

Aleksandra KUTRZYK, Jan FILIPCZYK

OKREŚLANIE POZIOMU EMISJI SKŁADNIKÓW SPALIN DLA RÓŻNYCH WARUNKÓW PRACY SILNIKA

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę obliczania objętościowej ilości poszczególnych składników spalin silnika o zapłonie iskrowym. Przeprowadzono wstępne obliczenia. Wyniki porównano z rezultatami badań emisji poszczególnych składników spalin. Obiektem badań był silnik o zapłonie iskrowym z turbodoładowaniem.

DESCRIPTION OF THE LEVEL OF EXHAUST EMISSION FROM SPARK IGNITION ENGINES FOR DIFFERENT WORK CONDITIONS OF ENGINE

Summary. This paper presents the method of calculation the amount of different ingredients of exhaust emission from spark ignition engines. The tentative calculations were made. Results of the calculations were compared with the results of the research, which were made for turbo-charged spark ignition engine.

1. WPROWADZENIE

Konieczność spełniania norm emisji spalin stawia przed producentami coraz trudniejsze zadania. W przypadku pojazdów eksploatowanych poziom emisji spalin powinien być kontrolowany podczas obsług technicznych oraz podczas obowiązkowych badań kontrolnych. Natomiast podczas okresowych obsług technicznych, jak i obowiązkowych badań kontrolnych diagnozowanie stanu technicznego silnika w zakresie oddziaływania na środowisko jest najczęściej pomijane lub traktowane pobieżnie. Znaczna część z eksploatowanych silników jest niesprawną przynajmniej w zakresie emisji zanieczyszczeń.

Użytkowanie niesprawnego silnika, a także stosowanie niewłaściwych materiałów eksploatacyjnych lub paliw powoduje, iż niekorzystne oddziaływanie silników na środowisko gwałtownie wzrasta [1]. Przy określaniu szacunkowego poziomu emisji spalin przez samochody istotna jest znajomość wpływu warunków pracy silnika, tj. obciążenia, prędkości obrotowej, warunków otoczenia oraz cech konstrukcyjnych na zawartość poszczególnych składników w spalinach.

2. SKŁADNIKI SPALIN SILNIKÓW SAMOCHODOWYCH

Skład mieszanki paliwowo – powietrznej wpływa na przebieg procesu spalania oraz na produkty procesu spalania paliwa. W zależności od warunków, w jakich odbywa się spalanie, występuje spalanie zupełne i całkowite, niezupełne oraz niecałkowite. Podczas spalania zupełnego i całkowitego cały węgiel zawarty w paliwie spala się na dwutlenek węgla CO_2 , wodór na H_2O , a cała siarka na SO_2 lub SO_3 . Zazwyczaj na skutek niedoskonałych warunków spalania produkty zawierają substancje palne, tj. gazy palne w przypadku spalania niezupełnego oraz stałe składniki palne w przypadku spalania niecałkowitego [2,3].

Zasadniczymi składnikami toksycznymi spalin są tlenek węgla CO, nieopalone węglowodory HC i tlenki azotu NO_x . Ponadto powstają także, głównie w silnikach o zapłonie samoczynnym, cząstki stałe PM. Silniki o zapłonie iskrowym emitują głównie składniki gazowe CO, HC i NO_x , silniki o zapłonie samoczynnym emitują natomiast NO_x , PM oraz w mniejszym stopniu HC [4].

2.1. Emisja silników o zapłonie iskrowym

Tlenek węgla CO powstaje podczas spalania mieszanek bogatych oraz w wysokotemperaturowym płomieniu w wyniku dysocjacji CO_2 . Stężenie tlenu węgla znacznie zmniejsza się wraz z przejściem z zakresu mieszanek bogatych w zakres mieszanek ubogich. Przy dalszym zubożaniu mieszanki poziom tlenu węgla jest na stałym, niewielkim poziomie. Stężenie węglowodorów jest największe także dla mieszanek bogatych. Najmniejsze stężenie węglowodorów występuje dla współczynnika nadmiaru powietrza λ w zakresie od 1,1 do 1,2. Dalsze zubożanie mieszanki powoduje wzrost emisji węglowodorów. Podwyższona emisja tlenków azotu występuje w przypadku lekko zubożonych mieszanek, przy współczynniku λ równym około 1,1. Aby powstały tlenki azotu NO_x , spełnione muszą być następujące warunki: wysoka temperatura spalania oraz wolne cząsteczki tlenu. Tlenki siarki pochodzą z utleniania siarki znajdującej się w paliwie, przy czym w benzynie siarka występuje w niewielkich ilościach [4,5].

