

Article citation info:

Paczuski M, Chłopek Z, Marchwiany M, Bukrejewski P, Biedrzycki J, Wójcik P. Performance of Internal Combustion Engine Fueled by Liquefied Petroleum Fuel with Water Addition. The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji. 2016; 73(3): 89-101, <http://dx.doi.org/10.14669/AM.VOL73.ART6>

# Właściwości użytkowe silnika spalinowego zasilanego skroplonym paliwem ropopochodnym z dodatkiem wody

**MACIEJ PACZUSKI<sup>1</sup>, ZDZISŁAW CHŁOPEK<sup>2</sup>, MARCIN MARCHWIANY<sup>3</sup>, PAWEŁ BUKREJEWSKI<sup>4</sup>, JACEK BIEDRZYCKI<sup>5</sup>, PIOTR WÓJCIK<sup>6</sup>**

Politechnika Warszawska  
PKN ORLEN SA  
Przemysłowy Instytut Motoryzacji

## Streszczenie

Przeanalizowano informacje literaturowe dotyczące dodatku wody w różnych postaciach do czynnika roboczego silnika zasilanego paliwem LPG. Opisano korzyści płynące z dodawania wody do silników o zapłonie zarówno iskrowym, jak i samoczynnym, zasilanych paliwem LPG, w tym wpływ na parametry operacyjne silnika oraz na emisję zanieczyszczeń. Ocenia się, że dodatek wody do czynnika roboczego ma korzystny wpływ na sprawność cieplną obiegu, przyczynia się również do zmniejszenia emisji tlenku węgla, węglowodorów i tlenków azotu. Przedstawiono metodykę badań empirycznych silnika o zapłonie iskrowym zasilanego paliwem LPG z dodatkiem wody: badania przeprowadzono w warunkach symulujących trakcyjne użytkowanie silnika – w homologacyjnym teście jezdnym – NEDC, składającym się z testu jazdy miejskiej – UDC i pozamiejskiej – EUDC. Przedstawiono charakterystykę paliwa stosowanego w badaniach: jego skład i wybrane właściwości fizyko-chemiczne. Przedstawiono wyniki badań empirycznych: zużycia paliwa i emisji zanieczyszczeń. Stwierdzono, że dodatek wody ma wpływ na zmniejszenie eksploatacyjnego zużycia paliwa oraz emisji drogowej tlenu

<sup>1</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii, Instytut Chemii, 09-400 Płock, ul. Łukasiewicza 17, Polska, e-mail: [mpaczuski@pw.plock.pl](mailto:mpaczuski@pw.plock.pl)

<sup>2</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, Polska, e-mail: [zchlopek@simr.pw.edu.pl](mailto:zchlopek@simr.pw.edu.pl)

<sup>3</sup> PKN ORLEN SA, 09-411 Płock, ul. Chemików 7, e-mail: [marcin.marchwiany@op.pl](mailto:marcin.marchwiany@op.pl)

<sup>4</sup> Przemysłowy Instytut Motoryzacji, ul. Jagiellońska 55, 01-301 Warszawa, Polska; e-mail: [p.bukrejewski@pimot.eu](mailto:p.bukrejewski@pimot.eu)

<sup>5</sup> Przemysłowy Instytut Motoryzacji, ul. Jagiellońska 55, 01-301 Warszawa, Polska, e-mail: [j.biedrzycki@pimot.eu](mailto:j.biedrzycki@pimot.eu)

<sup>6</sup> Przemysłowy Instytut Motoryzacji, ul. Jagiellońska 55, 01-301 Warszawa, Polska, e-mail: [p.wojcik@pimot.eu](mailto:p.wojcik@pimot.eu)

węgla, węglowodorów, tlenków azotu i dwutlenku węgla w warunkach pracy silnika odpowiadających jeździe zarówno miejskiej, jak i pozamiejskiej.

**Słowa kluczowe:** silniki spalinowe, skroplony gaz ropopochodny, LPG, dodatek wody

**Keywords:** internal combustion engines, liquefied petroleum gas, LPG, water addition

## 1. Wstęp

Mieszanina skroplonych gazów węglowodorowych, głównie C3 i C4 (węglowodorów o 3 i 4 atomach węgla), znana powszechnie jako LPG (ang. *Liquefied Petroleum Gas* – skroplony gaz ropopochodny) stanowi specyficzny rodzaj paliwa. Jest ono szeroko stosowane jako paliwo opałowe a także jako paliwo silnikowe, zwane autogazem (w literaturze anglojęzycznej: *autogas*). Niskie koszty wytwarzania i – w konsekwencji – niska cena rynkowa, duża wartość opałowa i możliwość uzyskania małej emisji zanieczyszczeń w stosunku do stosowania klasycznych ciekłych paliw ropopochodnych powodują szybki wzrost zastosowania paliwa LPG.

Dodatkową zaletą paliwa LPG – w stosunku do innych paliw gazowych – jest możliwość przechowywania paliwa w pojeździe w fazie ciekłej pod ciśnieniem około (0,3 ÷ 0,5) MPa, co nie wymaga stosowania kosztownych i ciężkich butli wysokociśnieniowych [4, 5].

