

Stefan POSTRZEDNIK

Institut Techniki Ciepłej, Politechnika Śląska w Gliwicach

MOTORYZACJA W ŚRODOWISKU - ZAGROŻENIA, ZADANIA, MOŻLIWOŚCI TECHNICZNE

Streszczenie. W pracy scharakteryzowano podstawowe uwarunkowania oraz przytoczono wartości graniczne dotyczące emisji substancji toksycznych dla silników spalinowych. Przedstawiono dotychczasowy rozwój środków technicznych prowadzących do ograniczenia emisji substancji szkodliwych. Omówiono także sposoby rozwiązywania problemów technicznych związanych z ustalonymi ograniczeniami emisji substancji toksycznych.

AUTOMOBILE ENGINEERING IN ENVIRONMENT - HAZARDS, TASKS, TECHNICAL POSSIBILITIES

Summary. In the paper the basic conditions and limits for the emission of pollutants from internal combustion engines has been characterized. The development of technical means, which lead to decrease of the emission of harmful substances has been presented. Procedures for solving of technical problems in the future, connected with the determined pollutants limits, have been discussed too.

AUTOMOBILTECHNIK IN DER UMWELT - GEFÄHRDUNGEN, AUFGABEN, TECHNISCHE MÖGLICHKEITEN

Zusammenfassung. Im Beitrag sind die Grundbedingungen der Schadstoffemission von Verbrennungsmotoren charakterisiert und auch die entsprechenden Emissionsgrenzwerte dargestellt worden. Es wurde auch die bisherige Entwicklung der technischen Mittel, die zur Minderung der Schadstoffemission führen, beschrieben. Zusätzlich sind auch die potenzielle Möglichkeiten zur Lösung der zukünftigen technischen Probleme besprochen worden.

1. WPROWADZENIE

Znacząca część (rzędu 40%) obciążenia środowiska życia człowieka substancjami szkodliwymi jest „zasługą” motoryzacji [1, 5].

Głównymi substancjami szkodliwymi w spalinach silnikowych są: tlenek węgla CO, tlenki azotu NO_x (w tym NO, NO₂), węglowodory C_mH_n, tlenki siarki SO_y (w tym SO₂, SO₃), także ozon O₃ oraz cząstki stałe (sadza, węglowodory skondensowane, substancje mineralne). Ich powstawanie podczas pracy silnika spalinowego jest m. in. konsekwencją występowania nieodpowiednich warunków przygotowania i spalania paliwa w układzie [4].

Jednym z istotnych zagadnień związanych z eksploatacją silników spalinowych jest ustalenie ich szkodliwego oddziaływania na otoczenie.

Posługiwanie się wyłącznie składem chemicznym spalin (nawet po dokonaniu jego korekcji do przyjętego stanu odniesienia [4]) jest często niewystarczające do wydania jednoznacznej oceny szkodliwości oddziaływania pracującego silnika spalinowego na środowisko życia człowieka [4, 5].

Jakość procesów konwersji energii zachodzących w układzie silnika spalinowego – rys. 1, charakteryzuje się za pomocą efektywnej sprawności energetycznej η_e układu, wyznaczonej ze wzoru:

$$\eta_e = \frac{N_e}{\dot{m}_p W_d} \quad (1)$$

gdzie:

N_e – moc efektywna silnika spalinowego, kW,

\dot{m} – strumień masy spalanego paliwa, kg/s, o wartości opałowej W_d , kJ/kg.

Na strumień substancji spalin \dot{n}_s , kmol/s, który jest proporcjonalny do strumienia spalanego paliwa

$$\dot{n}_s = n_{ss}'' + \dot{n}_{H_2O} = n_{ss}'' \dot{m}_p \quad (\text{także } \dot{n}_s'' = n_{ss}'' \dot{m}_p) \quad (2)$$

składa się suma dwóch strumieni (rys. 1) składowych:

$$\dot{n}_s = \dot{n}_{tks} + \dot{n}_{in} \quad (3)$$

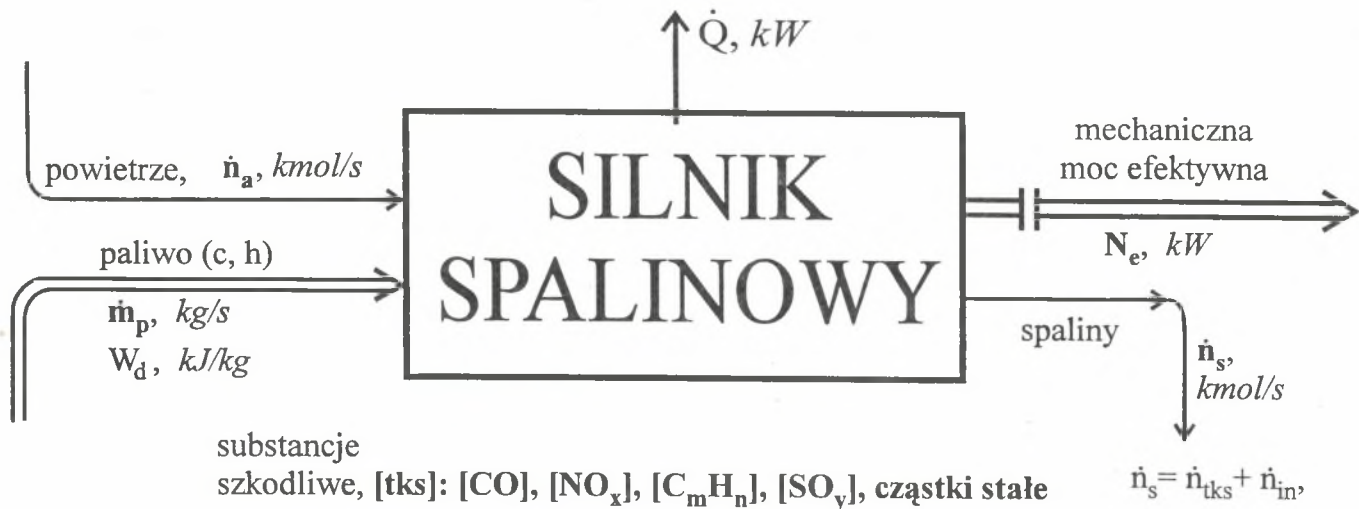
gdzie:

\dot{n}_{tks} – strumień substancji toksycznych, natomiast

\dot{n}_{in} – strumień substancji inertnych w spalinach silnikowych.

Strumień substancji szkodliwych zanotować można jako sumę:

$$\dot{n}_{tks} = \dot{n}_{CO} + \dot{n}_{NO_x} + \dot{n}_{C_m H_n} + \dot{n}_{SO_y} + \dot{n}_{st} \quad (4)$$



$$\dot{n}_{tk_s} = \dot{n}_{CO} + \dot{n}_{NO_x} + \dot{n}_{C_m H_n} + \dot{n}_{SO_y} + \dot{n}_{st}$$

$$\dot{n}_{in} = \dot{n}_{N_2} + \dot{n}_{CO_2} + \dot{n}_{O_2} + \dot{n}_{H_2O}$$

Rys. 1. Schemat układu z pracującym silnikiem spalinowym

Fig. 1. Scheme of the system with a working ICE

natomiast substancji toksycznie obojętnych (inertnych):

$$\dot{n}_{in} = \dot{n}_{O_2} + \dot{n}_{N_2} + \dot{n}_{H_2O} + \dot{n}_{CO_2} \quad (5)$$

Sytuację uważa się za optymalną, gdy strumień $\dot{n}_{tk_{ks}} \rightarrow 0$.

