

Mieszanka paliwowo-powietrzna i składniki spalin



Rys,1

Powstanie mieszanki paliwowo - powietrznej

Jeśli paliwo jest w formie płynnej (benzyna, gaz LPG lub LNG) to zanim będzie mogło utworzyć mieszankę paliwowo-powietrzną, musi przejść w stan gazowy. **Paliwo w stanie ciekłym nie spala się!** Ta uwaga jest istotna w stosunku do benzyny. Nie zawsze są warunki, by odparowały jej wszystkie frakcje. Tak jest np. podczas uruchamiania silnika, nagrzewania i szybkiego zwiększania prędkości obrotowej silnika (przyspieszanie samochodu). Wówczas niespalone paliwo jest usuwane ze spalinami przez układ wylotowy. Paliwo tworzy z powietrzem mieszankę, w której składniki powietrza: tlen (O_2) - jest utleniaczem dla składników paliwa, azot (N_2) - nie bierze udziału w procesie spalania, ale pełni istotną rolę gazu roboczego.

Współczynnik lambda składu mieszanki

To podstawowa wielkość charakteryzująca skład mieszanki. Obliczany z wzoru:

$$\lambda = m_{POW} / m_{PAL} \times LT$$

gdzie:

λ - współczynnik składu mieszanki - bezwymiarowy

m_{POW} - masa powietrza w mieszance paliwowo - powietrznej [kg]

m_{PAL} - masa paliwa w mieszance paliwowo - powietrznej

LT - teoretyczna masa powietrza potrzebna do spalenia 1kg paliwa

Teoretyczna masa powietrza potrzebna do spalania 1kg paliwa, to masa powietrza wynikająca z równania chemicznego, potrzebna do spalania 1kg paliwa. Jej wartość zależy od składu chemicznego paliwa. Jest wielkością charakterystyczną dla każdego paliwa.

Teoretyczna masa powietrza potrzebna do spalania:

- 1kg benzyny - wynosi 14, 7kg powietrza
- 1 kg gazu LPG (propan / butan 50%) , wynosi 15, 5kg powietrza
- 1 kg gazu CNG - wynosi 17, 2kg powietrza

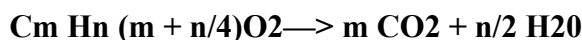
Jeśli wartość współczynnika lambda (λ):

- $\lambda = 1$ - to oznacza, że w mieszance paliwowo-powietrznej jest dokładnie tyle tlenu, ile trzeba do spalania paliwa; mieszanka ma skład stechiometryczny;
- $\lambda > 1$ - to oznacza, że w mieszance paliwowo - powietrznej jest więcej tlenu niż jest potrzebne do spalania paliwa, a więc część tlenu nie zostanie wykorzystana w procesie spalania; jest to mieszanka uboga;
- $\lambda < 1$ - to oznacza, że w mieszance paliwowo-powietrznej jest mniej tlenu niż jest potrzebne do spalania paliwa; jest to mieszanka bogata.

Składniki spalin i ich powstawanie

Skład spalin silnika ZI

Mieszanka o składzie stechiometrycznym ($\lambda = 1$) spala się teoretycznie według równania chemicznego:



Masa tlenu w takiej mieszance, jest dokładnie taka, jaka według powyższego równania jest konieczna do spalania masy paliwa znajdującej się w mieszance, więc po procesie spalania powinny pozostać tylko dwutlenek (CO_2) i para wodna (H_2O). W rzeczywistych warunkach procesu spalania, również mieszanki stechiometrycznej, spaliny emitowane przez silnik ZI mają skład przedstawiony na rys. 1. Tylko ok. 1% ich objętości to składniki szkodliwe.

