-1 (rys. 7) wynika, że wraz ze wzrostem strumienia powietrza Q_{GF} następuje wzrost skuteczności odpylenia oraz jednoczesny wzrost oporów przepływu. W pierwszym okresie pracy filtru dla małych wartości strumienia powietrza w zakresie $Q_{GF} = 300 \div 600 \text{ m}^3/\text{h}$ ($Q_{GF} = 0,107 \div 0,214 \text{ g/s}$) wzrost skuteczności odpylenia jest znaczny. Powyżej $600 \text{ m}^3/\text{h}$ skuteczność stabilizuje się na poziomie nieznacznie przekraczającym wartość 98%. Wraz ze wzrostem strumienia powietrza Q_{GF} następuje ciągły (paraboliczny) wzrost oporów przepływu badanego filtru od wartości $\Delta p_f = 0,85 \text{ kPa}$ (dla $Q_{GF\text{min}} = 300 \text{ m}^3/\text{h}$) do wartości $\Delta p_f = 13,21 \text{ kPa}$ dla maksymalnego zapotrzebowania powietrza przez silnik $Q_{GF\text{max}} = 1250 \text{ m}^3/\text{h}$ ($Q_{GF\text{max}} = 0,448 \text{ g/s}$). Taka zmiana skuteczności odpylenia powietrza i oporów przepływu w multicyklonie jest odzwierciedleniem pracy pojedynczych cyklonów i jest zgodna z informacjami literaturowymi podawanymi dla odpylaczy multicyklonowych [1, 10, 17].



Rys. 7. Charakterystyki skuteczności odpylenia $\varphi_f = f(Q_{GF})$ oraz oporów przepływu $\Delta p_f = f(Q_{GF})$ filtru powietrza BWP-1 [6]

Filtr powietrza bojowego wozu piechoty BWP-1 charakteryzuje się więc bardzo dużymi ($5 \div 13 \text{ kPa}$) oporami przepływu w eksploatacyjnym zakresie pracy, co nie jest bez wpływu na moc silnika i dynamikę ruchu pojazdu. Wzrost oporu filtru powietrza Δp_f o wartość 1 kPa powoduje średnio spadek znamionowej mocy użytecznej silnika o $ZS 0,4 \div 0,6\%$ [7, 8].

Ogólnie przyjmuje się w konstrukcji silników spalinowych, że filtr powietrza może mieć taki maksymalny opór przepływu, aby przy prędkości obrotowej mocy maksymalnej n_N silnika i 100% otwarcia przepustnicy mieszanki w silnikach o ZI nie powodował większego spadku mocy niż o 3%. Warunek ten ogranicza wzrost oporu filtru powietrza wynikający z jego obładowania pyłem w czasie eksploatacji.

W związku z tym filtr powietrza ma określoną wartość dopuszczalnego oporu przepływu $\Delta p_f = \Delta p_{f\text{top}}$ wynikającą z istniejącego konstrukcyjnego ograniczenia strat mocy na pokonanie oporów przepływu w układzie dolotowym silnika. Dopuszczalne wartości oporów przepływu, przy których należy wymienić wkład filtracyjny lub przeprowadzić jego regenerację, podawane przez producentów filtrów, są bardzo zróżnicowane i wynoszą [1, 8]:

- dla silników o ZI 3,5÷5,0 kPa,
- dla silników o ZS niedoładowanych 6,5÷7,0 kPa,
- dla silników o ZS z turbodoładowaniem 4,5÷6,0 kPa.

Na przykład dopuszczalny opór przepływu silnika MAN DO826 samochodu STAR 1466 ma wartość 5 kPa. Maksymalna wartość oporu filtra powietrza bojowego wozu piechoty BWP-1 jest więc dwukrotnie większa niż przedstawione wartości dopuszczalnych oporów przepływu filtrów powietrza. Konstrukcję filtra powietrza, w tym wartość dopuszczalnego oporu przepływu, dobiera się indywidualnie dla każdego silnika w zależności od zapotrzebowania powietrza i przewidywanych warunków pracy, a w szczególności od stężenia zapylenia powietrza.