Strumień każdej i -tej substancji szkodliwej $\dot{n}_{tk_{ks,i}}$ może być wyrażony poprzez jej udział $[tk_{s,i}]$ w spalinach suchych:

$$\dot{n}_{tk_{ks,i}} = [tk_{s,i}] \dot{n}_{ss} \quad (6)$$

Po dokonaniu sumowania strumieni n składników taktycznych uzyskuje się:

$$\dot{n}_{tk_{ks}} = \sum_{i=1}^n \dot{n}_{tk_{ks,i}} = \dot{n}_{ss} \sum_{i=1}^n [tk_{s,i}] \quad (7)$$

Równanie (7), po wykorzystaniu zależności (2), można zanotować jako:

$$\dot{n}_{tk_{ks}} = \dot{m}_p n_{ss}'' \sum_{i=1}^n [tk_{s,i}] \quad (8)$$

a następnie po uwzględnieniu wzoru (1) w postaci:

$$\dot{n}_{tk_{ks}} = \frac{N_e}{\eta_e W_d} n_{ss}'' \sum_{i=1}^n [tk_{s,i}] \quad (9)$$

Zgodnie ze wzorem (8) zmniejszenie zużycia paliwa \dot{m}_p prowadzi w prostej linii do ograniczenia strumienia substancji szkodliwych emitowanych do otoczenia. Obniżenie zużycia paliwa \dot{m}_p , przy zapewnieniu wymaganego efektu użytecznego N_e , może być osiągnięte jedynie (równ. (1)) poprzez zwiększenie sprawności efektywnej η_e . Wyrazem tego jest także wzór (9).

Wzrost sprawności energetycznej η_e urządzeń posiada więc podwójne znaczenie: ekonomiczne – gdyż przyczynia się do zmniejszenia zużycia paliwa, a więc do obniżenia kosztów eksploatacji, a także ekologiczne – przyczyniając się do ograniczenia emisji substancji toksycznych.

Zmniejszenie emisji substancji toksycznych silników spalinowych osiągnąć można, generalnie biorąc, poprzez realizację dwóch grup przedsięwzięć, w tym tzw.:

- a. poczynania pierwotne (inaczej – wewnątrzsilnikowe),
 - polegające na wprowadzeniu odpowiednich zmian konstrukcyjno-nastawczych w wybranych podukładach silnika spalinowego (np. w układzie zasilania i przygotowania mieszanki palnej),
- b. poczynania wtórne (czyli – pozasilnikowe),
 - w ramach których instaluje się specjalne układy oczyszczania spalin (np. dopalacze katalityczne, katalizatory wielofunkcyjne, filtry cząstek stałych).

Przedmiotem zainteresowań w ramach tego opracowania jest głównie pierwsza grupa poczynañ prowadzących do poprawy parametrów pracy silnika spalinowego, przy uwzględnieniu podstawowych możliwości grupy drugiej.

2. OGRANICZENIA DOTYCZĄCE EMISJI SUBSTANCJI TOKSYCZNYCH

2.1. Istota i rozwój obowiązujących ograniczeń

Głównym czynnikiem wymuszającym bezpośrednio zmniejszenie (ograniczenie) emisji substancji szkodliwych są najczęściej odpowiednie akty normatywne, podające wielkość emisji dopuszczalnej, odnoszącej się do emisji uzyskiwanej podczas przeprowadzania ściśle określonych testów jezdnych.

Program cyklu testowego powinien możliwie dokładnie symulować warunki ruchu na danym terenie (np. ruch w aglomeracjach miejskich), dlatego jest opracowywany raczej przez fachowców od organizacji ruchu.

Wynik przeprowadzanego badania testowego [g/test] zależy od:

- a. programu cyklu testowego (czasowe zmiany prędkości, przyspieszenia, czyli całego przebiegu drogi symulacyjnej),
- b. charakterystyki toksyczności samego silnika spalinowego (rys. 1).

Charakterystyka toksyczności silnika spalinowego zależy od jego konstrukcji i nastaw regulacyjnych, a tym samym od całego kompleksu zjawisk i procesów wewnętrznych (głównie organizacji przygotowania i przebiegu procesu spalania) zachodzących w silniku spalinowym.

W tym zakresie rola i zadania specjalistów od znajomości fizykochemicznych (termodynamicznych) procesów wewnętrznych (spalanie, wymiana ciepła, przepływy materii) silników spalinowych są szczególnie ważne.

Przy ustalaniu wartości granicznych (maksymalnych) emisji brane są pod uwagę m.in. następujące istotne uwarunkowania [1]:

- potrzeby oraz zagrożenia ekologiczne środowiska,
- techniczne możliwości spełnienia ustalonych ograniczeń,
- wielkość niezbędnych do poniesienia kosztów społecznych.

Pierwsze unormowania z tego zakresu pojawiły się w USA w latach 1969 – 1970 pod hasłem “clean air act”, jako tzw. siedmiostopniowy test kalifornijski. Od roku 1972 obowiązywał w USA test jezdny (FTP 72), odpowiadający

sytuacji ruchu w Los Angeles. Opracowany w 1975 r. test FTP-75 obowiązuje nadal. W testach tych limitowane są następujące składniki spalin: tlenek węgla CO, węglowodory C_mH_n , tlenki azotu NO_x , cząstki stałe.

W tabelicy 2.1 podano wartości odpowiednich ograniczeń, które dzisiaj jeszcze także obowiązują [3, 5].

Tabela 2.1
Podstawowe wartości graniczne emisji substancji szkodliwych

Cykl testowy		Wartości graniczne emisji dla siln. ZI					
		wymiar	CO	C_mH_n	NO_x	$C_mH_n + NO_x$	cz. stałe
FTP-75	USA	g/mila	3,4	0,41	1,0	–	0,2
	Kalifornia	g/mila	7,0	0,41	0,4	–	–
EWG	FTP-75	g/test	2,1	0,25	0,62	–	0,124
	Europa FZ	g/test	30,0	–	6,0	8,0	–
Japonia	10 - st.	g/km	2,7	0,39	0,48	–	–
	11 - st.	g/test	85,0	9,5	6,0	–	–
	bieg luzem	% v ppm	4,5	1200	–	–	–

W krajach EWG pierwsze unormowania pojawiły się w 1971 r. i dotyczyły tlenku węgla CO oraz węglowodorów C_mH_n , a następnie od 1975 r. obowiązuje przepis R-15/02, w którym uwzględnia się także wielkość emisji tlenków azotu NO_x . Rada Ministerialna EWG zatwierdziła w 1987 r. tzw. test europejski EFZ, wraz z wytycznymi EG 88/436.

Odrębne przepisy posiada Japonia; od 1975 r. obowiązuje tam tzw. 10-stopniowy test (dokonywane są pomiary następujących składników spalin: tlenek węgla CO, węglowodory C_mH_n , tlenki azotu NO_x), z dwiema odmianami: a. jazda w obrębie miasta z nagrzanym silnikiem, b. test rozpoczynający się przy nienagrzanym silniku (tzw. zimny start), a dodatkowo także – praca na biegu luzem. Przyjęte unormowania stają się tym samym stymulatorem postępu technicznego w przemyśle motoryzacyjnym [2, 3].

2.2. Dotychczasowy rozwój środków technicznych prowadzących do ograniczenia emisji substancji szkodliwych

Rozwiązania problemu ograniczenia emisji substancji szkodliwych poszukiwano dwoma drogami, wymienionymi w rozdziale 1. opracowania.

