

BARBARA WORSZTYNOWICZ*

WPŁYW SKŁADU MIESZANKI NA EMISJĘ SZKODLIWYCH SKŁADNIKÓW SPALIN PODCZAS ZASILANIA SILNIKA GAZEM ZIEMNYM

IMPACT OF THE COMBUSTIBLE MIXTURE COMPOSITION ON HARMFUL SUBSTANCES EMISSIONS DURING NATURAL GAS SUPPLY TO THE ENGINE

Streszczenie

W artykule poruszono temat emisji szkodliwych składników spalin do atmosfery w wyniku spalania gazu ziemnego w silnikach spalinowych przy zastosowaniu różnego składu mieszanki palnej. Przedstawione zostały wyniki pomiarów wykonanych na stanowisku hamowni silnikowej w warunkach sporządzania charakterystyk obciążeniowych dla silnika o zapłonie iskrowym. Na podstawie pomiarów przeprowadzono analizę wpływu składu mieszanki palnej na zawartość szkodliwych składników w spalinach, a także na skuteczność działania reaktora katalitycznego.

Słowa kluczowe: współczynnik nadmiaru powietrza, emisja spalin, paliwa alternatywne

Abstract

The article addresses the topic of harmful substances emissions into the atmosphere as the result of the natural gas combustion in the combustion engines, when using various composition of combustible mixture. The paper presents the results of measurements conducted on the engine test stand in terms of prepared load characteristics for a spark ignition engine. On the basis of these measurements the article provides the analysis of the impact of combustible mixture on harmful substances content in the exhaust gases and conversion efficiency of a catalytic converter.

Keywords: excess air coefficient, emission, alternative fuels

* Dr inż. Barbara Worsztynowicz, Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia Górniczo-Hutnicza.

1. Wstęp

W dobie szybkiego rozwoju technicznego zużycie energii jest bardzo duże. Wiąże się to z równie dużym wykorzystaniem źródeł tej energii, a więc głównie paliw kopalnych o wysokim potencjale emisji szkodliwych substancji do atmosfery, a jednocześnie ograniczonych zasobach. Efektem jest zanieczyszczenie środowiska. Jednym ze sposobów zapobiegania degradacji środowiska jest stosowanie alternatywnych źródeł energii, których oddziaływanie na środowisko byłoby mniej negatywne. W przypadku motoryzacji nie jest to jednak cel łatwy do osiągnięcia. Nawet przy zastosowaniu paliwa, którego skład chemiczny jest korzystny z punktu widzenia oddziaływania na środowisko, efekt może nie zostać uzyskany, jeśli nie dostosuje się odpowiednio parametrów pracy silnika do tego paliwa.

Przykładem paliwa alternatywnego dla płynnych paliw ropopochodnych jest gaz ziemny, w którym stosunek wodoru do węgla korzystnie wpływa na ograniczenie produktów utleniania węgla w spalinach. Gaz ziemny jest paliwem o wysokiej wartości energetycznej oraz liczbie oktanowej, jednak znacznie mniejszej gęstości w porównaniu do benzyny czy oleju napędowego.

Silniki spalinowe zasilane gazem ziemnym w porównaniu do zasilanych benzyną charakteryzują się mniejszą emisją dwutlenku węgla i tlenków azotu, znikomą emisją cząstek stałych, a także zanieczyszczeń niekontrolowanych, takich jak benzen i PAH [4–7]. Z drugiej jednak strony emisja metanu jest znacznie większa i stanowi około 70–80% węglowodorów emitowanych w spalinach, podczas gdy przy zasilaniu silnika benzyną nie przekracza 10%. Metan, tak jak dwutlenek węgla jest zaliczany do gazów przyczyniających się do występowania efektu cieplarnianego [5, 6, 10]. Dodatkowo stopień konwersji metanu w reaktorach katalitycznych jest mały, znacznie odbiegający od utleniania węglowodorów wyższych rzędów [3].

Istotnym aspektem, mającym często niekorzystny wpływ na ekologię, jest fakt dostosowywania istniejących już silników zasilanych benzyną do zasilania dwupaliwowego. Ze względu na różnice we właściwościach paliw gazowych i ciekłych trudno jest uzyskać optymalne parametry procesu spalania bez precyzyjnego doboru elementów instalacji popartych badaniami optymalizacyjnymi [10].

