

## SELECTED METHODS OF TOXICITY EXHAUST GAS REDUCTION FROM DIESEL ENGINE IN ASPECT OF EMISSION STANDARDS

**Hubert Kuszewski**

Rzeszów University of Technology  
Al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, Poland  
tel.:+48 17 8651582, tel/fax:+48 17 8543112  
e-mail:hkuszewski@prz.rzeszow.pl

**Kazimierz Lejda**

Rzeszów University of Technology  
Al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, Poland  
tel.:+48 17 8651582, tel/fax:+48 17 8543112  
e-mail:klejda@prz.rzeszow.pl

### **Abstract**

*In the article selected methods of toxicity exhaust gas reduction from diesel engine are presented. The influence of chosen parameters connected with fuel injection on toxic components emission of exhaust gas in diesel engines in the article have been described. The exhaust gas emission standards of diesel engine also are presented.*

*The article presents particularly some methods reduction of emissive of toxins, among them methods of influence on working process of diesel engine, as well as the use of alternative fuels for supplying of diesel engines and catalytic reduction of toxins.*

*In the paper one compared the range and speeds front stream of the classical injector and with rotatory-reversible motion of the needle, the influence angle beginning of fuel injection on emission of nitrous oxides, the smokiness of exhaust gases and fuel consumption at varying pressures of the injection, the influence dose after injection of diesel oil on the reduction efficiency of nitrous oxides in catalytic converter, the influence of the dose after injection of diesel oil on the reduction efficiency of nitrous oxides in catalytic converter.*

*Among methods of NO<sub>x</sub> content constrain in exhaust gases of diesel engine there were underlining among other things the changes of pressure and beginning of fuel injection and selective catalytic reduction in which the dose after injection's diesel oil is a reducing factor nitrous oxides. Pointed out thereon that an efficient method decreasing emission of particulate matter was increasing of the of fuel injection pressure.*

**Keywords:** *combustion engines, exhaust emission, fuel injection, alternative fuels, nitric oxides, particulate matter*

## WYBRANE METODY OGRANICZANIA TOKSYCZNOŚCI SPALIN SILNIKA ZS W ASPEKCIE LIMITÓW EMISYJNYCH

### **Streszczenie**

*W artykule są przedstawione wybrane metody redukcja toksyczności gazów wydechowych silnika wysokopięrznego. Wpływ wybranych parametrów połączony z wtryskiem paliwa na emisję toksycznych składników spalin silników wysokopięrnych są opisane w artykule. Także są prezentowany normy dotyczące emisji spalin silników wysokopięrnych.*

*Artykuł prezentuje w szczególności niektóre sposoby ograniczenia emisyjności toksyn, w tym metody oddziaływania na proces roboczy silnika wysokopięrznego, jak również wykorzystanie paliw alternatywnych do zasilania silników wysokopięrnych oraz katalityczną redukcję toksyn.*

*W artykule porównano zasięg i prędkości czoła strugi rozpylacza klasycznego i z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy, wpływ kąta początku wtrysku paliwa na emisję tlenków azotu, zadymienie spalin i jednostkowe zużycie paliwa przy różnych ciśnieniach wtrysku, wpływ dawki po wtrysku oleju napędowego na sprawność redukcji tlenków azotu w konwertorze katalitycznym, wpływ dawki po wtrysku oleju napędowego na sprawność redukcji tlenków azotu w konwertorze katalitycznym*

Wśród metod ograniczania zawartości  $NO_x$  w spalinach silnika wysokoprężnego podkreśla się m.in. zmianę ciśnienia i początku wtrysku paliwa oraz selektywną katalityczną redukcję, w której dawka po wtrysku oleju napędowego jest czynnikiem redukującym tlenki azotu. Zwrócono uwagę na to, że skutecznym sposobem zmniejszenia emisji cząstek stałych jest zwiększenie ciśnienia wtrysku paliwa.

**Słowa kluczowe:** silnik spalinowy, emisja spalin, wtrysk paliwa, paliwa alternatywne, tlenki azotu, cząstki stałe

## 1. Wstęp

Konstrukcyjny i technologiczny rozwój pojazdów samochodowych jest uwarunkowany obecnie głównie czynnikami ekologicznymi. Ochrona środowiska naturalnego przed skażeniami motoryzacyjnymi jest traktowana w krajach UE jako zagadnienie priorytetowe. Dlatego też odpowiednie dyrektywy Komisji Europejskiej nakładają na producentów silników spalinowych i pojazdów limity emisji składników toksycznych dla uzyskania świadectwa homologacji wyrobu.

Wobec radykalnej prognozy wzrostu liczby użytkowników pojazdów oraz, co się z tym bezpośrednio wiąże, dużego zwiększenia zapotrzebowania na paliwa silnikowe można sądzić, że globalna emisja spalin będzie nadal wzrastać, a ekologiczna presja wywierana na producentów silników odnośnie obniżenia toksyn w spalinach będzie jeszcze bardziej restrykcyjna. Dla spełnienia przyszłościowych wymagań ekologicznych należy wciąż poszukiwać rozwiązań, które poprzez ingerencję w proces roboczy silnika będą w stanie tym wymaganiom sprostać.

