

Jerzy Merkisz, Ireneusz Pielecha, Jacek Pielecha
Politechnika Poznańska

Maciej Szukalski
Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych we Wrocławiu

WPLYW WARUNKÓW PRACY SILNIKÓW POJAZDÓW BOJOWYCH NA EMISJĘ SKŁADNIKÓW SZKODLIWYCH SPALIN I ZUŻYCIE PALIWA

Streszczenie: W artykule przedstawiono rezultaty z badań wpływu warunków pracy silnika spalinowego kołowego transportera opancerzonego na emisję spalin. Pomiarów dokonano na odcinku kilkudziesięciu kilometrów podczas jazdy na odcinkach drogi o różnej charakterystyce. Porównano wpływ pracy standardowej i trybu *overboost* silnika na macierze udziału czasu pracy silnika, emisje składników gazowych, cząstek stałych oraz zużycia paliwa. Na podstawie uzyskanych wyników dokonano analizy warunków pracy pojazdu bojowego w aspekcie emisji spalin oraz zużycia paliwa.

Słowa kluczowe: silniki pojazdów bojowych, rzeczywiste warunki ruchu, zużycie paliwa

1. WSTĘP

Ograniczanie zużycia paliwa przez silniki pojazdów typu *heavy-duty* jest obecnie zagadnieniem często podejmowanym zarówno przez producentów tych silników jak i całych pojazdów. Pomiarów certyfikacyjne przeprowadzane na hamowni silnikowej dotyczą samego silnika, jednak nie przedstawiają żadnej informacji o emisji i zużyciu paliwa podczas rzeczywistych warunków ruchu takiego pojazdu [6]. Pomiarów emisji cząstek stałych i ich rozkładu dotyczących silników spalinowych są często tematem wielu publikacji naukowych [1-2, 11-12]. Wykorzystanie mobilnych analizatorów spalin spowodowało wzrost zainteresowania pomiarami emisji podczas rzeczywistych warunków ruchu pojazdów osobowych [4, 9]. Biorąc pod uwagę specjalne zastosowania pojazdów (w tym przypadku wozów bojowych) brak jest badań w tym zakresie. Praca więc pozwala na ocenę zużycia paliwa oraz określenie emisji składników gazowych i cząstek stałych podczas rzeczywistych warunków ruchu.

Wskaźnikiem ekonomiczności pracy silnika (ekonomiczności pojazdu) jest zużycie paliwa mierzone w $\text{dm}^3/100 \text{ km}$. Jest to wskaźnik bardzo popularny, jednak w zdecydowanej większości przypadków wyznaczany w warunkach symulacyjnych na

hamowni podwoziowej w ustalonych testach jezdnych. Testy te pozwalają tylko na częściową symulację rzeczywistych warunków drogowych. W przypadku wozów bojowych brak jest możliwości symulowania warunków drogowych (lub poligonowych), zarówno w czasie pokoju, jak i w warunkach bojowych. W odniesieniu tylko do silników istnieje wskaźnik bardziej dokładny – jednostkowe zużycie paliwa, który również bywa podawany w opisach technicznych, szczególnie samochodów ciężarowych dużej ładowności, co bez znajomości warunków pracy silnika nie pozwala na szacowanie przebiegowego zużycia paliwa. Badania drogowe nie ograniczają się tylko do pojazdów pozadrogowych. Autorzy prowadzą również badania drogowe pojazdów samochodowych [6-8], ciężarowych a także lekkich samolotów [5].


Ze względu na specyfikę eksploatacji wozów bojowych podjęto próbę oceny sposobu eksploatacji wozu bojowego i wpływu tej eksploatacji na emisję składników gazowych, cząstek stałych oraz zużycie paliwa na przykładzie wozu bojowego. Znajomość tych wielkości pozwala na ocenę sposobu użytkowania wozów bojowych oraz zużycie paliwa. Celem opracowania jest odpowiedź na pytanie: w jakim stopniu zmiana warunków eksploatacji wpływa na emisję cząstek stałych oraz zużycie paliwa przez silnik spalinowy pojazdu bojowego.