Jednostki zawartości składników spalin

W praktyce warsztatowej, udziały dwutlenku węgla (CO_2), tlenku węgla (CO) i tlenu (O_2) w spalinach, są określane przez podanie ich udziału objętościowego UOBJ. Obliczany z wzoru:

$$UOBJ = VSSP/VCSP$$

Jest to stosunek objętości mierzonego składnika spalin VSSP, która znajduje się w spalinach, do całkowitej objętości spalin VCSP. Jest on podawany w procentach i oznaczany [%vol] (vol to skrót od słowa volume, które oznacza objętość). Jest to więc informacja, jaki procent objętości spalin zajmuje mierzony składnik.

Zawartość w spalinach węglowodorów (HC) oraz tlenków azotu (NOX) jest określana też jako udział objętościowy, ale ze względu na ich małe zawartości, z zastosowaniem jednostki [ppm].

Oznaczenie [ppm] to skrót z języka angielskiego, od słów parts per million, oznaczający jedno milionową część objętości, a więc

$$1ppm = 0,01 \%vol$$

$$10000 = 1\% vol$$

Azot (N_2) w spalinach silnika

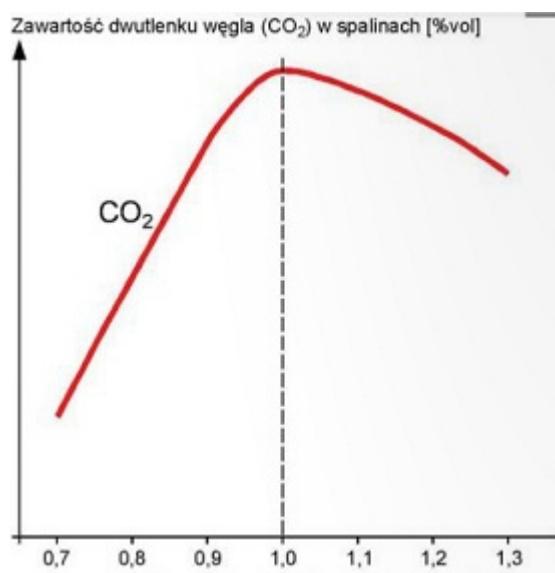
Azot (N_2) w spalinach pochodzi z powietrza. Dla człowieka jest gazem obojętnym.

Para wodna (H₂O) w spalinach silnika

Para wodna (H₂O) w spalinach jest produktem spalania wodoru (H), składnika paliwa węglowodorowego. W spalinach silnika zasilanego np. gazem CNG jest go więcej niż zasilanego benzyną, bowiem w gazie CNG jest więcej atomów wodoru (H) w stosunku do atomów węgla (C), niż w benzynie silnikowej.

Dwutlenek węgla (CO₂) w spalinach silnika

Powstawanie. Dwutlenek węgla (CO₂) to produkt spalania węgla (C) składnika paliwa węglowodorowego. Powstaje wówczas tylko, gdy mieszanka jest spalana. Jeśli nie ma procesu spalania, to dwutlenek węgla (CO₂) nie powstaje. Zawartość w spalinach silnika przed konwerterem katalitycznym pokazuje rys. 2. Najwyższa zawartość dwutlenku węgla (CO₂) jest w spalinach, powstałych ze spalania mieszanki stechiometrycznej.



Rys.2

Jeśli:

- są spalane mieszanki bogate lub ubogie;
- spalaniu ulega tylko część mieszanki – przykładowo w jednym cylindrze spala się tylko część mieszanki do niego wprowadzonej, bo proces spalania przebiega za wolno, lub nie spala się ona wcale, to zawartość w spalinach dwutlenku węgla (CO₂) jest mniejsza od maksymalnej.