Obecnie samochody osobowe oraz lekkie pojazdy użytkowe są coraz częściej wyposażane w wysokoprężne silniki z bezpośrednim wtryskiem paliwa. Wypierają one mniej ekonomiczne silniki benzynowe i wysokoprężne z dzielonymi komorami spalania.

W artykule zwrócono uwagę na limity emisyjne składników toksycznych spalin silników wysokoprężnych oraz zaprezentowano wybrane metody umożliwiające ograniczenie tej emisji. W szczególności uwagę zwrócono na ograniczenie emisji cząstek stałych i tlenków azotu.

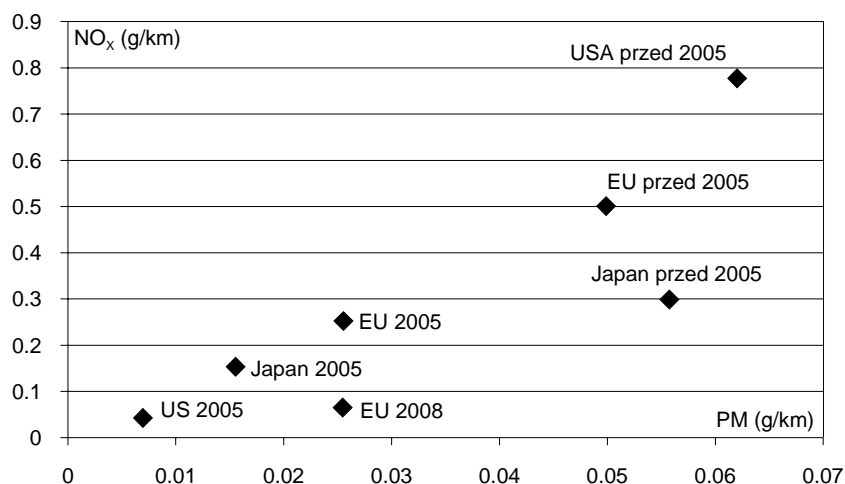
## 2. Normy emisyjności zanieczyszczeń w spalinach silników samochodowych

Jak wspomniano, występujące tendencje rynkowe w zakresie zastosowań silników spalinowych nakazują zwrócenie uwagi na emisję zanieczyszczeń silników wysokoprężnych, które stanowią wyłączość w transporcie towarów i komunikacji zbiorowej (mikrobusy, autobusy) oraz zaczynają wypierać silniki z zapłonem iskrowym z komunikacji indywidualnej (samochody osobowe). Biorąc niniejszy fakt pod rozwagę producenci pojazdów na całym świecie, sygnalizują uzyskanie bardzo niskich poziomów toksyn już w najbliższej przyszłości. Ilustrują to rys.1 i rys.2 dla emisyjności zanieczyszczeń przyjętych w USA, UE i Japonii [2,8]. Rysunki przedstawiają jedynie wartości dla tlenków azotu  $NO_x$  i cząstek stałych PM, jako najbardziej trudnych do wyeliminowania w silnikach wysokoprężnych.

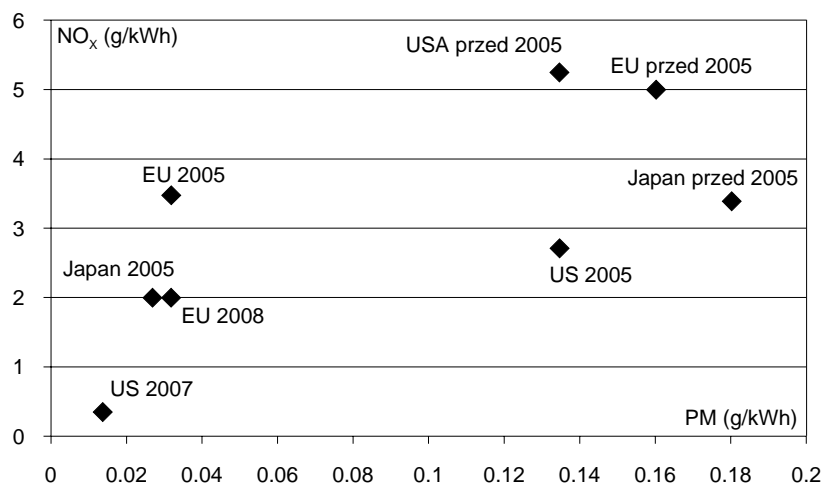
## 3. Niektóre sposoby ograniczenia emisyjności toksyn

### 3.1. Oddziaływanie na proces roboczy silnika ZS

W procesie spalania w silniku wysokoprężnym można wyróżnić dwie fazy: spalanie kinetyczne i dyfuzyjne. Występują one po sobie niosąc charakterystyczny wpływ na proces spalania, a więc i na tworzenie składników toksycznych. Spalanie kinetyczne związane jest z utworzeniem mieszaniny homogenicznej. Dochodzi do niego wówczas, gdy krople zostaną odparowane i zmieszane z powietrzem. Mieszanie odbywa się w czasie odparowania paliwa albo po jego zakończeniu. Natomiast spalanie dyfuzyjne dotyczy mieszaniny heterogenicznej – parująca kropla będąca źródłem pary paliwa, spala się w powietrzu w formie płomienia dyfuzyjnego obejmującego kroplę.