2.2. Emisja silników o zapłonie samoczynnym

Powstawanie cząstek stałych PM zależy od ilości wolnego tlenu. Liczba cząstek stałych wzrasta wraz ze wzbogaceniem mieszanki. Szczególnie duży wzrost licznych cząstek stałych występuje dla współczynników nadmiaru powietrza zbliżających się do dolnej granicy wartości granicznej, tj. do zakresu od 1,5 do 1,1. Stężenie tlenu węgla w spalinach silnika o zapłonie samoczynnym są stosunkowo małe. Emisja węglowodorów rośnie wraz ze zubożaniem mieszanki paliwowo – powietrznej. W przypadku tlenków azotu, najbardziej sprzyjające warunki występują podczas spalania mieszanek nieznacznie zubożonych. Aby powstały tlenki azotu NO_x , muszą być spełnione następujące warunki: wysoka temperatura spalania oraz wolne cząsteczki tlenu. Spalanie w silnikach o zapłonie samoczynnym z reguły odbywa się w warunkach nadmiaru powietrza, co sprzyja powstawaniu tlenków azotu. Tlenki siarki pochodzą z utleniania siarki znajdującej się w oleju napędowym [4,5].

3. SKŁADNIKI SPALIN

Na podstawie bilansu substancji można określić zawartość poszczególnych pierwiastków w spalinach [6]:

$$c = n''_{CO_2} + n''_{CO} + i \cdot n''_{HC} \quad (1)$$

$$h = n''_{H_2O} + j \cdot n''_{HC} + \lambda \cdot n_{amin} \cdot X_{ZA} \quad (2)$$

$$o = n''_{CO_2} + \frac{1}{2} n''_{H_2O} + \frac{1}{2} n''_{CO} + \frac{1}{2} \lambda \cdot n_{amin} \cdot X_{ZA} + n''_{O_2} \quad (3)$$

$$n = n''_{N_2} + n''_{NO_x}, \quad (4)$$

gdzie:

n''_i - ilość danego składnika spalin,

$n_{amin} \cdot X_{ZA}$ - wilgoć pochodząca z powietrza,

n_{amin} - teoretyczne zapotrzebowanie na powietrze,

X_{ZA} - molowy stopień zawilżenia powietrza,

λ - współczynnik nadmiaru powietrza

$$\lambda = \frac{n'_a}{n_{amin}} = \frac{n'_t}{n_{tmin}}, \quad (5)$$

n'_a - jednostkowe zużycie powietrza,

n'_t - jednostkowe zużycie tlenu,

n_{tmin} - teoretyczne zapotrzebowanie na tlen.

$$n_{tmin} = 0,21 \cdot n_{amin} \quad (6)$$

Przy spalaniu paliwa, w skład którego wchodzi: węgiel, wodór, siarka i tlen, udziały masowe można w uproszczeniu zapisać jako [7]:

$$c + h + s + o = 1 \quad (7)$$

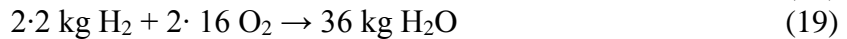
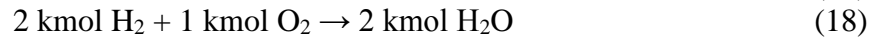
Reakcję spalania węgla można opisać w następujący sposób:



Reakcję spalania siarki można opisać równaniem reakcji:



Reakcję spalania wodoru można opisać:



Zakładając, że objętość 1 kmol gazu w warunkach normalnych wynosi $V = 22,4 \text{ m}^3$, można obliczyć objętość poszczególnych składników zawartych w spalinach.