4. Wymagania stawiane filtrom powietrza

Ciągłe dążenie do wydłużenia czasu eksploatacji silników oraz do uzyskania jak najdłuższych przebiegów międzyobsługowych i międzynaprawczych powoduje, że filtrom powietrza stosowanym do współczesnych silników spalinowych stawia się wiele wymagań, z których najważniejsze to:

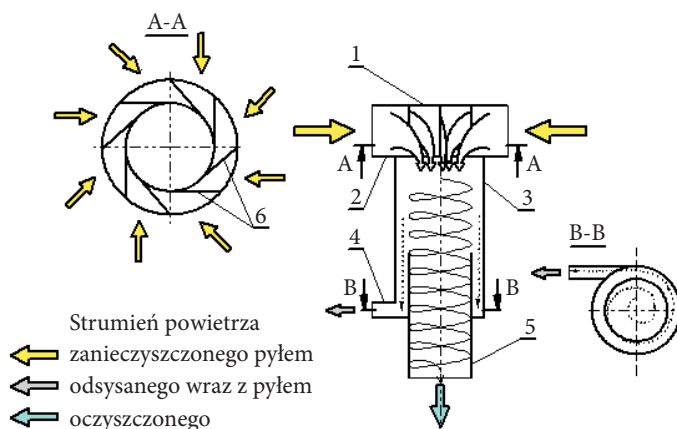
- skuteczność filtracji 99÷99,9%, w całym zakresie prędkości obrotowych silnika,
- dokładność zatrzymywania zanieczyszczeń powyżej 1 μm ,
- dopuszczalny opór przepływu nieprzekraczający 6÷7 kPa,
- duża chłonność zanieczyszczeń materiału filtracyjnego,
- małe wymiary i masa,
- prosta konstrukcja i obsługa,
- długi okres międzyobsługowy (do 100 000 km przebiegu dla pojazdów kołowych) — mała częstość obsługiwań.

Z przedstawionej analizy wynika, że zastosowany w BWP-1 filtr powietrza nie spełnia wymagań stawianym współczesnym filtrom powietrza trakcyjnych silników spalinowych w zakresie skuteczności i dokładności filtracji oraz oporów przepływu. Stanowiło to przesłankę do podjęcia prac mających na celu opracowanie filtra powietrza o możliwie małych oporach przepływu i wymiarach, lekkiego oraz jednocześnie o dużej skuteczności i dokładności filtracji powietrza, zapewniającego długi okres międzyobsługowy. Wymagania te spełniają dwustopniowe systemy filtracji powietrza wlotowego w układzie odpylacz bezwładnościowy — wkład papierowy.

5. Koncepcja modernizacji układu zasilania powietrzem silnika UTD-20

Dla silnika UTD-20 zaproponowano dwustopniowy system filtracji powietrza wlotowego w następującej konfiguracji:

- pierwszy stopień filtracji powietrza — bezwładnościowy odpylacz osiowy z bocznym doprowadzeniem powietrza, umieszczony za wieżą, w miejscu, gdzie dotychczas znajduje się czerpnia powietrza; odpylacz będzie jednocześnie spełniał rolę czerpni powietrza (rys. 8),
- drugi stopień filtracji (w miejsce dotychczas stosowanego filtru) — filtr przegrodowy z papierowymi wkładami filtracyjnymi (rys. 9).



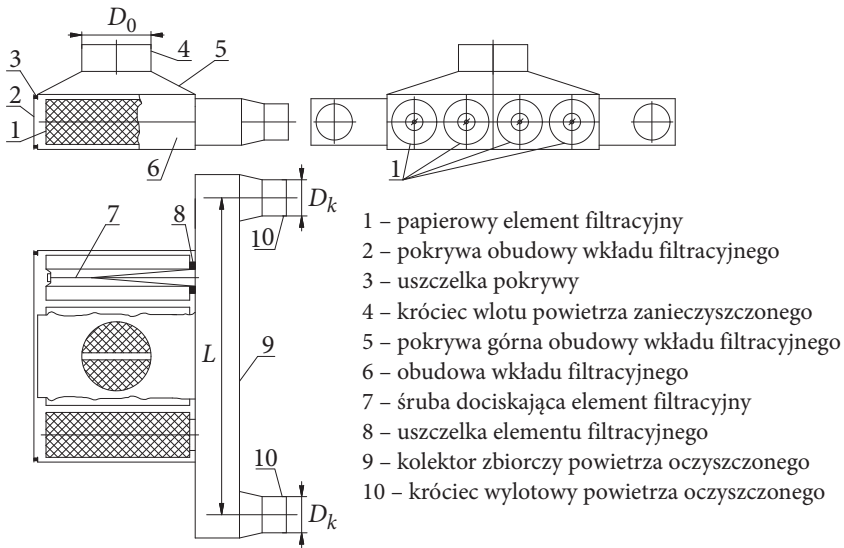
Rys. 8. Schemat funkcjonalny odpylacza bezwładnościowego z bocznym wlotem powietrza: 1 — zawirowywacz; 2 — okna wlotowe; 3 — kadłub cylindryczny; 4 — króciec odsysania; 5 — komora separacyjna; 6 — pierścień ustalający; 7 — przewód wylotowy oczyszczonego powietrza