Rys. 1. Emisyjne standardy ( $NO_x$ , PM) dla samochodów osobowych i LDV z silnikami wysokoprężnymi  
 Fig. 1. Emission standards ( $NO_x$ , PM) for passenger cars and LDV with diesel engines



Rys. 2. Emisyjne standardy ( $NO_x$ , PM) dla HDV  
 Fig. 2. Emission standards ( $NO_x$ , PM) for HDV

Przykładowo, ewolucję emisyjnych standardów od Euro 1 do Euro 5 dla samochodów osobowych i użytkowych poniżej 3,5 tony zawarto w tabeli 1 [2].

Tab. 1. Normy emisji UE dla samochodów osobowych i użytkowych do 3,5 tony (LDV)  
 Tab. 1. Emission standards of EU for passenger cars and LDV

Samochody osobowe i użytkowe do 3,5 tony	PM (mg/km)		NO <sub>x</sub> (g/km)		HC (g/km)		HC + NO <sub>x</sub> (g/km)	
	ZS	ZI	ZS	ZI	ZS	ZI	ZS	ZI
Euro 1 (1992-93)	140	-	-	-	-	-	0,97	0,97
Euro 2 (1996)	80/100 <sup>1</sup>	-	-	-	-	-	0,7/0,9 <sup>1</sup>	0,5
Euro 3 (2000)	50	-	0,50	0,15	-	0,20	0,56	-
Euro 4 (2005)	25	-	0,25	0,08	-	0,10	0,30	-
Euro 5 propozycja (2008)	2,5	2,5	0,08	0,08	0,05	0,05	-	-

<sup>1</sup>Odpowiednio wtrysk pośredni lub wtrysk bezpośredni

Powszechnie wiadomo, że intensyfikacja przejmowania ciepła przez czynnik roboczy w okresie spalania kinetycznego powoduje wzrost emisji tlenków azotu. Stąd niekiedy tendencja do zmniejszania zawiorowania ładunku (zerowirowe komory spalania), które przyczynia się do jego turbulencji [1]. Homogenizację mieszaniny paliwowo-powietrznej osiąga się w takim przypadku za pomocą wysokiego ciśnienia wtrysku, które przyczynia się do zmniejszania kropel paliwa, a tym samym do łatwiejszego ich odparowania. Zastosowanie mniejszych ciśnień wtrysku, przy jednoczesnym zwiększeniu zawiorowania ładunku, ogranicza wprawdzie emisję cząstek stałych (PM), lecz powoduje zwiększoną emisję tlenków azotu ( $\text{NO}_x$ ). Opóźnianie początku wtrysku paliwa zmniejsza okres opóźnienia samozapłonu; zmniejsza się zatem maksymalne ciśnienie i temperatura w komorze spalania, co wydatnie obniża emisję  $\text{NO}_x$  (niestety jednocześnie skraca się czas spalania, co zwiększa emisję PM).

Emisja PM może być zmniejszona przez polepszenie wymieszania paliwa z powietrzem. Osiągnięcie tego na drodze zwiększenia turbulencji ładunku nie jest korzystne ze względu na zwiększające temperaturę czynnika roboczego spalanie kinetyczne. Zwiększenie ciśnienia wtrysku, mające wyeliminować w znacznym stopniu emisję PM, może doprowadzić do utworzenia zbyt małego kąta strugi paliwa, przy jednoczesnym zwiększeniu jej zasięgu. To z kolei może powodować osadzanie się paliwa na ściankach komory spalania i w rezultacie zamiast zmniejszać emisję PM, może ją zwiększać, zwłaszcza w fazie nagrzewania silnika.