Przyjmując, że z 12 kg C powstaje 44 kg CO_2 , to z 1 kg C powstaje $44/12 \text{ kg CO}_2$. Objętość 1 kmol CO_2 (czyli 44 kg) jest równa $22,4 \text{ m}^3$. Stąd 1 kg CO_2 ma objętość $22,4/44 \text{ m}^3$.

$$\text{Z 1 kg C powstaje} \rightarrow \frac{44}{12} \cdot \frac{22,4}{44} \rightarrow 1,867 \text{ m}^3 \text{ CO}_2.$$

Analogicznie dla pozostałych pierwiastków można określić objętości:

- tlenek węgla CO

$$\text{z 1 kg C powstaje} \rightarrow 1,867 \text{ m}^3 \text{ CO};$$

- dwutlenek siarki SO_2

$$\text{z 1 kg S powstaje} \rightarrow 0,701 \text{ m}^3 \text{ SO}_2;$$

- wodór

$$\text{z 1 kg H powstaje} \rightarrow 11,2 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O}.$$

Objętość całkowita spalin mokrych (zawierających parę wodną) z 1 kg paliwa jest równa [6]:

- dla $\lambda > 1$

$$V_{\text{spm}} = 1,867c + 0,701s + 11,21h + (\lambda - 0,21) n_{a\text{min}}, \text{ m}^3/\text{kg paliwa} \quad (20)$$

- dla $\lambda < 1$

$$V_{\text{spm}} = 1,867c + 0,701s + 11,21h + 0,79 n_{a\text{min}}, \text{ m}^3/\text{kg paliwa}, \quad (21)$$

gdzie $n_{a\text{min}}$ - teoretyczne zapotrzebowanie na powietrze, m^3/kg paliwa.

Objętość azotu w spalinach można obliczyć wg wzoru:

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \lambda n_{a\text{min}}, \text{ m}^3/\text{kg paliwa} \quad (22)$$

Objętość tlenu w spalinach oblicza się wg wzoru:

$$V_{\text{O}_2} = 0,21(\lambda - 1) n_{a\text{min}}, \text{ m}^3/\text{kg paliwa} \quad (23)$$

Przy założeniu, że całkowita objętość spalin V_{spm} równa jest 100 %, procentową zawartość $\text{CO}_2 + \text{CO}$ można obliczyć wg zależności:

$$V_{\text{spm}} = 1,867c \frac{100}{b+t}, \quad (24)$$

gdzie $b + t$ – procentowa zawartość CO_2 i CO

Stąd:

$$b + t = \frac{100 \cdot 1,596}{V_{\text{sp}}} \quad (25)$$

Analogicznie można określić objętość pozostałych składników:

- objętość tlenu w spalinach:

$$o_{\text{sp}} = V_{\text{O}_2} \frac{100}{V_{\text{sp}}} \quad (26)$$

- objętość azotu w spalinach:

$$n_{\text{sp}} = V_{\text{N}_2} \frac{100}{V_{\text{sp}}} \quad (27)$$

- objętość wodoru w spalinach:

$$h_{\text{sp}} = \frac{100 \cdot 1,63}{V_{\text{sp}}} \quad (28)$$

3.1. Wyniki obliczeń dla silnika o zapłonie iskrowym

W celu określenia składu spalin silnika o zapłonie iskrowym zasilanego paliwem benzynowym przeprowadzono obliczenia z wykorzystaniem przedstawionych wzorów dla udziału masowego węgla i wodoru w paliwie wynoszącym: $c = 0,855$ i $h = 0,145$.

Przyjęto teoretyczne zapotrzebowanie na powietrze dla benzyny jako:

$$n_{a\text{min}} = 11,48 \text{ m}^3 / \text{kg paliwa}.$$

Korzystając ze wzoru (20) obliczona została całkowita objętość spalin mokrych:

- dla $\lambda = 1,03$

$$V_{\text{spm}} = 1,596 + 1,625 + 0,82 \cdot 11,48 = 12,63 \text{ m}^3/\text{kg paliwa}, \quad (29)$$

gdzie:

1,596 m^3/kg paliwa – $\text{CO}_2 + \text{CO}$,

1,625 m^3/kg paliwa – składniki zawierające wodór,

$0,82 \cdot 11,48 = 9,41 \text{ m}^3/\text{kg}$ paliwa – łączna objętość składników związków azotu i wolnego tlenu,

gdzie:

obliczona objętość azotu

$$V_{\text{N}_2} = 9,34 \text{ m}^3/\text{kg paliwa} \quad (30)$$

obliczona objętość tlenu:

$$V_{\text{O}_2} = 0,07, \text{ m}^3/\text{kg paliwa} \quad (31)$$

W tabeli 1 przedstawiono wyniki obliczeń zawartości poszczególnych składników spalin.

Tabela 1

Objętość poszczególnych składników spalin					
Objętość	CO + CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂	V _{sp}
m ³ /kg paliwa	1,596	9,34	0,07	1,625	12,63
%	12,63	73,93	0,57	12,86	100

Na podstawie obliczonych wartości objętości składników spalin powstałych po spanieniu 1 kg paliwa przy założeniu, że $\lambda = 1,03$ określono procentowe zawartości poszczególnych składników w spalinach.