Polska należy do czołowych użytkowników paliwa LPG, czemu towarzyszy dynamiczny rozwój całej branży związanej z wytwarzaniem i obsługą instalacji samochodowych LPG. Branża ta staje się ona istotnym składnikiem przemysłu motoryzacyjnego, w większości opartym na rozwiązaniach rodzimych.

Paliwo LPG znajduje zastosowanie przede wszystkim do zasilania silników o zapłonie iskrowym, pracującym oryginalnie na benzynie – są to zatem silniki dwupaliwowe [4, 5]. Rozruch i nagrzewanie się silnika następuje przy zasilaniu benzyną, a podstawowa praca może być bądź na benzynie, bądź na paliwie LPG z okresowym dawkowaniem benzyny w celu chłodzenia komory spalania i poprawy właściwości smarnych paliwa gazowego. Istnieje również możliwość eksploatacji silników o zapłonie iskrowym tylko na paliwie LPG – takie rozwiązania są stosowane przede wszystkim dla dużych silników spalinowych stosowanych do napędu pojazdów ciężkich [4, 5]. Oryginalnie są to zazwyczaj konstrukcje silników o zapłonie samoczynnym, zmodernizowane na silniki o zapłonie iskrowym zasilane paliwem LPG. To rozwiązanie jest jednak znacznie częściej stosowane w odniesieniu do zasilania silników gazem ziemnym.

Silniki o zapłonie iskrowym zasilane paliwem LPG charakteryzują się dobrymi właściwościami ze względu na emisję zanieczyszczeń [6, 18, 24, 27, 32]. Tak, jak w wypadku stosowania wszystkich paliw gazowych, odnotowuje się zmniejszenie emisji tlenku węgla i – zazwyczaj – węglowodorów, co wynika głównie z faktu tworzenia przez paliwa gazowe znacznie bardziej jednorodnej mieszanki palnej niż ma to miejsce w wypadku spalania paliw ciekłych. Wyniki badań emisji tlenków azotu są niejednoznaczne – niekiedy z powodu wyższej temperatury spalania paliwa gazowego ulega zwiększeniu emisja tlenków azotu. Szczególnie korzystne jest zastosowanie paliwa LPG do zasilania silników o zapłonie iskrowym o wtrysku bezpośrednim – w takich silnikach są stosowane układy zasilania paliwem LPG 6. generacji [5]. W silnikach tych oryginalny wtryskiwacz jest wykorzystywany albo do wtrysku benzyny, albo paliwa LPG w fazie ciekłej. Zastosowanie paliwa LPG do zasilania silników o zapłonie iskrowym o wtrysku bezpośrednim umożliwia zmniejszenie emisji cząstek stałych (czyli ich masy) i liczby emitowanych cząstek stałych [18, 27, 32].

Istnieje również możliwość zastosowania paliwa LPG do zasilania silników o zapłonie samoczynnym [19, 23, 28]. W takim wypadku jest realizowany w cylindrach zapłon mieszany: samoczynny od dawki rozruchowej paliwa ciężkiego, najczęściej oleju napędowego, i wymuszony mieszanki paliwa LPG z powietrzem. W wypadku silników o zapłonie samoczynnym dzięki zasilaniu ich paliwem LPG można uzyskać zmniejszenie emisji nie tylko tlenku węgla i węglowodorów, ale i tlenków azotu i – przede wszystkim – radykalne zmniejszenie emisji cząstek stałych. Ekologiczną korzyścią jest również zmniejszenie emisji hałasu.

Istnieją również negatywne cechy stosowania do zasilania silników spalinowych paliwa LPG. Do najważniejszych problemów można zaliczyć większe obciążenie cieplne komory spalania z powodu wyższej temperatury spalania lekkich węglowodorów oraz praktycznie brak smarności paliw gazowych. Może się to stać przyczyną szybszego zużywania się niektórych elementów, przede wszystkim talerzyków zaworów wylotowych oraz wylotowych gniazd zaworowych. Jedną z możliwości poprawy w tym zakresie jest stosowanie dodatku wody do czynnika roboczego cylindra.

Dodatek wody do czynnika roboczego w silnikach spalinowych jest rozwiązaniem znanym od początków XX w. Już w publikacji z 1913 r. P. B. Hopkinson [13] opisuje dodatek

rozpylonej wody doprowadzanej do cylindra silnika o zapłonie samoczynnym, dzięki czemu było możliwe m.in. zmniejszenie obciążenia cieplnego denka tłoka i komory spalania oraz zmniejszenie skłonności do spalania stukowego. Początkowo dodatek wody do czynnika roboczego był stosowany głównie w silnikach spalinowych, których zastosowanie wymagało ich dużego wysilenia, jak ma to miejsce np. w wypadku silników lotniczych [7, 8]. Dzięki obniżeniu temperatury komory spalania i cylindra zmniejszono skłonność do spalania stukowego i było możliwe zastosowanie większego stopnia sprężania w silnikach o zapłonie iskrowym. W ten sposób uzyskiwano zwiększenie mocy użytecznej. Bywały również stosowane rozwiązania dodatku wody do czynnika roboczego głównie z powodu chłodzenia silnika, włącznie z rozwiązaniami w silnikach lotniczych, polegającymi na zastąpieniu klasycznego układu chłodzenia silnika wtryskiem wody do czynnika roboczego [7, 8].

