

Tadeusz DZIUBAK¹
Grzegorz TRAWIŃSKI²

BADANIA EKSPERYMENTALNE WPLYWU MODYFIKACJI UKŁADU DOLOTOWEGO NA EFEKTYWNOŚĆ FILTRACJI POWIETRZA WLOTOWEGO I OSIĄGI SILNIKA BOJOWEGO WOZU PIECHOTY

Pokazano charakterystyczne cechy układu zasilania powietrzem silnika UTD-20 bojo-wego wozu piechoty BWP-1. Przedstawiono wyniki badań skuteczności filtracji i oporów przepływu standardowego filtra powietrza BWP-1. Wykazano konieczność zmian konstrukcyjnych układu zasilania powietrzem silnika UTD-20. Zaproponowano i wykonano system filtracji powietrza wlotowego do silnika BWP-1 w postaci filtra przegrodowego. Określono charakterystyki skuteczności filtracji $\varphi = f(m_p)$ i oporu przepływu $\Delta p = f(m_p)$, $\Delta p = f(Q_G)$ oraz chłonność pyłową dla zaprojektowanego filtra przegrodowego. Określono na hamowni silnikowej wpływ zmodernizowanego filtra powietrza oraz wzrostu dawki paliwa na parametry efektywne silnika. Wyznaczono wpływ proponowanych zmian na przebieg momentu indukowanego i efektywnego podczas swobodnego rozpędzania silnika oraz na jego sprawność mechaniczną.

THE EXPERIMENTAL RESEARCH OF AIR SUPPLY SYSTEM MODIFICATION ON INLET AIR FILTRATION EFFICIENCY AND MILITARY VEHICLE ENGINE EFFECTIVENESS IMPROVEMENT

Specific features of air inlet system of BWP-1 vehicle UTD-20 engine are shown. The tests results of filtration 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. The inlet air filtration system for BWP-1 engine with the porous filter was proposed and performed. 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 determined. Absorbency of filter for air nominal stream of engine BWP-1 was specified. The influence of modernized air filter and fuel dose increase on engine effective parameters were determined. There were determined the influence the proposed changes on indicated and effective torque during engine free acceleration and its mechanical efficiency as well.

¹ Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia Techniczna, 00-908 Warszawa, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, tel./fax. (+48) 22-6837121, tdziubak@wat.edu.pl

² Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia Techniczna, 00-908 Warszawa, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, tel./fax. (+48) 22-6837046, gtrawinski@wat.edu.pl

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, bwp, działa samobieżne) wyposażonych w silniki o zapłonie samoczynnym (ZS) dużej mocy oraz silniki turbinowe. Maksymalne zapotrzebowanie powietrza Q_{sil} takich silników znacznie przekracza wartość 1 kg/s, na przykład: dla silnika czołgu T-72 wynosi $Q_{sil} = 1,21$ kg/s, (3400 m³/h). Jeżeli zapylenie powietrza ma wartość $s = 1$ g/m³, to silnik czołgu T-72 zasysa prawie 1 g pyłu w ciągu sekundy. Z tego względu pojazdy specjalne wyposaża się w filtry realizujące dwustopniową filtrację powietrza, gdzie pierwszym stopniem oczyszczania jest odpylacz bezwładnościowy (multicyklon lub monocyklon), a drugim, ustawiona za nim szeregowo, przegroda porowata.

Multicyklony charakteryzują się skutecznością odpylania dochodzącą do $\phi = 96\%$ i dokładnością powyżej $d_z = 15 \div 30$ μm [1, 4, 6]. Dla monocyklonów parametry te wynoszą odpowiednio $\phi = 50 \div 70\%$ i $d_z = 40 \div 50$ μm [1]. Materiały stosowane na przegrody porowate zapewniają wysoką (ponad 99 %) skuteczność i dokładność (powyżej $3 \div 5$ μm) filtracji [1, 2, 4]. Największe zużycie elementów silnika (np.: skojarzenie tłok - pierścienie tłokowe - cylinder) powodują ziarna pyłu o rozmiarach $2 \div 35$ [1, 3, 7] i dlatego powinny być one zatrzymywane z największą skutecznością.

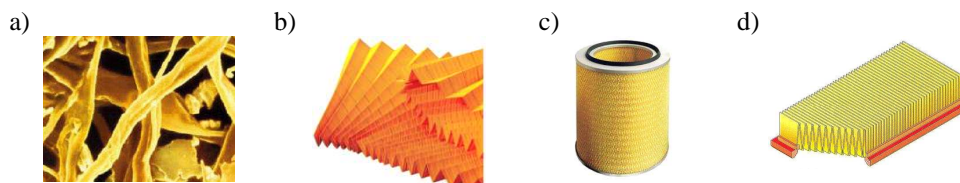
W układzie doprowadzenia powietrza do silnika UTD-20 bojowego wozu piechoty BWP-1 jedynym filtrem jest multicyklon, który, jak wynika z powyższych informacji, nie zapewnia wymaganej skuteczności i dokładności filtracji powietrza wlotowego. Stąd wynikają podjęte działania mające na celu poprawienie efektywności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

2. CHARAKTERYSTYKA SYSTEMÓW FILTRACJI POWIETRZA WLOTOWEGO DO SILNIKÓW SPALINOWYCH POJAZDÓW MECHANICZNYCH

Do filtracji powietrza wlotowego silników samochodów osobowych, które eksploatowane są w warunkach małego zapylenia powietrza ($s = 0,001 \div 0,005$ g/m³) stosowane są filtry jednostopniowe, gdzie elementem filtracyjnym jest przegroda porowata – najczęściej filtracyjny wkład papierowy. Pojazdy eksploatowane w warunkach dużego zapylenia powietrza ($s > 1$ g/m³) wyposaża się w dwustopniowe filtry powietrza, 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. 1a), której produkowane są 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. 1b), z której następnie może być w różny sposób zmontowany wkład filtracyjny kształtowany najczęściej w cylindry o podstawie koła lub owalu oraz jako panelowe – rys. 1c, d.