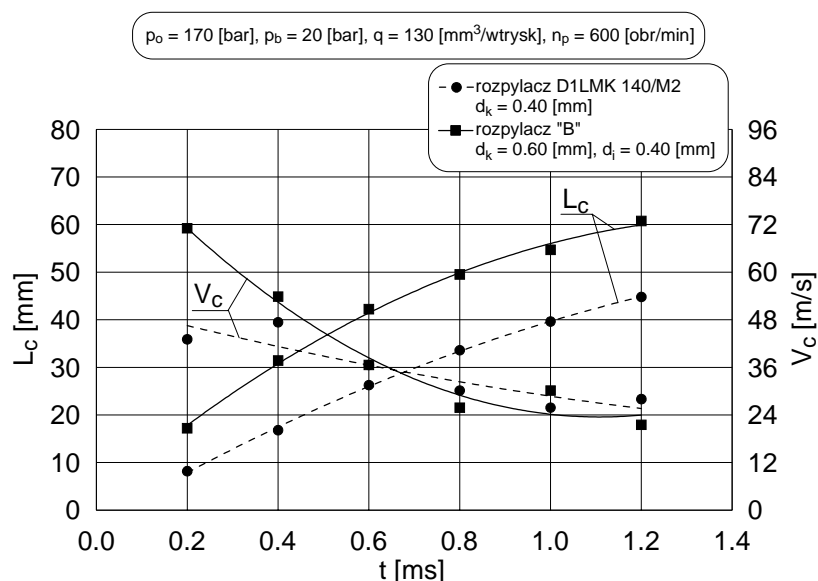
Dlatego, aby temu zapobiec, stosuje się zmniejszone średnice otworków rozpylacza, które poprawiają widmo rozpylenia poprzez uzyskanie małych średnic kropel w całej objętości strugi, a nie tylko na jej krawędzi, co ma miejsce w przypadku zwiększonego ciśnienia wtrysku i większych średnic otworków rozpylacza.

Samozapłon obejmuje te porcje paliwa, które przebywają najdłużej w warunkach wysokiej temperatury i ciśnienia w obecności tlenu, a więc przede wszystkim paliwo dostarczone w pierwszej fazie wtrysku. Stwierdzono, że najkorzystniejsze warunki wykorzystania powietrza występują wówczas, gdy w okresie samozapłonu względne prędkości ruchu powietrza i paliwa są niewielkie, a po samozapłonie wzrastają. Intensyfikacja tych ruchów po samozapłonie sprzyja bowiem rozprowadzeniu par paliwa, a tym samym przyspiesza tworzenie mieszaniny palnej. Stwierdzono także, że wir powstały w komorze spalania może oddziaływać zarówno w procesie tworzenia mieszaniny palnej (wtrysk objętościowy) jak i spalania (wtrysk powierzchniowy). W pierwszym przypadku istotne jest wzajemne dobranie zasięgu strugi i prędkości kropel oraz wirującego w przestrzeni spalania powietrza tak, aby nadmiernie nie potęgować dynamiki procesu w fazie spalania kinetycznego, co jak już wspomniano, zwiększa powstawanie  $\text{NO}_x$ .

Zwiększenie zasięgu czoła strugi może być osiągnięte przez zwiększenie ciśnienia wtrysku (do pewnego stopnia) lub przez zastosowanie wtryskiwacza o odmiennej zasadzie działania, w którym iglica wykonuje ruch obrotowo-zwrotny, a przekroje otworków rozpylających zmieniają się w czasie wtrysku. Porównanie zasięgu i prędkości czoła strugi dla trzyotworowego rozpylacza klasycznego D1LMK 140/M2 i z obrotowo-zwrotnym ruchem „B” iglicy przedstawiono na rys.3.

Rozpatrując proces powstawania składników toksycznych spalin silnika wysokoprężnego na tle strugi rozpylonego paliwa można stwierdzić, że sadza tworzy się zwykle w obszarze bogatej mieszanki (lokalny niedobór powietrza) przy dostatecznie wysokiej temperaturze (800 - 1400 K). Odbywa się to przeważnie w rdzeniu strugi paliwa, a także w tylnej jej części, gdzie często obserwuje się zwiększoną koncentrację kropel paliwa. Powstawanie  $\text{NO}_x$  determinowane jest natomiast współistnieniem wysokiej temperatury z podwyższonym ciśnieniem powietrza w komorze spalania (w tych warunkach produkty spalania są najdłużej w stanie wzbudzenia) [6]. Niespalone węglowodory powstają na obrzeżu wtryskiwanej strugi paliwa i w pobliżu ścianek, gdzie powstająca mieszanka jest zbyt uboga do całkowitego spalania paliwa. Emisja tlenku węgla w silnikach wysokoprężnych nie stanowi istotnego

problemu. Zarówno CO jak i HC są łatwe do zredukowania w silnikach samochodowych poprzez zastosowanie konwertorów utleniających.



Rys. 3. Porównanie zasięgu i prędkości czoła strugi dla trzytorowego rozpylacza klasycznego i z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy [7]

Fig. 3. The comparison of the front-range and spray velocity of the spray generated by the classical injector and the rotary swinging movement of the needle [7]

Efektywnym sposobem oddziaływania na emisję NO<sub>x</sub> jest, jak już wspomniano, zmiana parametrów związanych z wtryskiem paliwa. Na górnej części rys.4 przedstawiono wpływ kąta początku wtrysku paliwa na emisję tlenków azotu (NO<sub>x</sub>) dla różnych ciśnień wtrysku. Ciśnienie było zwiększane od 500 do 1100 [bar] co 300 [bar].