Wodę można doprowadzić do czynnika roboczego [7, 8, 14–17, 20–23, 25, 26, 29–31]:

- bezpośrednio wtryskiem do komory spalania,
- wraz z powietrzem wlotowym:
  - przez wtrysk wody do powietrza dolotowego,
  - przez doprowadzanie pary wodnej do powietrza dolotowego,
  - przez doprowadzanie aerozolu wodno-powietrznego do powietrza dolotowego
- wraz z paliwem w postaci emulsji wodno-paliwowej.

Zastosowanie emulsji wodno-paliwowej daje szczególnie duże korzyści. Autorzy [14, 30] wykazali, że użycie emulsji wyraźnie wpływa na zmniejszenie zużycia paliwa i obniżenie temperatury emitowanych spalin, a w konsekwencji zmniejszenie emisji tlenków azotu.

Wyniki badań dodatku wody jako odrębnego strumienia, emulsji wodno-paliwowej lub w postaci pary przedstawiono w [1, 12, 15–17]. Badania prowadzono pod kątem zmniejszenia emisji szkodliwych składników gazów spalinowych oraz zwiększania sprawności cieplnej silnika. Stwierdzono korzystny wpływ dodatku wody do czynnika roboczego ze względu na stawiane cele.

J. A. Harrington w pracy [12] stwierdził znaczący wpływ dodatku wody na zmniejszanie się skłonności do spalania stukowego i zmniejszania się emisji tlenków azotu, przy jednoczesnym zmniejszeniu się emisji tlenku węgla i niewielkim zwiększeniu się emisji węglowodorów.

Obecność wody w procesie spalania sprzyja przebiegowi dodatkowych zachodzących w komorze spalania procesów, takich jak: hydroliza, piroliza, reforming oraz uwodornienie [1, 14, 29]. W wyniku przebiegu tych procesów odnotowuje się znaczne przyspieszenie utleniania węglowodorów, co sprzyja zmniejszeniu emisji niecałkowitych i niezupełnych produktów spalania [1–3, 7–10, 12, 15–17, 25, 26, 32]. W wysokiej temperaturze w czasie spalania woda reaguje między innymi z sadzą, będącą skutkiem rozpadu węglowodorów w warunkach lokalnego niedoboru tlenu, zgodnie z równaniem reakcji:



tworząc wysokoenergetyczne gazy, które łatwo ulegają całkowitemu i pełnemu spalaniu.

Jednocześnie duże ciepło parowania wody przyczynia się do obniżenia temperatury czynnika, co umożliwia zmniejszenie emisji tlenków azotu – zgodnie z termicznym mechanizmem powstawania tlenków azotu (J. B. Zeldowicz [33]), obniżenie temperatury spalania o 100 K mieszaniny stechiometrycznej powoduje zmniejszenie się szybkości powstawania tlenku azotu o 33% [33].

Podstawowe badania na temat spalania emulsji wodno-paliwowych zostały przedstawione w pracach M. W. Ivanowa i I. P. Nefedova [14], którzy stwierdzili, że woda zemulgowana

w ciężkim oleju pozostałościowym powoduje spontaniczne zjawisko mikroeksplozji paliwa w strefie spalania. Zjawisko mikroeksplozji jest spowodowane różnicami lotności między wodą i paliwem. Uznano, że zjawisko mikroeksplozji sprzyja szybszemu tworzeniu się lokalnie kwaziejnorodnej mieszanki i – w konsekwencji – zwiększeniu się szybkości reakcji utleniania, co skutkuje zmniejszoną emisją cząstek stałych. Stwierdzono również, że obecność pary wodnej wpływa korzystnie na kinetykę procesów spalania. Tlenek węgla spala się szybciej w wilgotnym niż suchym powietrzu, tę samą tendencję obserwuje się w przypadku kropelek emulsji wodno-węglowodorowych.

W pracy [30] opisano model spalania kropelek emulsji z uwzględnieniem zjawiska mikroeksplozji. Zjawisko to wpływa na zmniejszenie kropelek, które szybciej odparowują w strefie spalania. Para wodna w strefie spalania zmniejsza reaktywność chemiczną węglowodorów, wydłużając tym samym zwłokę samozapłonu oraz wpływa na wygaszenie płomienia. Wpływ wody zależy od właściwości fizycznych i chemicznych stosowanych węglowodorów, a szczególnie od ich lotności i szybkości utleniania [30].