Zasilanie silników gazem ziemnym jest realizowane przy stechiometrycznym składzie mieszanki albo przy składzie w zakresie mieszanek ubogich [4], stąd też w niniejszej pracy przeanalizowano wpływ składu mieszanki na emisję szkodliwych składników w spalinach oraz stopień konwersji reaktora katalitycznego.

2. Stanowisko pomiarowe

Pomiary wykonano na stanowisku badawczym w laboratorium silników spalinowych Akademii Górniczo-Hutniczej. Stanowisko jest wyposażone w hamulec elektrowirowy typu Schenck W130. Do przeprowadzenia pomiarów wykorzystano czterocylindrowy rzędowy silnik spalinowy o zapłonie iskrowym Fiat 170A1.00 o objętości skokowej 900 cm³. Silnik jest wyposażony w standardowy układ zasilania benzyną oraz w układ umożliwiający zasilanie gazem ziemnym. Ilość podawanego do silnika gazu ziemnego jest sterowana za pomocą regulatora dopływu gazu, co umożliwia zmianę składu mieszanki przy zasilaniu silnika gazem ziemnym. W układzie dolotowym silnika zamontowano przepływomierz powietrza i termopary. Termopary umieszczono także w układzie chłodzenia silnika oraz w układzie

wylotowym – w kolektorze wylotowym i za reaktorem katalitycznym. Ponadto stanowisko jest wyposażone w układ do objętościowego pomiaru zużycia paliwa ciekłego, przepływowy system pomiaru zużycia paliwa gazowego oraz analizator spalin typu Capelec CAP 3201.

3. Metodyka prowadzenia pomiarów

Założona metodyka pomiarów obejmowała rejestrację parametrów pracy silnika zasilanego gazem ziemnym przy stałej prędkości obrotowej 3000 1/min oraz stałym obciążeniu silnika. Parametrem, który zmieniano, był skład mieszanki palnej, co uzyskiwano, sterując położeniem silnika krokowego umieszczonego w układzie zasilania gazem ziemnym. Regulacja składu mieszanki wymagała odłączenia sondy lambda. W każdym punkcie pomiarowym mierzono zużycie paliwa, strumień masy powietrza, skład spalin oraz temperaturę w układzie dolotowym, wylotowym i chłodzenia. Pomiarzy przeprowadzono, dokonując rejestracji stężenia objętościowego składników spalin przed reaktorem katalitycznym, a następnie za reaktorem.

Na podstawie wyników pomiarów przeprowadzono analizę wpływu składu mieszanki na skład spalin silnika zasilanego gazem ziemnym, a także na skuteczność działania reaktora katalitycznego.

4. Analiza wyników pomiarów

Wykorzystanie analizatora spalin Capelec CAP3201 pozwoliło na rejestrowanie stężenia objętościowego poszczególnych składników spalin, które odnosiły się do objętości spalin suchych. Dlatego w celu obliczenia emisji poszczególnych składników spalin należało wyliczyć objętość spalin suchych [1, 2, 8].

Ponieważ zastosowanym paliwem jest wysokometanowy gaz ziemny o stężeniu metanu wynoszącym 96–98%, do obliczeń przyjęto założenie, iż jego skład stanowi 100% metanu, w wyniku czego uzyskano następujące objętościowe udziały poszczególnych składników spalin, pochodzących ze spalania zupełnego i całkowitego 1 m³ paliwa [9]:

$$\begin{aligned} V_{sp}(\text{CO}_2) &= 1 \text{ [m}^3/\text{m}^3 \text{ paliwa]} \\ V_{sp}(\text{H}_2\text{O}) &= 2 \text{ [m}^3/\text{m}^3 \text{ paliwa]} \\ V_{sp}(\text{N}_2) &= 7,5238 \cdot \lambda \text{ [m}^3/\text{m}^3 \text{ paliwa]} \\ V_{sp}(\text{O}_2) &= 1,999998 \cdot (\lambda - 1) \text{ [m}^3/\text{m}^3 \text{ paliwa]} \end{aligned}$$