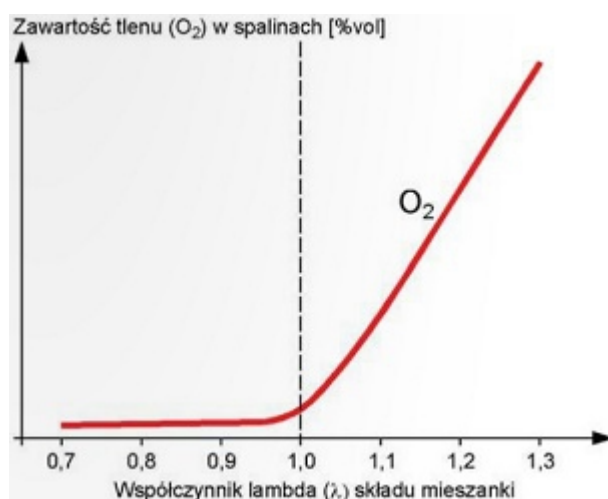
Własności. Powietrze, którym oddychamy, zawiera dwutlenek węgla (CO). Jest on bezwonny, przezroczysty, nietrujący i nieszkodliwy. W opinii części ekspertów, nadmierny wzrost jego zawartości w atmosferze powoduje na kuli ziemskiej tzw. efekt cieplarniany, a w konsekwencji zmianę klimatu i kataklizmy. Ponieważ ważne by paliwa spalały się jak najpełniej, a wówczas powstaje najwięcej dwutlenku węgla (CO₂), więc jedyną metodą ograniczenia jego emisji jest zmniejszenie zużycia paliwa, lub stosowanie paliw o małej zawartości węgla (C), np. paliw z wysoką zawartością metanu CH₄.

Tlen (O₂) w spalinach silnika

Pochodzenie. Tlen (O₂) wprowadzany do komory spalania, jest składnikiem powietrza (ok. 21% jego objętości). Jego niewielka ilość, jest też w benzynie silnikowej. Jest niezbędny do procesów spalania. Zawartość w spalinach silnika przed konwerterem katalitycznym (rys. 3). Cały tlen (O₂), znajdujący się w mieszance paliwowo-powietrznej, nigdy nie jest wykorzystywany w procesie spalania, dlatego jest on też w spalinach powstałych ze spalania mieszanki bogatej ($\lambda < 1$).

Gdy spalane są mieszanki uboższe od stechiometrycznej, w spalinach pozostaje również tlen (O₂), którego jest za dużo w stosunku do paliwa znajdującego się w mieszance - im uboższa jest mieszanka, tym więcej tlenu (O₂) jest w spalinach. Jeśli spalaniu ulega tylko część mieszanki, ponieważ np. w jednym cylindrze spala się tylko część mieszanki, bo proces spalania przebiega za wolno, lub nie spala się ona wcale, to niewykorzystany w procesie spalania tlen (O₂) opuszcza komorę spalania wraz ze spalinami - wzrasta więc jego zawartość w spalinach.

Własności. Tlen (O₂) jest gazem niezbędnym do życia.



Rys.3

Tlenek węgla (CO) w spalinach silnika

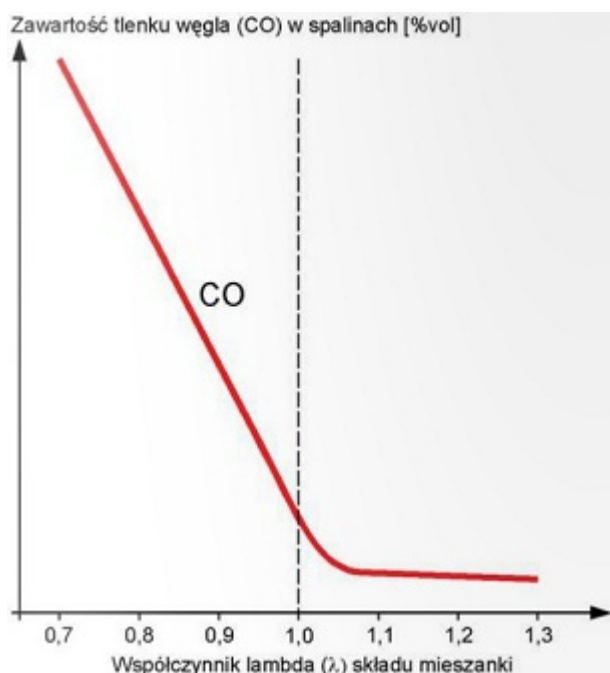
Powstawanie. Tlenek węgla (CO) jest produktem niedokończonego procesu spalania węgla (C), składnika paliwa węglowodorowego. Nigdy w komorze spalania nie ma warunków, aby całość węgla (C) spaliła się tak, by powstał tylko dwutlenek węgla (CO₂), dlatego tlenek węgla (CO) zawsze jest w spalinach silnika. Powstawanie tlenku węgla (CO) towarzyszy procesowi spalania mieszanki. Jeśli mieszanka nie jest spalana, to tlenek węgla (CO) nie powstaje.