H. Özcan i S. M. Söylemez [25, 26] prowadzili badania, których celem była ocena wpływu dodatku wody na proces spalania paliwa LPG w silniku o zapłonie iskrowym. W badaniach tych dodatek wody wprowadzono do kolektora dolotowego. Wyniki badań wskazały, że dodatek wody wykazywał działanie chłodzące mieszanki paliwo-powietrznej i zmniejszał szybkość spalania – w konsekwencji następuje obniżenie szczytowej temperatury spalania, co z kolei zapewnia zmniejszenie o 35% emisji tlenków azotu, bez żadnej znaczącej zmiany emisji tlenku węgla i węglowodorów. Stwierdzono, że dodatek wody do kolektora dolotowego zmniejsza pracę sprężania. Wraz ze zwiększaniem się stosunku masy wody i masy paliwa w zakresie przeprowadzonych badań wzrastał moment obrotowy, moc użyteczna i sprawność cieplna silnika. Przeciętny bezwzględny wzrost sprawności cieplnej dla stosunku masy wody i masy paliwa równego 0,5 wynosi około 2,4% w porównaniu do zastosowania czystego paliwa LPG dla badanego zakresu prędkości obrotowej silnika.

W pracach [2, 3, 7–10] autorzy opisują doświadczenia z dawkowaniem wody do kolektora dolotowego silnika z wykorzystaniem jej ultradźwiękowego rozpylania. Wykorzystywano do tego celu falowód ultradźwiękowy o częstotliwości równej około 40 kHz, a także płytę drgającą z częstotliwością około 3 MHz. Średnica kropelek rozpylanych przez falowód kilohercowy wynosiła przeciętnie mniej niż 10  $\mu\text{m}$ , co sprawiało, że krople te nie osiadały na ściankach kolektora dolotowego i kanałów dolotowych w głowicy. Rozpylacz megahercowy dostarczał do układu dolotowego praktycznie jednorodny aerozol wodno-powietrzny. W obydwu wypadkach uzyskano zwiększenie się mocy użytecznej i sprawności cieplnej silnika, a emisja zanieczyszczeń: tlenku węgla, węglowodorów i tlenków azotu (dla silnika o zapłonie iskrowym i dla silnika o zapłonie samoczynnym) oraz cząstek stałych (dla silnika o zapłonie samoczynnym) uległa zmniejszeniu. Rozpylacze ultradźwiękowe wykorzystano również do doprowadzania do czynnika roboczego nie tylko wody, ale i wodnego roztworu soli metali alkalicznych [2, 3, 10]. Doprowadzenie do obiegu soli metali alkalicznych dodatkowo, obok udziału wody, wpływało na zmniejszenie emisji tlenków azotu i cząstek stałych.

Bogata jest literatura na temat szczegółowych rozwiązań konstrukcyjnych układów do doprowadzania wody do czynnika roboczego, m.in. patenty Rzeczypospolitej Polskiej [20–22].

## 2. Badania empiryczne

Celem badań empirycznych, których wyniki są przedstawiane w niniejszym artykule, była ocena wpływu dodawania wody do czynnika roboczego w silniku o zapłonie iskrowym zasilanym paliwem LPG na zużycie paliwa i emisję zanieczyszczeń w warunkach pracy silnika symulujących jego użytkowanie trakcyjne. Warunki pracy silnika, symulujące użytkowanie trakcyjne, były zdeterminowane obciążeniem silnika w teście jezdnym NEDC (New European Driving Cycle), składającym się z testu jazdy w miastach – UDC (Urban Driving Cycle) i testu jazdy poza miastami – EUDC (Extra Urban Driving Cycle) [11].

Do badań wykorzystano samochód osobowy Daewoo Lanos z w 2000 r. z silnikiem o zapłonie iskrowym o objętości skokowej  $1498 \text{ cm}^3$  z wielofunkcyjnym reaktorem katalitycznym.

Badania samochodu zostały przeprowadzone na stanowisku hamowni podwoziowej Schenk Komeg EMDY 48 w Przemysłowym Instytucie Motoryzacji. Badania samochodu wykonywano w stanie silnika spalinyowego nagrzanego do ustabilizowanej temperatury.

Do badań emisji wykorzystano stanowisko do badań składu spalin, w skład którego wchodzi system Horiba Mexa 7200 wyposażony w analizatory Horiba:

- AIA –721A (pomiar stężenia tlenku węgla),
- AIA –722 (pomiar stężenia dwutlenku węgla),
- MPA –720 (pomiar stężenia tlenu),
- CLA –755A (pomiar stężenia tlenków azotu),
- FIA –725A (pomiar stężenia węglowodorów).

Zużycie paliwa wyznaczano na podstawie bilansu masy węgla w składnikach spalin.

Silnik był zasilany handlowym paliwem LPG o podstawowym składzie wyznaczonym za pomocą chromatografu gazowego Agilent 6890N:

- etan – 0,20% m/m,
- propan – 45,93% m/m,
- n-butan – 52,77% m/m,
- izobutan – 0,77% m/m,
- izobuten – 0,19% m/m.

Paliwo LPG charakteryzowało się motorową liczbą oktanową 92 i miało wartość opałową równą  $45,97 \text{ MJ/kg}$ , a gęstość w temperaturze  $15^\circ\text{C}$  wynosiła  $550,6 \text{ kg/m}^3$ .

Wodę doprowadzano do cylindra dzięki umieszczeniu króćca wlotowego w układzie dolotowym za filtrem powietrza. Do układu dolotowego doprowadzano wodę rozpyloną w ultradźwiękowym generatorze Boneco Astoria 7035 o mocy 45 W i częstotliwości pracy 1,7 MHz. Dawka paliwa była sterowana w taki sposób, aby udział masy wody w masie wody i paliwa wynosił 2,22%.

