

Katedra Fizyki Akademii Rolniczej w Lublinie

Krzysztof KORNARZYŃSKI, Tomasz ÓWIKŁA\*,  
Jacek WASILEWSKI\*, Roman KOPER,  
Eugeniusz KRASOWSKI\*

**Masowo-spektrometryczne badania  
wpływu nieprawidłowej eksploatacji silnika wysokoprężnego  
na emisję toksycznych składników spalin**

Mass Spectrometer Investigation of the Influence of Diesel Engine Improper Exploitation  
on the Toxic Exhaust Gas Contaminant Emission

1. WPROWADZENIE

Zmiana parametrów przebiegu wtrysku paliwa wpływa na wskaźniki ekonomiczno-techniczne silnika wysokoprężnego oraz na emisję toksycznych składników spalin do atmosfery. Analiza gazów spalinowych silników wysokoprężnych, prowadzona w ramach tematu TKF/DS-1 realizowana była przy współpracy z Zakładem Pojazdów i Silników IMR. Badania dotyczyły wpływu zmiennego wydatku i stopnia zużycia sekcji tłoczących na toksyczność emitowanych spalin.

Niepowtarzalność czasowa wtrysku wyraża się różnym przebiegiem wtrysku paliwa w kolejnych cyklach pracy silnika. Jej przyczyną są przede wszystkim zjawiska hydrodynamiczne występujące w przewodach wysokiego ciśnienia oraz nierównomierność dawkowania paliwa przez poszczególne sekcje tłoczące pompy wtryskowej.

Nierównomierność dawkowania wynika z samej konstrukcji układu wtryskowego, w szczególności rozpylaczy paliwa, ale zależy również od stopnia zużycia par precyzyjnych i zaworów tłoczących pompy wtryskowej oraz od warunków pracy silnika.

Do związków toksycznych występujących w gazach spalinowych zaliczamy głównie: tlenek węgla, tlenki azotu oraz niespalone węglowodory [1, 4].

\* Instytut Mechanizacji Rolnictwa AR w Lublinie.

Tlenki azotu powstają w obszarach o dużym nadmiarze powietrza i wysokiej temperaturze [2, 6] jako skutek reakcji azotu z tlenem zawartym w atmosferze. Do związków tych należą między innymi tlenek i dwutlenek azotu.

Tlenek węgla powstaje na skutek niezupełnego spalania węgla w warunkach niedoboru tlenu. Powstawaniu CO sprzyja również niedostateczne rozpylenie paliwa, jego złe wymieszanie z powietrzem oraz niska temperatura procesu spalania. Może on powstać również na skutek dysocjacji  $\text{CO}_2$  w wysokich temperaturach.

Węglowodory znajdujące się w spalinach pochodzą z niecałkowitego spalania paliwa oraz z częściowego rozpadu frakcji węglowodorowych w wysokiej temperaturze w procesie spalania. Istotnym czynnikiem jest niedomiar tlenu w obszarach o stosunkowo niskiej temperaturze (tj. w pobliżu ścianek cylindra i komory spalania silnika), co prowadzi do emisji węglowodorów, tlenku węgla i sadzy.

## 2. METODYKA BADAŃ

Przedmiotem badań był wysokoprężny, czterocylindrowy silnik spalinowy S-4002, z wtryskiem bezpośrednim o mocy 33,1 kW. Został on zamontowany na stanowisku dynamometrycznym hamowni silnikowej IMR AR w Lublinie, skąd pobierano próbki gazu do analizy. Próbkę spalin pobierana była do odpompowanego do wysokiej próżni i wygrzanego szklanego zbiornika o pojemności ok. 0,3 l, a następnie podawana za pomocą układu dozującego do źródła jonów spektrometru masowego.

Do uzyskania wiązki jonów badanych gazów zastosowano źródło jonów Niera z wiązką elektronową. Podczas analizy wszystkich próbek parametry pracy źródła jonów były jednakowe. Pomiary wykonywano przy energii elektronów jonizujących  $E_e = 100$  eV, dla energii jonów  $E_j = 2,9$  keV. Dla natężenia przepływu badanego gazu  $J = 3,12 \times 10^{-4}$  Tr l s<sup>-1</sup> ciśnienie gazu w komorze jonizacyjnej źródła wynosiło ok.  $0,9 \times 10^{-4}$  Tr. Do analizy gazów spalinowych zastosowano spektrometr masowy podwójnie ogniskujący, będący w posiadaniu Katedry Fizyki AR w Lublinie.