2. METODYKA BADAWCZA

Badaniom poddano kołowy transporter opancerzony, którego podstawowe dane techniczne oraz widok przedstawiono w tab. 1. Charakterystyka gęstości czasowej będzie służyła do określenia średniego przebiegowego zużycia paliwa pojazdu. Charakterystyka ta będzie zastępowała cały cykl drogowy kilkunastoma punktami pomiarowymi na charakterystyce pracy silnika i umożliwiała wyznaczenie średniego przebiegowego zużycia paliwa.

Tablica 1.

Podstawowe dane techniczne silnika i widok pojazdu

Typ silnika	Scania DI1249A03P	
Liczba cylindrów/układ	6/rzędowy	
Max moc silnika	294 kW/2100 obr/min	
Max moment obrotowy	1688 N·m/1500 obr/min	
Max moc silnika – <i>oveboost</i>	360 kW/2100 obr/min	
Max moment obrotowy – <i>overboost</i>	1974 N·m/1500 obr/min	
Masa pojazdu	22 000 kg	

Do pomiarów stężenia związków toksycznych wykorzystano mobilny analizator do badań toksyczności SEMTECH DS firmy SENSORS (tab. 2). Analizator umożliwił pomiar masowego natężenia przepływu spalin.

Do pomiaru liczby cząstek stałych wykorzystano mobilny analizator Particle Counter firmy AVL, którego podstawowe dane techniczne zawarto w tab. 3.

Tablica 2.

Charakterystyka mobilnego analizatora spalin SEMTECH DS [3, 10]

Parametr	Metoda pomiaru	Dokładność
1. Stężenie związków w spalinach		
CO	NDIR, zakres pomiarowy 0–10%	±3% zakresu pomiaru
HC	FID, zakres 0–10 000 ppm	±2,5% zakresu pomiaru
NO _x = (NO + NO ₂)	NDUV, zakres 0–3000 ppm	±3% zakresu pomiaru
CO ₂	NDIR, zakres 0–20%	±3% zakresu pomiaru
O ₂	analizator elektrochemiczny, zakres 0–20%	±1% zakresu pomiaru
2. Przepływ spalin	masowe natężenie przepływu temperatura spalin do 700°C	±2,5% zakresu pomiaru ±1% zakresu pomiaru
3. Czas nagrzewania	900 s	
4. Czas odpowiedzi	T ₉₀ < 1 s	
5. Obsługiwane systemy diagnostyczne	SAE J1850/SAE J1979/SAE 15765 (LDV) SAE J1708/SAE J1587/SAE 1939 (HDV)	

Tablica 3.

Dane techniczne licznika cząstek stałych firmy AVL – Particle Counter [13]

Zakres działania	0÷10 000 cm ⁻³
Limit pomiarowy	≤ 0,1 cm ⁻³
Czas dostępu	≤ 5 s
Przepływ próbki pomiarowej	1÷5 dm ³ /min
Napięcie zasilające	230 V, 600 W
Zapotrzebowanie powietrza	30 dm ³ /min
Warunki pracy urządzenia	0÷40°C, 0÷90% wilgotności
Temperatura spalin dolotowych	< 200°C

Do pomiaru wielkości cząstek stałych wykorzystano mobilny analizator 3090 EEPS (*Engine Exhaust Particle Sizer™ Spectrometer*) firmy TSI Incorporated, którego parametry techniczne zamieszczono w tab. 4. Analizator umożliwiał ciągły pomiar rozkładu wielkości cząstek stałych emitowanych przez silnik badanego pojazdu. Pomiar wielkości cząstek stałych odbywał się w zakresie od 5,6 do 560 nm, z częstotliwością pomiaru 10 Hz. Rozcieńczone spaliny o odpowiedniej temperaturze były kierowane jednocześnie do licznika cząstek stałych i do spektrometru masowego. W związku z tym otrzymywano jednocześnie ogólną liczbę cząstek stałych, a także rozkład ilościowy w każdym przedziale wymiarowym.

Tablica 4.