Badania zostały wykonane dla dwóch sposobów zasilania silnika:

- paliwem LPG – oznaczenie: LPG,
- paliwem LPG z dodatkiem wody – oznaczenie: LPG & H<sub>2</sub>O.

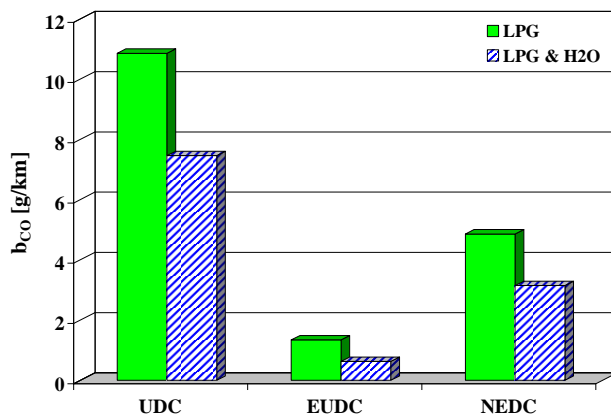
## 3. Wyniki badań emisji zanieczyszczeń i zużycia paliwa

W tabeli przedstawiono wyniki badań emisji drogowej zanieczyszczeń: tlenku węgla –  $b_{\text{CO}}$ , węglowodorów –  $b_{\text{HC}}$ , tlenków azotu –  $b_{\text{NOx}}$  i dwutlenku węgla –  $b_{\text{CO}_2}$  oraz eksploatacyjnego zużycia paliwa –  $Q$  w testach jezdnych dla dwóch sposobów zasilania silnika: paliwem LPG oraz paliwem LPG z dodatkiem wody.

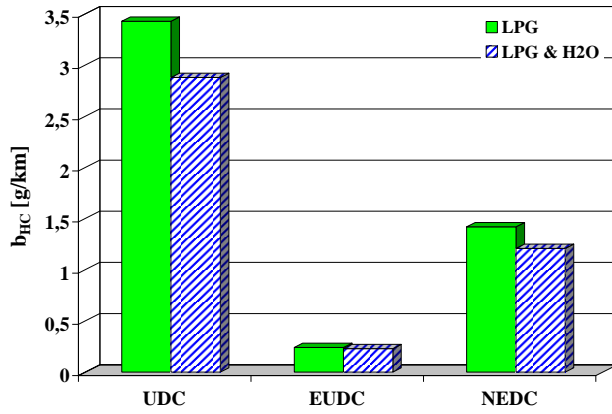
Tabela. Wyniki badań emisji drogowej zanieczyszczeń i eksploatacyjnego zużycia paliwa w testach jezdnych dla dwóch sposobów zasilania silnika: paliwem LPG oraz paliwem LPG z dodatkiem wody

Wielkość fizyczna		Jednostka miar	Sposób zasilania	Test		
Nazwa	Oznaczenie			UDC	EUDC	NEDC
Emisja drogowa	$b_{CO}$	g/km	LPG	10,86	1,34	4,86
			LPG & H <sub>2</sub> O	7,46	0,63	3,15
	$b_{HC}$		LPG	3,43	0,24	1,42
			LPG & H <sub>2</sub> O	2,88	0,23	1,21
	$b_{NOx}$		LPG	0,12	0,18	0,16
			LPG & H <sub>2</sub> O	0,11	0,17	0,15
	$b_{CO2}$		LPG	206,8	107,9	144,5
			LPG & H <sub>2</sub> O	191,8	104,1	136,4
Eksploatacyjne zużycie paliwa	Q	dm <sup>3</sup> /100 km	LPG	15,21	7,21	9,62
			LPG & H <sub>2</sub> O	13,81	6,88	8,92

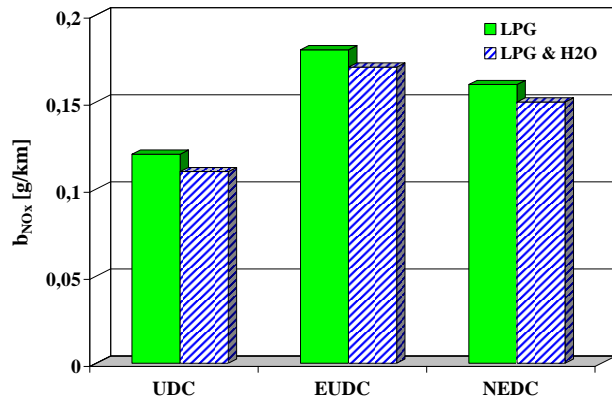
Na rysunkach 1–4 przedstawiono emisję drogową zanieczyszczeń w testach jezdnych dla dwóch sposobów zasilania silnika.