Podstawowym czynnikiem warunkującym uzyskanie ograniczenia emisji substancji szkodliwych było zastosowanie odpowiednich elektronicznych układów regulacyjnych, dzięki którym dla każdego punktu pracy silnika można było dobrać optymalne wartości parametrów pracy.

Zastosowanie wyłączania dopływu paliwa podczas jazdy z tzw. „hamowaniem silnikiem” prowadziło do obniżenia zużycia paliwa oraz ograniczenia emisji węglowodorów C_mH_n .

Obniżenie emisji tlenków azotu NO_x można było osiągnąć stosując opóźnienie zapłonu, przy jednoczesnym wzbogaceniu mieszanki palnej.

Dodatkowo, celem spowodowania lepszego dopalenia paliwa, zastosowano system doprowadzania powietrza wtórnego do komory spalania. Ten system charakteryzował się jednak zbyt wysokim zużyciem paliwa, dlatego nie był dalej rozwijany.

Ważnym rozwiązaniem, a jednocześnie łatwym i prostym w realizacji, było zastosowanie recyrkulacji spalin, prowadzącej do znacznego ograniczenia emisji tlenków azotu NO_x . Metoda ta nie powodowała także wzrostu zużycia paliwa, co było jej poważną zaletą. Recyrkulacja spalin wymaga zbudowania odpowiednich układów regulacji stopnia recyrkulacji spalin – stosownie do aktualnych parametrów pracy silnika (prędkości obrotowej, zapotrzebowania mocy – obciążenia). Wadą tego rozwiązania problemu jest lokalnie możliwy wzrost emisji tlenku węgla CO oraz węglowodorów C_mH_n .

Celem spełnienia bardziej ostrych wymagań amerykańskich niezbędne okazało się wprowadzenie drugiej grupy przedsięwzięć (rozdział 1.), polegającej na zastosowaniu katalizatorów.

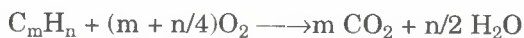
W pierwszej kolejności instalowane były tzw. dopalacze katalityczne, umożliwiające dzięki doprowadzeniu powietrza wtórnego, pełne utlenienie produktów niezupełnego spalania – głównie tlenku węgla CO oraz węglowodorów C_mH_n . Tlenki azotu NO_x nie mogły być tym sposobem usuwane.

Zaproponowano rozwiązanie polegające na zastosowaniu dwustrefowego katalizatora: najpierw występuje strefa redukcyjna, a następnie strefa utleniająca.

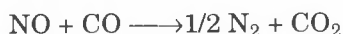
Logiczną konsekwencją tego rozwiązania było opracowanie wersji katalizatora potrójnego działania (tzw. Drei-Wege-Katalisator).

Dzięki zainstalowaniu w strumieniu spalin specjalnej sondy lambda, zasilająca silnik mieszanka palna posiada dokładnie skład stechiometryczny ($\lambda = 1$) w każdym punkcie pracy silnika. W ten sposób stało się możliwe jednoczesne usunięcie w obrębie katalizatora wszystkich składników szkodliwych, według schematu reakcji:

a. utlenianie



b. redukcja



Pierwszą firmą, która wprowadziła katalizatory potrójnego działania, była firma BMW. Dzisiaj instalowane one są prawie powszechnie, chociaż wymagane jest stosowanie specjalnego paliwa, tzw. benzyny bezołowiowej, co właściwie w konsekwencji dodatkowo zmniejsza obciążenie środowiska substancjami szkodliwymi (ograniczenie emisji ołowiu).

Zastosowanie katalizatorów potrójnego działania powoduje jedynie niewielki spadek mocy silnika spalinowego oraz mało znaczący wzrost jednostkowego zużycia paliwa.

2.3. Wartości graniczne emisji substancji szkodliwych

Dzięki wprowadzeniu obowiązujących norm, ograniczających wielkość emisji dla silników spalinowych, osiągnięto prawie 90% zmniejszenie ilości emitowanych substancji szkodliwych.

Postępujące jednak dalej motoryzacyjne skażenie środowiska, szczególnie w dużych aglomeracjach miejskich (tzw. Balungsgebiete), zmusza odpowiednie władze do dalszego zmniejszenia wartości granicznych emisji substancji szkodliwych. Władze EWG przygotowały już odpowiedni nowy program ograniczeń dotyczący pojazdów napędzanych silnikami spalinowymi.

Pierwszy etap (tabl. 2.2.) obowiązuje już od lipca 1992 r. – tzw. nowy cykl EWG, pod nazwą EG – RL – 91 / 441.

Tablica 2.2

Program ograniczeń emisji substancji szkodliwych dla krajów E W G – etap I,
symbol EG – RL – 91 / 441 (obowiązuje od lipca 1992 r.)

Składnik	Badania przygotowane	Badania seryjne	Jednostka
A. Silniki z zapłonem iskrowym			
CO	2,72	3,16	g/km
C _m H _n + NO _x	0,97	1,13	g/km
B. Silniki z zapłonem samoczynnym			
CO	2,72	3,16	g/km
C _m H _n + NO _x	0,97	1,13	g/km
cząstki stałe	0,14	0,18	g/km

W USA natomiast już w 1993 r. wprowadzono nowe, bardziej zaostrzone ograniczenia emisji, a także opracowano nowy sposób i uwarunkowania prowadzenia badań testowych. Wprowadza się dodatkowo osobne badanie koncentracji węglowodorów niemetanowych, tzw. NMHC (non methan hydrocarbon), a także pomiar koncentracji tlenku węgla CO w spalinach, podczas tzw. zimnego startu silnika przy temperaturze -7°C . Ograniczenia te będą w najbliższych latach coraz bardziej zaostrzane; do 1996 r. przewiduje się osiągnięcie istotnego zmniejszenia emisji: tlenków azotu NO_x o około 60%, węglowodorów znowu o ok. 40%.

Najbardziej ostre ograniczenia przyjmowane są zawsze w Kalifornii. Aktualnie dopuszczalny poziom składnika NMHC wynosi 0,39 g/milę. Od 1994 r. obowiązuje tam nowe ograniczenie, dotyczące dodatkowo pewnej grupy niespalonych węglowodorów, tzw. grupy NMOG (non methan organic gases, typu od C_2H_x do C_{12}H_x). Dopuszczalna emisja wynosi 0,25 g/milę, następnie stopniowo powinna maleć do wartości 0,062 g/milę w 2003 r.

Plany EU na lata następne przewidują dalsze ograniczenia wielkości dopuszczalnej emisji, co ilustruje tablica 2.3.

Tablica 2.3
Program ograniczeń emisji substancji szkodliwych dla krajów EU - etap II
(obowiązujący od 1996 r.)

Składnik	Propozycje niemieckie	Propozycje A C E A	Jednostka
A. Silniki z zapłonem iskrowym			
CO	2,2	2,72	g/km
$\text{C}_m\text{H}_n + \text{NO}_x$	0,45	0,6	g/km
B. Silniki z zapłonem samoczynnym			
CO	2,2	1,3	g/km
$\text{C}_m\text{H}_n + \text{NO}_x$	0,85	0,8 (0,97)*	g/km
cząstki stałe	0,08	0,1	g/km

* dla wtrysku bezpośredniego

Ograniczenia perspektywiczne dla krajów EU – etap III (do tej pory bez określenia terminu ważności) przytoczono w tablicy 2.4.