Zawartość tlenków azotu i tlenku węgla w badanych próbkach została wyznaczona w stosunku do dobrze określonej zawartości argonu w powietrzu, wynoszącej 0,93%. Argon jest gazem obojętnym, nie biorącym udziału w reakcjach procesu spalania, stąd jego zawartość w analizowanej próbce jest taka sama, jak w powietrzu. Zawartość tlenku węgla i tlenków azotu została wyznaczona po uwzględnieniu wartości przekrojów czynnych na jonizację tych gazów elektronami. Wartości przekrojów czynnych zostały zaczerpnięte z prac [2, 6, 7] dla energii elektronów 100 eV.

Zawartość węglowodorów w badanych próbkach została wyznaczona w stosunku do zawartości argonu w powietrzu. Widmo analizowanych węglowodorów jest bardzo złożone stąd trudno odróżnić od siebie pasma odpowiadające alkanom, alkenom czy związkom cyklicznym. Dlatego też zostały przeprowadzone własne pomiary, których celem było określenie zawartości węglowodorów w próbce.

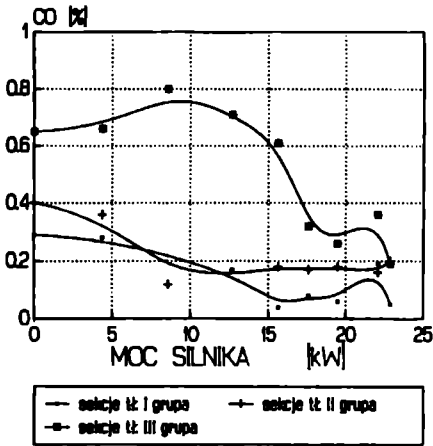
Polegały one na wprowadzeniu do źródła jonów spektrometru mieszaniny czystego spektralnie argonu i par ropy naftowej używanej do zasilania badanego silnika, przy dobrze określonym stosunku ciśnień tych związków w zbiorniku dozującym. Otrzymane widmo spektrometryczne dla energii elektronów jonizujących 100 eV umożliwia określenie zawartości niespalonych węglowodorów w próbce spalin na przykład na podstawie pomiaru prądów jonowych wybranych, charakterystycznych mas. Przeprowadzona w ten sposób normalizacja opiera się na założeniu, że skład węglowodorów zawartych w analizowanej próbce jest taki, jak w ropie naftowej. Dlatego też zawartości węglowodorów w badanych próbkach są szacunkowe, lecz zmiana ich zawartości w funkcji parametrów pracy silnika została wyznaczona precyzyjnie.

Stopień zużycia elementów tłoczących pompy wtryskowej określono na podstawie badania szczelności metodą hydrauliczną. Szczelność sekcji tłoczących sprawdzana była na podstawie pomiaru czasu spadku ciśnienia cieczy w zamkniętej przestrzeni o ściśle określonej pojemności. Spadek ciśnienia jest wynikiem wyciekania cieczy przez nieszczelny zespół tłoczący [1, 8]. Do sprawdzenia wtryskiwaczy użyto — jako pompy wtryskowo-ciśnieniowej — próbnika typu PRW-3 połączonego z przyrządem do sprawdzania szczelności sekcji tłoczących pompy wtryskowej. Do ustawienia dawek paliwa podawanych przez sekcje tłoczące o różnym stopniu zużycia wykorzystano stół probierczy typu PW-2.

Badania zostały przeprowadzone dla trzech grup sekcji tłoczących typu Bosch. Badane sekcje zostały sklasyfikowane pod względem stopnia zużycia w zależności od czasu spadku ciśnienia od 24 MPa do 20 MPa, gdzie:

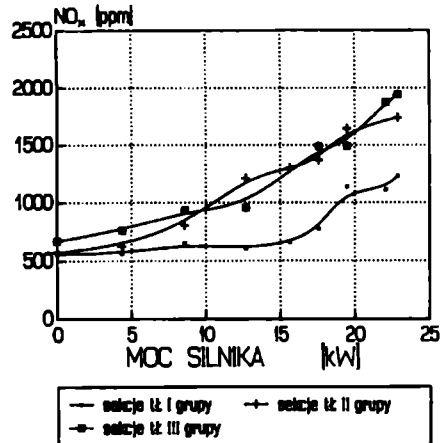
- sekcje grupy I były nowe; czas spadku ciśnienia wynosił dla nich 6,4 s, co odpowiada 0% ich zużycia;
- sekcje grupy II; czas spadku ciśnienia wynosił dla nich 4,8 s, co odpowiada 25% ich zużycia;
- sekcje grupy III; czas spadku ciśnienia wynosił dla nich 2,4 s, co odpowiada 63% ich zużycia.