Rys. 1. Emisja drogowa tlenku węgla –  $b_{CO}$  w testach jezdnych dla dwóch sposobów zasilania silnika

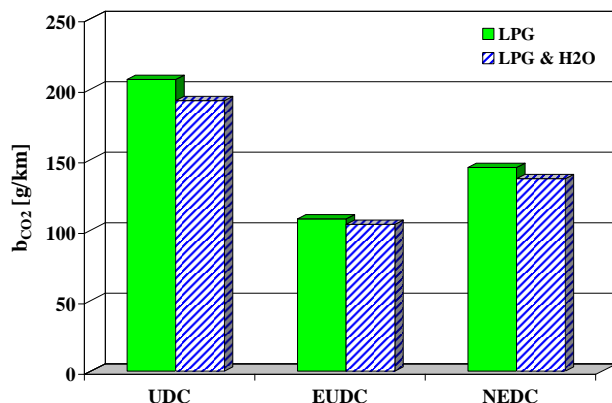


Rys. 2. Emisja drogowa węglowodorów –  $b_{HC}$  w testach jezdnych dla dwóch sposobów zasilania silnika



Rys. 3. Emisja drogowa tlenków azotu –  $b_{NOx}$  w testach jezdnych dla dwóch sposobów zasilania silnika

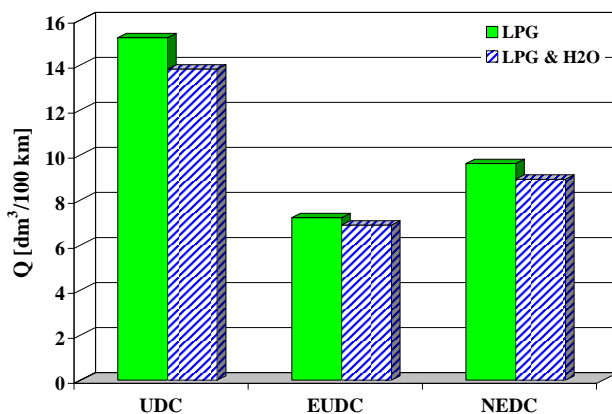




Rys. 4. Emisja drogowa dwutlenku azotu –  $b_{CO_2}$  w testach jezdnych dla dwóch sposobów zasilania silnika

Dla wszystkich zanieczyszczeń jest widoczne zmniejszenie się emisji drogowej zanieczyszczeń na skutek dodatkowego doprowadzania wody do czynnika roboczego – różniące się, niekiedy znacznie, dla różnych substancji i dla różnych warunków pracy silnika.

Na rysunku 5 jest przedstawione eksploatacyjne zużycie paliwa w testach jezdnych dla dwóch sposobów zasilania silnika.



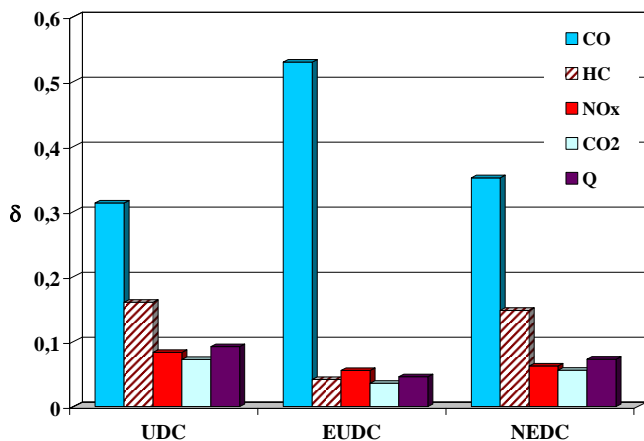
Rys. 5. Eksploatacyjne zużycie paliwa –  $Q$  w testach jezdnych dla dwóch sposobów zasilania silnika

Dodatkowe doprowadzanie wody do czynnika roboczego powoduje również zmniejszenie się eksploatacyjnego zużycia paliwa.

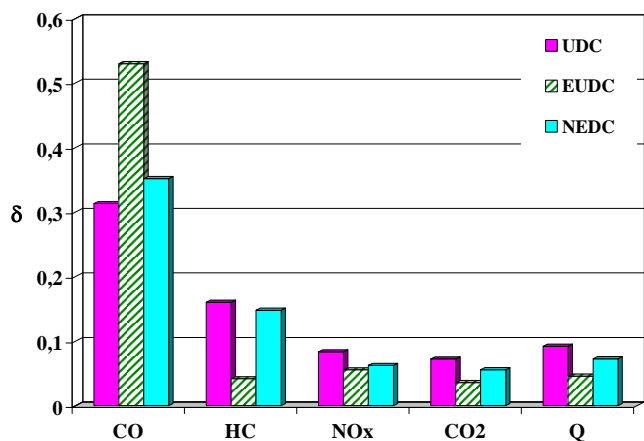
Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono współczynnik względnego zmniejszenia się emisji drogowej zanieczyszczeń i eksploatacyjnego zużycia paliwa na skutek dodatkowego doprowadzania wody do czynnika roboczego:

$$\delta = \frac{X_{LPG} - X_{LPG \& H_2O}}{X_{LPG}} \quad (2)$$

gdzie:  $x = b_{CO}; b_{HC}; b_{NOx}; b_{CO2}; Q$ ,  
 indeks: LPG – dla zasilania silnika paliwem LPG,  
 indeks: LPG & H<sub>2</sub>O – dla zasilania silnika paliwem LPG z dodatkiem wody.