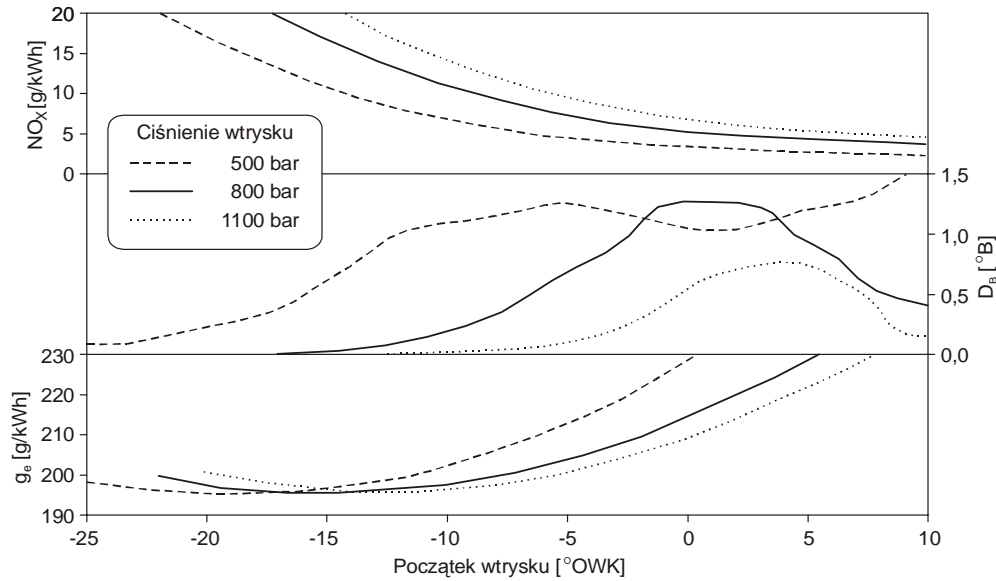
Jak widać, zwiększanie kąta wyprzedzenia wtrysku wywołuje wzrost emisji NO<sub>x</sub>, przy czym zwiększanie ciśnienia wtrysku wpływa silniej na tę emisję dla wcześniejszych początków wtrysku. Opóźnianie wtrysku obniża natomiast emisję tlenków azotu, a wzrost ciśnienia wtrysku tylko w niewielkim stopniu wpływa wówczas na zwiększenie emisji NO<sub>x</sub>.

Wzrost emisji NO<sub>x</sub> z powiększaniem ciśnienia wtrysku i przyspieszaniem początku wtrysku interpretowany jest następująco [3]:

- na skutek wysokich ciśnień wtrysku w okresie opóźnienia samozapłonu gromadzi się więcej nie spalonego paliwa,
- skraca się czas trwania wtrysku,
- lepsze rozpylenie paliwa powoduje zwiększenie szybkości spalania.

Na środkowej części rys.4 przedstawiono krzywe zadymienia spalin. Jak można zauważyć, najmniejsze zadymienie spalin dla wyższych ciśnień wtrysku (w analizowanym przypadku 800 i 1100 [bar]) osiąga się zarówno dla bardzo wczesnych początków wtrysku jak i bardzo późnych (ok. 10°OWK po GMP), przy czym im wyższe ciśnienie wtrysku, tym zadymienie spalin jest mniejsze.

Oczywiście zbyt późny wtrysk paliwa nie jest akceptowany, gdyż przy korzystnym zmniejszeniu emisji NO<sub>x</sub> występują duże straty energetyczne objawiające się znacznym wzrostem jednostkowego zużycia paliwa. Wtrysk już po GMP powoduje ponadto zwykle ponowny, nieznaczny wzrost emisji NO<sub>x</sub>. W takim przypadku decydującą rolę odgrywa obniżenie temperatury ładunku w cylindrze i wydłużenie okresu opóźnienia samozapłonu.



Rys. 4. Wpływ kąta początku wtrysku paliwa na emisję tlenków azotu ( $NO_x$ ), zadymienie spalin ( $D_B$ ) i jednostkowe zużycie paliwa ( $g_e$ ) przy różnych ciśnieniach wtrysku ( $n = 1400$  [obr/min], 50 % obciążenia) [4]

Fig. 4. The influence of fuel injection start on nitric oxidises ( $NO_x$ ), smoke of exhaust gases ( $D_B$ ) and specific fuel consumption ( $g_e$ ) at difference pressure injections ( $n = 1400$  [rpm], 50% load) [4]

Prezentowane na rys.4 wyniki dotyczą sześciocylindrowego silnika trakcyjnego firmy MAN (objętość skokowa 1 cylindra wynosiła  $1,6$  [dm<sup>3</sup>]) z bezpośrednim wtryskiem paliwa, który wyposażono w układ zasilania typu Common Rail. Moc znamionowa tego silnika wynosi  $300$  [kW] przy prędkości  $2000$  [obr/min].