Zadaniem odpylacza bezwładnościowego jest odseparowanie z powietrza wlotowego ziaren pyłu o większych rozmiarach oraz masie i „pozostawieniu” w strumieniu powietrza ziaren pyłu o mniejszych rozmiarach i masie, co wydłuża czas pracy przegrody porowatej i czas użytkowania systemu filtracji powietrza w silniku do osiągnięcia dopuszczalnej wartości oporu przepływu filtru powietrza Δp_{fdop} .

Podstawowym elementem odpylacza jest zawirowywacz 2 (rys. 8) utworzony przez kołowe tarcze i łopatki, które nadają strumieniowi zanieczyszczonego powietrza ruch wirowy, a następnie ruch śrubowy w kierunku otworu przewodu wylotowego. Wytrącony z powietrza pył kieruje się na ścianę wewnętrzną kadłuba cylindrycznego, gdzie wytraca prędkość i gromadzi się na dnie komory separacyjnej, skąd odprowadzany jest na zewnątrz odpylacza. Strumień oczyszczonego powietrza porusza się nadal ruchem śrubowym i przewodem wylotowym opuszcza odpylacz.

Proponowany przegrodowy filtr powietrza do silnika bojowego wozu piechoty zbudowany jest z trzech podstawowych elementów (rys. 9):

- obudowy wkładu filtracyjnego 6 wraz z wlotem powietrza,
- wkładu filtracyjnego 1,
- kolektora zbiorczego powietrza oczyszczonego 9.



Rys. 9. Schemat wykonanego przegrodowego filtra powietrza bojowego wozu piechoty

Wkładem filtracyjnym jest zespół czterech ułożonych względem siebie równolegle cylindrycznych elementów filtracyjnych o symbolu katalogowym AM 406/1 WIX Filtron (rys. 10b) wykonanych z plisowanego papieru filtracyjnego. Wlot powietrza do obudowy filtra następuje króćcem o średnicy $D_0 = 150$ mm. Oczyszczone w filtrze powietrze napływa do kolektora zbiorczego zakończonego



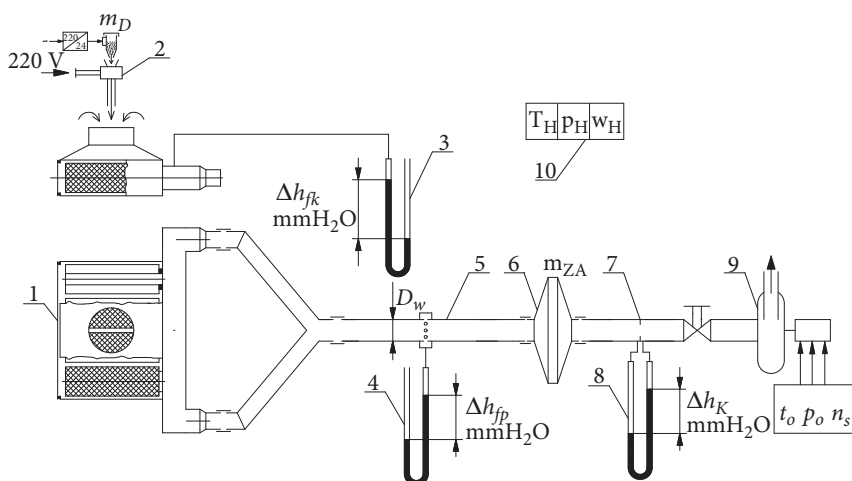
Rys. 10. Prototyp przegrodowego filtra powietrza bojowego wozu piechoty: a) widok ogólny; b) element filtracyjny

dwoma króćcami powietrza wylotowego 10 umożliwiającymi podłączenie filtra do kolektorów dolotowych silnika.

Zaproponowany zakres zmian wynika między innymi z konieczności usytuowania zmodernizowanego zespołu filtracyjnego w ograniczonej przestrzeni przedziału silnikowego.

6. Metodyka badań filtra przegrodowego

Badania eksperymentalne wykonanego filtra powietrza przeprowadzono na stanowisku (rys. 11), które umożliwia wykonywanie podstawowych charakterystyk: skuteczności odpylania oraz oporu przepływu filtrów powietrza w zakresie strumienia powietrza $Q_{GF} = 300 \div 2000 \text{ m}^3/\text{h}$ ($Q_{GF} = 0,107 \div 0,717 \text{ g/s}$) i dla stężenia zapylenia do 2 g/m^3 .