Rys. 6. Współczynnik względnego zmniejszenia się emisji drogowej zanieczyszczeń i eksploatacyjnego zużycia paliwa na skutek dodatkowego doprowadzania wody do czynnika roboczego



Rys. 7. Współczynnik względnego zmniejszenia się emisji drogowej zanieczyszczeń i eksploatacyjnego zużycia paliwa na skutek dodatkowego doprowadzania wody do czynnika roboczego

Największe względne zmniejszenie się emisji drogowej zanieczyszczeń występuje dla tlenku węgla (rzędu 0,31 ÷ 0,53), w następnej kolejności dla węglowodorów (rzędu 0,04 ÷ 0,16). W

wypadku emisji drogowej tlenków azotu i dwutlenku węgla oraz eksploatacyjnego zużycia paliwa współczynnik względnego zmniejszenia się emisji drogowej zanieczyszczeń i eksploatacyjnego zużycia paliwa na skutek dodatkowego doprowadzania wody do czynnika roboczego ma wartość podobną rzędu  $0,04 \div 0,09$ .

#### 4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych analiz literatury naukowej, dotyczącej dodatkowego doprowadzania wody do czynnika roboczego w silnikach spalinowych, oraz wyników własnych badań empirycznych istnieje możliwość sformułowania następujących wniosków.

1. Dodatek wody do czynnika roboczego silnika spalinowego jest skutecznym sposobem oddziaływanie na przebieg procesu spalania. Zgodnie z doniesieniami literaturowymi dodatek wody umożliwia obniżenie temperatury spalania, co sprzyja zmniejszeniu emisji tlenków azotu oraz zmniejszeniu skłonności do spalania stukowego. Jednocześnie produkty zachodzących w komorze spalania z udziałem wody procesów, takich jak: hydroliza, piroliza, reforming i uwodornienie, sprzyjają intensywniejszemu utlenianiu związków organicznych, co umożliwia w konsekwencji zmniejszenie emisji tlenu węgla, węglowodorów i cząstek stałych. Obserwowane w komorze spalania zjawisko mikroeksplozji kropek emulsji paliwowo-wodnej sprzyja poprawie jakości rozpylenia paliw.
2. W wyniku przeprowadzonych badań empirycznych potwierdził się korzystny wpływ dodatku wody do czynnika roboczego na zmniejszenie się emisji zanieczyszczeń, szczególnie tlenu węgla i – w następnej kolejności – węglowodorów, a także tlenków azotu.
3. Dodatek wody do czynnika roboczego ma korzystny wpływ na sprawność cieplną silnika, czego skutkiem jest zmniejszenie się eksploatacyjnego zużycia paliwa – odpowiada to również zmniejszeniu się emisji drogowej dwutlenku węgla.
4. Zastosowany w badaniach sposób doprowadzania wody z wykorzystaniem rozpylania ultradźwiękowego okazał się skuteczny dzięki stabilności uzyskiwanego aerozolu wodno-powietrznego, co umożliwiło uniknięcie osadzanie się ciekłej warstwy wody w kolektorze dolotowym.

Dotychczasowe wyniki badań empirycznych, traktowane jako badania wstępne modyfikowania procesu spalania paliwa LPG w silniku o zapłonie iskrowym, w pełni potwierdziły oczekiwania poprawy właściwości użytkowych silnika dzięki dodatkowi wody do czynnika roboczego. Autorzy są świadomi, że konieczna jest realizacja rozbudowanego programu badań, obejmującego m.in. wielowymiarowe badania o charakterze regulacyjnym, a przede wszystkim badania procesu spalania z wyznaczeniem charakterystyk wydzielania się ciepła na podstawie indykowania silnika.

#### Literatura

- [1] Abu-Zaid M. Performance of single cylinder, direct injection diesel engine using water fuel emulsions. *Energy Convers and Manage*, 2004, 45. 697–705.
- [2] Ambrozik A, Chłopek Z, Danilczyk W, Kruczyński S. Zasilanie silnika o zapłonie samoczynnym emulsją paliwa z wodą i wodnymi roztworami soli jako metoda zmniejszania emisji tlenków azotu i cząstek stałych. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej* 2(38)/2000. 21–30.