Wpływ zużycia sekcji tłoczących pompy wtryskowej na zawartość tlenu węgla, tlenków azotu i niespalonych węglowodorów w spalinach — przy



Ryc. 1. Zawartość tlenku węgla w spalinach w funkcji mocy znamionowej w zależności od stopnia zużycia sekcji tłoczących silnika

Fig. 1. Content of carbon oxide in exhaust gas as a function of the rated power in dependence on the degree of wear of the Diesel engine pumping section



Ryc. 2. Zawartość tlenków azotu w spalinach w funkcji mocy znamionowej w zależności od stopnia zużycia sekcji tłoczących silnika

Fig. 2. Content of nitric oxide in exhaust gas as a function of the rated power in dependence on the degree of wear of the Diesel engine pumping section

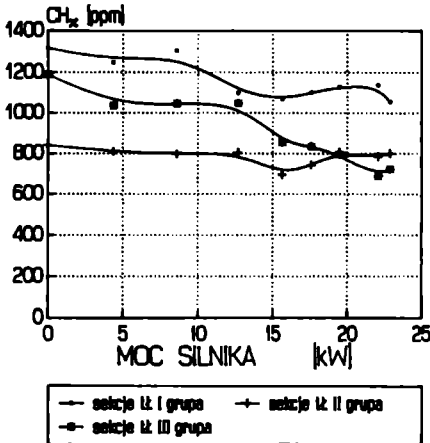
ustawieniu poszczególnych sekcji na nominalne dawki paliwa wynoszące  $5,3 \text{ cm}^3/100$  wtrysków — przedstawiają odpowiednio ryciny 1, 2, 3.

Wpływ zmiennego wydatku sekcji tłoczących (dawek wtryskiwanego paliwa) o różnym stopniu zużycia na emisję tlenku węgla, tlenków azotu i węglowodorów przedstawiają odpowiednio ryciny 4, 5, 6.

### 3. WNIOSKI

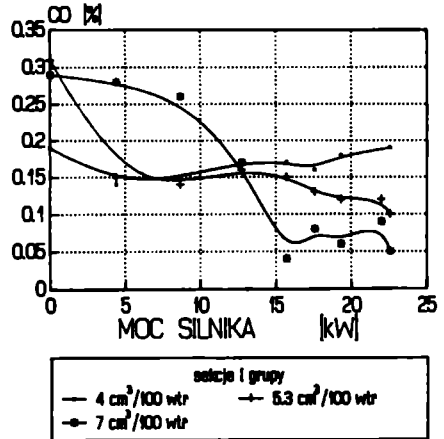
Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że stopień zużycia sekcji tłoczących pompy wtryskowej oraz zmiana dawki paliwa wpływają na emisję toksycznych składników spalin do atmosfery.

Zawartość tlenku węgla w spalinach maleje wraz ze wzrostem mocy silnika dla sekcji tłoczących o różnym stopniu zużycia. Jest ona największa dla sekcji najbardziej zużytych (sekcje III grupy) i zmienia się w zakresie od 0,6% do 0,25%, co przedstawiono na rycinie 1. Zawartość CO w spalinach dla nowych sekcji tłoczących (sekcje I grupy) jest największa w zakresie małych mocy silnika dla wszystkich dawek paliwa. Największa zawartość (0,3%) jest charakterystyczna dla większych dawek paliwa, co zostało przedstawione na rycinie 4.



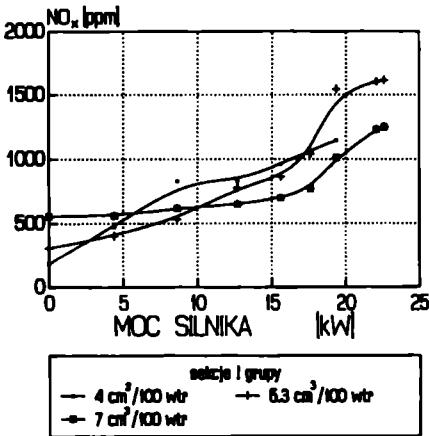
Ryc. 3. Zawartość węglowodorów w spalinach w funkcji mocy znamionowej w zależności od stopnia zużycia sekcji tłoczących silnika