Zawartość w spalinach silnika przed konwerterem katalitycznym pokazuje rysunek 4. W mieszance bogatej ($\lambda < 1$) ilość tlenu (O₂) jest za mała, aby całość węgla (C) spaliła się tak, by powstał tylko dwutlenek węgla (CO₂). Im bogatsza jest mieszanka, tym powstaje więcej tlenku węgla (CO).

Dla mieszanek bogatych, zawartość tlenku węgla (CO) w spalinach, jest dobrą informacją o składzie spalanej mieszanki. W mieszance ubogiej ($\lambda > 1$) ilość tlenu (O₂) jest większa niż wymagana, aby całość węgla (C) mogła się spalić tak, by powstał tylko dwutlenek węgla (CO₂).

Zawsze jednak w komorze spalania są takie strefy, w których mieszanka jest bogata i palna. Jednym z produktów jej spalania jest tlenek węgla (CO), dlatego w spalinach powstałych ze spalania mieszanki ubogiej też jest on obecny. Im uboższa jest mieszanka, tym mniejsza jest zawartość tlenku węgla (CO). Jednak im uboższa jest mieszanka, tym większa jest w spalinach zawartość azotu (N₂) oraz niewykorzystanego w procesie spalania tlenu (O₂) - patrz [rys.3](#). Powoduje to wzrost całkowitej objętości spalin (VCSP - patrz wzór 3), a więc zmniejszenie udziału objętościowego tlenku węgla (CO). Jego zawartość błędnie informuje o przebiegu procesu spalania mieszanek ubogich, o większych wartościach współczynnika lambda (λ). Dla prawidłowej oceny procesu spalania takiej mieszanki, należy dodatkowo mierzyć zawartość węglowodorów (HC) w spalinach.

Własności. Tlenek węgla (CO) jest bezwonny, przeźroczysty, bezbarwny i pozbawiony smaku. Jest to silna trucizna, szczególnie niebezpieczna, bo niewyczuwalna „nosem”. Oddychanie przez 30 min powietrzem o zawartości 0,3%vol tlenku węgla (CO), może spowodować śmierć.



Rys,4

Węglowodory (HC) w spalinach silnika

Powstawanie. „Węglowodorami” nazwano grupę związków chemicznych, które składają się z węgla (C) i wodoru (H). Oznacza się je symbolem (HC). W spalinach jest ok, 180 różnych związków typu węglowódor. Mają one różne własności i są różnym stopniu toksyczne. Paliwa silnikowe składają się głównie z węglowodorów benzyny silnikowej oraz z innych składników. Ich końcowymi produktami spalania (patrz równanie 2) są dwutlenek węgla (CO₂) para wodna (H₂O). W komorze spalania nie ma warunków, by wszystkie węglowodory tak się spaliły.

Są strefy, w których:

- proces spalania części węglowodorów rozpoczyna się, ale na którymś etapie, pomiędzy kolejnymi reakcjami, zostaje przerwany nie kończy się (spalanie paliwa jest tzw. procesem łańcuchowym, składającym się z wielu następujących po sobie reakcji) w następstwie przerwania proces spalania część węglowodorów zmienia tylko swój rodzaj, pozostając nadal węglowodorami;
- proces spalania węglowodorów nie nastąpił

Oba procesy powodują, że w spalinach zawsze węglowodory (HC). Im lepiej przebiega proces przygotowania i spalania mieszanki, tym jest ich mniej.