Rys. 11. Schemat stanowiska do badań filtra powietrza silnika UTD-20 BWP-1: 1 — filtr powietrza; 2 — dozownik pyłu; 3, 4, 8 — manometry cieczowe typu U-rurka; 5 — przewód pomiarowy oporu przepływu filtra powietrza; 6 — filtr mierniczy pyłu (absolutny); 7 — kryza pomiarowa; 9 — wentylator wytwarzający strumień powietrza Q ; 10 — zestaw do pomiaru temperatury, ciśnienia i wilgotności powietrza otoczenia

Zakres badań obejmował wyznaczenie następujących charakterystyk filtra:

- 1) aerodynamicznych (dla filtra z czystym wkładem filtracyjnym i po badaniach skuteczności) $\Delta p_f = f(Q_{GF})$,
- 2) skuteczności filtracji $\varphi_f = f(m_p)$,
- 3) oporu przepływu $\Delta p_f = f(m_p)$,

gdzie: m_p — masa pyłu zatrzymana na wkładzie filtracyjnym.

Badania charakterystyk aerodynamicznych $\Delta p_f = f(Q_{GF})$ przeprowadzono w zakresie strumienia powietrza $Q_{GF} = Q_{GF\min} \div Q_{GF\max}$ odpowiadającego objętościowemu zapotrzebowaniu powietrza przez silnik (wyływającego z filtru) w zakresie prędkości obrotowej silnika $n_{\min} \div n_{\max}$. Badawczy strumień powietrza Q_{GF} określono według normy PN-S-34040 z zależności:

$$Q_{GF \min(\max)} = \frac{V_{SS} \cdot n_{\min(\max)} \cdot \eta_v \cdot 60}{k \cdot 1000} \quad [\text{m}^3 / \text{h}], \quad (1)$$

gdzie: V_{SS} — pojemność skokowa silnika [dm^3];
 $n_{\min(\max)}$ — minimalna (maksymalna) prędkość obrotowa silnika [obr/min];
 η_v — współczynnik napełnienia cylindrów (przyjmuje się: $\eta_v = 0,7 \div 0,9$ dla silników czterosuwowych, $\eta_v = 0,5 \div 0,7$ dla silników dwusuwowych, większe wartości przyjmuje się dla silników o ZS);
 k — współczynnik liczby suwów ($k = 2$ dla silników czterosuwowych i $k = 1$ dla silników dwusuwowych).

Zgodnie z powyższą zależnością badawczy strumień powietrza dla skrajnych prędkości obrotowych silnika przyjmuje wartości $Q_{GF\min} = 350 \text{ m}^3/\text{h}$ oraz $Q_{GF\max} = 1250 \text{ m}^3/\text{h}$. Do wyznaczenia charakterystyk $\Delta p_f = f(Q_{GF})$ filtru powietrza przyjęto 11 wartości strumieni powietrza z wyznaczonego zakresu.

Opór przepływu filtru powietrza określono jako spadek ciśnienia statycznego Δp_{fp} i Δp_{fk} dla kolejnych wytypowanych wartości strumienia powietrza Q_{GF} (powtarzając pomiar n -krotnie) według zależności:

$$\Delta p_{fp(k)} = \frac{\bar{\Delta h}_{fp(k)}}{1000} (\rho_m - \rho_H) \cdot g \quad [\text{Pa}], \quad (2)$$

gdzie: $\bar{\Delta h}_{fp(k)}$ — średnia wartość spadku ciśnienia statycznego dla każdej przyjętej wartości strumienia powietrza Q_{GF} (punktu pomiarowego) z $n = 5$ cykli pomiarowych [$\text{mm H}_2\text{O}$];
 Δh_{fp} — spadek ciśnienia statycznego mierzony na przewodzie pomiarowym za filtrem w odległości równej $6D_w$ (gdzie D_w — średnica wewnętrzna przewodu pomiarowego) od miejsca jego połączenia z rurami stanowiącymi przedłużenie rur wylotowych (rys. 11);
 Δh_{fk} — spadek ciśnienia statycznego mierzony w zbiorczym kolektorze filtru powietrza (rys. 11);
 g — lokalne przyspieszenie, $g = 9,812 \text{ m/s}^2$;
 ρ_m — gęstość cieczy manometrycznej (wody) w temperaturze pomiaru t_H [kg/m^3];

ρ_H — gęstość powietrza atmosferycznego w warunkach wykonywania pomiaru [kg/m^3].