Dane techniczne spektrometru masowego firmy TSI [14]

Rozmiar mierzonych cząstek	5,6–560 nm
Liczba kanałów pomiarowych	16 kanałów na dekadę
Liczba kanałów elektrod	22
Rozdzielczość	10 Hz
Przepływ próbki spalin	10 dm ³ /min
Przyływ sprężonego powietrza	40 dm ³ /min
Temperatura próbki	10–52°C
Temperatura pracy urządzenia	0–40°C

Do pomiarów warunków pracy silnika oraz informacji o zużyciu paliwa wykorzystano diagnostyczną sieć pokładową pojazdu (CAN J1939); uzyskane dane posłużyły do opracowania macierzy pracy silnika (i pojazdu) dla różnych aspektów prowadzonych badań.

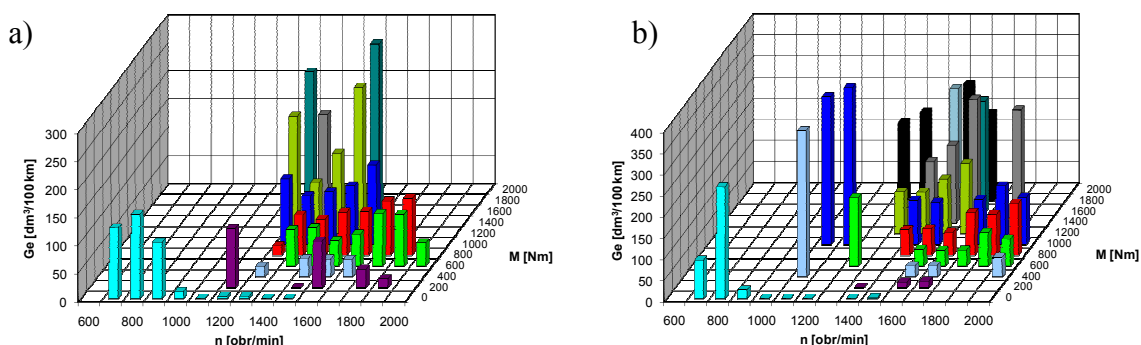
Charakterystyki silnika oraz zużycia paliwa wyznaczono w warunkach jazdy poligonowej – wykorzystano tu oprócz standardowej charakterystyki silnika, możliwość chwilowego zwiększenia momentu obrotowego, tzw. trybu pracy *overboost*.

3. ZUŻYCIE PALIWA W WARUNKACH JAZDY POLIGONOWEJ

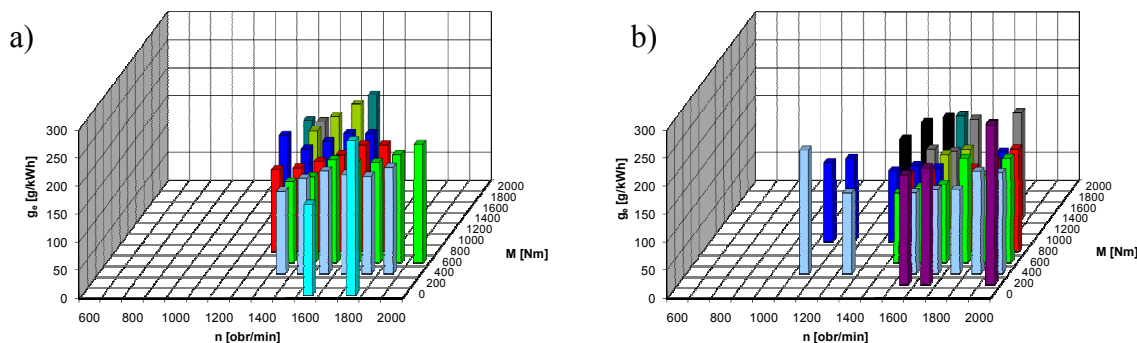
Charakterystykę pracy silnika podczas jazdy poligonowej podzielono na dwa etapy: przejazd w warunkach mocy standardowej oraz zwiększonej – *overboost*.