4. BADANIA WERYFIKACYJNE

W celu zweryfikowania wyników obliczeń wstępnych przeprowadzono pomiary objętościowej zawartości składników spalin silnika badawczego. Badania zostały przeprowadzone na stanowisku badawczym wyposażonym w hamulec elektrowirowy. Obiektem badań był silnik o zapłonie iskrowym o pojemności 1300 cm³ z turbodoładowaniem. Dla różnych warunków pracy silnika mierzono udziały objętościowe CO, CO₂, NO_x, O₂, λ , zużycia paliwa, temperatury i natężenia przepływu zasysanego powietrza oraz momentu obrotowego w zakresie prędkości obrotowej od 1000 do 5000 obr/min przy stopniu otwarcia przepustnicy wynoszącym 50%.

Przykładowe wyniki procentowych udziałów składników spalin przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

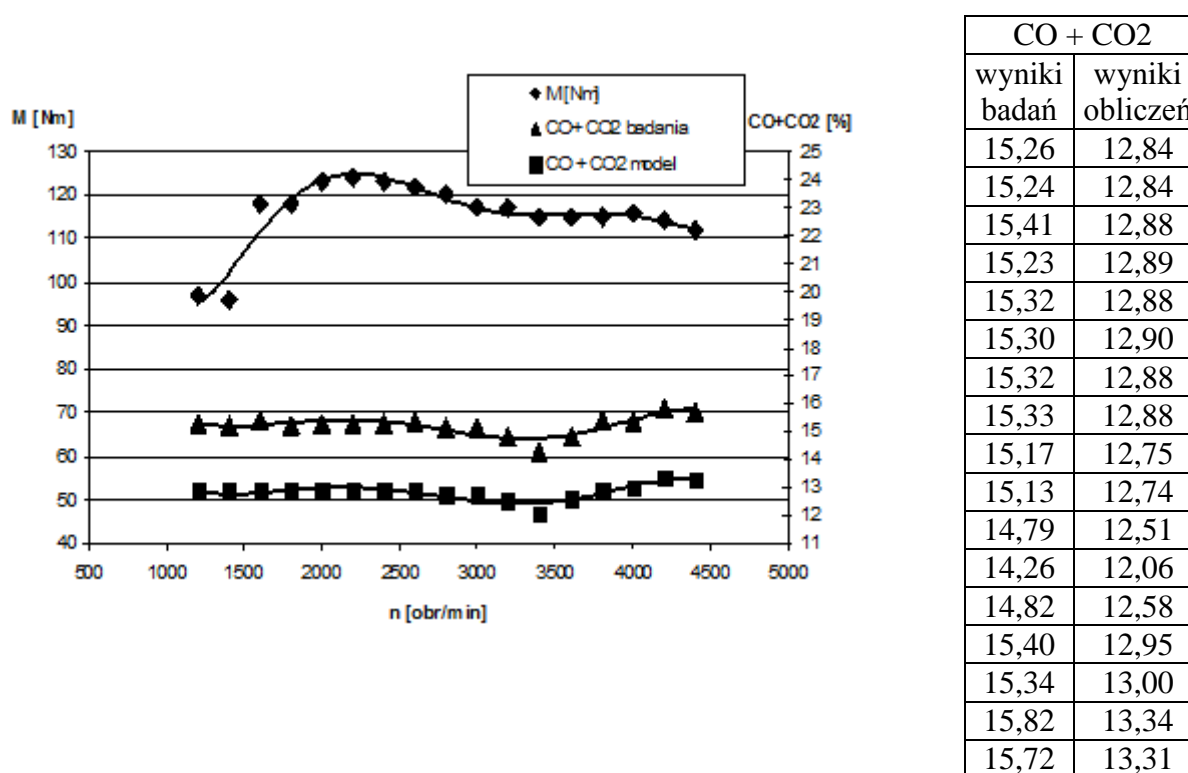
Przykładowe wyniki badań								
Lp.	n [obr/min]	M [Nm]	g _e [g/s]	CO [%]	CO ₂ [%]	NO _x [ppm]	O ₂ [%]	λ
1.	1200	97	1,1	0,46	14,8	2890	0,62	1,012
2.	1400	96	1,32	0,44	14,8	2559	0,60	1,012
3.	1600	118	1,32	0,51	14,9	3800	0,60	1,009
4.	1800	118	1,58	0,53	14,7	3971	0,60	1,008
5.	2000	123	1,83	0,52	14,8	4030	0,60	1,009
6.	2200	124	1,04	0,50	14,8	4095	0,60	1,001
7.	2400	123	2,07	0,52	14,8	4340	0,60	1,009
8.	2600	122	2,28	0,53	14,8	4604	0,59	1,009
9.	2800	120	2,27	0,37	14,8	5152	0,71	1,020
10.	3000	117	2,41	0,33	14,8	5250	0,71	1,021
11.	3200	117	2,64	0,19	14,6	5725	0,99	1,041
12.	3400	115	2,74	0,16	14,1	5963	0,79	1,082
13.	3600	115	3,01	0,22	14,6	5880	0,96	1,035
14.	3800	115	3,29	0,60	14,8	4864	0,48	1,003
15.	4000	116	3,44	0,54	14,8	4130	0,41	0,999
16.	4200	114	3,74	1,32	14,5	4044	0,22	0,972
17.	4400	112	3,83	1,32	14,4	4101	0,28	0,974