Charakterystyki skuteczności oczyszczania $\varphi_f = f(m_p)$ i oporów przepływu $\Delta p_f = f(m_p)$ filtru powietrza wyznaczono dla strumienia powietrza $Q_{GF\max} = 1250 \text{ m}^3/\text{h}$ ($Q_{GF\max} = 0,448 \text{ g/s}$) oraz dla stężenia zapylenia powietrza $s = 0,5 \text{ g}/\text{m}^3$.

Skuteczność filtracji określano metodą grawimetryczną zgodnie z PN-S-34040 w cyklach badawczych o czasie trwania $\tau_c = 10 \text{ min}$ na podstawie zależności:

$$\varphi = \frac{m_p}{m_D} \cdot 100 \quad [\%], \quad (3)$$

gdzie: m_p – masa pyłu zatrzymana w czasie τ_c przez filtr [g];
 m_D – masa pyłu [g] wprowadzona równomiernie (w określonym czasie $\tau_c = 10 \text{ min}$) do filtru wraz ze strumieniem powietrza wlotowego
 $Q_{0F\max} = Q_{GF\max} = 1250 \text{ m}^3/\text{h}$.

Stężenie pyłu w powietrzu zasysanym do filtru w czasie pomiaru określano po każdym cyklu badawczym z następującej zależności:

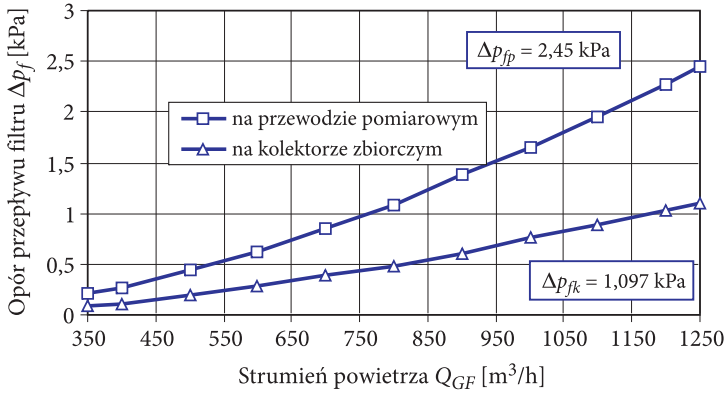
$$s = \frac{m_D \cdot 60}{Q_{0F\max} \cdot \tau_c} \quad [\text{g}/\text{cm}^3]. \quad (4)$$

Do określenia skuteczności filtracji powietrza w filtrze stosowano pył testowy PTC-D będący krajowym zamiennikiem pyłu testowego AC Fine o rozmiarach ziaren $d_z < 80 \text{ }\mu\text{m}$, którego skład granulometryczny i chemiczny podano w [14].