Rozpoczęła się tym samym era produkcji samochodów o szczególnie niskiej emisji substancji szkodliwych; począwszy od samochodów typu TLEV (transitional low emission vehicle) – 1994 r., poprzez samochody typu LEV (low emission vehicle), aż do samochodów typu ULEV (ultra low emission vehicle) – w 1997 r., a następnie typu ZEV (zero emission vehicle). Osiągnięte wtedy prawie 99-procentowe zmniejszenie emisji węglowodorów w stosunku do roku bazowego (1968).

Tablica 2.4

**Program ograniczeń emisji substancji szkodliwych dla krajów EU
(obowiązujący w dalszej perspektywie)**

Składnik	Propozycje EU – etap III	Jednostka
A. Silniki z zapłonem iskrowym		
CO	1,62	g/km
C _m H _n + NO _x	0,14	g/km
B. Silniki z zapłonem samoczynnym		
CO	1,62	g/km
C _m H _n + NO _x	0,14	g/km
cząstki stałe	0,042	g/km

W USA (obszar 49 stanów) wymagane jest dodatkowo, aby producent pojazdów udowodnił, że ustalone granice emisji są dotrzymane nawet po przebiegu ok. 100 000 mil. Jednocześnie na koszt producenta wykonywane są wszystkie niezbędne naprawy układów regulacji i kontroli jakości spalin w pojeździe.

Z przedstawionego programu wprowadzanych ograniczeń emisji substancji szkodliwych wynika jasno, że aby sprostać postawionym wymaganiom, dokonać się musi bardzo istotny postęp techniczny w dziedzinie produkcji pojazdów samochodowych.

Rozpoczęcie właściwego cyklu produkcyjnego muszą poprzedzać odpowiednie badania naukowe, w tym ważną rolę odgrywają badania termodynamicznych procesów wewnętrznych (przygotowanie oraz spalanie mieszanki palnej, niustalone zjawiska transportowe – wymiany ciepła i masy), wpływających bezpośrednio na powstawanie substancji szkodliwych w trakcie pracy silnika spalinowego. Dodatkowymi elementami, jakie muszą być brane pod uwagę, są powszechne wymagania klientów, ekonomiczność eksploatacji pojazdów (zużycie paliwa, niezawodność, pewność ruchu).

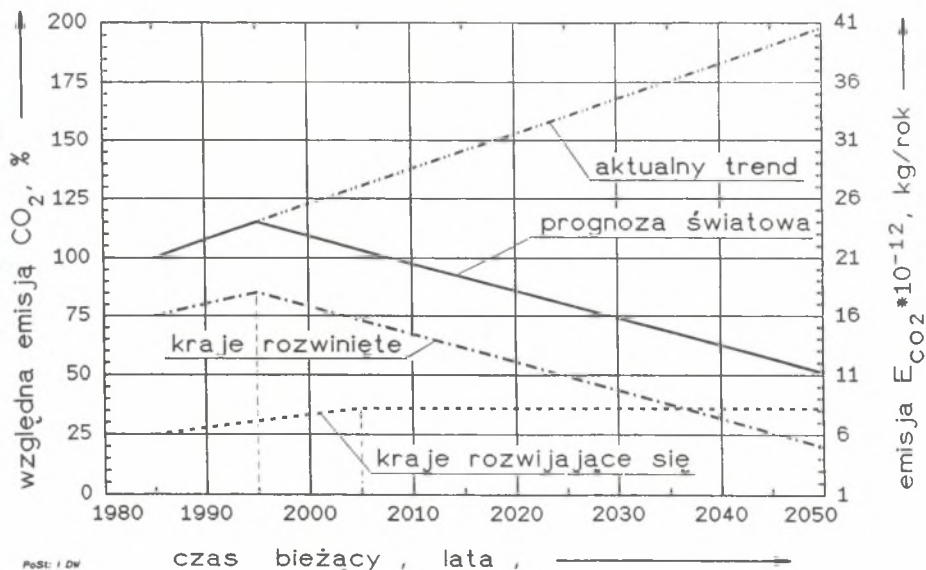
2.4. Zagadnienie emisji dwutlenku węgla

Dwutlenek węgla CO₂ należy do produktów zupełnego i całkowitego spalania paliw silnikowych. Globalnie biorąc, nie należy on do grupy substancji toksycznych, lecz coraz częściej zalicza się go do grupy substancji szkodliwych. Dwutlenek węgla jest w znacznej mierze (w ok. 50%) odpowiedzialny za tzw. efekt cieplarniany (szklarniowy). Obserwuje się systematyczny wzrost zawartości dwutlenku węgla w atmosferze ziemskiej; jeszcze na początku XX w. wynosiła ok. 0,03%, aktualnie dochodzi do 0,045%.

Oszacować można łatwo, że spalanie jednostkowej ilości (1 kg) tzw. paliwa silnikowego ($c = 0,85$, $h = 0,15$) daje w efekcie około:

$$e_{CO_2} \approx 0,85 \frac{44}{12} = 3,12 \text{ kg CO}_2/\text{kg pal.}$$

Wielkość strumienia materii dwutlenku węgla emitowanego do otoczenia jest więc ściśle związana ze strumieniem (razy 3.12) zużywanego paliwa. Opracowana została [2] światowa strategia (rys. 2) postępowania, prowadząca do radykalnego obniżenia emisji dwutlenku węgla w skali globalnej. Jej realizacja wymaga zmniejszenia ilości spalanych paliw, co może być osiągnięte w pierwszej kolejności na drodze doskonalenia (wzrost sprawności) samych procesów konwersji energii spalanych paliw. Duże możliwości istnieją także w stosowaniu paliw alternatywnych (wodorowych).



Rys. 2. Emisja dwutlenku węgla i prognozy jej zmian

Fig. 2. Emission of the carbon dioxide and trends of its changes

3. SPOSOBY ROZWIĄZANIA PROBLEMÓW TECHNICZNYCH, ZWIĄZANYCH Z OGRANICZENIAMI EMISJI SUBSTANCJI TOKSYCZNYCH

3.1. Charakterystyka możliwości realizacyjnych

Narzućenie bardzo ostrych wymagań odnośnie do dopuszczalnej emisji substancji szkodliwych zmusza do kompleksowego wykorzystania wszystkich możliwości technicznych w tym zakresie.

Jak już wspomniano w rozdziale 1. – zmniejszenie emisji substancji toksycznych silników spalinowych osiągnąć można poprzez realizację dwóch grup przedsięwzięć, do których należą:

- a. poczynania pierwotne (czyli wewnątrzsilnikowe), realizowane m. in. za pomocą następujących czynników:
 - poprawa napełniania cylindrów,
 - lepsze przygotowanie mieszanki palnej,
 - zawirowanie ładunku w komorze spalania,
 - doskonalenie kształtu komory spalania,
 - optymalizacja temperatury wewnątrz cylindra,
 - dobór czasów otwarcia zaworów, stosunek kompresji,
 - wprowadzenie recyrkulacji spalin,
- b. poczynania wtórne (inaczej: pozasilnikowe), obejmujące m. in. następujące elementy:
 - katalizatory trójfunkcyjne z regulacją stosunku nadmiaru powietrza (sonda λ),
 - katalizatory warstwowe i strefowe,
 - podgrzewanie katalizatorów w fazie przedrozruchowej,
 - izolacja układów wydechowych,
 - doprowadzenie powietrza wtórnego do dopalania,
 - elektroniczne układy sterowania procesami.

Aby sprostać narzuconym ograniczeniom, należy równolegle realizować poczynania pierwotne, jak i wtórne.

Jednocześnie należy założyć oraz pamiętać o tym, że ograniczenia dopuszczalnej emisji powinny leżeć w zakresie możliwym technicznie do spełnienia.