Jako silnik badawczy celowo wykorzystano silnik wolnossący ze zmodyfikowanym układem dolotowym. Modyfikacja polegała na zamontowaniu turbosprężarki zmieniającej warunki napełnienia silnika. Nie przeprowadzono modyfikacji układu sterującego. W trakcie badań okazało się, że zmiana warunków pracy silnika nie miała istotnego znaczenia na wartość współczynnika λ .

5. ANALIZA PRZEPROWADZONYCH BADAŃ ORAZ WYNIKÓW OBLICZEŃ

Przeprowadzono obliczenia udziałów objętościowych składników spalin dla zmierzonych wartości współczynnika λ , jednostkowego zużycia paliwa i jednostkowego zużycia powietrza w różnych warunkach pracy opisanych wielkością obciążenia i prędkości obrotowej.

Przykładowe wyniki obliczeń porównano z wartościami zmierzonymi zawartości poszczególnych składników w spalinach. Zestawienie wyników przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Przebieg momentu obrotowego oraz procentowej zawartości CO i CO₂ w spalinach
Fig. 1. The torque and the percentage amount of CO and CO₂ in exhaust gases curve

Charakter przebiegu krzywych opisujących procentową zawartość CO₂ i CO dla wartości zmierzonych i obliczonych jest podobny. Stała różnica pomiędzy wartościami zmierzonymi i obliczeniowymi w całym zakresie przebiegu wynika z przyjętej szacunkowej zawartości poszczególnych pierwiastków w paliwie.

6. PODSUMOWANIE

Do obliczeń procentowej zawartości poszczególnych składników w spalinach wykorzystano wzory reakcji chemicznych spalania poszczególnych składników paliwa i powietrza. Istotne znaczenie dla dokładności szacunkowych obliczeń ma przyjęty udział masowy poszczególnych pierwiastków w paliwie i powietrzu. We współczesnych silnikach o zapłonie iskrowym współczynnik składu mieszanki λ w minimalnym stopniu zależy od warunków pracy silnika. Można przyjąć, że emisja spalin i zawartość poszczególnych składników zależą od składu i jednostkowego zużycia paliwa. Dla silników z zapłonem iskrowym z dużym przybliżeniem można określić zawartość procentową składników spalin wykorzystując przedstawione zależności przy znanym składzie i jednostkowym zużyciu paliwa.

Bibliografia

1. Filipczyk J, Kutrzyk A.: Wpływ rozwiązań konstrukcyjnych i stanu technicznego silnika na poziom emisji zanieczyszczeń. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z. 63, Gliwice 2006.
2. Szargut J.: Termodynamika techniczna. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005.
3. Wilk S.: Termodynamika techniczna. WSiP, Warszawa 1999.
4. Merkiś J.: Ekologiczne problemy silników spalinowych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.
5. Rokosch U.: Układy oczyszczania spalin i pokładowe systemy diagnostyczne samochodów OBD. WKiŁ, Warszawa 2007.
6. Wilk K.: Równania bilansu substancji zawartych w spalinach. Materiały niepublikowane.
7. Kowalewicz A.: Podstawy procesów spalania. WNT, Warszawa 2000.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Bronisław Sendyka

Praca wykonana w ramach BW-510/RT1/2008