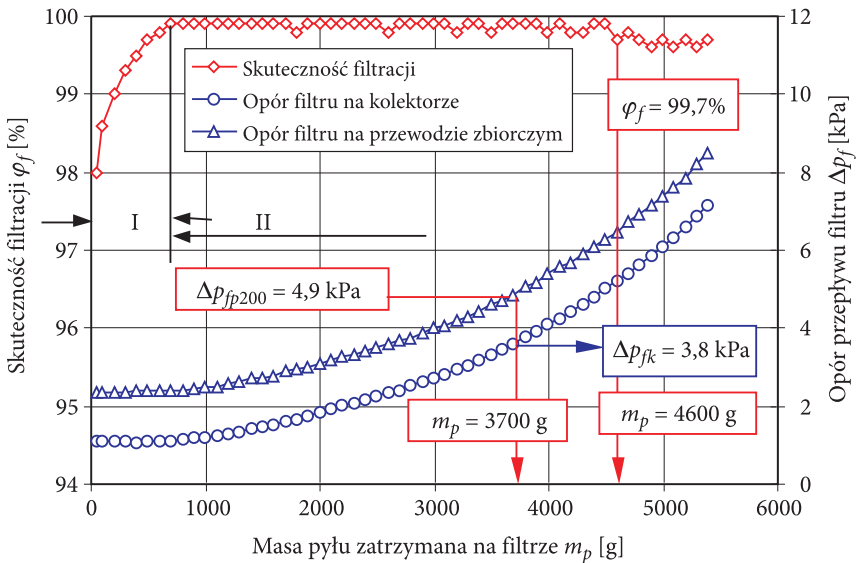
7. Analiza wyników badań

Wyniki badań charakterystyk aerodynamicznych zaprojektowanego filtru powietrza BWP-1 z wkładami czystymi przedstawiono na rysunku 12. Wraz ze wzrostem strumienia powietrza następuje ciągły wzrost oporów przepływu filtru powietrza i przy $Q_{GF} = 1250 \text{ m}^3/\text{h}$ opór przepływu mierzony na przewodzie pomiarowym osiąga wartość $\Delta p_{fp} = 2,45 \text{ kPa}$, a na kolektorze zbiorczym powietrza oczyszczonego dwukrotnie mniej — $\Delta p_{fk} = 1,097 \text{ kPa}$, co wynika ze znacznej długości przewodów na odcinku od kolektora do miejsca pomiaru oporu.

Wyniki badań i obliczeń skuteczności filtracji φ_f i oporu przepływu Δp_f w funkcji masy pyłu m_p zatrzymanego przez badany filtr powietrza BWP-1 przedstawiono na rysunku 13. Ze względu na osiągane wartości skuteczności filtracji, czas pracy badanego filtru można podzielić umownie na dwa okresy. Pierwszy (I), charakteryzujący



Rys. 12. Charakterystyki aerodynamiczne badanego filtra powietrza BWP-1 z wkładami czystymi



Rys. 13. Charakterystyki skuteczności filtracji $\varphi_f = f(m_p)$ i oporów przepływu $\Delta p_f = f(m_p)$ badanego filtra powietrza BWP-1

się małymi wartościami skuteczności filtracji, które systematycznie i gwałtownie wzrastają wraz z masą pyłu zatrzymanego przez papier filtracyjny. Okres ten (filtracji nieustalonej) trwa od chwili rozpoczęcia procesu filtracji do osiągnięcia przez papier maksymalnej ustalonej wartości skuteczności filtracji. Dla filtrów powietrza pojazdów eksploatowanych w warunkach dużego zapylenia powietrza (samochody ciężarowe, pojazdy specjalne i wojskowe) przyjmuje się wymaganą wartość skuteczności filtracji na poziomie $\varphi_f = 99,9\%$ [3, 4]. Następujący po nim drugi okres (II) filtracji (nazywany okresem filtracji ustalonej) charakteryzuje się utrzymującymi

się na tym poziomie wartościami skuteczności filtracji. Wraz ze wzrostem masy pyłu m_p zatrzymanego przez papier filtracyjny wkładu, opór przepływu badanego filtru cały czas systematycznie rośnie, odpowiednio od wartości $\Delta p_{fp} = 2,45$ kPa do wartości ponad 8,5 kPa, jaki zanotowano po ostatnim cyklu pomiarowym. Opór przepływu filtru zanotowany na kolektorze zbiorczym przyjmuje odpowiednio wartości $\Delta p_{fk} = 1,085$ kPa i 7,166 kPa.

Jednoczesny wzrost skuteczności filtracji i oporu przepływu papierowego wkładu filtracyjnego wskutek zatrzymywania masy pyłu jest zjawiskiem znanym i zgodnym z informacjami literaturowymi podawanymi dla filtrów przegrodowych, a wynika ze zmian struktury przegrody filtracyjnej wskutek zatrzymywania i osadzania się ziaren pyłu na włóknach w efekcie działania mechanizmów filtracji. W okresie filtracji nieustalanej zjawisko to zachodzi głównie na pierwszych warstwach włókien i wraz z upływem czasu postępuje w głąb materiału. Skutkiem tego zjawiska jest utrudniony swobodny przepływ przez złożę, co uwidacznia się wzrostem oporu przepływu.

Po zatrzymaniu przez filtr masy pyłu $m_p \approx 4600$ g zauważa się nieznaczny systematyczny spadek skuteczności filtracji do $\varphi = 99,7\%$, co może być sygnałem „przebicia” papieru filtracyjnego, a tym samym początkiem utraty właściwości filtracyjnych filtru. Dalsza praca filtru powietrza jest niewskazana. W rzeczywistości wiąże się to z przedostawaniem się z powietrzem wlotowym do silnika zwiększonej masy pyłu, w tym o większych rozmiarach, szczególnie niebezpiecznych dla powierzchni elementów silnika.