- [3] Ambrozik A, Chłopek Z. Umienszenije okisłow azota i twierdich czastii w wychłopnych gazach za szciot pitanija dzieliia emulsiej topliwa s wodoj i wodnymi rastworami soli. Szestoj Miedzunarodnoj Kongres Dwigatieliestroitieliej. Rybaczie. Ukraina 2001.
- [4] ASTM D1835 – 11: Standard specification for liquefied petroleum (LP) gases. American Society for Testing & Materials.
- [5] AUTO-GAS.NET: Generations of autogas systems. <http://www.auto-gas.net/technology/system-types>. (2015.09.15).
- [6] Chłopek Z, Bardziński W, Jarczewski M, Sar H. Badania porównawcze samochodu osobowego zasilanego benzyną i skroplonym gazem ropopochodnym (LPG). Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej 2006. 111–120.
- [7] Chłopek Z, Danilczyk W, Januła J, Kruczyński S. Badania wpływu dodatku wody w postaci aerozolu wodno-powietrznego w polu ultradźwięków na pracę silnika spalinowego. Zeszyty SEP PAN. Warszawa 1984.
- [8] Chłopek Z, Danilczyk W, Januła J, Kruczyński S. Wlijanie dobawki wody na soderżanie toksycznych komponentow w otrobotawskich gazach dwigatjela s prinuditelnym zażiganjem. Conference "Internal Combustion Engines". Russe 1985.
- [9] Chłopek Z, Danilczyk W, Kruczyński S. Ocena możliwości zmniejszenia emisji tlenków azotu przez dodatek wody do układu zasilania silnika o zapłonie samoczynnym. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej 3(15)/1994. 5–16.
- [10] Chłopek Z, Danilczyk W. Metoda zmniejszania emisji tlenków azotu i cząstek stałych z silnika o zapłonie samoczynnym przez dodatek do czynnika roboczego wodnych roztworów soli metali alkalicznych. Przegląd Mechaniczny 3 '01. 26–32.
- [11] DELPHI: Worldwide emission standards. Passenger cars and light duty vehicles. Innovation for the real world. 2015/2016.
- [12] Harrington J A. Water addition to gasoline-effect on combustion, emissions, performance and knock. SAE Technical Paper 1982.
- [13] Hopkinson P B. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineering (I. M. E. Proceedings), 679 (1913).
- [14] Ivanov M V, Nefedov I P. Experimental investigation of the combustion process of natural and emulsified liquid fuels. NASA Tech. Translation TTF–258, 1965.
- [15] Kegl B, Pehan S. Reduction of diesel engine emissions by water injection. SAE Technical Paper 2001.
- [16] Kohketsu Set al. Reduction of exhaust emission with new water injection system in a diesel engine. JSAE Review, 1996, 17, 87–88.
- [17] Lanzafame R. Water injection effects in a single-cylinder CFR engine. SAE Technical Paper, 1999.
- [18] Lee J W et al. Effect of various LPG supply systems on exhaust particle emission in spark-ignited combustion engine. International Journal of Automotive Technology 2010, 11 (6). 793–800.
- [19] Luft S. Dwupaliwowy silnik o zapłonie samoczynnym zasilany wtryskowo paliwem LPG w fazie ciekłej. The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji 2005, 2.153–16
- [20] PL 378514: Sposób efektywnego spalania paliw przy udziale pary wodnej, we wszelkiego rodzaju układach spalania, zawierających komorę spalania oraz układ

- do efektywnego spalania paliw przy udziale pary wodnej w silniku spalinowym. 2005.
- [21] PL 381186A: Sposób i układ optymalizacji spalania paliw, zwłaszcza w systemach z silnikami z wewnętrzną komorą spalania.
- [22] PL 385723: Sposób zmniejszania zużycia paliwa i emisji spalin w silnikach spalinowych poprzez zastosowanie wody jako substytutu paliwa oraz silnik stosujący ten sposób.
- [23] Qi D et al. Combustion and exhaust emission characteristics of a compression ignition engine using liquefied petroleum gas-fuel-oil blended fuel. *Energy Conversion and Management* 2006, 48 (2). 500–509.
- [24] Saraf R R, Thipse S S, Saxena P K. Comparative emission analysis of gasoline/LPG automotive bifuel engine. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 2009, 3.
- [25] Söyelmez S M, Özcan H. Experimental investigation of the effects of water addition on the exhaust emissions of a naturally aspirated, liquefied-petroleum-gas-fueled engine. *Energy Fuels*, 2005, 19 (4), s. 1468–1472.
- [26] Söyelmez S M, Özcan H. Water injection effects on the performance of four-cylinder, LPG fuelled SI engine. *Open Access Scientific Reports*, Volume 2, Issue 1, 2013.
- [27] Tasic T et al. Gasoline and LPG exhaust emissions comparison. *Advances in Production Engineering & Management* 2011, 6 (2). 87–94.
- [28] Vijayabalan P, Nagarajan G. Performance, emission and combustion of LPG diesel dual fuel engine using glow plug. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering* 2009, 3 (2). 105–110.
- [29] Wang C H et al. Effects of fuel properties on the burning characteristics of collision-merged alkane/water droplets. *Experimental Thermal and Fluid Science* 32 (2008). 1049–1058.
- [30] Wang C H, Chen J T. An experimental investigation of the burning characteristics of water-oil emulsions. *International Communication of Heat Mass Transfer* 23 (6) (1996). 823–834.
- [31] Wilson, Parley J. Effects of water injection and increased compression ratio in a gasoline spark ignition engine. *Wilson, Thesis, University of Idaho*, 2011.
- [32] Wu Y Y, Chen B CH, Tran A T. Pollutant emission reduction and engine performance improvement by using a semi-direct injection spark ignition engine fuelled by LPG. *Aerosol and Air Quality Research* 2012, 12. 1289–1297.
- [33] Zeldovich Y B, Sadonikov Y P, Frank-Kamenetskij A D. Oxidation of nitrogen in combustion. *Publ. House Academy of Science of U.S.S.R. Moscow–Leningrad* 1947.