Objętość spalin mokrych V_{spm} , powstałych ze spalania 1 m³ paliwa, wynosi:

$$V_{spm} = 1 + 9,523798 \cdot \lambda \text{ [m}^3 \text{ spalin/m}^3 \text{ paliwa]}$$

Natomiast objętość spalin suchych V_{sps} wynosi:

$$V_{sps} = 9,523798 \cdot \lambda - 1 \text{ [m}^3 \text{ spalin suchych/m}^3 \text{ paliwa]}$$

Na podstawie wyliczonych dla każdego punktu pomiarowego wartości objętości spalin suchych (V_{sps}) oraz zmierzonego objętościowego zużycia paliwa (\dot{V}_e) i stężenia objętościowego

wego poszczególnych składników spalin uzyskano objętościowe udziały poszczególnych składników spalin [2, 9]:

$$\dot{V}(\text{CO}_2) = V_{sps} \cdot \dot{V}_e \cdot [\text{CO}_2] \cdot 10^{-6} [\text{m}^3/\text{h}]$$

$$\dot{V}(\text{CO}) = V_{sps} \cdot \dot{V}_e \cdot [\text{CO}] \cdot 10^{-6} [\text{m}^3/\text{h}]$$

$$\dot{V}(\text{HC}) = V_{sps} \cdot \dot{V}_e \cdot [\text{HC}] \cdot 10^{-6} [\text{m}^3/\text{h}]$$

$$\dot{V}(\text{NO}_x) = V_{sps} \cdot \dot{V}_e \cdot [\text{NO}_x] \cdot 10^{-6} [\text{m}^3/\text{h}]$$

Strumień masy poszczególnych szkodliwych składników spalin został obliczony na podstawie równania Clapeyrona [2, 9]:

$$\dot{m}(\text{CO}_2) = \frac{p(\text{CO}_2) \cdot \dot{V}_{sps}}{R(\text{CO}_2) \cdot T_{sp}} [\text{kg}/\text{h}]$$

$$\dot{m}(\text{CO}) = \frac{p(\text{CO}) \cdot \dot{V}_{sps}}{R(\text{CO}) \cdot T_{sp}} [\text{kg}/\text{h}]$$

$$\dot{m}(\text{HC}) = \frac{p(\text{HC}) \cdot \dot{V}_{sps}}{R(\text{HC}) \cdot T_{sp}} [\text{kg}/\text{h}]$$

$$\dot{m}(\text{NO}_x) = \frac{p(\text{NO}_x) \cdot \dot{V}_{sps}}{R(\text{NO}_x) \cdot T_{sp}} [\text{kg}/\text{h}]$$

gdzie:

$p(\text{CO}_2)$, $p(\text{CO})$, $p(\text{HC})$ i $p(\text{NO}_x)$ – wartość ciśnienia cząstkowego poszczególnych składników spalin,

$R(\text{CO}_2)$, $R(\text{CO})$, $R(\text{HC})$, $R(\text{NO}_x)$ – indywidualna stała gazowa poszczególnych składników spalin,

\dot{V}_{sps} – strumień objętości spalin suchych,

T_{sp} , p_{sp} – temperatura i ciśnienie spalin.

Wartość ciśnienia cząstkowego danego składnika spalin, zgodnie z prawem Daltona, wynosi [2, 9]:

$$p(\text{CO}_2) = \frac{\dot{V}(\text{CO}_2)}{\dot{V}_{sps}} \cdot p_{sp} [\text{Pa}]$$

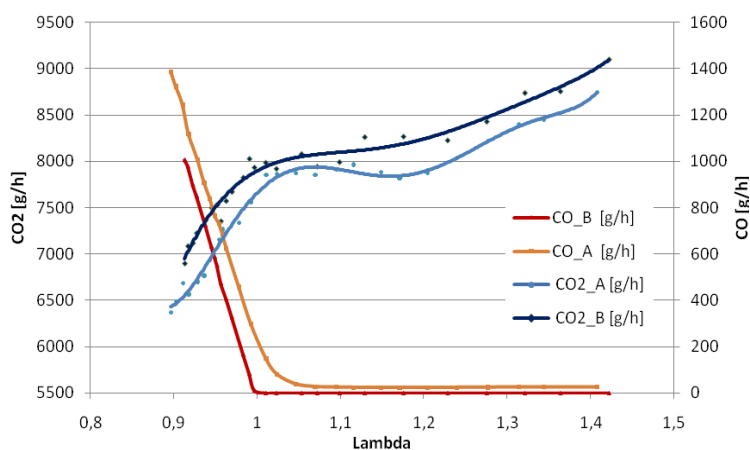
$$p(\text{CO}) = \frac{\dot{V}(\text{CO})}{\dot{V}_{sps}} \cdot p_{sp} [\text{Pa}]$$