8. Badanie chłonności filtru

Według normy PN-S-34040 chłonność filtru Δm definiowana jest jako masa pyłu zatrzymana przez filtr do chwili [14]:

- 1) osiągnięcia przez filtr przy nominalnym strumieniu powietrza oporów równych 200% wartości oporów zmierzonych dla czystego filtru powietrza lub,
- 2) spadku skuteczności filtracji poniżej wartości ustalonej dla danego typu filtru.

Chłonność filtru zmierzona w tych warunkach nie powinna być mniejsza od wartości teoretycznej obliczonej według zależności [14]:

$$\Delta m_t = k \cdot Q_{\max} \quad [\text{g}], \quad (5)$$

gdzie: k — współczynnik zależny od rodzaju filtru [$\text{g} \cdot \text{min}/\text{m}^3$];

Q_{\max} — nominalny strumień powietrza przepływający przez filtr [m^3/min].

Jeżeli zmierzona chłonność filtru Δm_t ma wartość większą od obliczonej teoretycznie Δm_t , a skuteczność filtracji nie spada poniżej wartości ustalonej, to określoną eksperymentalnie w ten sposób wartość oporu przepływu badanego filtru można uznać za wartość dopuszczalną Δp_{fdop} .

Opór przepływu filtru powietrza z czystymi wkładami filtracyjnymi mierzony na przewodzie zbiorczym osiąga przy $Q_{GFmax} = 1250 \text{ m}^3/\text{h}$ wartość $\Delta p_{fp} = 2,45 \text{ Pa}$. Wtedy 200% wartości oporu przepływu czystego filtru powietrza wynosi $\Delta p_{fp200} = 4,9 \text{ kPa}$. Z rysunku 11 wynika, że masa pyłu zatrzymana przez wkład filtracyjny do chwili osiągnięcia przez filtr przy Q_{GFmax} oporów równych $\Delta p_{fp200} = 4,9 \text{ Pa}$ ma wartość $m_{p200} = 3700 \text{ g}$, natomiast masa pyłu zatrzymana do chwili spadku skuteczności filtracji poniżej wartości ustalonej ($\varphi = 99,7\%$) dla danego typu filtru wynosi $m_p \approx 4600 \text{ g}$.

Według normy PN-S-34040 dla tego rodzaju filtrów powietrza współczynnik $k = 140 \text{ g} \cdot \text{min}/\text{m}^3$. Dla nominalnego strumienia powietrza $Q_{max} = Q_{GFmax} = 1250 \text{ m}^3/\text{h} = 20,83 \text{ m}^3/\text{min}$ wymagana powyższą normą chłonność filtru zgodnie z zależnością (5) nie powinna mieć wartości mniejszej niż:

$$\Delta m_t = 140 \cdot 20,83 = 2917 \text{ [g]}.$$

Jest to więc wartość mniejsza niż wyznaczona eksperymentalnie z obu warunków 1 i 2. Wynika z tego, że zaprojektowany filtr powietrza spełnia warunek wymaganej chłonności pyłowej. Ponieważ do chwili zatrzymania przez filtr przy nominalnym strumieniu powietrza masy pyłu $m_{p200} = 3700 \text{ g}$ nie zarejestrowano spadku skuteczności filtracji, to wartość oporu przepływu $\Delta p_{fp200} = 4,9 \text{ kPa}$ badanego filtru należy uznać jako wartość dopuszczalną Δp_{fdop} . W warunkach rzeczywistego zamocowania filtru powietrza w pojeździe nie ma możliwości pomiaru oporu przepływu Δp_{fp} na przewodzie, tak jak wykonywano to w warunkach laboratoryjnych. Jest natomiast możliwość takiego pomiaru na kolektorze zbiorczym. Jeżeli podłączony w tym miejscu czujnik ciśnienia wskaże wartość $\Delta p_{fk} = 3,8 \text{ kPa}$, znaczy to, że filtr powietrza osiągnął dopuszczalny opór przepływu $\Delta p_{fdop} = 4,9 \text{ kPa}$ (rys. 13).

9. Podsumowanie

Zaprojektowany i wykonany prototyp przegrodowego filtru powietrza do silnika UTD-20 bojowego wozu piechoty — BWP-1 ma prostą i trwałą konstrukcję, a papierowe elementy filtracyjne są typowymi, powszechnie dostępnymi materiałami eksploatacyjnymi. Zaproponowany filtr przegrodowy charakteryzuje się 2,5-krotnie mniejszymi oporami przepływu niż oryginalny filtr multicyklonowy, co powinno umożliwić (przy odpowiednim zwiększeniu dawki paliwa) poprawę parametrów efektywnych silnika, a w efekcie poprawę dynamiki pojazdu. Określenie całkowitej

skuteczności filtracji i sumarycznych oporów przepływu kompletnego systemu filtracji silnika UTD-20 bojowego wozu piechoty możliwe będzie po wykonaniu pierwszego stopnia filtracji — odpylacza bezwładnościowego. Należy się wtedy liczyć ze wzrostem początkowych oporów przepływu i skuteczności filtracji oraz wydłużeniem okresu użytkowania pojazdu do chwili osiągnięcia oporu dopuszczalnego.

