

Prof. WSTE dr hab. inż. Benedykt Julian LITKE (†)

Wyższa Szkoła Techniczno-Ekonomiczna w Szczecinie, Wydział Systemów Automotive
Higher School of Technology and Economics in Szczecin, Faculty of Automotive Systems

ZAGADNIENIE SPALANIA

Streszczenie

Wstęp i cele: W pracy opisano spalanie jest proces gwałtownego utleniania substancji palnej, podczas którego wywiązuje się duża ilość ciepła. Celem spalania jest uzyskanie ciepła o wysokiej temperaturze, a w niektórych urządzeniach również spalin o dużym ciśnieniu, jak np. w silnikach spalinowych tłokowych. Celem pracy jest ogólne omówienie paliw i ich własności, zapotrzebowania powietrza do spalania, współczynnika nadmiaru powietrza oraz ilości i składu spalin.

Materiał i metody: Materiał stanowią źródła z literatury z zakresu termodynamiki. W pracy zastosowano metodę analizy teoretycznej.

Wyniki: Rezultatem analizy jest opracowanie równań przedstawiających ilość produktów powstających przy spalaniu różnych składników paliw stałych, ciekłych i gazowych. Z równań tych można obliczyć objętość spalin, powstałych ze spalania 1 kg paliwa, jako sumę wszystkich produktów spalania oraz składników niepalnych powietrza.

Wnioski: Znajomość objętości spalin powstających przy spalaniu 1 kg paliwa w danym urządzeniu jest niezbędna do obliczania przekrojów kanałów lub rurociągów odprowadzających gazy spalinowe.

Słowa kluczowe: Proces spalania, równania analityczne, produkty spalania.

(Otrzymano: 06.06.2017; Zrecenzowano: 12.06.2017; Zaakceptowano: 25.06.2017)

PROBLEM OF COMBUSTION

Abstract

Introduction and aim: The paper describes combustion is a process of rapid oxidation of a combustible substance during which a large amount of heat is generated. The purpose of combustion is to obtain heat at a high temperature, and in some devices also high-pressure exhaust gas, such as piston internal combustion engines. The purpose of the work is to discuss fuels and their properties in general, combustion air demand, excess air coefficient, and the amount and composition of exhaust gases.

Material and methods: Material covers some sources based on the literature in the field of thermodynamics. The method of theoretical analysis has been shown in the paper.

Results: The result of the analysis is the development of equations showing the amount of products formed when burning various components of solid, liquid and gaseous fuels. From these equations, the volume of exhaust gas resulting from the combustion of 1 kg of fuel can be calculated as the sum of all combustion products and non-flammable air components.

Conclusion: Knowledge of the volume of flue gas resulting from the combustion of 1 kg of fuel in a given device is necessary for calculating the cross-sections of ducts or pipelines that discharge flue gases.

Keywords: Combustion process, analytical equations, combustion products.

(Received: 06.06.2017; Revised: 12.06.2017; Accepted: 25.06.2017)

1. Wstęp

Spalanie jest to proces gwałtownego utleniania substancji palnej, podczas którego wywiązuje się duża ilość ciepła. Spalanie jest więc reakcją chemiczną egzotermiczną. Spalaniu towarzyszy powstawanie produktów spalania o wysokiej temperaturze, zwanych spalinami.

Celem spalania jest uzyskanie ciepła o wysokiej temperaturze, a w niektórych urządzeniach również spalin o dużym ciśnieniu, jak np. w silnikach spalinowych tłokowych.

Celem pracy jest ogólne omówienie paliw i ich własności, zapotrzebowania powietrza do spalania, współczynnika nadmiaru powietrza oraz ilości i składu spalin.

2. Paliwa i ich własności

Nie wszystkie substancje nadają się do spalania. Te, które mogą być spalane w różnych urządzeniach i silnikach nazwane są paliwami.

W zależności od stanu skupienia paliwa są stałe, ciekłe i gazowe. Ponadto mogą być naturalne lub sztuczne. Dokładne opisy rodzajów paliw i ich właściwości można znaleźć w literaturze fachowej, dotyczącej paliw i urządzeń, w których są spalane.

Palnymi pierwiastkami paliw są węgiel C, wodór H i jako niepożądany, występujący w małych ilościach to siarka S. Wymienione pierwiastki mogą występować samodzielnie lub najczęściej jako związki chemiczne między sobą, a również w powiązaniu z tlenem. Są to tlenki np. tlenek węgla CO oraz węglowodory zawierające tlen, m.in. alkohol metylowy CH_3OH .