Reasumując należy stwierdzić, że ze względu na emisję tlenków azotu, korzystniejsze jest stosowanie – podobnie jak przy klasycznym wtrysku – późniejszego wtrysku paliwa. Wówczas dobierając odpowiednią wartość ciśnienia wtrysku można osiągnąć także korzystny przebieg krzywych zadymienia spalin i jednostkowego zużycia paliwa.

### 3.2. Wykorzystanie paliw alternatywnych do zasilania silników ZS

Jako paliwo silnikowe może być stosowany alkohol metylowy (metanol), alkohol etylowy (etanol), a także butanol, przy czym najbardziej rozpowszechniony jest metanol i etanol. Paliwa alkoholowe mogą być zarówno paliwem głównym, ale stosowane są także jako dodatki do paliw standardowych.

Zastosowanie paliw alkoholowych do napędu silników wysokoprężnych napotyka wiele trudności. Główne z nich to [5]:

- niska liczba cetanowa, a więc słaba zdolność do samozapłonu,
- duża wartość utajonego ciepła parowania, co stwarza trudności odparowywania paliwa i utrudnia rozruch zimnego silnika,
- mała wartość opałowa, co zwiększa zużycie paliwa i stwarza konieczność stosowania większych wydatków pomp wtryskowych,
- nie mieszają się z olejem napędowym i przejmują wilgoć z otoczenia (celem uzyskania stabilnych mieszanin oleju napędowego i alkoholu trzeba stosować odpowiedni emulgator),
- słabe własności smarne, co wiąże się z koniecznością dodawania środków smarnych dla zapewnienia prawidłowej pracy układu wtryskowego,
- własności korozyjne i niszczące działanie na gumę i niektóre tworzywa sztuczne.

Jedną z korzyści wynikających z zastosowania paliw alkoholowych do silników wysokoprężnych jest obniżenie emisji niektórych toksycznych składników spalin. Jest to związane zarówno z dużą zawartością tlenu w takich paliwach jak i skutecznym obniżaniu temperatury świeżego ładunku na skutek większej wartości ciepła parowania alkoholu. Obniżenie temperatury ładunku nie tylko przyczynia się do obniżenia emisji  $\text{NO}_x$ , ale także poprawia proces napełniania cylindra.

Ponieważ podstawowe właściwości decydujące o przebiegu procesu spalania dla oleju napędowego i paliw alkoholowych dość znacząco różnią się między sobą (np. co do LC i wartości opałowej), dlatego zastosowanie paliw alkoholowych do zasilania silników wysokoprężnych zwykle związane jest ze zmianami konstrukcyjnymi silnika i koniecznością dodatkowej jego regulacji. Stopień modyfikacji konstrukcji silnika zależy głównie od tego, czy do zasilania silnika użyto jedynie paliwa alkoholowego, czy też jego mieszaniny z olejem napędowym.

Olejami roślinnymi, które bierze się pod uwagę w badaniach związanych z ich zastosowaniem jako paliwa do silników ZS jest olej rzepakowy, sojowy, słonecznikowy i palmowy. W polskich warunkach klimatycznych dobre efekty ekonomiczne uzyskuje się z uprawy rzepaku i dlatego może on stanowić źródło paliw do silników wysokoprężnych.

Jak wiadomo, surowy olej rzepakowy nie nadaje się do bezpośredniego zastosowania w silniku wysokoprężnym. Wynika to przede wszystkim ze znacznie większej lepkości oleju rzepakowego w porównaniu z olejem napędowym. Ponadto surowy olej rzepakowy ma znacznie gorszą lotność, posiada mniejszą skłonność do samozapłonu i charakteryzuje się niską temperaturą rozkładu termicznego. Czynniki te znacząco wpływają na zwiększenie emisji  $\text{NO}_x$  i PM.

Zastosowanie naturalnego oleju rzepakowego do zasilania nie przystosowanego do tego celu silnika wysokoprężnego znacznie zakłóca jego pracę. W szczególności występuje zwiększony pobór mocy na procesy tłoczenia paliwa, a powstające w wyniku rozpylania krople paliwa mają duże średnice i ich odparowanie jest utrudnione, co istotnie zwiększa emisję PM. W rezultacie wzrasta skłonność do tworzenia osadów na rozpylaczach wtryskiwaczy i w komorze spalania. Wzrasta też wtedy skłonność do zagęszczania oleju silnikowego. Odmienne w stosunku do oleju napędowego podstawowe właściwości surowego oleju rzepakowego sprawiają zatem, że olejem tym bezpośrednio mogą być zasilane tylko silniki specjalnie do tego celu skonstruowane.