3.2. Przedsięwzięcia wewnątrzsilnikowe

3.2.1. Przygotowanie mieszanki palnej

Przebieg spalania zależy dobitnie od jakości przygotowanej mieszanki palnej. Chodzi przede wszystkim o jej homogeniczność, polegającą na pełnym odparowaniu paliwa ciekłego i wymieszaniu powstałych par z powietrzem. Pojawiające się w komorze spalania krople nieodparowanego paliwa powodu-

ją lokalne wygaszanie płomienia, co w konsekwencji prowadzi do pojawiania się niespalonych węglowodorów C_mH_n oraz tlenku węgla CO w spalinach. Bieg silnika jest wtedy także bardziej nierównomierny.

Taka sytuacja jest szczególnie niekorzystna podczas rozruchu zimnego silnika, gdyż wtedy także katalizator nie funkcjonuje jeszcze poprawnie, a na domiar szybko może ulec zużyciu (zatruciu).

Aby paliwo nie odkładało się na ściankach kanału dolotowego, rozwijane będą raczej układy z wtryskiem bezpośrednim, przy dopasowaniu początku wtrysku do aktualnego stanu pracy silnika.

3.2.2. Komora spalania, ruch ładunku

Nowoczesne komory spalania są tak kształtowane, aby stosunek powierzchni ścian do objętości komory był możliwie mały (najniższa wartość odpowiada kuli), przy zachowaniu także niewielkiej ekscentryczności jej kształtu. Centralnie usytuowana świeca zapłonowa pozwala na uzyskiwanie dobrego zapłonu, co w konsekwencji warunkuje szybki i pełny przebieg spalania mieszanki palnej. Uzyskuje się wtedy płynny i stabilny przebieg spalania. Istnieje w związku z tym możliwość podniesienia stosunku kompresji ϵ , dzięki czemu osiąga się zmniejszenie jednostkowego zużycia paliwa. Prowadzić to jednak może do nieznacznego wzrostu emisji substancji szkodliwych.

Z kształtem komory spalania wiąże się także możliwość zabudowania większej liczby zaworów (12 V, 16 V). Układy czterozaworowe przyczyniają się do wzrostu stopnia napełnienia silnika (możliwy wzrost mocy jednostkowej), a także do zmniejszenia emisji węglowodorów C_mH_n .

Istotną sprawą jest zawirowanie świeżego ładunku w komorze spalania, dzięki czemu uzyskuje się większą homogeniczność mieszanki palnej, prowadzącą do wzrostu szybkości oraz podniesienia stabilności spalania. Nowe możliwości w tym zakresie stwarzają układy wielozaworowe, dzięki którym łatwiej można także sterować przebiegiem napełniania silnika (wyłączanie cylindrów, zmiany faz otwarcia zaworów) oraz spalania mieszanki palnej.

3.2.3. Temperatura ścianek komory spalania

Niespalone węglowodory C_mH_n pojawiają się głównie tam, gdzie płomień uległ wygaszeniu. Generalnie rozróżnia się dwa przypadki (mechanizmy) wygaszenia płomienia:

- wygaszenie w obrębie frontu płomienia (flame quenching),
- wygaszenie na zimnej ścianie komory (wall quenching).

Istotną rolę odgrywa tutaj temperatura ścianek komory spalania. Podnosząc jej wartość i ustalając na poziomie stosownie do obciążenia silnika, uzyskać można prawie 20% zmniejszenie emisji węglowodorów. W tym zakresie istnieją dalsze możliwości do wykorzystania. Największe ilości węglowodorów C_mH_n oraz tlenku węgla CO powstają zaraz po uruchomieniu zimnego

silnika (podczas jego nagrzewania), kiedy ścianki cylindra oraz kanału dopływowego posiadają jeszcze niską temperaturę. Faza nagrzewania silnika powinna być dlatego możliwie krótka.

Szacuje się, że tym sposobem można ograniczyć emisję węglowodorów o ok. 40%, natomiast tlenków azotu NO_x oraz tlenku węgla CO o dalsze 25%.

Dla szybkiego nagrzewania elementów silnika można by wykorzystać specjalne zasobniki ciepła, np. akumulatory ciepła z przemianą fazową. Ważne są przy tym: uzyskanie odpowiednio dużej pojemności zasobnika, izolacje, dyspozycyjność, waga oraz koszty eksploatacyjne.

3.2.4. Recyrkulacja spalin

Recyrkulacja spalin jest już od dłuższego czasu stosowanym sposobem pozwalającym na obniżenie maksymalnych temperatur spalania w silniku, a tym samym przyczyniającym się do ograniczenia emisji tlenków azotu NO_x .

Wadą tego systemu jest pewne pogorszenie warunków spalania w stosunku do spalania w powietrzu, gdyż w odniesieniu do cząstek jeszcze nie spalonych, na skutek mniejszych koncentracji drobin tlenu i paliwa, maleje prawdopodobieństwo zachodzenia odpowiednich reakcji chemicznych.

Tworzyć się może strefowa (warstwowa) struktura ładunku, wynikająca z braku pełnego wymieszania wszystkich składników.

Wzrasta tym samym prawdopodobieństwo lokalnego wygaszenia płomienia – jako “flame quenching”. Konsekwencją tego mogą być wzrastające emisje węglowodorów C_mH_n oraz tlenku węgla CO, o ile warunki spalania nie ulegną odpowiednio zmianie.

Rozróżnia się dwa rodzaje recyrkulacji spalin:

- zewnętrzną ZRS,
- wewnętrzną WRS.

Recyrkulacja zewnętrzna polega na zawracaniu spalin do silnika poprzez specjalny kanał zabudowany na zewnątrz silnika. System taki stosuje się w przypadkach, kiedy fazy otwarcia i zamknięcia zaworów nie mogą być zmieniane w trakcie pracy silnika.

Stosując układy rozrządu z oddzielnymi wałkami – odpowiednio dla napędu zaworów dolotowych oraz wylotowych, dobierać można niezależnie fazy otwarcia i zamknięcia poszczególnych grup zaworów, a tym samym sterować procesami napełniania oraz opróżniania cylindrów. Dzięki takim rozwiązaniom realizować można tzw. recyrkulację wewnętrzną (wewnętrznie sterowaną), polegającą na tym, że część spalin w ogóle nie opuszcza komory cylindra. Tak organizowana recyrkulacja spalin przyczynia się do polepszenia procesu przygotowania mieszanki palnej dzięki temu, że temperatura ładunku w całej fazie kompresji jest wyższa.

Obniża się także zużycie paliwa, a wzrost emisji węglowodorów C_mH_n oraz tlenku węgla CO jest mniej znaczący.

Także recyrkulacja zewnętrzna może być udoskonalona. Poprzez wstępne intensywne mieszanie recyrkulujących spalin z częścią świeżego powietrza, a następnie doprowadzanie tej mieszaniny oddzielnym kanałem do cylindra można uzyskać znaczne zintensyfikowanie procesu spalania. Polepszeniu ulega praca silnika; szczególnie w stanach przejściowych – np. podczas przyspieszeń, kiedy występują duże odchylenia wartości stosunku powietrza λ – nie obserwuje się nierównomierności ruchu silnika.

Badania wskazują [1], że tym sposobem możliwe jest osiągnięcie (w stosunku do silnika bez recyrkulacji) wielu pozytywnych efektów, polegających na zmniejszeniu emisji: – tlenków azotu NO_x o około 55% , – tlenku węgla CO rzędu 26%, węglowodorów C_mH_n o ok. 4% , przy pewnym (ok. 3 ÷ 4%) zmniejszeniu zużycia paliwa.