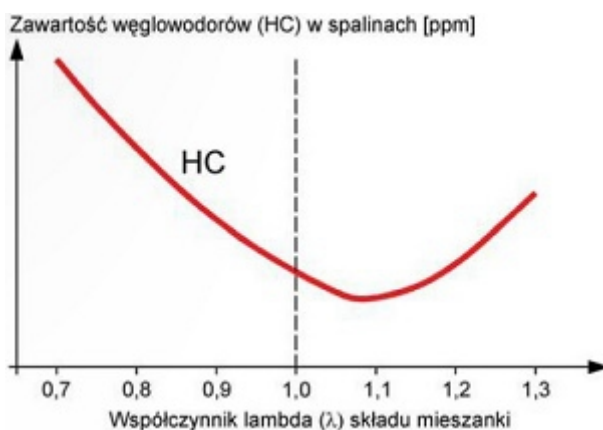
Zawartość w spalinach silnika przed konwerterem katalitycznym pokazuje [rys 5](#).

Zawsze w komorze spalania są strefy, w których:

1. proces spalania węglowodorów nie kończy się;
2. mieszanka paliwowo-powietrzna jest za bogata lub za uboga, aby proces spalania nastąpił.

W mieszance bogatej ilość tlenu jest za mała, aby wszystkie węglowodory spaliły się tak, by zostały po nich tylko para wodna i dwutlenek węgla, dlatego im bogatsza jest mieszanka, tym emisja węglowodorów jest wyższa.

W mieszance ubogiej ilość tlenu jest większa niż wymagana, aby wszystkie węglowodory spaliły się, dlatego przy spalaniu lekko uboższych mieszanek - przykładowo λ od 1,05 do 1,1 ([rys. 5](#)), emisja węglowodorów jest najmniejsza.



Rys,5

Jeśli są spalane mieszanki uboższe, w porównaniu z mieszanką, przy spalaniu której zawartość węglowodorów (HC) w spalinach jest najniższa, to w komorze spalania jest więcej stref, w których:

- mieszanka uboga spala się za wolno, aby proces spalania skończył się przed otwarciem zaworu wylotowego (jego otwarcie pogarsza warunki procesu spalania);
- mieszanka jest tak uboga, że nie spala się.

Powoduje to wzrost emisji węglowodorów (HC). Zawartość węglowodorów (HC) w spalinach lepiej informuje o jakości procesu spalania niż zawartość tlenku węgla (CO), szczególnie w zakresie mieszanek ubogich.

Własności. Grupa węglowodorów (HC) obejmuje związki chemiczne o różnych właściwościach. Niektóre są bezwonne, a inne mają intensywny zapach. Większość z nich szkodliwie oddziałuje na drogi oddechowe i układ krwionośny. Mają również działanie rakotwórcze. Uczestniczą w tworzeniu smogu.

Tlenki azotów (NOX) w spalinach silnika

Powstawanie. Przy ciśnieniu i temperaturze panujących w naszym otoczeniu, azot (N_2) nie reaguje z tlenem (O_2) (oba są składnikami powietrza). Jednak w komorze spalania silnika, przy ciśnieniach i temperaturach towarzyszących procesowi spalania, przekraczających lokalnie ok. $1800^\circ C$, azot (N_2) wchodzi w reakcje z tlenem (O_2), tworząc tlenek azotu (NO). Przyjmuje się, że temperatura $1800^\circ C$ jest graniczną, po przekroczeniu której ilość powstających tlenków azotu (NO) szybko rośnie. Powstawanie tlenków azotu (NOX) w komorze spalania silnika nie jest bezpośrednim wynikiem procesu spalania paliwa, ale wynikiem reakcji po między azotem (N_2) i tlenem (O_2), w korzystnych warunkach panujących w komorze spalania, stworzonych przez proces spalania.