Tryb *overboost* wykorzystuje wyższe wartości prędkości obrotowej i obciążenia. Dzięki temu przebiegowe zużycie paliwa jest zdecydowanie wyższe w trybie *overboost* (rys. 1). Chwilowe wartości tego zużycia osiągają 250-280 dm^3/h w trybie standardowym, natomiast w trybie *overboost* wartości te przekraczają 350 dm^3/h . Znacznie większe wartości zużycia paliwa nie pozostają bez wpływu na moc i moment maksymalny silnika. Jak przedstawiono w tabelicy 2 przyrost wartości momentu obrotowego w trybie *overboost* wynosi 17%, natomiast moc przyrasta o 22%. Analiza jednostkowego zużycia paliwa (rys. 2) potwierdza mniejszy przyrost zużycia paliwa w stosunku do przyrostu mocy, gdyż wskaźnik ten ulega wyraźnemu zmniejszeniu podczas pracy silnika w trybie *overboost*. Średnie wartości jednostkowego zużycia paliwa w trybie pracy standardowej wynoszą 250-300 g/kWh , natomiast w trybie *overboost* wartości te nie przekraczają 250 g/kWh .

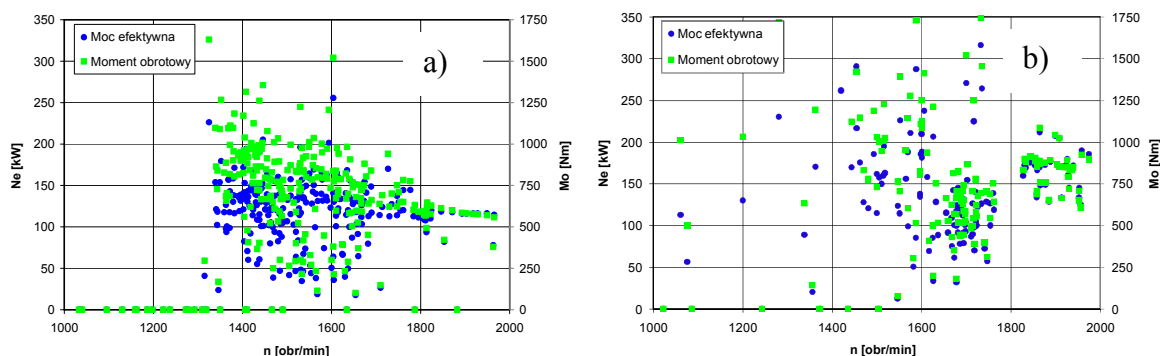
Wyraźne zróżnicowanie punktów pracy silnika w jednym i drugim trybie pracy poligonowej widoczne jest na rysunku 3. Znacznie węższe pole pracy silnika spalinowego w trybie *overboost* w przesuniętych wartościach prędkości i momentu obrotowego w stronę wyższych wartości prędkości obrotowych, a przy tym niższych obciążań. Drugim polem jest obszar o średnich obciążeniach i wysokich wartościach prędkości obrotowych. Pola pracy w obu trybach jazdy poligonowej prawie się nie pokrywają.



Rys. 1. Przebiegowe zużycie paliwa podczas jazdy poligonowej: a) w trybie standard, b) w trybie *overboost*



Rys. 2. Jednostkowe zużycie paliwa podczas jazdy poligonowej w różnych trybach pracy silnika:
a) standard, b) *overboost*



Rys. 3. Charakterystyka pracy silnika podczas jazdy poligonowej w różnych trybach pracy silnika:
a) standard, b) *overboost*