Wykorzystując jednocześnie wszystkie możliwości wymienione w punkcie 3.2., uzyskać można poważne zmniejszenie emisji substancji szkodliwych.

Aby jednak spełnić także wszystkie perspektywiczne ograniczenia (w tym głównie amerykańskie, kalifornijskie), niezbędne jest także wprowadzanie przedsięwzięć drugiej grupy, dotyczących układów pozasilnikowych.

3.3. Przedsięwzięcia pozasilnikowe

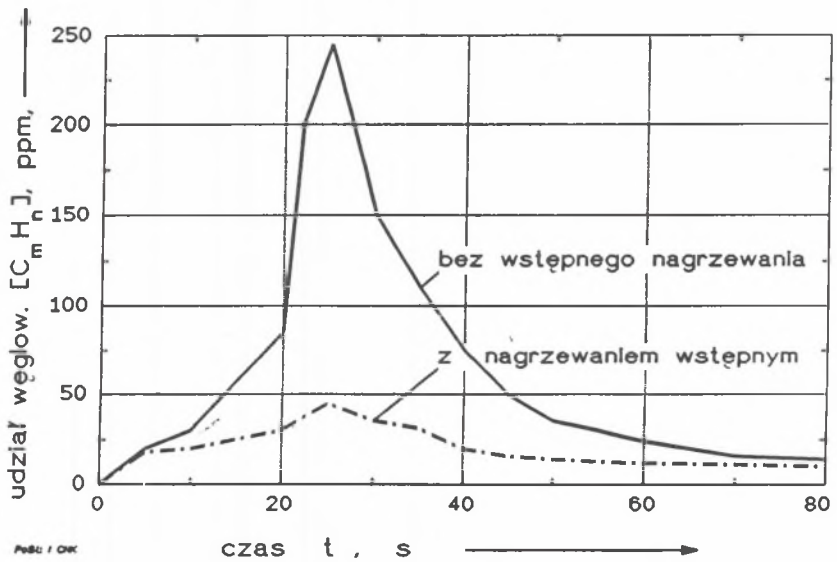
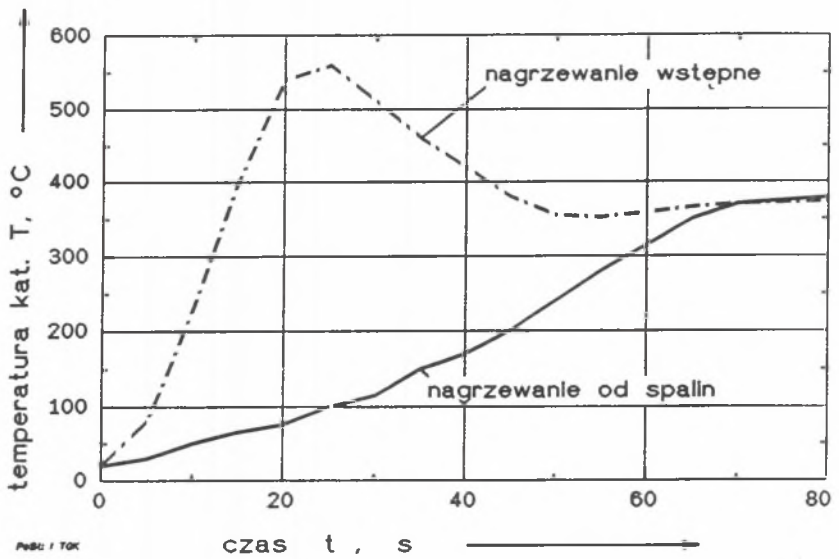
3.3.1. Układy katalityczne

Katalizatory trójfunkcyjne (pkt 2.2.) wraz z regulacją stosunku nadmiaru powietrza (sonda λ) stały się krokiem milowym na drodze poprawy jakości spalin. Umożliwiają one osiągnięcie prawie 90–procentowe oczyszczenia spalin. Prace nad doskonaleniem konstrukcji samych katalizatorów są nadal kontynuowane.

Najważniejszą sprawą jest próg temperaturowy, powyżej którego katalizator zaczyna dopiero poprawnie pracować. Ponieważ ponad 80% emitowanych ilości tlenku węgla CO oraz węglowodorów C_mH_n powstaje w fazie nagrzewania silnika – rys. 3, dlatego istotne jest, aby próg temperaturowy katalizatora był możliwie niski. Instalowane dzisiaj katalizatory posiadają ów próg na poziomie ok. 250°C. Czas, jaki upływa do osiągnięcia tej temperatury, wynosi przeciętnie 1 ÷ 3 min., co oznacza, że w tym czasie emitowane są szczególnie duże ilości substancji szkodliwych.

Celem skrócenia okresu nagrzewania można zainstalować katalizator bliżej silnika, wtedy jednak zachodzi niebezpieczeństwo jego przegrzania (ograniczona wytrzymałość temperaturowa materiałów konstrukcyjnych) podczas pracy silnika przy pełnym obciążeniu. W wysokich temperaturach za chodzi także dezaktywacja powierzchni czynnych katalizatora.

Ze względu na temperaturę wyodrębnić można trzy charakterystyczne zakresy pracy katalizatorów;



Rys. 3. Działanie katalizatora w fazie rozruchowej

Fig. 3. Efficiency of the catalyst in the warm-up phase

- zakres I: do 250°C, brak konwersji składników toksycznych,
- zakres II: od 250°C do 1000°C, faza robocza, w tym
 - od 480°C do 620°C – słabe starzenie cieplne, większa możliwość zatrucia,
 - od 620°C do 800°C – średnie starzenie cieplne, mała możliwość zatrucia,
 - od 800°C do 1000°C – silne starzenie cieplne,
- zakres III: ponad 1000°C (do ok. 1500°C),
 - możliwość przegrzania katalizatora, silna dezaktywacja powierzchni, niebezpieczeństwo stopienia.

Istotną sprawą jest także żywotność katalizatora; w tym zakresie normy amerykańskie są szczególnie wymagające (100 000 mil).

Zwrócić należy także uwagę na dopuszczalną szerokość tzw. „okna lambda – $\Delta\lambda$ ”, przy czym $1 \leq \lambda \leq (1 + \Delta\lambda)$, która może się zmieniać wraz z czasem eksploatacji katalizatora. Szerokość przedziału $\Delta\lambda$ jest szczególnie istotna w fazach niestacjonarnej pracy silnika, kiedy ma miejsce stała korekcja i dopasowywanie stosunku nadmiaru powietrza λ . Zastosowanie powłok ze specjalnych materiałów (metale ziem rzadkich) pozwala na uzyskanie większej szerokości przedziału $\Delta\lambda$.

Problemem do rozwiązania jest także silny wpływ temperatury na szerokość okna $\Delta\lambda$, gwarantujący utrzymanie wysokiego stopnia konwersji substancji szkodliwych spalin.

3.3.2. Strategie nagrzewania katalizatorów

W fazie nagrzewania silnik pracuje zwykle (płynny ruch) przy zasilaniu mieszanką bogatą ($\lambda \leq 1$), czemu towarzyszy stosunkowo wysoka emisja węglowodorów C_mH_n oraz tlenku węgla CO. Fakt ten można wykorzystać do przyspieszonego nagrzewania katalizatora, poprzez organizowanie dopalania tych składników, doprowadzając wtórne powietrze do kanałów wylotowych. Do rozwiązania pozostają jednak zagadnienia obejmujące: ilość, wymagane parametry i miejsce doprowadzania powietrza wtórnego.