W następstwie procesów zachodzących w komorze spalania i w układzie wylotowym silnika, przez końcówkę układu wylotowego są emitowane różne związki chemiczne, będące połączeniem azotu (N_2) i tlenu (O_2). Podstawowe z nich to:

- tlenek azotu (NO)
- dwutlenek azotu (NO_2)
- podtlenek azotu (N_2O)

Wszystkie związki azotu (N_2) i tlenu (O_2) są ogólnie nazywane tlenkami azotu i oznaczane symbolem NOX. Zawartość w spalinach silnika przed konwerterem katalitycznym pokazuje rys 6. Zawartość tlenków azotu (NOX) w spalinach jest najwyższa, gdy spalane są mieszanki trochę zubożone, charakteryzowane współczynnikiem lambda wynoszącym od 1,05 do 1,1 (rys. 6). Gdy spalane są mieszanki uboższe lub bogatsze, to emisja tlenków azotu (NOX) jest niższa od maksymalnej.



Rys,6

Zawartość tlenków azotu (NOX) w spalinach zależy silnie od ciśnień i temperatur panujących w komorze spalania, a więc od obciążenia silnika. W warunkach warsztatowych, analiza składu spalin silnika ZI jest wykonywana prawie wyłącznie dla silnika nieobciążonego - wówczas emisja tlenków azotu (NOX) jest bardzo niska. Dopiero obciążenie silnika powoduje wyraźny wzrost emisji tlenków azotu (NOX). Przykładowa, zawartość tlenków azotu (NOX) w spalinach przed konwerterem katalitycznym wynosi na biegu jałowym silnika 300ppm, a przy pełnym obciążeniu silnika 5000ppm.

Z tego powodu, oraz ze względu na różnice konstrukcyjne między silnikami (wartość stopnia sprężenia), trudno jest określić normę emisji tlenków azotu (NOX) dla silnika nieobciążonego,

dlatego pomiar ich zawartości w spalinach silnika nieobciążonego, nie ma znaczenia praktycznego.

Własności. Związki z grupy tlenków azotu (NOX), mają różne własności :

- tlenek azotu (NO) - bezwonny, bezbarwny gaz, powodujący ciężkie zatrucie krwi i porażenie centralnego układu nerwowego;
- dwutlenek azotu (NO₂) - gaz o czerwono-brunatnym zabarwieniu, o drażniącym zapachu, podrażnia i powoduje choroby układu oddechowego;
- podtlenek azotu (N₂O) - bezbarwny gaz, o działaniu odurzającym, stosowany też jako gaz rozweselający.

Tlenkom azotu (NOX) przypisuje się ok. dziesięciokrotnie silniejsze szkodliwe oddziaływanie na organizm człowieka niż tlenkom węgla (CO). Ponadto reagując z węglowodorami (HC) w atmosferze, już po opuszczeniu układu wylotowego, powodują powstanie ozonu kolejnych „odmian” trujących węglowodorów (zjawisko smogu). Przyczyniają się również do powstawania kwaśnych deszczy (opady kwasu azotowego) i obumierania roślinności.

Mieszanka stechiometryczna ($\lambda=1$) : najwięcej CO₂, najmniej CO, HC, NOX, O₂

Mieszanka uboga ($\lambda>1$) :więcej O₂, mniej HC i CO, CO₂-mniej niż max. NOX-mniej niż max.

Mieszanka bogata ($\lambda<1$) : mało O₂, więcej HC i CO,CO₂-mniej niż max. NOX-mniej niż max.

Mieszanka zubożona (λ od 1,05 do 1,1) : najwięcej NOX , najmniej HC

Lambda	Rodzaj mieszanki	Emisja CO tlenek węgla	Emisja HC węglowodory	Emisja NOX tlenki azotu	Emisja CO ₂ dwutlenek węgla	Emisja O ₂ tlen
$\lambda = 1$	Mieszanka stechiometryczna	niska	niska	niska	największa	najmniejsza
$\lambda > 1$	Mieszanka uboga	niska	niska	niska	niska	wysoka
$\lambda < 1$	Mieszanka bogata	wysoka	wysoka	niska	niska	niska
λ 1,05-1,1	Mieszanka zubożona	niska	najmniejsza	największa	niska	wysoka