$$p(\text{HC}) = \frac{\dot{V}(\text{HC})}{\dot{V}_{sps}} \cdot p_{sp} [\text{Pa}]$$

$$p(\text{NO}_x) = \frac{\dot{V}(\text{NO}_x)}{\dot{V}_{sps}} \cdot p_{sp} [\text{Pa}]$$

Wyniki pomiarów oraz obliczeń przedstawiono w postaci wykresów. Przeprowadzone prace miały na celu analizę wpływu składu mieszanki palnej przy zasilaniu silnika gazem ziemnym na emisję szkodliwych składników w spalinach, w związku z czym dane na wszystkich wykresach są przedstawione w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza λ .

Na rysunku 1 przedstawiono emisję dwutlenku węgla i tlenku węgla przed i za reaktorem katalitycznym. W zakresie współczynnika nadmiaru powietrza (λ) od 0,9 do 0,95 emisja CO za reaktorem jest mniejsza o 15–20%, jednak zarówno przed, jak i za reaktorem jest bardzo wysoka. Od wartości $\lambda = 0,95$ różnica rośnie aż do pełnej konwersji CO w reaktorze przy $\lambda = 1$. Równocześnie wartość emisji CO zmierzona przed reaktorem zmniejsza się w tym zakresie 8-krotnie, a w przedziale współczynnika λ od 1,1 do 1,4 ma wartość stałą nieprzekraczającą 25 g/h. Emisja CO₂ za reaktorem w całym zakresie współczynnika nadmiaru powietrza jest większa o około 1–8%, co wynika z utleniania CO w reaktorze katalitycznym.

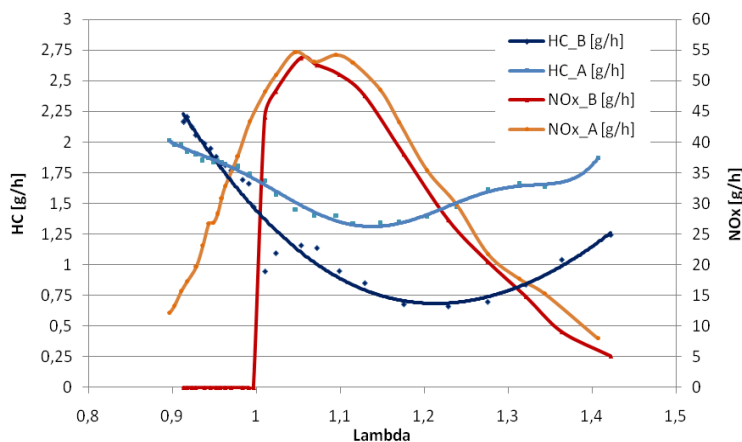


Rys. 1. Emisja dwutlenku węgla (CO₂) oraz tlenku węgla (CO) w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza (λ) z silnika zasilanego gazem ziemnym, zmierzona przed reaktorem katalitycznym (A) i za reaktorem katalitycznym (B)

Fig. 1. Carbon dioxide (CO₂) and carbon monoxide (CO) emissions as a function of the excess air coefficient (λ) for engine powered natural gas, measured before the catalytic converter (A) and by the catalytic converter (B)