4. EMISJA CZĄSTEK STAŁYCH Z SILNIKA WOZU BOJOWEGO

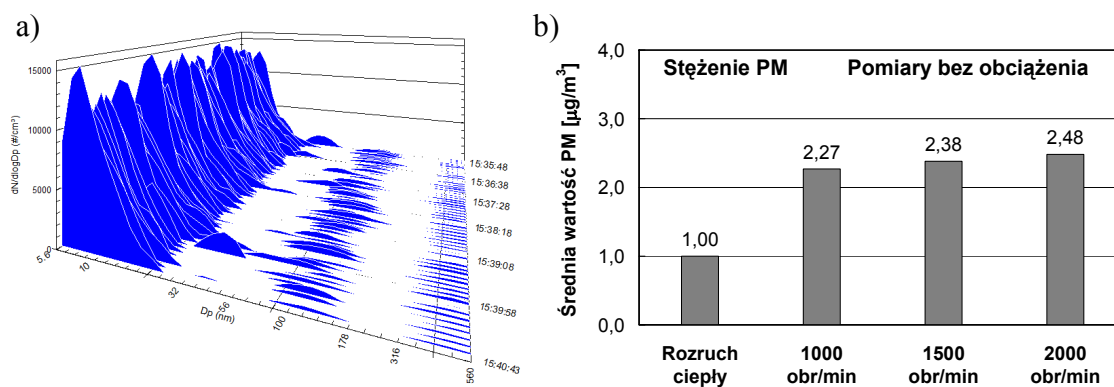
4.1. Metodyka badań

Charakterystykę emisji cząstek stałych przeprowadzono przy uwzględnieniu liczby cząstek stałych oraz ich masy. Pomiary liczby cząstek stałych miały na celu określenie liczby cząstek emitowanych w danym punkcie pracy silnika. Pomiarów dokonano bez obciążenia dla ciepłego rozruchu silnika oraz dla stałych prędkości obrotowych silnika 1000, 1500 oraz 2000 obr/min. Rezultat to wykresy bieżących pomiarów liczby cząstek stałych oraz wartości średnie uzyskane z pomiarów z naniesionymi wartościami dopuszczalnych błędów pomiarów (zaznaczone jako odchylenie standardowe).

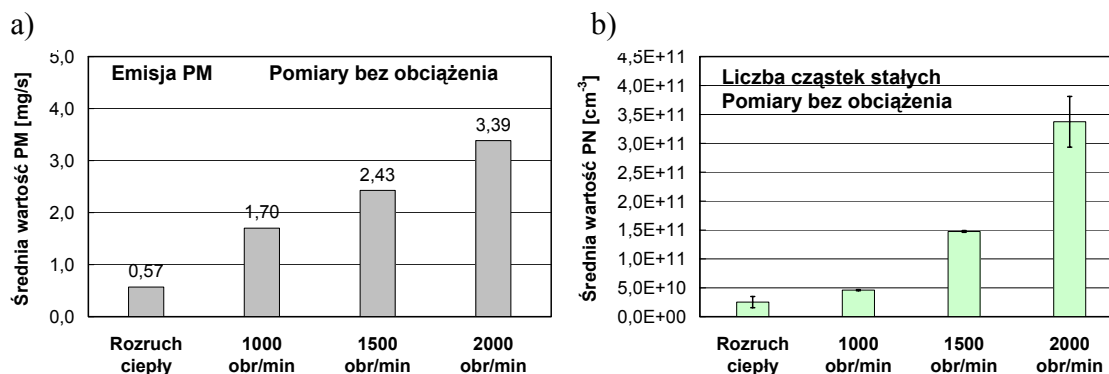
Masę cząstek stałych obliczano z wykorzystaniem zależności, że gęstość cząstek stałych jest niezależna od ich średnicy charakterystycznej (aerodynamicznej) i wynosi 1 g/cm^3 .

4.2. Emisja cząstek stałych podczas rozruchu i zmiennych prędkości obrotowych silnika

Zimny rozruch silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym jest główną przyczyną wysokiej emisji masowej cząstek stałych. W publikacji przedstawiono wyniki z badań podczas ciepłego rozruchu silnika. Wynika z niego, że dominująca liczba cząstek stałych zawiera się w przedziale do 20 nm (rys. 4a). Stężenia cząstek stałych są najmniejsze podczas rozruchu (co wynika m.in. z natężenia przepływu spalin), natomiast prawie stałe dla zmiennych prędkości obrotowych (rys. 4b). Wzrost wydatku spalin przy wyższych prędkościach obrotowych powoduje, że wraz z nim wzrasta emisja masowa cząstek stałych (rys. 5a). Liczba cząstek stałych wzrasta prawie proporcjonalnie do emisji masowej cząstek stałych (rys. 5b).