Proponuje się nawet wstępnie tak znacząco obniżyć stosunek powietrza λ , że silnik będzie pracował prawie jak „generator gazu”, a dopalanie składników palnych będzie się odbywać w specjalnej komorze spalania, umiejscowionej przed katalizatorem. Powstające gorące spaliny mogą bardzo szybko nagrzewać katalizator.

Inną możliwością jest zastosowanie podgrzewania za pomocą energii elektrycznej (moc: 2 ÷ 4 kW). Wymagane jest jednak wtedy posiadanie specjalnego, wysokopojemnościowego zestawu akumulatorów. O rezultatach uzyskiwanych na tej drodze informują wyniki badań pokazane na rys. 3, wykonane dla układu silnika SW 400.

Ważnym elementem rozwiązania problemu jest także odpowiednie rozwiązanie konstrukcyjno–materiałowe kanałów wylotowych silnika. Poprzez stosowanie materiałów o niskiej pojemności cieplnej oraz izolowanie kanałów łączących silnik z katalizatorem (np. kanały dwururowe typu rura w rurze, z pierścieniową szczeliną powietrzną) uzyskuje się znacznie szybsze nagrzanie katalizatora.

Duże znaczenie posiada możliwość ruchowej zmiany kąta wyprzedzenia zapłonu; poprzez ustawienie mniejszego kąta wyprzedzenia zapłonu (późniejszy zapłon) uzyskuje się wyższą temperaturę spalin wylotowych, co przyczynia się do szybszego nagrzewania katalizatora. Jest to sposób dzisiaj już prawie powszechnie stosowany.

Ciągła regulacja stosunku nadmiaru powietrza na poziomie $\lambda = 1$, (sonda λ) polega w istocie na naprzemiennym „wpadaniu” w zakres mieszanki ubogiej oraz bogatej. Zakres występujących wahań stosunku λ wpływa na pracę katalizatora. Następuje także chwilowe odkładanie się paliwa na ściankach kanału dolotowego, co następnie może zakłócić sam proces regulacji stosunku λ . Niezbędne jest więc dalsze doskonalenie układów sterowania i regulacji silnika spalinowego (motormanagement).

3.4. Propozycje bardziej ogólnych rozwiązań – paliwa alternatywne

Duże nadzieje wiązane są z zastosowaniem paliw alkoholowych, w tym przede wszystkim alkoholu metylowego oraz etylowego. Celem badań jest możliwość obniżenia emisji substancji szkodliwych, poprawa sprawności oraz zwiększenie mocy silnika.

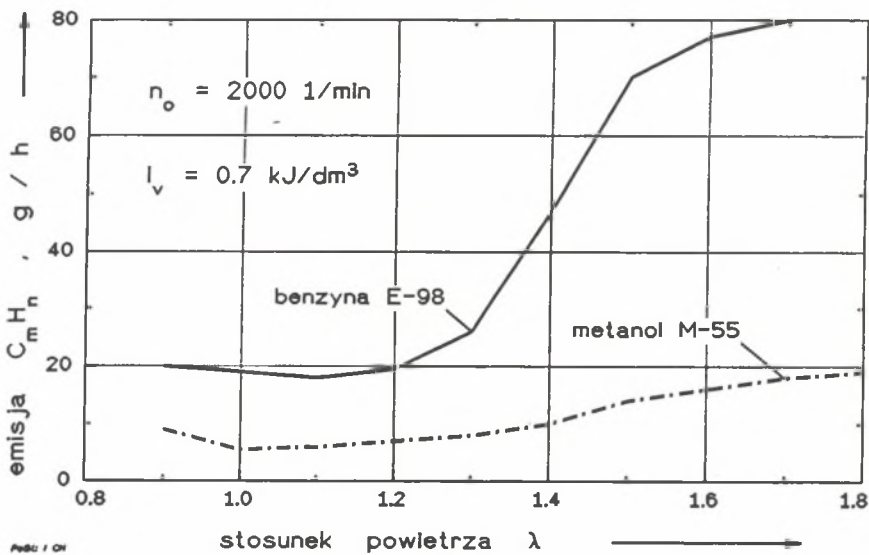
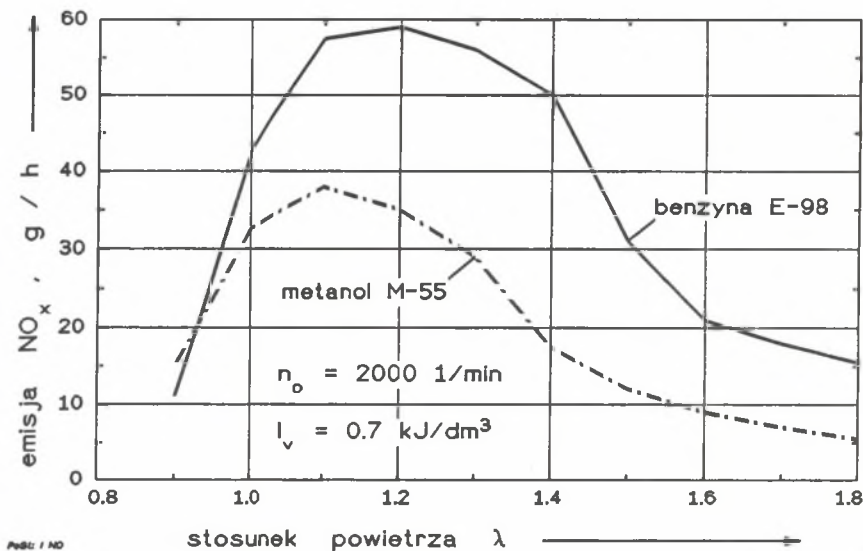
Wykorzystując stosunkowo wysokie ciepło parowania alkoholi, uzyskuje się niższe temperatury świeżego ładunku, dzięki czemu jego gęstość wzrasta. Konsekwencją tego jest pewien wzrost stopnia napełnienia silnika, a tym samym możliwość osiągnięcia wyższej mocy jednostkowej.

Następną korzystną sprawą jest niższa temperatura spalania mieszanki palnej, co powoduje ograniczenie emisji tlenków azotu NO_x – rys. 4.

Emisja węglowodorów C_mH_n – rys. 4, także w okresie nagrzewania silnika, jest w przypadku spalania alkoholi wyraźnie niższa, gdyż opary alkoholi cechuje dobra skłonność do tworzenia homogenicznych mieszanek palnych.