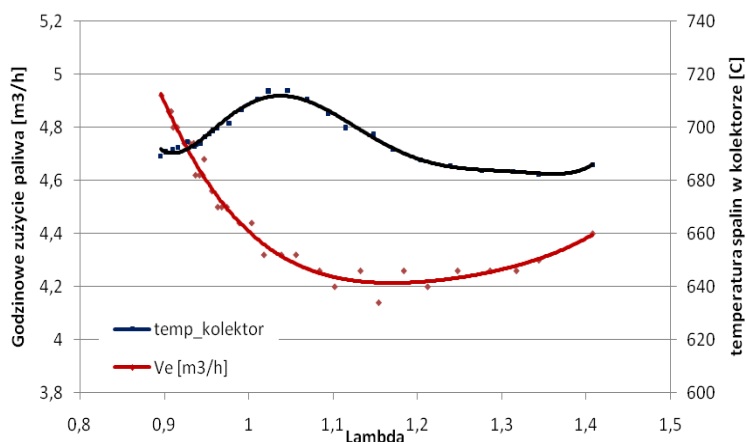
Rysunek 2 obrazuje emisję węglowodorów i tlenków azotu przed i za reaktorem katalitycznym. Emisja HC w całym zakresie współczynnika nadmiaru powietrza nie przekracza wartości 2 g/h. Wyjątek stanowi, w wąskim zakresie współczynnika λ (0,9–0,93), emisja za reaktorem, która nieznacznie przekracza tę wartość, oraz wartość emisji przed reaktorem, dochodząc do 2,2 g/h. Wzrost wartości emisji HC, zarówno przed reaktorem, jak i za nim, przy λ większym od 1,2 wynika ze zmniejszenia prędkości zachodzenia reakcji spalania, spowodowanego znacznym nadmiarem powietrza w komorze spalania. Emisja tlenków azotu zmienia się w szerokim zakresie wartości w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza. Pełna konwersja następuje jedynie w przedziale λ od 0,9 do 0,99, po którym następuje gwałtowny wzrost emisji do wartości maksymalnej około 54 g/h przy $\lambda = 1,07$. Przy wartości współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda = 0,95$ w układzie wylotowym silnika zaczyna

rosnąć temperatura spalin (rys. 3). W kolektorze wylotowym temperatura spalin zmienia się od wartości 690°C do 715°C przy λ od 0,99 do 1,04, a następnie zmniejsza się jej wartość do 700°C przy $\lambda = 1,1$, osiągając w dalszym przedziale wartość około 690°C. W następstwie wzrostu temperatury spalania rośnie emisja NO_x , osiągając wartości powyżej 45 g/h w zakresie współczynnika nadmiaru powietrza λ od 1,0 do 1,15, przy czym maksymalna wartość to około 55 g/h. Od momentu uzyskania mieszanki stechiometrycznej różnica w emisji NO_x przed i za reaktorem katalitycznym wynosi około 5–10%.



Rys. 2. Emisja węglowodorów (HC) oraz tlenków azotu (NO_x) w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza (λ) z silnika zasilanego gazem ziemnym, zmierzona przed reaktorem katalitycznym (A) i za reaktorem katalitycznym (B)

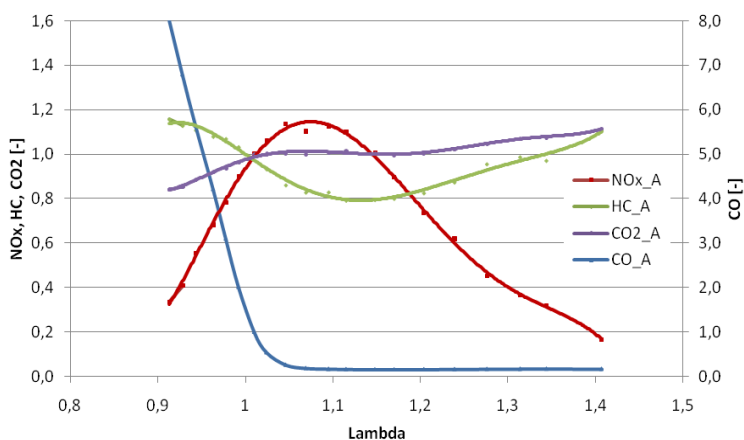
Fig. 2. Hydrocarbons (HC) and nitrogen oxides (NO_x) emissions as a function of the excess air coefficient (λ) for engine powered natural gas, measured before the catalytic converter (A) and by the catalytic converter (B)



Rys. 3. Zużycie gazu ziemnego oraz temperatura spalin w kolektorze wylotowym w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza (λ)