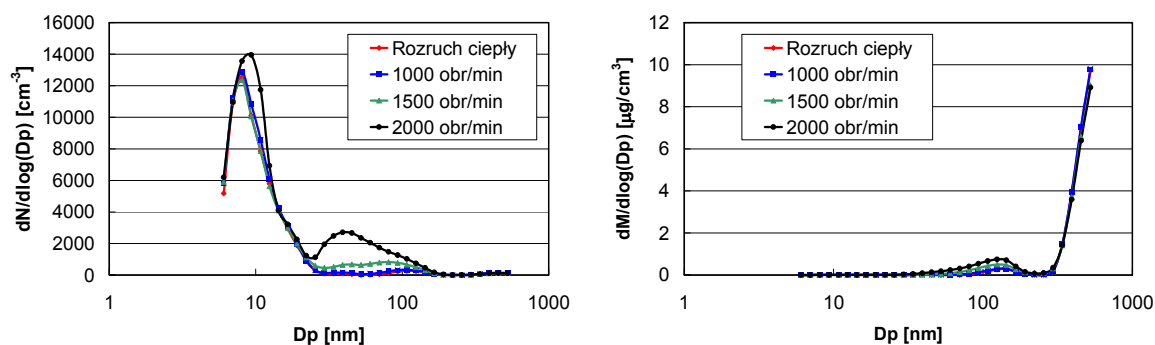
Rys. 4. Analiza emisji cząstek stałych: a) rozkład wymiarowy cząstek stałych podczas rozruchu silnika, b) średnie wartości stężeń cząstek stałych podczas różnych punktów badawczych



Rys. 5. Emisja i liczba cząstek stałych: a) średnie wartości masy cząstek stałych podczas różnych punktów badawczych, b) średnie wartości liczby cząstek stałych

Biorąc pod uwagę rozkłady cząstek stałych, należy zauważyć, że zmiana warunków pracy silnika (od rozruchu poprzez wzrost prędkości obrotowych) nie prowadzi do zmiany rozkładu wymiarowego cząstek stałych. Największą liczbą cząstek stałych przypada na zakres około 10 nm i wynosi około 14000 cm^{-3} . Wpływ zmiany prędkości obrotowej jest zauważalny dopiero przy $n = 2000 \text{ obr}/\text{min}$: znaczenia zaczyna nabierać liczba cząstek w przedziale 50-100 nm (rys. 6a). Znacznie mniejsze zmiany występują w rozkładzie

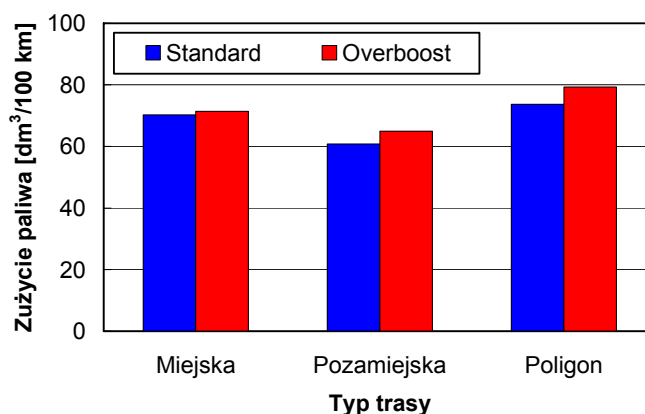
masowym PM (cząstki stałe) w różnych warunkach pracy silnika (rys. 6b). Zauważalne zmiany (rzędu kilku procent) dotyczą jedynie średnic cząstek stałych o wartościach 100 nm. W pozostałych przedziałach nie odnotowano zmian rozkładów przy zmiennych warunkach pracy silnika opancerzonego transportera kołowego.



Rys. 6. Zależność liczby cząstek stałych a) oraz masy cząstek stałych b) od ich średnicy

WNIOSKI

1. Zmienne warunki ruchu pojazdu wpływają na wykorzystanie pola pracy silnika. Jazda poligonowa w trybie standardowym powoduje wykorzystanie częściowych obciążeń silnika. Jazda w trybie *overboost* powoduje wykorzystanie niewielkiego fragmentu pola pracy silnika: duże wartości prędkości obrotowych w średnim zakresie obciążeń. Skutkuje to około 10-procentowym wzrostem zużycia paliwa (rys. 7).