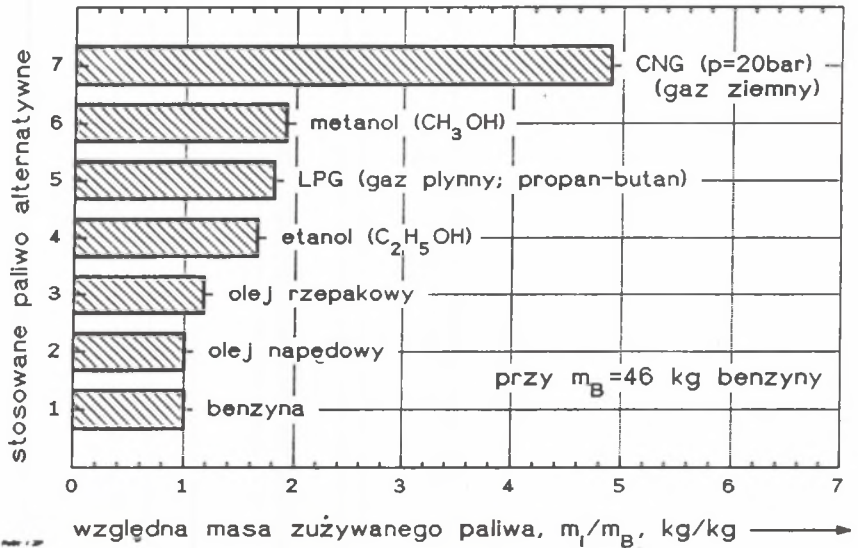
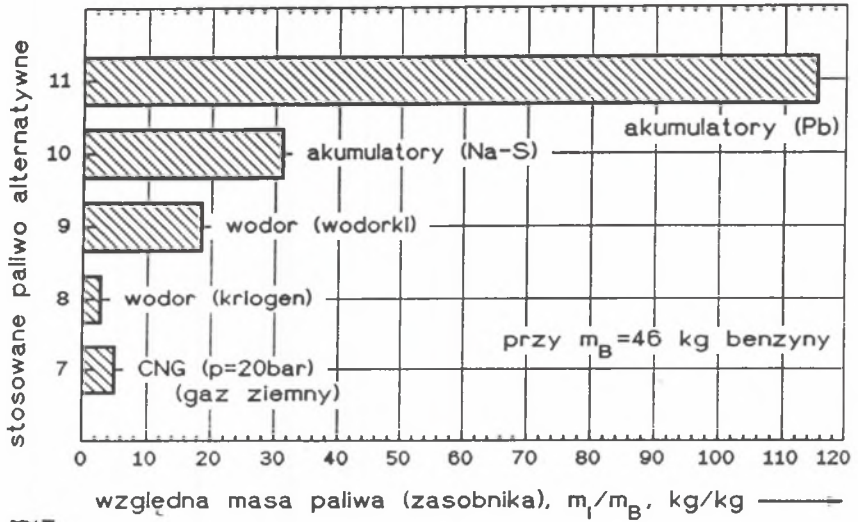
Alkohole zawierają także mniej w stosunku do benzyn węgla pierwiastkowego C, dzięki czemu emisja dwutlenku węgla CO_2 może być odpowiednio niższa, co ma także dzisiaj istotne znaczenie (efekt cieplarniany).

Oczekuje się, że dzięki zastosowaniu alkoholowych paliw silnikowych można będzie osiągnąć efektywne zmniejszenie zużycia paliwa o około 15%, dodatkowo ograniczenie emisji węglowodorów C_mH_n o ok. 80%, a także emisji tlenków azotu NO_x o prawie 60%.



Rys. 4. Efektywność stosowania metanolu

Fig. 4. Efficiency of the applied of the methanol-fuel



Rys. 5. Paliwa i napędy alternatywne

Fig. 5. Fuels and alternative drive-systems

Zasadniczym problemem związanym z szerszym stosowaniem paliw alkoholowych jest powstawanie dużej ilości szkodliwych aldehydów w czasie spalania i ich obecność w spalinach.

Także stosunkowo niska temperatura spalin – szczególnie w okresie nagrzewania silnika spalinowego (zbyt powolne nagrzewanie katalizatora, pogorszenie jego pracy), stanowi problem do rozwiązania w przyszłości.

Pomimo to wiąże się duże nadzieje z szerszym zastosowaniem paliw alkoholowych. Do dyspozycji pozostają jeszcze inne paliwa pozyskiwane na bazie roślinnej, np. olej rzepakowy do silników wysokoprężnych.

Ogólne porównanie różnych możliwości w tym zakresie, łącznie z innymi alternatywnymi koncepcjami silnikowymi [2, 3], przy założeniu tej samej drogi przebywanej przez napędzany pojazd – pokazano na rys. 5.

Badane są dzisiaj – głównie z punktu widzenia możliwości zmniejszenia zużycia paliwa – także inne propozycje rozwiązań silnikowych, w tym np.:

- a. silnik napędzany mieszanką ubogą,
 - b. tworzenie mieszanek uwarstwionych,
 - c. zastosowanie silników dwusuwowych nowej generacji,
- i inne.

Żadna z tych koncepcji nie może bezpośrednio współpracować z trójfunkcyjnym katalizatorem, co stwarza poważne problemy eksploatacyjne. Zasadniczy problem dotyczy emisji tlenków azotu NO_x w grupie propozycji a. oraz b. przy wysokich obciążeniach, natomiast w silnikach dwusuwowych zasadniczy problem leży w stosunkowo wysokiej emisji węglowodorów C_mH_n oraz tlenku węgla CO. Problem może być częściowo rozwiązany poprzez zastosowanie wysoko wydajnych katalizatorów (dopalczy) nieregulowanych, przy oddzielnym potraktowaniu problemu tlenków azotu NO_x .

Istotnym czynnikiem w omawianym zakresie będzie także problem kosztów badań i opracowania nowych rozwiązań.

Szacuje się, że do rozwiązania problemów ograniczonej emisji substancji szkodliwych na poziomie ULEV (ultra low emission vehicle) niezbędne są nakłady na poziomie 300% nakładów dodatkowych ponoszonych dzisiaj.

LITERATURA

- [1] Hockel K.G.L., Langen P., Mallog J.: Abgas-Emissionsreduzierung – eine Herausforderung für die Automobilindustrie. *Motortechnische Zeitschrift*, 53 (1992), nr 7/8.
- [2] Heitland H., Rinne G., Wisłocki K.: Chancen hybrider Antriebssysteme im zukünftigen Straßenverkehr. *Motortechnische Zeitschrift*, 55 (1994), nr 2.

- [3] Merkisz J.: Ekologiczne aspekty stosowania silników spalinowych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1994.
- [4] Postrzednik S., Żmudka Zb.: Charakterystyka porównawcza emisji substancji szkodliwych przez silniki spalinowe. Ochrona Powietrza 15 (1992), nr 3.
- [5] Spalanie paliw ze szczególnym uwzględnieniem problemów ekologicznych. Ekspertyza PAN wyk. pod red. J. Tomeczka. Warszawa 1992.

Recenzent: Dr hab. inż. Zbigniew RUDNICKI

Wpłynęło do Redakcji: 20. 02. 1995 r.

Abstract

Automobile industry is faced with continuously growing demands by future emission standards. In the paper the basic conditions and limits for the emission of pollutants from internal combustion engines has been characterized.

The global stream of harmful substances depends on the whole stream of exhaust gases and on the specific concentrations of this pollutants.

The efficiency of the internal combustion engine determines the fuel consumption and this later the stream of exhaust gases, and so influences the emission of harmful substances too.

The basic part of the engine emissions is a product of the combustion process, especially during the warm-up stage. It is particular necessary to look for potential in this area, to get a rapid catalyst light-off.

The development of technical means, which lead to decrease of the emission of harmful substances has been presented.

It is necessary to investigate to understanding and optimization of fundamental engine physics, such as influence of combustion parameters, chamber geometry, mixture preparation and the interaction of flow and combustion process within the cylinder.

Dilution of the charge by residual gas (either explicitly via exhaust gas recirculation or implicitly via throttling) or by moisture in the inlet air reduces the nitric oxides.

The most important engine parameter influencing carbon monoxide emissions is the fuel-air equivalence ratio. All other variables cause secondorder effect.

Procedures for solving of technical problems in the future, connected with the determined pollutants limits, have been discussed too.

The current approaches based on today's spark ignition engine to fulfill the specific demands have been described, and some aspects regarding the potential at alternative engine concepts also presented.

There are three basic methods by which engine emissions are controlled: by the design of the combustion process, by optimizing choice of the operating parameters, and by using aftertreatment devices in the exhaust system.