Fig. 3. Natural gas consumption and exhaust temperature in the exhaust manifold as a function of the excess air coefficient (λ)

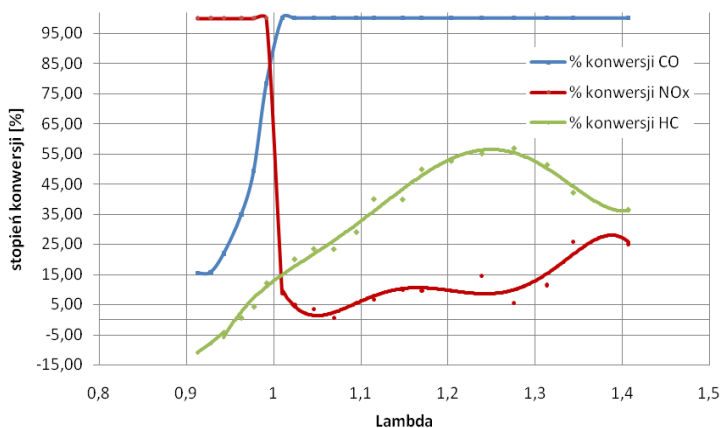
Wykres na rysunku 4 zawiera porównanie względnej emisji poszczególnych składników spalin przed reaktorem katalitycznym w odniesieniu do emisji przy stechiometrycznym składzie mieszanki, którą przyjęto jako wartość odniesienia. Emisja CO_2 ma stałą wartość, począwszy od $\lambda = 1,0$ do $\lambda = 1,2$. Równocześnie od wartości współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda = 1,1$ emisja CO jest stała i ma małą wartość, wynoszącą ok. 15–17% wartości emisji dla $\lambda = 1$. W przypadku węglowodorów emisja jest również bardzo mała, a jej minimum przypada dla przedziału współczynnika nadmiaru powietrza λ wynoszącego od 1,07 do 1,2. Charakterystyka emisji NO_x w analizowanym zakresie λ powoduje, iż trudno znaleźć optymalny obszar pracy silnika z punktu widzenia emisji tego związku do atmosfery w powiązaniu z pozostałymi szkodliwymi składnikami spalin.



Rys. 4. Względna emisja szkodliwych składników spalin przed reaktorem katalitycznym w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza (λ) odniesiona do emisji przy mieszance stechiometrycznej

Fig. 4. The comparative harmful substances emission before the catalytic converter as a function of the excess air coefficient (λ), in relation to the stoichiometric mixture emissions

Stożek konwersji toksycznych składników spalin w reaktorze katalitycznym został przedstawiony na rysunku 5. Dla mieszanki stechiometrycznej ($\lambda = 1$) stopień konwersji tlenków węgla wynosi 89%, tlenków azotu 61%, a węglowodorów 14%. Konwersja CO równa 100% następuje od wartości $\lambda = 1,01$, natomiast dla NO_x do wartości $\lambda = 0,99$. W przypadku HC maksymalny stopień konwersji wynosi 57% i jest uzyskiwany przy $\lambda = 1,27$.



Rys. 5 Stopień konwersji toksycznych składników spalin w reaktorze katalitycznym w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza (λ)

Fig. 5. Conversion efficiency of the toxic elements in the catalytic converter as a function of the excess air coefficient (λ)

5. Wnioski

Producenci pojazdów coraz częściej decydują się na zamieszczenie wśród wersji danego modelu również pojazdu z silnikiem zasilanym dwupaliwowo-benzyną i gazem ziemnym lub tylko gazem ziemnym. Wynika to z konieczności zmniejszenia niekorzystnego oddziaływania motoryzacji na środowisko oraz z potrzeby ekonomii eksploatacji pojazdów, której oczekują użytkownicy. Fabrycznie zamontowany układ charakteryzuje się precyzyjnie dostosowanymi parametrami pracy silnika do zastosowanego paliwa, co w przypadku tak zwanych nakładkowych systemów zasilania gazem jest trudne do uzyskania, w związku z czym niekoniecznie daje pozytywny efekt ekologiczny.