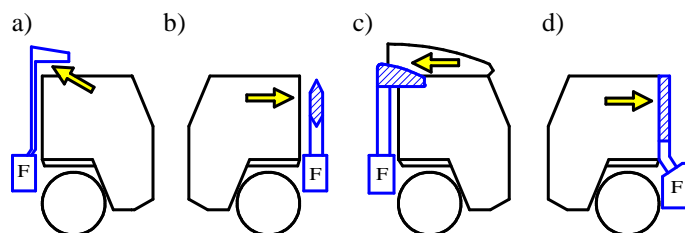
Rys. 1. Rodzaje papierowych wkładów filtracyjnych filtrów powietrza: a) struktura papieru filtracyjnego, b) papier filtracyjny po plisowaniu, c) wkład cylindryczny o podstawie koła, d) wkład panelowy

Wkład filtracyjny kształtuje się tak, aby uzyskać największą powierzchnię w jednostce 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 [1, 4].

Na przegrody porowate stosowane są też włókniny oraz nowłókna, produkowane technologią „electrospinningu” lub metodą meltblown, które umożliwiają wytwarzanie włókien o średnicach w zakresie $1 \div 2000$ nm [8]. Nanowłókna są formowane w tak zwaną nanosieć, która może mieć grubość $1 \div 5$ μm , przez co charakteryzuje się małymi oporami przepływu [3, 4, 8]. Ze względu na ograniczone właściwości mechaniczne cienkiej warstwy nanosieci, nakłada się ją na podłoże z konwencjonalnych materiałów filtracyjnych (celuloza), które mają większą wytrzymałość. Zastosowanie nanowłókien zdecydowanie podnosi skuteczność filtracji, szczególnie ziaren pyłu poniżej 5 μm , bez istotnego wzrostu spadku ciśnienia na przegrodzie filtracyjnej.

Filtry powietrza silników pojazdów osobowych, ze względu na małe wymiary, montowane są w przedziale silnikowym. Wkład filtracyjny wykonany jest w postaci prostopadłościennego panelu, natomiast powietrze do filtru zasysane jest najczęściej bezpośrednio z otoczenia czerpnią 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. 2.

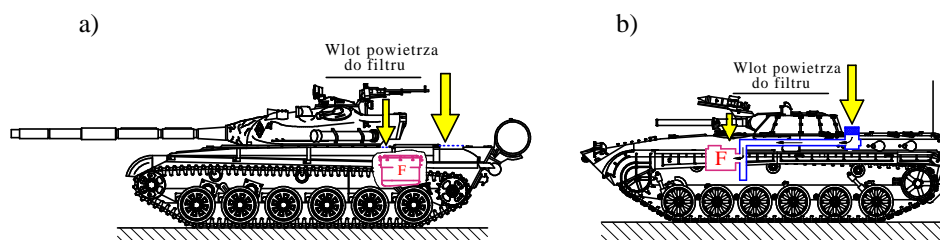


Rys. 2. Schematy typowego usytuowania czerpni powietrza i filtru w wybranych pojazdach ciężarowych: a) Jelcz C-424, b) Volvo FL8, c) Volvo FH16/520, d) Iveco Euro Cargo 8060

Zapewnia to łatwy dostęp podczas prac obsługowych, a filtr nie jest narażony na oddziaływanie drgań silnika, lecz tylko drgania nadwozia. Czerpnię filtru powietrza, lokalizuje się, najczęściej nad kabiną w miejscu zapewniającym zasysanie powietrza o jak najmniejszym stężeniu zapylenia.

W wojskowych pojazdach gąsienicowych (czołgi, transportery, bojowe wozy piechoty) filtry powietrza umieszcza się wewnątrz szczelnego pancerza (rys. 3). 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 zasysane jest z otoczenia czerpnię znajdującą się za wieżą (rys. 4b) i doprowadzane jest specjalnym kanałem (magistralą podwieżową) znad powierzchni pancerza, a w warunkach zimowych dodatkowo przez chłodnicę.

W obecnej chwili najszerze 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 samochodów ciężarowych na przykład Volvo, Scania, DAF.