Rys. 7. Wartości zużycia paliwa dla różnych warunków pracy pojazdu w trybie standardowym i *overboost*

2. Zmiana prędkości obrotowej silnika na biegu luzem nie powoduje zmian stężenia masy cząstek stałych (zmianie jednak ulega emisja PM).
3. Analiza liczby cząstek stałych w zakresie zmian prędkości obrotowej silnika na biegu luzem silnika wskazuje na występowanie maksymalnej liczby cząstek o wymiarach około 10 nm dla każdej badanej prędkości obrotowej.

4. Charakterystyki rozkładu wymiarowego liczby cząstek stałych wykazują istnienie maksimum liczby cząstek o średnicy w zakresie 100 nm, jednak maksymalne wartości masy dotyczą cząstek stałych o średnicy ponad 500 nm.

Bibliografia

1. Czerwinski J., Pétermann J.-L., Ulrich A., Mueller G., Wichser A.: Particle emissions of a TDI-engine with different lubrication oils. *Combustion Engines*, ss. 46-55, no 2, 2005, 121.
2. Czerwinski J., Zimmerli Y., Mayer A.: Experiences about Retrofitting of City Busses with DPF's. *Combustion Engines*, ss. 38-53, no 1, 2006, 124.
3. Ensfield C., Bachman L.J., Erb A., Bynum C.: Evaluating Real-World Fuel Economy on Heavy Duty Vehicles using a Portable Emissions Measurement System, 2006-01-3543
4. Gao, Y., Checkel, M.D., Emission Factors Analysis for Multiple Vehicles Using an On-Board, In-Use Emissions Measurement System, presented at SAE World Congress, 2007-01-1327, 2007
5. Merkisz J., Markowski J., Pielecha J.: Emission tests of the AI-14RA aircraft engine under real operating conditions of PZL-104 'Wilga' plane. *Combustion Engines*, ss. 64-70, no 3, 2009, 138.
6. Merkisz J., Pielecha J.: Analysis of Particle Concentrations and Smoke in Common-Rail Diesel Engine, 2008-01-1743
7. Merkisz J., Pielecha J., Bielaczyc P.: Investigation of Exhaust Emissions from DI Diesel Engine During Cold and Warm Start. 2001-01-1260
8. Merkisz J., Pielecha J., Gis W.: Gaseous and Particle Emissions Results from Light Duty Vehicle with Diesel Particle Filter presented at SAE World Congress 2009-01-2630, 2007
9. Rykowski R.A., Nam E.K., Hoffman G.: On-road Testing and Characterization of Fuel Economy of Light-Duty Vehicles, 2005-01-0677
10. Shahinian, V.D., SENSORS tech-ct Update Application Software for SEMTECH Mobile Emission Analyzers. Sensors 4th Annual SUN (SEMTECH User Network) Conference, 2007
11. Singer W., Schindler W., Linke M.: Particulate and smoke measurement on Euro 4 engines. *Combustion Engines*, ss. 54-59, no 1, 2006, 124.
12. Tinaut F.V., Melgar A., Briceño Y., Horrillo A.: Performance of vegetable derived fuels in diesel engine vehicles. *Combustion Engines*, ss. 55-69, No. 2, 2005, 121.
13. www.avl.com: AVL Particle Counter.
14. www.tsi.com: TSI Incorporated, Engine Exhaust Particle Sizer – 3090.

THE INFLUENCE OF THE OPERATING CONDITIONS OF COMBAT VEHICLE ENGINES ON EXHAUST EMISSIONS AND FUEL ECONOMY

Abstract: The paper presents the results of investigations on the influence of engine operating conditions of an armored vehicle combustion engine on the exhaust emissions. The influence of a standard operation and the *overboost* mode of the engine operation on the matrices of the share of engine operating time, exhaust emissions including PM and fuel consumption have been analyzed. Based on the obtained results an analysis of the operating conditions of an armored vehicle has been performed in the aspect of emissions and fuel consumption.

Keywords: combat vehicle engines, real road drive, PM emissions, fuel economy