W paliwach mogą znajdować się składniki niepalne, które oprócz tlenu nie biorą udziału w procesie spalania.

Ogólne wymagania stawiane paliwom:

- duża ilość ciepła uzyskana z jednostki paliwa,
- umiarkowana temperatura zapłonu,
- łatwość pozyskania – co wiąże się z ceną paliwa,
- mała zawartość składników niepalnych,
- brak szkodliwego działania na elementy urządzeń, w których są spalane,
- łatwość doprowadzenia do miejsca spalania.

Do oceny paliwa pod względem energetycznym stosuje się dwa wskaźniki:

- *ciepło spalania* W_t
- *wartość opałową* W_u .

Wartość opałowa W_u jest to ilość ciepła otrzymanego, w wyniku spalania jednostki paliwa (kg, kmol lub m^3), przy stałym ciśnieniu, po ochłodzeniu spalin do temperatury początkowej substratów, przy czym ciepło, które mogłoby wydzielić się ze skroplenia pary wodnej zawartej w spalinach nie jest uwzględniane (dodane).

Ciepło spalania W_t zawiera również ciepło, które może być uzyskane ze skroplenia pary wodnej.

Ilość ciepła określona przez wartość opałową lub ciepło spalania będzie uzyskana jeżeli wszystkie cząsteczki palne paliwa zostaną w pełni utlenione tzn., że wartości W_u oraz W_t podawane są dla przypadku *całkowitego* i *zupelnego* spalania.

Niecałkowite lub niezupełne spalanie paliwa może być spowodowane:

- nierównomiernym wymieszaniem z powietrzem w komorze spalania,
- krótkim czasem przewidzianym na spalanie (w szybkoobrotowych silnikach spalinowych),

- przy niedostatecznej ilości dostarczonego powietrza
- i innymi przyczynami.

Niecałkowite spalanie charakteryzuje się zawartością stałych cząsteczek palnych w postaci skoksowanego węgla (sadzy) a spalanie niezupełne obecnością gazów palnych jak CO, H₂, CH₄ w spalinach (dotyczy spalania węglowodorów).

Wartość opałową W_u można obliczyć na podstawie składu chemicznego paliwa. Najczęściej stosowany wzór do obliczania wartości opałowej paliw stałych i ciekłych ma następującą postać:

$$W_u = 33900C + 121000 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) + 10500S - 2500 \left(w + \frac{9}{8} O_2 \right), \quad (1a)$$

$$[W_u] = \left[\frac{\text{kJ}}{1 \text{ kg paliwa}} \right], \quad (1b)$$

gdzie C, H₂, O₂, S – to udziały masowe pierwiastków oraz wilgoci w.

Dla paliw gazowych stosuje się wzór

$$W_u = 12680 CO + 10760 H_2 + 35800 CH_4 + 64350 C_2H_6, \quad (2a)$$

$$[W_u] = \left[\frac{\text{kJ}}{1 \text{ Nm}^3 \text{ paliwa}} \right]. \quad (2b)$$

Do wzoru (2a) należy podstawić udziały objętościowe składników tj. tlenku węgla CO, wodoru H₂, metanu CH₄ i etanu C₂H₆. Liczby przed symbolami pierwiastków lub związków oznaczają ich wartości opałowe.

Aby proces spalania mógł się rozpocząć konieczne jest podgrzanie paliwa do odpowiedniej temperatury zwanej *temperaturą zapłonu*.

W przypadku paliw płynnych, w warunkach atmosferycznych mogą wydzielać się pary, które po zetknięciu z płomieniem, zapalają się przy temperaturze niższej od temperatury zapłonu. Temperatura ta nazywa się *temperaturą zapłonięcia*.

3. Zapotrzebowanie powietrza do spalania

Utlenianie składników paliwa podczas spalania przebiega zgodnie z regułami reakcji chemicznych.

Spalanie czystego węgla przebiega następująco:



$$1 \text{ kmol} = 12 \text{ kg} \quad 1 \text{ kmol} = 32 \text{ kg} \quad 1 \text{ kmol} = 44 \text{ kg}. \quad (3b)$$

Na 1 kmol C, którego masa molowa wynosi 12 kg należy dostarczyć 1 kmol O₂ tzn. o masie 32 kg, więc do spalania 1 kg C potrzeba $\frac{32}{12} = \frac{8}{3}$ kg O₂.