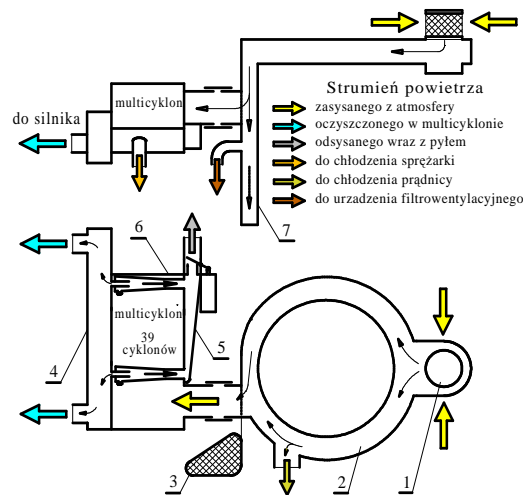
Rys. 3. Miejsce poboru powietrza oraz schemat lokalizacji filtru: a) w czołgu T-72, b) w bojowym wozie piechoty BWP-1

3. CHARAKTERYSTYKA UKŁADU ZASILANIA POWIETRZEM SILNIKA UTD-20

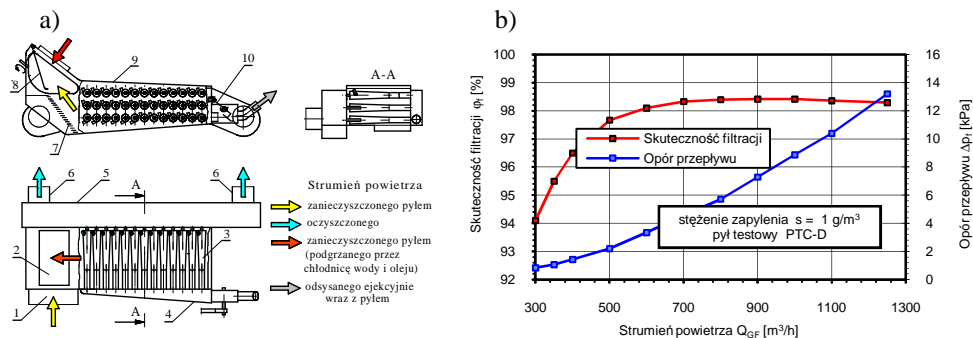
Układ zasilania powietrzem silnika UTD-20 BWP-1 (rys. 4) charakteryzuje się skomplikowaną budową i znaczną długością oraz złożonością kształtów poszczególnych jego części składowych. Filtr powietrza jest odpylacz bezwładnościowy (multicyklon) zbudowany z cyklonów zwrotnych z wlotem stycznym, usytuowanych poziomo w trzech rzędach (po 13 cyklonów w każdym), zamkniętych w szczelnej, przypominającej prostopadłościan skrzyni, do której dopływ powietrza następuje króćcem wlotowym z magistrali podwieżowej oraz częściowo otworem wlotowym z otoczenia chłodnicy.

Powietrze atmosferyczne zasysane jest do układu, czerpnię 1 (rys. 4a) umieszczoną nad górną płytą pancerną za wieżą, a następnie transportowane jest pierścieniową magistralą podwieżową 2, rozmieszczoną wokół łożyska wieży, do multicyklonu filtru. Często zmieniające się objętości i przekroje układu zasilania powietrzem silnika UTD-20, są przyczyną zmian prędkości przepływającego powietrza i źródłem zwiększonych oporów przepływu. Oczyszczone w cyklonach powietrze napływa do zbiorczego kolektora 4, skąd

dwoma cylindrycznymi króćcami napływa do kolektorów silnika. Zatrzymany przez cyklony pył magazynowany jest w osadniku pyłu 5, skąd (na bieżąco) w wyniku efektywnego działania spalin usuwany jest na zewnątrz pojazdu.



Rys. 4. 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



Rys. 5. Filtr powietrza silnika UTD-20 BWP-1: a) schemat funkcjonalny: 1 – króciec wlotowy powietrza do filtru, 2 – otwór wlotu ciepłego powietrza, 3 – cyklon, 4 – osadnik pyłu, 5 – kolektor zbiorczy powietrza wylotowego, 6 – króćce wylotowe powietrza oczyszczonego, 7 – kratka filtracyjna, 8 – przysłona wlotu ciepłego powietrza, 9 – multicyklon, 10 – urządzenie odcinające osadnik pyłu od ejektora: b) charakterystyki skuteczności odpylenia $\varphi_f = f(Q_{GF})$ i oporów przepływu $\Delta p_f = f(Q_{GF})$

Z charakterystyki skuteczności odpylania $\varphi_f = f(Q_{GF})$ oraz charakterystyki oporów przepływu $\Delta p_f = f(Q_{GF})$ filtru powietrza BWP-1 (rys. 5b) wynika, że wraz ze wzrostem strumienia powietrza przepływającego przez filtr (wypływającego z filtru) Q_{GF} następuje wzrost skuteczności odpylania φ_f oraz jednoczesny wzrost oporów przepływu Δp_f . W pierwszym okresie pracy filtru w zakresie małych wartości strumienia powietrza ($Q_{GF} = 300 \div 600 \text{ m}^3/\text{h}$) wzrost skuteczności odpylania φ_f jest znaczny. Powyżej $600 \text{ m}^3/\text{h}$ skuteczność φ_f stabilizuje się na stałym poziomie nieznacznie przekraczając wartość 98 %. Wraz ze wzrostem strumienia powietrza Q_{GF} następuje ciągły (paraboliczny) wzrost oporów przepływu Δp_f filtru od wartości $\Delta p_f = 0,85 \text{ kPa}$ (dla $Q_{GFmin} = 300 \text{ m}^3/\text{h}$) do wartości $\Delta p_f = 13,21 \text{ kPa}$ $Q_{GFmax} = 1250 \text{ m}^3/\text{h}$. Taki przebieg skuteczności odpylania powietrza i oporów przepływu w multicyklonie jest odzwierciedleniem pracy pojedynczych cyklonów i jest zgodny z informacjami literaturowymi [1, 3, 4].

