ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1988

Seria: TRANSPORT z. 6 Nr kol. 908

Jacek MAĆKOWSKI

OKREŚLANIE ILOŚCI SKŁADNIKÓW SPALIN PODCZAS SPALANIA MIESZANEK BOGATYCH

Streszczenie: Ciągle rozwijające się podstawowe gałęzie nauki umożliwiają coraz dokładniejsze wyznaczenie wartości parametrów znajdujących zastosowanie w różnych dziedzinach techniki.

Analiza spalin wykazała, że stosunek liczby moli wodoru do liczby moli tlenku węgla jest dla danego paliwa wartością stałą i dla mieszanek bogatych nie zależy od współczynnika zmian powietrza.

W artykule wykorzystano podany przez Prof. Chowacha stosunek liczby moli tlenku węgla zawartego w spalinach silników spalinowych do określenia ilości moli poszczególnych składników spalin, otrzymanych ze spalenia 1 kg benzyny. Obliczenia przeprowadzono w funkcji zmieniającego się współczynnika składu mieszanki. Wyniki obliczeń porównano z wynikami obliczeń stosowanymi dawniej. Przeprowadzona korekta umożliwia bardziej precyzyjne określenie np. energii wewnętrznej spalin, a ta przyczynia się do zwiększenia dokładności obliczeń cieplnych procesu spalania.

Obliczenia cieplne procesu spalania, wykorzystywane dawniej do wyznaczania niektórych parametrów konstrukcyjnych silnika, obecnie ustąpiły całkowicie modelowaniu spalania. Mogą jednak nadal być wykorzystywane do analizy niektórych zagadnień teoretycznych.

Jednym z problemów występujących w czasie obliczeń jest określenie ilości moli poszczególnych składników spalin występujących podczas spalania mieszanek bogatych ($\alpha > 1$).

Przeprowadzone rozważania dotyczą spalania 1 kg benzyny o składzie elementarnym C = 0,885 i H = 0,145.

W silnikach o ZI przy zupełnym spaleniu 1 kg benzyny powstaje M_1 kmoli mieszanki składającej się z par benzyny i powietrza:

$$M_1 = \alpha \cdot L_o + \frac{1}{\mu_T},$$

gdzie:

α - współczynnik nadmiaru powietrza,

μ_T - średnia masa cząsteczkowa benzyny,

L_o - teoretyczna ilość powietrza potrzebna do spalenia 1 kg benzyny

$$L_o = \frac{1}{0,21}\left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4}\right) \tag{1}$$

W obliczeniach cieplnych zakłada się, że przy zupełnym spaleniu mieszanki ubogiej $\alpha > 1$ produktami spalania są tylko CO_2, H_2O, O_2 i N_2. Ogólna ilość produktów spalania w kmolach odniesiona do 1 kg benzyny wynosi:

$$M_2 = M_{CO_2} + M_{H_2O} + M_{O_2} + M_{N_2} \tag{2}$$

Ilość poszczególnych składowych produktów spalania w kmolach określa się wg następujących równań:

$$M_{CO_2} = \frac{C}{12},$$

$$M_{H_2O} = \frac{H}{2},$$

$$M_{O_2} = 0{,}21\alpha \cdot L_o - 0{,}21\, L_o = 0{,}21\, L_o\, (\alpha - 1),$$

gdzie:

$0{,}21\, \alpha L_o$ - masa dopływającego tlenu w kmolach,

$0{,}21\, L_o$ - masa tlenu uczestniczącego w reakcji,

$$M_{N_2} = 0.79\, \alpha L_o$$

Podstawiając otrzymane składniki do równania (2) i sumując możemy ogólną ilość produktów spalania M_2 przedstawić w ten sposób:

$$M_2 = \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + \alpha L_o - 0{,}21\, L_o$$

$$M_2 = \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + L_o\, (\alpha - 0{,}21)$$

lub podstawiając w miejsce $0{,}21\, L_o$ równanie (1)

$$M_2 = \alpha L_o + \frac{H}{4}.$$

Dla stechiometrycznego składu mieszanki $\alpha = 1$, $M_{O_2} = 0$, a zatem równanie (2) wygląda następująco:

$$(M_2)_{\alpha=1} = \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + 0{,}79\, \alpha L_o.$$

Można też ilość produktów spalania przy $\alpha > 1$ przedstawić w następujący sposób:

$$(M_2)_{\alpha > 1} = (M_2)_{\alpha = 1} + 0{,}79\ (\alpha - 1)\ L_o + 0{,}21\ (\alpha - 1)\ L_o$$

$$(M_2)_{\alpha > 1} = (M_2)_{\alpha = 1} + (\alpha - 1)\ L_o\ ,$$

gdzie

$0{,}79\ (\alpha - 1)\ L_o$ i $0{,}21\ (\alpha - 1)\ L_o$ wyrażają nadmierne ilości azotu i tlenu w produktach spalania uzależnione od współczynnika nadmiaru powietrza α.