W analogiczny sposób można napisać reakcje dla innych składników palnych:



$$2 \text{ kg} \quad 16 \text{ kg} \quad 18 \text{ kg}. \quad (4b)$$

Do spalania 2 kg H₂ należy doprowadzić 16 kg O₂, więc na 1 kg H₂ przypada 8 kg O₂.
Postępując analogicznie określi się zapotrzebowanie tlenu do spalania siarki:



$$32 \text{ kg} \quad 32 \text{ kg} \quad 64 \text{ kg}, \quad (5b)$$

stąd na 1 kg S potrzeba 1 kg O₂.

Jeżeli paliwo zawiera tlen, wówczas jego zapotrzebowanie będzie mniejsze o ten udział. Znając udziały masowe poszczególnych składników paliwa można określić zapotrzebowanie teoretyczne na tlen, które będzie sumą poszczególnych zużyć:

$$\text{O}_t = \frac{8}{3} \text{C} + 8\text{H}_2 + \text{S} - \text{O}_2, \quad (6a)$$

$$[\text{O}_t] = \left[\frac{\text{kg tlenu}}{1 \text{ kg paliwa}} \right]. \quad (6b)$$

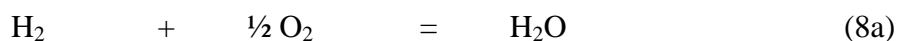
Udział masowy tlenu w powietrzu wynosi około 0,23.

Teoretyczna masa powietrza wyniesie:

$$\text{L}_t = \frac{\text{O}_t}{0,23} = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} \text{C} + 8\text{H}_2 + \text{S} - \text{O}_2 \right), \quad (7a)$$

$$[\text{L}_t] = \left[\frac{\text{kg powietrza}}{1 \text{ kg paliwa}} \right]. \quad (7b)$$

W podobny sposób oblicza się zapotrzebowanie tlenu i powietrza do spalania paliw gazowych z tą różnicą, że ilości składników wyrażane będą objętościowo tzn. w normalnych metrach sześciennych (Nm³):



$$1 \text{ V}_M = 22,4 \text{ m}^3 \quad \frac{1}{2} \text{ V}_M = 11,2 \text{ m}^3 \quad 1 \text{ V}_M = 22,4 \text{ m}^3 \quad (8b)$$

na 1 m³ H₂ potrzeba $\frac{11,2}{22,4} = \frac{1}{2} \text{ m}^3 \text{ O}_2$.

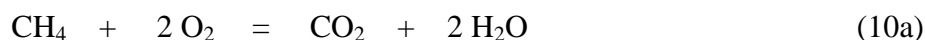
Wiemy, że 1 kmol gazu w warunkach normalnych zajmuje objętość molową (w zaokrągleniu) V_M = 22,4 m³.

Zatem:



$$1 \text{ V}_M \quad \frac{1}{2} \text{ V}_M \quad 1 \text{ V}_M \quad (9b)$$

w tym przypadku również na 1 m³ CO wymagane jest $\frac{1}{2} \text{ m}^3 \text{ O}_2$.



$$1 \text{ V}_M \quad 2 \text{ V}_M \quad 1 \text{ V}_M \quad 2 \text{ V}_M \quad (10b)$$

więc na 1 m³ CH₄ potrzebne są 2 m³ O₂.

Teoretyczne zapotrzebowanie tlenu dla paliwa wynosi:

$$O_t = \frac{1}{2}(\text{CO} + \text{H}_2) + 2\text{CH}_4 - \text{O}_2, \quad (11a)$$

$$[O_t] = \left[\frac{\text{m}^3 \text{ tlenu}}{1 \text{ m}^3 \text{ paliwa}} \right], \quad (11b)$$

a teoretyczne zapotrzebowanie powietrza

$$L_t = \frac{O_t}{0,21} = \frac{1}{0,21} \left[\frac{1}{2}(\text{CO} + \text{H}_2) + 2\text{CH}_4 - \text{O}_2 \right], \quad (12a)$$

$$[L_t] = \left[\frac{\text{m}^3 \text{ powietrza}}{1 \text{ m}^3 \text{ paliwa}} \right], \quad (12b)$$

gdzie 0,21 jest objętościowym udziałem tlenu w powietrzu.