Filtr powietrza BWP-1 charakteryzuje się więc bardzo dużymi ($5 \div 13 \text{ kPa}$) oporami przepływu w eksploatacyjnym zakresie pracy, znacznie przekraczającymi dopuszczalne wartości Δp_{fdop} jakie są stosowane dla silników innych pojazdów (np. dla silnika MAN DO826 samochodu STAR 1466 wartość $\Delta p_{fdop} = 5 \text{ kPa}$). Powoduje to negatywne skutki jeśli chodzi o moc silnika i dynamikę ruchu pojazdu. Wzrost oporu przepływu filtru powietrza Δp_f o wartość 1 kPa powoduje średnio spadek mocy o $0,4 \div 0,6\%$ i wzrost jednostkowego zużycia paliwa silnika o ZS o około $0,3 \div 0,5\%$ [5].

Analiza stosowanego w BWP-1 filtru powietrza wykazała, że nie spełnia on wymagań stawianych współczesnym filtrom powietrza trakcyjnych silników spalinowych pojazdów eksploatowanych w warunkach dużego zapylenia powietrza, zwłaszcza dotyczących możliwie małych oporów przepływu oraz zapewnienia odpowiednio wysokiej skuteczności filtracji cząstek zanieczyszczeń o małych wymiarach.

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 $1 \mu\text{m}$;
- dopuszczalny opór przepływu nie przekraczający $6 \div 7 \text{ kPa}$;
- duża chłonność zanieczyszczeń materiału filtracyjnego;
- małe wymiary i masa;
- prosta konstrukcja i obsługa;
- długi okres międzyobsługowy - do 100 000 km przebiegu dla pojazdów kołowych.

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 filtru 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

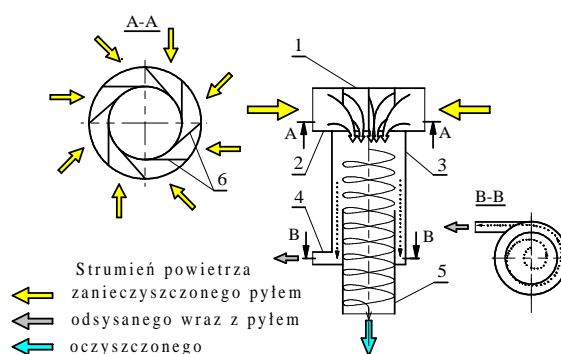
Dla silnika UTD-20 zaproponowano dwa warianty systemu filtracji powietrza:

A. Jednostopniowy system filtracji powietrza wlotowego w postaci filtru przegrodowego z papierowymi wkładami filtracyjnymi (rys. 7). Napływ powietrza do filtru następował będzie bezpośrednio z otoczenia przewodem i pompą usytuowaną bezpośrednio nad przednim pancierzem.

B. Dwustopniowy system filtracji powietrza wlotowego w następującej konfiguracji:

a) pierwszy stopień filtracji powietrza - bezwładnościowy odpylacz osiowy z bocznym doprowadzeniem powietrza, umieszczony za wieżą, w miejscu, gdzie dotychczas znajduje się pompa powietrza (odpylacz spełniał będzie jednocześnie rolę pompy powietrza – rys. 6) lub bezpośrednio nad filtrem przegrodowym (nad przednim pancierzem),

b) drugi stopień filtracji - filtr przegrodowy z papierowymi wkładami filtracyjnymi (rys. 8) w miejsce dotychczas stosowanego filtru-multicyklonu.

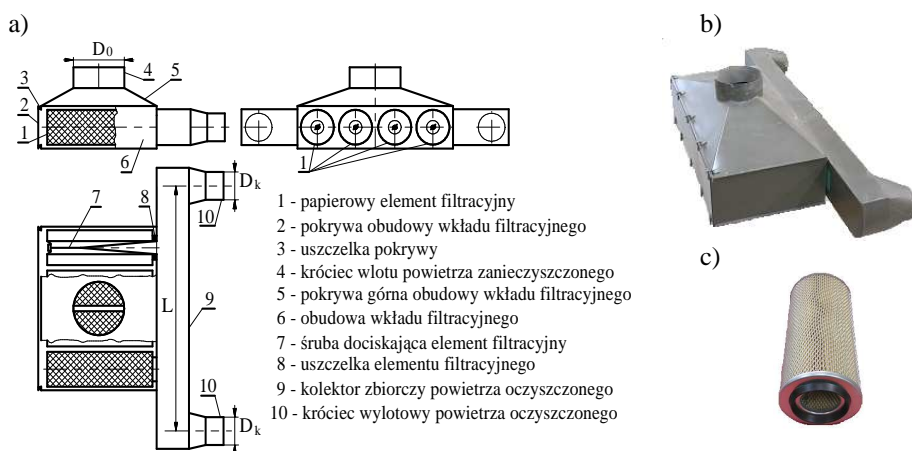


Rys. 6. Schemat funkcjonalny odpylacza bezwładnościowego z bocznym wlotem powietrza: 1 – zawirowywacz, 2 – okna wlotowe, 3 – kadłub cylindryczny, 4 – króciec odsysania, 5 – komora separacyjna, 6 – pierścień ustalający, 7 – przewód wylotowy powietrza

Zadaniem odpylacza bezwładnościowego jest odseparowanie z powietrza wlotowego ziaren pyłu o większych rozmiarach (powyżej $5\div 30\ \mu\text{m}$) 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. 6) 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. 7): obudowy wkładu filtracyjnego 6 wraz z wlotem powietrza, wkładu filtracyjnego 1, kolektora zbiorczego powietrza oczyszczonego 9. Zaproponowany zakres zmian wynika między innymi z konieczności usytuowania zmodernizowanego zespołu filtracyjnego w ograniczonej przestrzeni przedziału silnikowego.