Jednym ze sposobów ograniczenia niekorzystnych efektów związanych z zasilaniem typowych silników wysokoprężnych olejem rzepakowym jest stosowanie mieszaniny tego oleju z olejem napędowym. Poprawiają się wówczas własności rozruchowe silnika a proces spalania nie jest już tak znacznie zakłócony ponieważ w wyniku rozpylania powstają krople o mniejszych średnicach.

Inny sposób, aczkolwiek znacznie droższy, rozwiązania problemu dużej lepkości oleju roślinnego (dotyczy to oczywiście również oleju rzepakowego) polega na przebudowie chemicznej cząstek trójglicerydów. W wyniku uzyskuje się estry alkoholowe kwasów tłuszczowych oleju roślinnego. Stosowanie takiego paliwa nie wymaga dodatkowej regulacji silnika, który normalnie zasilany jest olejem napędowym pochodzącym z przeróbki ropy naftowej.

Często stosowanym zabiegiem prowadzącym do zmniejszenia dużych i ciężkich cząsteczek oleju rzepakowego jest proces transestryfikacji. Proces ten zachodzi z użyciem alkoholu w obecności katalizatora. Najczęściej stosuje się alkohol metylowy (ze względu na koszt), ale może być także wykorzystany alkohol etylowy lub butylowy.

Paliwo będące mieszaniną estrów metylowych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego (tzw. EMKOR) posiada właściwości bardzo zbliżone do właściwości oleju napędowego.

### 3.3. Katalityczna redukcja toksyn

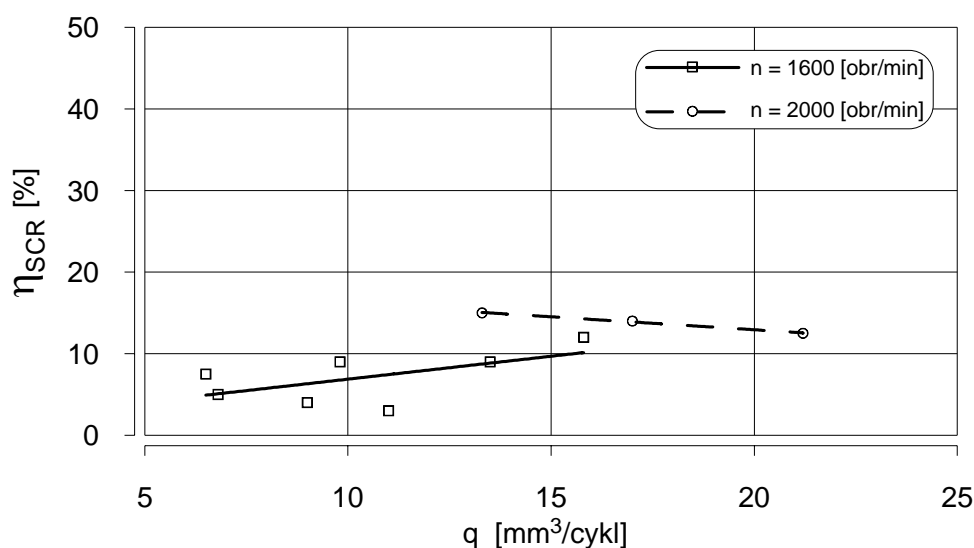
Jednym z pozasilnikowych sposobów ograniczenia emisji  $\text{NO}_x$  w silnikach wysokoprężnych może być zastosowanie selektywnej katalitycznej redukcji. Wymaga to zastosowania specjalnej konstrukcji konwertora katalitycznego, natomiast czynnikiem redukującym mogą być węglowodory zawarte w paliwie [4].

Koncepcja ograniczenia emisji  $\text{NO}_x$  zaprezentowana w [9] bazuje na wykorzystaniu powtrysku oleju napędowego (jako źródła czynnika redukującego) oraz konwertora katalitycznego. Metoda taka wymaga stosowania specjalnego układu wtryskowego umożliwiającego realizację dawki powtryskowej. Konieczne w takim przypadku jest dokładne kontrolowanie wielkości dodatkowej dawki paliwa oraz momentu jej występowania.

Sprawność selektywnej katalitycznej redukcji  $\eta_{\text{SCR}}$  może być zdefiniowana jako stosunek różnicy zawartości tlenków azotu przed konwertorem katalitycznym (przy zasilaniu silnika dawką zasadniczą i powtryskową) i zawartości tlenków azotu za konwertorem katalitycznym (przy zasilaniu silnika dawką zasadniczą i powtryskową) do zawartości tlenków azotu przed konwertorem katalitycznym.

Na rys.5 przedstawiono zależność sprawności selektywnej katalitycznej redukcji  $\eta_{\text{SCR}}$  od wielkości dawki powtryskowej  $q$ . Badania prowadzono dla dwóch prędkości obrotowych silnika.

Należy zwrócić uwagę, że spełnienie rygorystycznych limitów dotyczących emisji cząstek stałych także wiąże się z koniecznością eliminacji tego składnika poza strefą komory spalania, przez zastosowanie skutecznych filtrów.