Należy pamiętać, że objętości powietrza i gazu należy odnosić do jednakowych warunków (p, t).

4. Współczynnik nadmiaru powietrza

Spalenie całkowite i zupełne paliwa przy dostarczonej teoretycznej ilości powietrza wymagałyby idealnego ich wymieszania, tak aby każda cząstka tlenu zetknęła się z odpowiednią cząstką paliwa. Wymagałyby to różnych zabiegów i odpowiednio długiego czasu.

W praktyce takich warunków nie można dokładnie spełnić. Dlatego do spalania dostarcza się więcej powietrza niż to wynika z obliczeń teoretycznych (stechiometrycznych).

Nadmiar powietrza określany jest *współczynnikiem nadmiaru powietrza* λ :

$$\lambda = \frac{L_r}{L_t}, \quad (13)$$

gdzie L_r – to rzeczywista ilość powietrza.

Na ogół $L_r > L_t$, jednak nie zawsze. W silnikach spalinowych tłokowych występują okresowo stany pracy kiedy $\lambda < 1$.

Wartości współczynnika nadmiaru powietrza podawane są dla różnych urządzeń i silników w wydawnictwach dotyczących tych zagadnień.

5. Ilość i skład spalin

Spaliny są mieszaniną produktów otrzymanych ze spalania składników palnych paliwa i z niepalnych części dostarczonych wraz z powietrzem, a w przypadku niedoskonałego spalania mogą zawierać pierwiastki palne, pierwiastki palne niecałkowicie utlenione, jak również wolny tlen.

Masa produktów spalania jest równa sumie mas składników spalania, co wynika z równań (3a) do (5a). Jeżeli do spalania tlen był dostarczony jako składnik powietrza, to w masie spalin będzie też azot oraz ewentualnie inne niepalne składniki.

Wobec tego można napisać równanie masy spalin dla 1 kg paliwa:

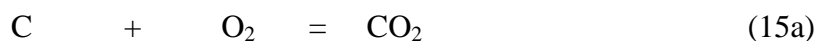
$$m_s = 1 + L_r = 1 + \lambda L_t. \quad (14)$$

Wzór przedstawia sumę 1 kg paliwa i L_r kg powietrza.

Ilość produktów powstających przy spalaniu różnych składników paliw stałych, ciekłych i gazowych, przedstawiają równania (3a) do (5a) oraz (8a) do (10a).

Na ich podstawie można obliczyć objętość spalin, powstałych ze spalania 1 kg paliwa, jako sumę wszystkich produktów spalania oraz składników niepalnych powietrza.

Przykład obliczenia objętości produktu spalania węgla:



$$1 \text{ kmol} = 12 \text{ kg} \quad V_M = 22,4 \text{ m}^3 \quad (15b)$$

Ze spalania 1 kg węgla otrzyma się $\frac{22,4}{12} \text{ m}^3 \text{CO}_2$, tj.

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{V_M}{12} \quad (16)$$

Jeżeli w paliwie udział masowy węgla wynosi C , to objętość CO_2 wyniesie:

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{V_M}{12} \cdot C \quad (17)$$

Postępując w powyższy sposób można określić objętość produktów spalania dla każdego składnika paliwa.

Wzory do obliczania objętości spalin suchych i wilgotnych można znaleźć w literaturze wykazanej w niniejszym opracowaniu jak również w innych wydawnictwach.

Znajomość objętości spalin powstających przy spalaniu paliwa w danym urządzeniu jest niezbędna do obliczania przekrojów kanałów lub rurociągów odprowadzających gazy spalinowe.

6. Wnioski

- Z równań przedstawiających ilość produktów powstających przy spalaniu różnych składników paliw stałych, ciekłych i gazowych można obliczyć objętość spalin, powstałych ze spalania 1 kg paliwa, jako sumę wszystkich produktów spalania oraz składników niepalnych powietrza.
- Znajomość objętości spalin powstających przy spalaniu 1 kg paliwa w danym urządzeniu jest niezbędna do obliczania przekrojów kanałów lub rurociągów odprowadzających gazy spalinowe.

Literatura

- [1] Ochęduszek S.: *Termodynamika stosowana*. Warszawa: WNT, 1974.
- [2] Staniszewski B.: *Termodynamika*. Warszawa: PWN, 1986.
- [3] Szargot J.: *Termodynamika*. Warszawa: PWN, 2000.