Rys. 7. Prototyp przegrodowego filtra powietrza bojowego wozu piechoty: a) schemat konstrukcyjny, b) widok ogólny, c) element filtracyjny

Wkładem filtracyjnym jest zespół czterech ułożonych względem siebie równolegle cylindrycznych elementów filtracyjnych o symbolu AM 406/1 (rys. 7c) 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 dwoma króćcami powietrza wylotowego 10 umożliwiającymi podłączenie filtra do kolektorów dolotowych silnika.

6. METODYKA BADAŃ FILTRU PRZEGRODOWEGO

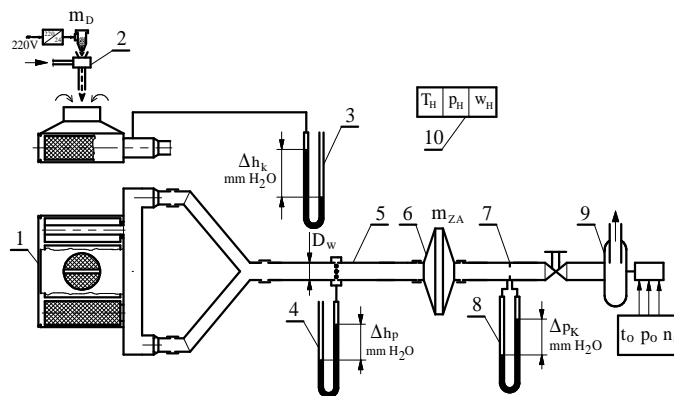
Badania eksperymentalne wykonanego filtra powietrza przeprowadzono na stanowisku (rys. 8), które umożliwia wykonywanie podstawowych charakterystyk: skuteczności odpylania oraz oporu przepływu filtrów powietrza zakresie strumienia powietrza $Q_{GF} = 300 \div 2000$ m³/h dla stężenia zapylenia do 2 g/m³.

Zakres badań obejmował wyznaczenie następujących charakterystyk filtra:

- aerodynamicznych $\Delta p_f = f(Q_{GF})$ (dla filtra z czystym wkładem filtracyjnym i po badaniach skuteczności);
- skuteczności filtracji $\varphi_f = f(m_p)$; m_p – masa pyłu zatrzymana na wkładzie filtra;
- oporu przepływu $\Delta p_f = f(m_p)$.

Badania charakterystyk aerodynamicznych $\Delta p_f = f(Q_{GF})$ przeprowadzono w zakresie strumienia powietrza $Q_{GF} = (350 \div 1250) \text{ m}^3/\text{h}$ odpowiadającego objętościowemu zaprzebowaniu powietrza przez silnik (wyptywającego z filtru) w zakresie prędkości obrotowej silnika $n_{min} \div n_{max}$.

Opór przepływu filtru powietrza określono jako spadek ciśnienia statycznego w przewodzie pomiarowym za filtrem Δp_{fp} i w zbiorczym kolektorze filtru powietrza Δp_{fk} dla kolejnych wytypowanych wartości strumienia powietrza Q_{GF} powtarzając pomiar n – krotnie.



Rys. 8. Schemat stanowiska do badań filtru 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 filtru powietrza, 6 – filtr mierniczy pyłu (absolutny), 7 – kryza pomiarowa, 9 – wentylator wytwarzający strumień powietrza Q , 10 – zestaw do pomiaru warunków otoczenia

Charakterystyki skuteczności filtracji $\varphi_f = f(m_p)$ i oporów przepływu $\Delta p_f = f(m_p)$ filtru powietrza wyznaczono dla strumienia powietrza $Q_{max} = 1250 \text{ m}^3/\text{h}$ 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 τ_c na podstawie zależności:

$$\varphi = \frac{m_P}{m_D} = \frac{m_D - m_A}{m_D} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

gdzie: m_p – masa pyłu zatrzymana w czasie τ_c przez filtr; m_D – masa pyłu wprowadzona równo-miernie (w czasie τ_c) do filtru wraz ze strumieniem powietrza wlotowego $Q_{OF max}$; m_A – masa pyłu zatrzymana w czasie τ_c przez filtr mierniczy (absolutny).