Rys. 5. Wpływ dawki powtrysku oleju napędowego na sprawność redukcji tlenków azotu w konwertorze katalitycznym [4]

Fig. 5. The influence of post-injection fuel dose on reduction efficiency of nitric oxidises with using of catalytic converter [4]

### 4. Podsumowanie

Przyszłość, jako źródła napędu wszelkich typów pojazdów samochodowych, jest postrzegana głównie w rozwoju silników wysokoprężnych, które zużywają mniej paliwa niż silniki o zapłonie iskrowym. W przedziale małych i średnich samochodów osobowych już obecnie stanowią one dużą konkurencję dla silników benzynowych. Należy się spodziewać, że w niedalekiej przyszłości uzyskanie w silnikach wysokoprężnych spalania homogenicznego obniży powstawanie cząstek stałych i tlenków azotu, które są



najtrudniejszymi do usunięcia składnikami spalin. Znaczne ilości tych związków wynikają głównie z heterogenicznego charakteru procesu spalania.

W chwili obecnej, jednoczesne ograniczenie emisji tlenków azotu oraz cząstek stałych jest najistotniejszym zagadnieniem przy konstrukcji i optymalizacji systemu spalania silnika wysokoprężnego. Ponieważ rozwój konstrukcji silników wysokoprężnych determinowany jest przez coraz bardziej rygorystyczne limity toksyczności spalin, dlatego stosuje się szereg rozwiązań mających na celu ograniczenie emisji tych związków. Wśród metod ograniczania zawartości  $\text{NO}_x$  w spalinach silnika wysokoprężnego można zastosować m.in. zmianę ciśnienia i początku wtrysku paliwa oraz selektywną katalityczną redukcję, w której dawka powtryskowa oleju napędowego jest czynnikiem redukującym tlenki azotu. Skutecznym, ale niewystarczającym sposobem zmniejszenia emisji cząstek stałych jest zwiększenie ciśnienia wtrysku paliwa. Coraz bardziej rygorystyczne normy nakazują jednak eliminację tego składnika również poza silnikiem, co wiąże się z rozwojem systemów filtracji cząstek stałych.

## Literatura

- [1] Cisek, J., Szlachta, Z., Wcisło, G., *Ograniczenie emisji  $\text{NO}_x$  w spalinach silnika wysokoprężnego przez zmniejszenie ich powstawania w komorze spalania*. Problemy Eksploatacji, Nr 3/1999.
- [2] *Emission standards for light and heavy road vehicles*. ACID News, No 3/2004.
- [3] Härle, H., *Anwendung von Common Rail Einspritzsystemen für Nkw – Dieselmotoren. Common Rail Einspritzsysteme - Gegenwart und Zukunft-spotential*. ETH Zürich, 1997.
- [4] Kuszewski, H., Lejda, K., *Wpływ wybranych parametrów związanych z wtryskiem paliwa na emisję toksycznych składników spalin w silnikach wysokoprężnych*. Journal of Explo-Diesel & Gas Turbine '05 IV International Scientific-Technical Conference „Keeping diesel engines and gas turbines in movement with regard to environmental protection”, Gdańsk – Międzyzdroje – Kopenhaga 2005.
- [5] Kuszewski, H., Lejda, K., *Wybrane aspekty zasilania silników wysokoprężnych biopaliwami*. VII Konferencja Naukowo-Techniczna nt. „Współczesne technologie w motoryzacji a bezpieczeństwo ruchu drogowego”, Słupsk 2004.
- [6] Kuszewski, H., *Rozpylanie paliwa jako proces determinujący powstawanie mieszaniny palnej i spalanie w silniku wysokoprężnym*. Materiały XV Konferencji Międzynarodowej SAKON'04 nt. „Metody Obliczeniowe i Badawcze w Rozwoju Pojazdów Samochodowych i Maszyn Roboczych Samojezdnych. Zarządzanie i Marketing w Motoryzacji”, Rzeszów 2004.
- [7] Kuszewski, H., *Wpływ zmiennych przekrojów wylotowych wtryskiwacza z obrotową iglicą na rozpylanie oleju napędowego*. Praca doktorska. Politechnika Krakowska. Kraków 2002.
- [8] Lejda, K., *Limity emisyjne składników toksycznych dla pojazdów samochodowych*. Materiały XVI Konferencji Międzynarodowej SAKON'05 nt. „Metody Obliczeniowe i Badawcze w Rozwoju Pojazdów Samochodowych i Maszyn Roboczych Samojezdnych. Zarządzanie i Marketing w Motoryzacji”, Rzeszów 2005.
- [9] Szlachta, Z., *Niektóre aspekty redukcji tlenków azotu w silniku wysokoprężnym za pomocą powtrysku oleju napędowego do cylindra*. Materiały Międzynarodowej Konferencji Motoryzacyjnej AUTOPROGRES-KONMOT 2002.