Obliczenia ilości moli spalin przy spalaniu z nadmiarem powietrza są znane od przeszło dwudziestu lat i dokładność ich jest wystarczająca dla tego typu obliczeń. Natomiast obliczenia przeprowadzone przy niedomiarze powietrza wykazały dość istotne różnice z danymi doświadczalnymi.

Określenie ilości poszczególnych składników spalin przy $\alpha > 1$ odbywało się dotychczas najczęściej z następujących wzorów:

$$M_{CO} = 0{,}42\ (1 - \alpha)\ L_o\ ,$$

$$M_{CO_2} = \frac{C}{12} - M_{CO}\ ,$$

$$M_{H_2O} = \frac{H}{2}\ ,$$

$$M_{N_2} = 0{,}79\ \alpha\ L_o\ .$$

Przy niezupełnym spalaniu część węgla zawartego w paliwie spala się na tlenek węgla, a część wodoru nie reaguje z tlenem, a zatem w spalinach powinien znaleźć się wolny wodór. Analiza gazów przy $\alpha < 1$ wykazała, że stosunek liczby moli wodoru do liczby moli tlenku węgla jest dla danego paliwa stały i nie zależy od wielkości współczynnika nadmiaru powietrza α.

Zgodnie z doświadczeniami [1] dla benzyn o stosunku $\frac{H}{C} = 0{,}17 - 0{,}19$ stosunek $k = \frac{M_{H_2}}{M_{CO}}$ wynosi 0,45 - 0,5.

Wyniki te umożliwiły przeprowadzenie następujących rozważań.

Chemiczna reakcja węgla z tlenem przy niezupełnym spalaniu ma postać:

$$2\ C + O_2 = 2\ CO$$

$$1\ kg\ (C) + \frac{4}{3}\ kg\ (O_2) = \frac{7}{3}\ kg\ (CO)$$

Oznaczając przez $\emptyset$ ilość węgla (C) w paliwie zamienionego na CO otrzymamy:

$$\emptyset\ C\ kg\ (C) + \frac{4}{3}\emptyset\ C\ kg\ (O_2) = \frac{7}{3}\emptyset\ kg\ (CO)$$

lub

$$\emptyset\ C\ kg\ (C) + \frac{\emptyset C}{24}\ kmol\ (O_2) = \emptyset\ \frac{C}{12}\ kmol\ (CO).$$

Z ostatniego równania widać, że przy spaleniu węgla na CO objętość produktów spalania jest 2 razy większa w porównaniu z objętością tlenu uczestniczącego w spalaniu.

Przy spalaniu węgla częściowo na CO_2 i CO ilość produktów spalania w kmolach wynosi:

$$M_{CO_2} + M_{CO} = \frac{C}{12}(1 - \emptyset) + \frac{\emptyset C}{12} = \frac{C}{12}$$

Ilość pary wodnej w produktach spalania w przypadku niezupełnego spalania określa się równaniem:

$$(1 - \emptyset_1)\ H\ kg\ (H_2) + \frac{1 - \emptyset_1}{4}\ H\ kmol\ ,$$

gdzie:

$\emptyset_1$ - ilość wolnego wodoru,

$(1 - \emptyset_1)$ - ilość wodoru utlenionego na H_2O.

Ilość wolnego wodoru w kmolach w produktach spalania wynosi:

$$M_{H_2} = \frac{\emptyset_1}{2}\ H\ .$$

Sumaryczna ilość pary wodnej i wodoru w produktach spalania w kmolach wynosi:

$$M_{H_2O} + M_{H_2} = \frac{1 - \emptyset_1}{2}\ H + \frac{\emptyset_1}{2}\ H = \frac{H}{2}$$

A zatem z uwzględnieniem azotu zawartego w powietrzu ogólna ilość produktów spalania w kmolach przy $\alpha < 1$ wynosi:

$$(M_2)_{\alpha<1} = \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + 0{,}79\,\alpha \cdot L_o \,.$$

Wyrażenie to w różnych postaciach spotyka się w krajowej literaturze.