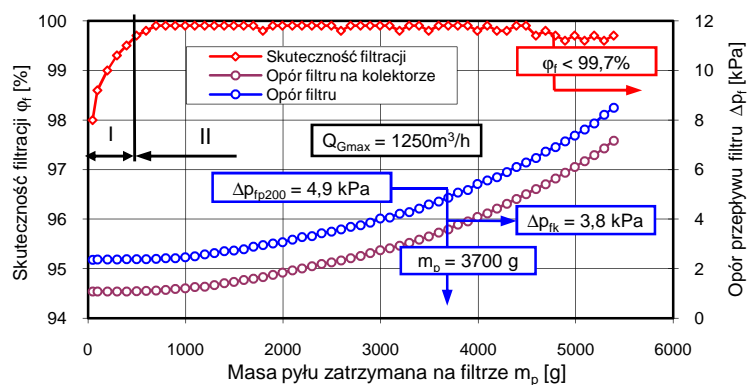
Do określenia skuteczności filtracji powietrza w filtrze stosowano pył testowy PTC-D będący krajowym zamiennikiem pyłu testowego AC Fine o maksymalnych rozmiarach ziaren $d_z = 80 \mu\text{m}$ i zawartości w nim SiO_2 - 69% oraz Al_2O_3 - 17%.

6. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ FILTRU PRZEGRODOWEGO

Wyniki badań charakterystyk skuteczności filtracji φ_f i oporu przepływu Δp_f w funkcji masy zatrzymanego pyłu m_p zaprojektowanego filtra powietrza BWP-1 przedstawiono na rysunku 9. Wraz ze wzrostem masy pyłu m_p zatrzymanego przez papier filtracyjny wkładu, opór przepływu Δp_f badanego filtra 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 filtra zanotowany na kolektorze zbiorczym przyjmuje odpowiednio wartości $\Delta p_{fk} = 1,097$ kPa i 7,166 kPa.

Ze względu na osiągnięte wartości skuteczności filtracji, czas pracy badanego filtra można podzielić umownie na dwa okresy. Pierwszy (I), charakteryzujący się małymi wartościami skuteczności filtracji, które systematycznie i gwałtownie wzrastają wraz 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. Następujący po nim drugi okres (II) filtracji (okres filtracji ustalonej) charakteryzuje się znacznie większymi i utrzymującymi się na stałym poziomie wartościami skuteczności filtracji. W przypadku badanego filtra przyjęto strefę rozdziału obu okresów z chwilą uzyskania przez papier skuteczności filtracji $\varphi_f = 99,5\%$.

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 różnych mechanizmów filtracji.



Rys. 9. Charakterystyki skuteczności filtracji $\varphi_f = f(m_p)$ i oporów przepływu $\Delta p_f = f(m_p)$ zaprojektowanego przegrodowego filtra powietrza

Po zatrzymaniu przez filtr masy pyłu $m_p = 4591,2$ g zauważa się nieznaczny systematyczny spadek skuteczności filtracji do $\varphi = 99,6\%$, co może być sygnałem „przebiecia” papieru filtracyjnego, a tym samym początkiem utraty właściwości filtracyjnych filtra i chłonności.

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

- a) osiągnięcia przez filtr przy nominalnym strumieniu powietrza oporów równych 200% wartości oporów zmierzonych dla czystego filtru powietrza;
- b) 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:

$$\Delta m_t = k \cdot Q_{GF \max} \text{ [g]} \quad (2)$$

gdzie: k – współczynnik zależny od rodzaju filtru.

Dla współczynnika $k = 140 \text{ g min/m}^3$ oraz strumienia powietrza $Q = 1250 \text{ m}^3/\text{h} = 20,83 \text{ m}^3/\text{min}$ wymagana normą PN-S 34040 chłonność filtru ma zgodnie z powyższą zależnością wartość: $\Delta m_t = 140 \cdot 20,38 = 2917 \text{ g}$.

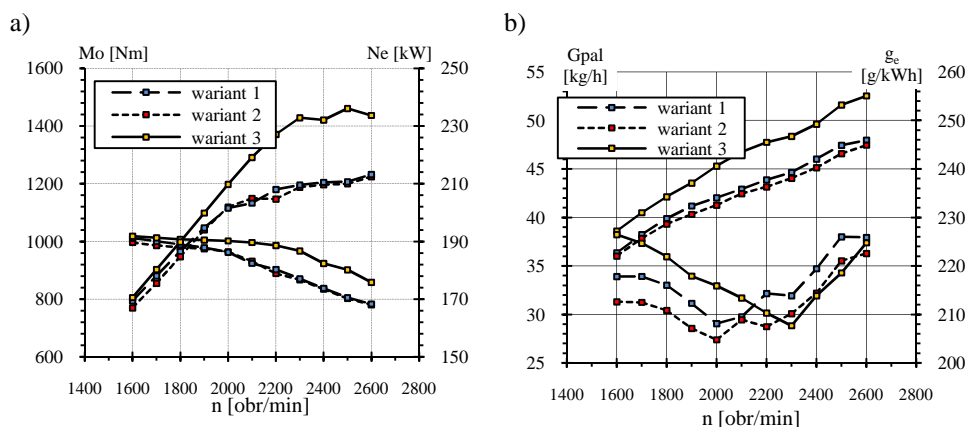
Opór przepływu filtru powietrza z czystymi wkładami filtracyjnymi mierzony na przewodzie zbiorczym osiąga wartość $\Delta p_{fp} = 2,45 \text{ kPa}$ przy $Q_{GF \max} = 1250 \text{ m}^3/\text{h}$, wtedy 200% wartości oporu zmierzonego dla czystego filtru powietrza wynosi $\Delta p_{fp200} = 4,9 \text{ kPa}$. Masa pyłu zatrzymana przez wkład filtracyjny do chwili osiągnięcia przez filtr przy nominalnym strumieniu powietrza oporów równych $\Delta p_{fp200} = 4,9 \text{ kPa}$ (rys. 9) ma wartość $m_{p200} = 3700 \text{ g}$. 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_{dop} . Wynika z tego, że zaprojektowany filtr powietrza spełnia warunek wymaganej chłonności pyłowej.