Fig. 3. Content of hydrocarbons in exhaust gas as a function of the rated power in dependence on the degree of wear of the Diesel engine pumping section



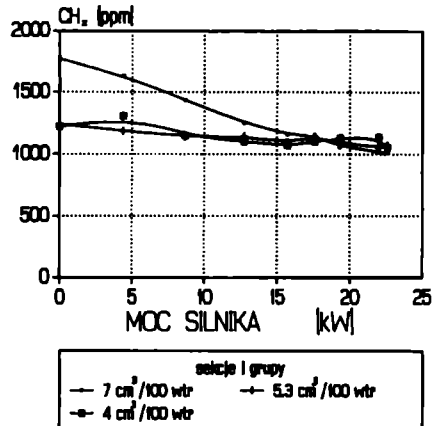
Ryc. 4. Zawartość tlenu węgla w spalinach w funkcji mocy znamionowej dla różnych dawek paliwa pobieranego przez silnik

Fig. 4. Content of carbon oxide in exhaust gas as a function of the rated power for different fuel charges injection by the Diesel engine



Ryc. 5. Zawartość tlenków azotu w spalinach w funkcji mocy znamionowej dla różnych dawek paliwa pobieranego przez silnik

Fig. 5. Content of nitric oxide in exhaust gas as a function of the rated power for different fuel charges injection by the Diesel engine



Ryc. 6. Zawartość węglowodorów w spalinach w funkcji mocy znamionowej dla różnych dawek paliwa pobieranego przez silnik

Fig. 6. Content of hydrocarbons in exhaust gas as a function of the rated power for different fuel charges injection by the Diesel engine

Zawartość tlenków azotu w spalinach wzrasta wraz ze wzrostem mocy silnika i jest najmniejsza dla sekcji tłoczących najmniej zużytych. Największa zawartość  $\text{NO}_x$  występuje dla sekcji o większym stopniu zużycia i przy nominalnej dawce paliwa (ok. 2000 ppm). Zależności te przedstawiono odpowiednio na rycinach 2 i 5.

Zawartość węglowodorów w spalinach spada wraz ze wzrostem mocy silnika osiągając najwyższy poziom dla sekcji najmniej zużytych (ok. 1300 ppm) oraz dla największej dawki wtryskiwanego paliwa (ok. 1800 ppm). Zależności te przedstawiono odpowiednio na rycinach 3 i 6.

Podsumowując można stwierdzić, iż prawidłowa regulacja i stan techniczny silnika wysokoprężnego mają ogromny wpływ na emisję szkodliwych składników spalin.

#### PIŚMIENNICTWO

- [1] Falkowski H., Hauser G., Janiszewski T., Jaskula A., *Układy wtryskowe silników wysokoprężnych*, WKiŁ Warszawa 1989.
- [2] Hille E., Märk T. D., *J. Chem. Phys.*, 69 (10) (1978) 4600.
- [3] Kornarzyński K., Koper R., Łacek R., Krasowski E., Wasilewski J., Ćwikła T., Marko R., *Badanie wpływu niektórych parametrów pracy silników ZS na toksyczność spalin przy zastosowaniu spektrometru masowego. III Międzynarodowa Konferencja Naukowa, Problemy Techniki Rolniczej i Leśnej*, SGGW, Warszawa 1992, s. 82.
- [4] Kowalewicz A., *Systemy spalania szybkoobrotowych tłokowych silników wysokoprężnych*, WKiŁ, Warszawa 1990.
- [5] Krasowski E., *Wpływ zużycia par precyzyjnych na parametry pracy silnika wysokoprężnego. Prace Naukowe Politechniki Lubelskiej*, Lublin 1992, s. 193.
- [6] Mark T. D., *Int. Mass Spectrom. Ion Phys.*, 45 (1982) 125.
- [7] Stephan K., Helm H., Kim B., Seykora G., Ramler J., Grössl M., *J. Chem. Phys.*, 73 (1) (1980) 303.
- [8] Zabłocki M., *Wtrysk i spalanie paliwa w silniku wysokoprężnym*, WKiŁ, Warszawa 1978.

#### SUMMARY

The results of measurements of nitric oxides, carbon oxides and inburned hydrocarbons in the exhaust gas as a function of the state parameters of Diesel engine are presented. It is also possible to estimate the correctness of engine work and the influence of incorrect work on environment.