W przypadku niezupełnego spalania, przy $\alpha < 1$, ilość uczestniczącego w reakcji tlenu konieczna do spalania węgla w CO_2 wynosi:

$$(1 - \emptyset)\,\frac{C}{12} = M_{CO_2} \,,$$

węgla w CO:

$$\frac{\emptyset C}{24} = \frac{M_{CO}}{2} \,,$$

wodoru:

$$(1 - \emptyset_1)\,\frac{H}{4} = \frac{M_{H_2O}}{2} \,.$$

Całkowita ilość tlenu uczestniczącego w reakcji wyniesie:

$$M_{CO_2} + \frac{M_{CO}}{2} + \frac{M_{H_2O}}{2} = 0{,}21\,\alpha\,L_o \,. \tag{3}$$

Ale ponieważ

$$M_{CO_2} + M_{CO} = \frac{C}{12} \,, \qquad \text{to} \qquad M_{CO_2} = \frac{C}{12} - M_{CO} \,.$$

$$M_{H_2O} + M_{H_2} = \frac{H}{2} \,, \qquad \text{to} \qquad M_{H_2O} = \frac{H}{2} - M_{H_2} \,.$$

Podstawiając do ostatniego wyrażenia

$$k = \frac{M_{H_2}}{M_{CO}} \,,$$

otrzymamy ilość kmoli pary wodnej

$$M_{H_2O} = \frac{H}{2} - kM_{CO} .$$

Obecnie równanie (3) możemy przedstawić w postaci umożliwiającej wyznaczenie ilości kmoli tlenku węgla M_{CO}

$$\frac{C}{12} - M_{CO} + \frac{M_{CO}}{2} + \frac{1}{2}\left(\frac{H}{2} - k\,M_{CO}\right) = 0{,}21\,\alpha\,L_o ,$$

a po przekształceniu i uporządkowaniu:

$$\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - 0{,}21\,\alpha\,L_o = \frac{1}{2}\,M_{CO}\,(1 + k),$$

a ponieważ

$$L_o = \frac{1}{0{,}21}\left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4}\right) \qquad \frac{C}{12} + \frac{H}{4} = 0{,}21\,L_o$$

$$0{,}21\,L_o - 0{,}21\,\alpha\,L_o = \frac{1}{2}\,M_{CO}\,(1 + k),$$

$$0{,}21\,L_o\,(1 - \alpha) = \frac{1}{2}\,M_{CO}\,(1 + k),$$

zatem ilości każdego ze składników spalin przy $\alpha < 1$ w kmolach można określić z następujących równań:

$$M_{CO} = 0{,}42\,L_o\,\frac{(1 - \alpha)}{(1 + k)} ,$$

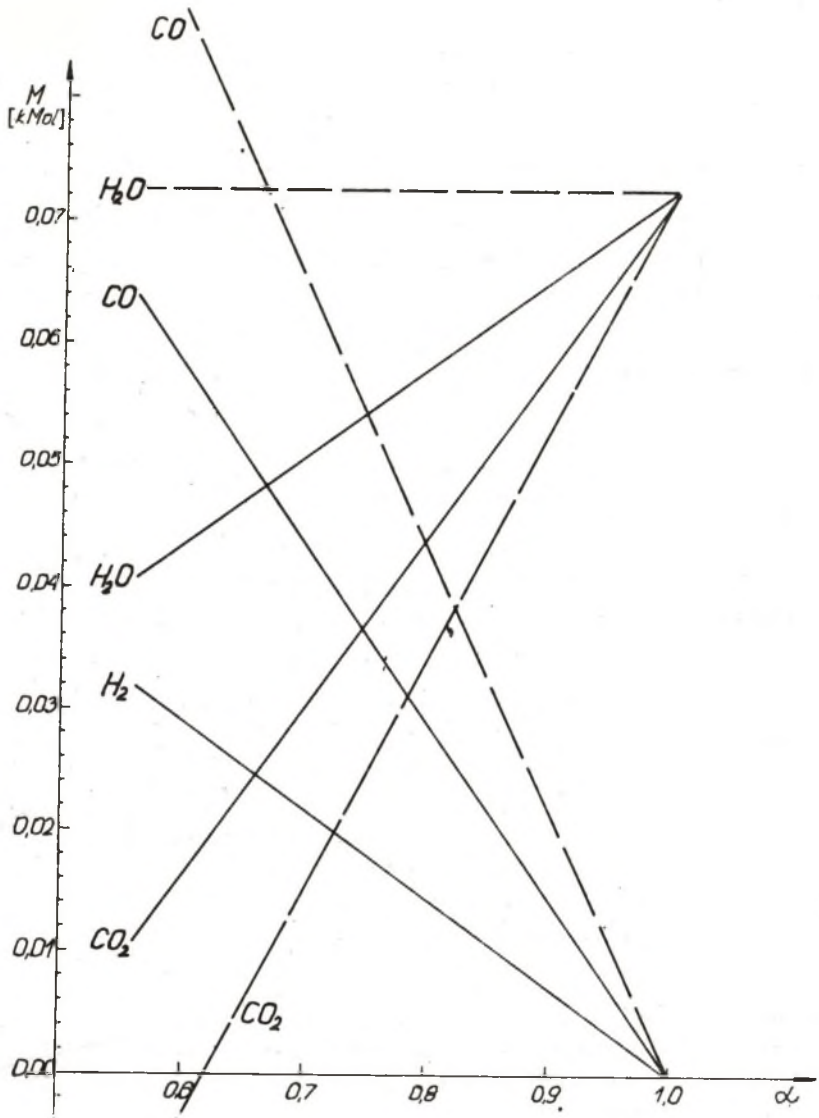
$$M_{CO_2} = \frac{C}{12} - M_{CO} ,$$

$$M_{H_2} = K \cdot M_{CO} ,$$

$$M_{H_2O} = \frac{H}{2} - KM_{CO} .$$

Natomiast ilość azotu

$$M_{N_2} = 0{,}79\,\alpha\,L_o .$$



Rys. 1. Zależność składu spalin (uzyskanych ze spalania 1 kg benzyny) od współczynnika nadmiaru powietrza α:

——————— obliczenia wg nowej metody
- - - - - obliczenia wg starej metody

Fig. 1. Combustion gas contents (obtained from 1 kg of petrol) as a function of coefficient α

——————— new method
- - - - - old method

Tabela 1

Wyniki obliczeń poszczególnych składników spalin w kmolach (nowa metoda)

α \ M	M_{CO}	M_{CO_2}	M_{H_2O}	M_{H_2}
1	0	0,0737	0,0725	0
0,9	0,0144	0,0566	0,0653	0,0072
0,8	0,0289	0,0446	0,0581	0,0144
0,7	0,0435	0,0302	0,0508	0,0217
0,6	0,0578	0,0159	0,0436	0,0289

Tabela 2

Wyniki obliczeń poszczególnych składników spalin w kmolach (stara metoda)

α \ M	M_{CO}	M_{CO_2}	M_{H_2O}
1	0	0,0737	0,0725
0,9	0,0217	0,0520	0,0725
0,8	0,0433	0,0304	0,0725
0,7	0,0650	0,0187	0,0725
0,6	0,0867	-0,003	0,0725

Przy założeniu składu elementarnego paliwa teoretyczna ilość powietrza potrzebna do spalania 1 kg benzyny wynosi:

$$L_o = \frac{1}{0,21}\left(\frac{0,855}{12} + \frac{0,145}{4}\right) = 0,516 \text{ kmola} .$$

Przyjmując dla benzyn $\frac{H}{C} = 0,19$, otrzymamy k = 0,5. Wyniki obliczeń starą i nową metodą poszczególnych składników spalin zamieszczono w tab. 1 i 2, a na rys. 1 przedstawiono porównanie ilości poszczególnych składników obliczone różnymi metodami.

Przeprowadzona korekta umożliwiła bardziej precyzyjne określenie energii wewnętrznej czy pojemności cieplnej spalin niezbędnych do wyznaczenia temperatury końca spalania, szczególnie przy mieszankach bogatych.

LITERATURA

[1] Chowach M.S.: Silniki samochodowe. Maszgiz 1977.

Recenzent:
Doc. dr hab. inż. Stanisław Jarnuszkiewicz

Wpłynęło do Redakcji 26.09.1986

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ ВО ВРЕМЯ СГОРАНИЯ БОГАТЫХ СМЕСЕЙ

Р е з ю м е

В статье использовано, предложенное проф. Ховаха, отношение числа моделей водорода к числу молей окиси водорода, имеющихся в выхлопных газах двигателей внутреннего сгорания, для определения количества молей отдельных частей выхлопных газов, полученных при сжигании 1 кг бензина. Расчёты проводились в зависимости от изменяющегося коэффициента состава смеси. Результаты расчётов сравнены с результатами расчётов применяемых до сих пор. Проведённая корректировка даёт возможность более точного определения, например внутренней энергии выхлопных газов, что увеличивает точность тепловых расчётов процесса сжигания.

DEFINITION OF WASTE GAS COMPONENTS DURING RICH MIXTURE COMBUSTION

S u m m a r y

Waste gases analysis proved that the ratio of the mole number forhydrogen and the one of carbon monexide is the constant for each fuel and for the rich mixtures does not depend on the coefficient of air changes. The Chowach's ratio contained in the waste gases were used to fine the number of moles of all components of waste gases obtained from compustion of 1 kg of petrol. Computations are made in the function of changes of the coefficient of mixture contents. The results are compared with the previous results. This correction enables accurate definition of inner energy of waste gases, and the same the increase of accuracy of heat computation of the combustion process.