7. BADANIA NA HAMOWNI SILNIKOWEJ I W STANACH NIEUSTALONYCH

Zaprojektowany i wykonany filtr przegrodowy powietrza poddano badaniom porównawczym na stanowisku hamownianym. Badania obejmowały porównanie parametrów efektywnych (wyznaczonych dla maksymalnego obciążenia) silnika UTD-20 wyposażonego w standardowy filtr powietrza (wariant 1), filtr zmodernizowany (wariant 2) oraz dodatkowo, dla filtru zmodernizowanego, z pompą wtryskową ze zwiększoną o około 7% dawką paliwa (wariant 3). Metodyka i sposób realizacji wykonanych badań dostosowane były do zaleceń podanych o odpowiednich polskich normach. Wybrane wyniki badań pokazano na rys. 10 i 11.

Dla silnika w drugim wariantcie kompletacji uzyskano nieznaczny przyrost parametrów efektywnych, w prawie całym zakresie prędkości obrotowych, w porównaniu do silnika wzorcowego (wariant 1). Największy przyrost obserwuje się dla prędkości obrotowych 1600...1800 obr/min (ponad 1 %), najmniejszy dla zakresu prędkości 2300...2600 obr/min (0,4 % - w granicach błęd pomiaru). Obserwowany nieznaczny wzrost mocy i momentu obrotowego dla tego wariantu kompletacji silnika uzyskano dla mniejszego godzinowego zużycia paliwa (średnio o 1,5 %). Uzasadnia to sformułowanie tezy, że przy tym samym dawkowaniu paliwa (G_{pal}), można by uzyskać przyrost parametrów efektywnych tego samego rzędu.

Dla silnika ze zwiększoną dawką paliwa i ze zmodernizowanym filtrem powietrza (wariant 3) uzyskano znaczny przyrost mocy i momentu obrotowego. Im większa prędkość obrotowa, tym (generalnie) większy wzrost parametrów efektywnych. Wynosi on nieco ponad 2% (dla prędkości obrotowej 1600 obr/min) oraz ponad 10% dla prędkości obrotowych 2200...2600 obr/min, przy nieznacznym (poniżej 2%) zwiększeniu jednostkowego zużycia paliwa w porównaniu do wartości uzyskanych dla wariantu 1. Wzrost ten jest znacznie mniejszy niż przyrost parametrów efektywnych (N_e , M_o) silnika, który dla rozpatrywanego zakresu prędkości obrotowych (1600...2600 obr/min) wynosi średnio 7%. Świadczy to o efektywniejszym wykorzystaniu zwiększonej ilości paliwa (regulacja pompy) i powietrza (spadek oporów przepływu – wzrost napełnienia). Potwierdza to przyrost temperatury spalin (średnio o 20°C), obserwowany podczas badań.



Rys. 10. Charakterystyki zewnętrzne: a) mocy efektywnej N_e i momentu obrotowego M_o , b) godzinowego G_{pal} i jednostkowego g_e zużycia paliwa silnika UTD-20

Badania wykonano również w warunkach nieustalonych, wyznaczając tzw. charakterystykę dynamiczną silnika, na podstawie której dokonano porównania wartości momentu efektywnego, indykowanego (suma momentu efektywnego i oporów własnych) oraz sprawności mechanicznej silnika UTD-20 dla trzech badanych wariantów jego kompletacji. Pomiar wykonano przy pomocy komputerowego zestawu pomiarowego prędkości obrotowej i przyspieszenia wału korbowego, o dokładności pomiaru prędkości obrotowej $\pm 0,05\%$ [6, 7].

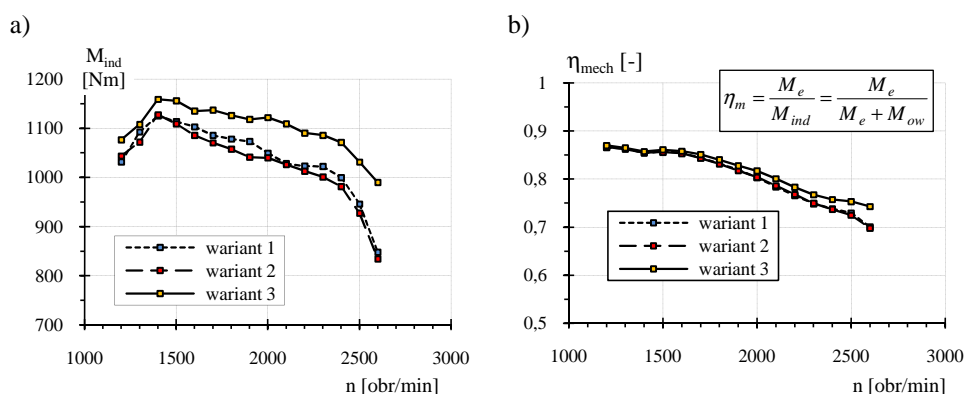
Do analizy przyjmowano wartości średnie momentu obrotowego (efektywnego, oporów własnych) wyznaczone z trzydziestu procesów rozpędzania (3 serie po 11 rozpędzeń – wynik pierwszego rozpędzania odrzucano) w przedziałach prędkości obrotowej o szerokości 100 obr/min.