Na stanowisku hamowni silnikowej przeprowadzono pomiary emisji szkodliwych składników spalin w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza dla silnika będącego przedstawicielem starszej generacji rozwiązań konstrukcyjnych, do którego dostosowano układ zasilania gazem ziemnym. Badanie silnika na hamowni silnikowej nie daje możliwości porównania wielkości emisji składników spalin z obowiązującymi normami. Dlatego wykonano analizę względną emisji, wynikającą ze składu mieszanki, zapewniając stałe warunki pracy silnika.

Emisja dwutlenku węgla w analizowanym zakresie współczynnika nadmiaru powietrza była bardzo wysoka, jednak ten sam silnik zasilany benzyną wykazywał jeszcze większą emisję dwutlenku węgla, co wynika ze znacznie mniejszej zawartości węgla w gazie ziemnym. Podobnie kształtowała się sytuacja w przypadku emisji tlenków azotu, która również była wysoka w całym badanym zakresie i jednocześnie niższa niż przy zasilaniu benzyną, co także jest konsekwencją składu chemicznego paliwa. Uzyskanie niższej wartości emisji tych składników wymagałoby optymalizacji procesu spalania oraz wzrostu stopnia sprężania podczas zasilania silnika gazem ziemnym. Stężenie objętościowe tlenu węgla w surowych

spalinach, w zakresie zasilania silnika mieszanką ubogą, od wartości współczynnika nadmiaru powietrza 1,1, było bardzo małe. Natomiast w zakresie od mieszanki stechiometrycznej po bogatą emisja tlenu węgla bardzo gwałtownie wzrastała, uzyskując 8-krotnie wyższą wartość. Emisja węglowodorów w całym zakresie pomiarów była bardzo mała, ale też stopień konwersji tego składnika w reaktorze katalitycznym nie był duży. Może to wskazywać, iż przeważającą większość emitowanych węglowodorów stanowił metan, a sprawność konwersji metanu w reaktorach katalitycznych jest bardzo mała [3].

Z punktu widzenia poziomu emisji poszczególnych składników spalin w surowych spalinach, jak również z punktu widzenia sprawności silnika w badanym zakresie pracy, jego zasilanie ubogą mieszanką gazu ziemnego z powietrzem o współczynniku nadmiaru powietrza 1,2 wydaje się być najbardziej korzystne. Aby dokonać pełnej analizy wpływu składu mieszanki palnej na skład spalin, w celu wybrania optymalnego zakresu współczynnika nadmiaru powietrza, należy przeprowadzić pomiary dla pozostałych punktów pracy silnika.

Literatura

- [1] Bernhardt M., Dobrzyński S., Loth E., *Silniki Samochodowe*, WKiŁ, Warszawa 1974.
- [2] Brzeżański M., *Emisja toksycznych składników spalin w fazie nagrzewania się silnika o zapłonie iskrowym z zastosowaniem akumulatora ciepła*, Monografia nr 326, seria Mechanika, Kraków 2007.
- [3] Kruczyński S., *Trójfunkcyjne reaktory katalityczne*, Warszawa–Radom 2004.
- [4] Merkisz J., Pielecha I., *Alternatywne napędy pojazdów*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.
- [5] Merkisz J., Pielecha I., Radziński S., *Pragmatyczne podstawy ochrony powietrza atmosferycznego w transporcie drogowym*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2009.
- [6] Merkisz J., Radziński S., *Analiza metod pomiaru emisji węglowodorów według przepisów europejskich dotyczących emisji zanieczyszczeń z pojazdów*, „Silniki Spalinowe” 1/2009 (136), 76-89.
- [7] Molenda J., *Gaz ziemny – paliwo i surowiec*, WNT, Warszawa 1996.
- [8] Niewiarowski K., *Tłokowe silniki spalinowe*, WKiŁ, Warszawa 1983.
- [9] Ochęduszek S., Szargut J., Górniak H., Guzik A., Wilk S., *Zbiór zadań z termodynamiki technicznej*, PWN, Warszawa 1975.
- [10] Romaniszyn K.M., *Alternatywne zasilanie samochodów benzyną oraz gazami LPG i CNG. Badania porównawcze dynamiki rozpędzania i emisji spalin*, WNT, Warszawa 2007.