Celowe jest wykonanie badań eksploatacyjnych mających na celu ustalenie przebiegu pojazdu limitowanego osiągnięciem przez zaprojektowany system filtracji oporu dopuszczalnego równego $\Delta p_{fdop} = 4,9$ kPa.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2009 jako projekt badawczy N504-O/0010/32.

Artykuł wpłynął do redakcji 20.07.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w październiku 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*, Mann&Hummel GMBH, Ludwigsburg, Niemcy, 2005.
- [5] T. DZIUBAK, *The research of air filtration process on paper partition in the "cyclone — porous partition" system*, Journal of KONES Powertrain and Transport, 14, 2, 2007, 115-124.
- [6] T. DZIUBAK, *Badania możliwości poprawy efektywności odpylania powietrza wlotowego w filtrze silnika wojskowego pojazdu gąsienicowego*, Biul. WAT, 50, 9 (589), 2001, 109-125.
- [7] T. DZIUBAK, G. TRAWIŃSKI, *Badania eksperymentalne wpływu oporu przepływu filtru powietrza na parametry pracy silnika T359E*, Biul. WAT, 50, 4 (584), 2001.
- [8] T. DZIUBAK, *Problemy filtracji powietrza w silnikach spalinowych pojazdów eksploatowanych w warunkach dużego zapylenia powietrza*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, PAN, 4 (124), 2000.
- [9] J. GEORGE, R. FORNA, T. CRAVERO, *Air Filtration with Fine Polymeric Fibers*, 16th Annual Technical Conference and Exposition 2003, Technical Sessions Papers, Reno-Nevada, June 17-20, 2003.
- [10] T. DZIUBAK, *Badania eksperymentalne minicyklonu zwrotnego z wlotem stycznym*, Biul. WAT, 44, 3-4, 1995, 113-125.
- [11] H. ERDMANNSDÖRFER, *Lesttingmöglichkeiten von Papierfiltern zur Reinigung der Ansaugluft von Dieselmotoren*, MTZ, 32, 4, 1971.
- [12] 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.
- [13] K. GRAHAM, M. OUYANG, T. RAETHER, T. GRAFE, B. McDONALD, P. KNAUF, *Polymeric Nanofibers in Air Filtration Applications*, 5th Annual Technical Conference & Expo of the American Filtration & Separations Society, Galveston, Texas, April 9-12, 2002.

- [14] PN-S-34040, *Filtry powietrza, Wymagania i badania*, PKN, 1996.
- [15] PowerCore™, *Innovative Air Filter Technology*, www.donaldson.com.
- [16] J. W. SCHAEFFER, L. M. OLSON, *Air Filtration Media for Transportation Applications*, Filtration & Separation, 35, 2, 1998.
- [17] S. SZCZECIŃSKI i in., *Turbinowe napędy samochodów*, WKŁ, Warszawa, 1974.

T. DZIUBAK, G. TRAWIŃSKI

Inlet air filtration efficiency tests of UTD-20 engine of BWP-1 vehicle

Abstract. Filtration systems of inlet air used in vehicle combustion engines are characterized. The parameters of air for motor vehicles filtration efficiency assessment are presented. The basic mechanisms of filtration at porous partition are described. The possibilities of air purification efficiency improvement for UTD-20 engine of BWP-1 vehicle were analysed. Specific features of air inlet system of BWP-1 vehicle UTD-20 engine are shown. The tests results of purification efficiency and air flow drag for BWP-1 vehicle air filter standard version are presented. The necessity of UTD-20 engine air supplying system constructional changes are proved. Two-stage inlet air filtration system for engine BWP-1 is proposed. There is designed and made the second stage of air filtration system — the porous filter. The characteristics of the air purification efficiency $\varphi = f(m_p)$ and flow drag $\Delta p = f(m_p)$ $\Delta p = f(Q_G)$ for designed air filter were done. Absorbency of filter for air nominal stream of engine BWP-1 was specified.

Keywords: combustion engines, two-stage filter, multicyclone, filter characteristics

Universal Decimal Classification: 621.43