W pierwszej kolejności za pomocą testów statystycznych porównania wartości średnich c-Cochrana i t-Studenta na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ stwierdzono, że wartości średnie momentu oporów własnych silnika dla wszystkich badanych kompletacji silnika były prawie dla wszystkich rozpatrywanych przedziałów prędkości obrotowej równe. Wskazuje

to na porównywalny stan cieplny silnika (wartość momentu oporów własnych) podczas badań.

Uzyskana w warunkach nieustalonych względna (procentowa) zmiana momentu obrotowego i mocy efektywnej silnika UTD-20 dla poszczególnych wariantów jego kompletacji jest nieco mniejsza (o około 1 %) niż w przypadku pomiarów wykonanych na stanowisku hamownianym.

Moment indykowany silnika ze zmodernizowanym filtrem powietrza oraz zwiększoną dawką paliwa w całym rozpatrywanym przedziale prędkości obrotowej jest większy średnio o około 59,7 Nm (6%) w porównaniu do momentu indykowanego wytwarzanego przez silnik w kompletacji standardowej (rys. 11a). Przyrost momentu indykowanego jest zbliżony do wielkości przyrostu momentu efektywnego silnika wyznaczonego dla pomiarów w warunkach nieustalonych. Na podstawie wyznaczonych charakterystyk dynamicznych wyznaczono przebiegi sprawności mechanicznej η_m silnika UTD-20 (rys. 11b), którą obliczono z zależności podanej na tym rysunku, dla której M_{ind} , M_e , M_{ow} oznaczają odpowiednio moment indykowany, efektywny i oporów własnych określony w warunkach nieustalanej pracy silnika (swobodne rozpędzanie i hamowanie).



Rys. 11. Przebiegi: a) momentu indykowanego, b) sprawności mechanicznej wyznaczone w warunkach nieustalanej pracy silnika UTD-20 dla trzech wariantów jego kompletacji

Dla dwóch pierwszych wariantów kompletacji silnika uzyskano takie same przebiegi sprawności mechanicznej silnika UTD-20. Dla wariantu 3 przyrost sprawności mechanicznej wynosi średnio ponad 1 % i jest zróżnicowany w zależności od prędkości obrotowej. Największy wzrost zaobserwowano dla prędkości powyżej 2000 obr/min, dla których przekracza on 2 %.

8. WNIOSKI

Jednostopniowy system filtracji powietrza wlotowego w postaci filtru przegrodowego z papierowymi wkładami filtracyjnymi (zmodernizowany filtr powietrza o mniejszych oporach przepływu) umożliwił uzyskanie poprawy napełnienia cylindrów, co przy zwiększeniu dawki paliwa o ponad 7 % umożliwiło wzrost parametrów efektywnych

silnika UTD-20 na podobnym poziomie w porównaniu do silnika w wersji standardowej. Uzyskana poprawa parametrów efektywnych widoczna jest zwłaszcza powyżej prędkości obrotowej 2200 obr/min, przekraczając w tym zakresie ponad 10 % (ponad 20 kW).

Poprawa parametrów efektywnych silnika UTD-20 ze zmodernizowanym filtrem powietrza i pompą ze zwiększoną dawką paliwa widoczna jest nie tylko w warunkach quasiustalonej pracy, ale także w warunkach nieustalonych. Podczas swobodnego rozpędzania przyrost mocy i momentu obrotowego jest nieco mniejszy (średnio wynosi 6%) niż dla warunków ustalonych.

Potwierdzeniem uzyskanej poprawy ogólnej efektywności procesu spalania paliwa w silniku UTD-20 jest wzrost jego sprawności mechanicznej wynoszący ok. 1,5 %.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] Baczewski K., Hebda M.: *Filtracja płynów eksploatacyjnych*, MCNEMT, Radom 1991/92.
- [2] Durst M., Klein G., Moser N.: *Filtration in Fahrzeugen*, Mann+Hummel GmbH, Ludwigsburg, Niemcy 2005.
- [3] Dziubak T.: *Analiza procesu filtracji powietrza wlotowego do silników pojazdów specjalnych*, Rozprawa habilitacyjna, WAT, Warszawa 2008.
- [4] Dziubak T.: *Problemy filtracji powietrza w silnikach spalinowych pojazdów eksploatowanych w warunkach dużego zapylenia powietrza*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN, zeszyt 4 (124), 2000.
- [5] Dziubak T., Trawiński G.: *Badania eksperymentalne wpływu oporu przepływu filtru powietrza na parametry pracy silnika T359E*, Biuletyn WAT L, 4 (584), 2001.
- [6] Olchownik W., Pięta A., Trawiński G.: *Komputerowa diagnostyka silnika o ZS na podstawie charakterystyki dynamicznej*, VIII Kongres Eksploatacji Urządzeń Technicznych, Krynica Górská 1997.
- [7] Pięta A., Trawiński G.: *Analiza pomiarów prędkości obrotowej i przyspieszeń kątowych wału korbowego do celów diagnostycznych*, materiały IV Symposium Naukowo-Technicznego „Silniki spalinowe w zastosowaniach wojskowych”, Jurata, październik 1999.
- [8] Schaeffer J. W., Olson L. M.: *Air Filtration Media for Transportation Applications. Filtration & Separation*, Vol. 35, No 2, 1998.