

Jarosław KOBRYŃ, Tomasz FIGLUS

LICZBY PODOBIENSTWA DWUSTREFOWEGO MODELU PROCESU SPALANIA

Streszczenie. Najważniejszym procesem termodynamicznym, zachodzącym w silniku jest proces spalania paliwa. Badanie tego procesu jest możliwe przy wykorzystaniu skomplikowanych modeli matematycznych i wyników bardzo kosztownych badań laboratoryjnych. W niniejszym artykule podjęto próbę wyodrębnienia z dwustrefowego modelu procesu spalania w silnikach samochodowych liczb kryterialnych podobieństwa, wykorzystując zarówno metodę równań różniczkowych, jak i metodę analizy wymiarowej. Liczby te mogłyby, według zasad teorii podobieństwa, uprościć procedury badawcze.

SIMILARITY NUMBERS IN THE-ZONE COMBUSTION MODEL

Summary. The most important thermodynamic process taking place in the engine is the combustion process. The study of this process is possible by using complex mathematical models and very costly laboratory test results. This study attempts to isolate similarity criterion numbers in the-zone combustion model of car engines using both the method of differential equations and the method of dimensional analysis. These numbers could, according to the principles of similarity theory simplify the testing procedure.

1. WPROWADZENIE

Proces spalania paliwa w silniku jest procesem tak bardzo skomplikowanym, że nadal nie udało się określić wszystkich zależności, mających wpływ na jego przebieg. Z uwagi na duże trudności zbadania tego procesu laboratoryjnie, głównie ze względu na duży stopień skomplikowania jego przebiegu, badania modelowe opisujące go są główną podstawą jego analizy. Modelowanie tego procesu wymaga jednak wprowadzenia założeń upraszczających. Uzyskany (w wyniku tych założeń) model matematyczny umożliwia otrzymanie wyników zbliżonych do rzeczywistych. Model, będący podstawą w tych rozważaniach [1] był już wykorzystywany do oceny procesu spalania w silnikach ZI oraz silnikach ZS. W pracach [2, 3] służył on do obliczeń średniej temperatury dla całego cyklu pracy samochodowego silnika spalinowego wykorzystywanej jako parametr charakterystyczny w równaniach z liczbami kryterialnymi podobieństwa.

Wykorzystanie teorii podobieństwa przy projektowaniu lub modernizacji maszyn i urządzeń najczęściej skutkuje zmniejszeniem nakładów finansowych na te przedsięwzięcia. Zasady teorii podobieństwa stosuje się do wielu zjawisk fizycznych i chemicznych, opisujących również silnik spalinowy.

2. DWUSTREFOWY MODEL PROCESU SPALANIA

W artykule wykorzystano model spalania opisany w pracy prof. K. Wilka [1]. Model ten zakłada podział komory spalania na dwie strefy, oddzielone od siebie nieskończenie cienkim frontem płomienia. W poszczególnych strefach wartości temperatur są jednorodne, temperatura frontu płomienia jest równa temperaturze spalin.

Model tworzą równania dla elementarnego kąta $d\varphi$ obrotu wału korbowego:

- bilans energii strefy niespalonej (mieszanki):

$$\frac{dQ}{d\varphi} = \frac{dU_u}{d\varphi} + \frac{dI_u}{d\varphi} + \frac{pdV_u}{d\varphi} + \frac{dQ_{wu}}{d\varphi} \quad (1)$$

- bilans energii frontu płomienia:

$$\frac{dI_u}{d\varphi} = \frac{dI_b}{d\varphi} + \frac{dQ}{d\varphi} \quad (2)$$

- bilans energii strefy spalanej (spalin):

$$\frac{dI_b}{d\varphi} = \frac{dU_b}{d\varphi} + \frac{pdV_b}{d\varphi} + \frac{dQ_{wb}}{d\varphi} \quad (3)$$

- termiczne równania stanu stref:

$$pV_u = m_u R_u T_u \quad (4)$$

$$pV_b = m_b R_b T_b \quad (5)$$

- równania bilansu substancji i objętości:

$$m = m_u + m_b \quad (6)$$

$$V_i = V_u + V_b \quad (7)$$

- stopień wypalenia ładunku:

$$x = \frac{m_b}{m} \quad (8)$$

- stopień wyzwolenia energii chemicznej, zawartej w paliwie:

$$y = x \left(1 - \frac{W_{db}}{W_{du}} \right) \quad (9)$$

- energia cieplna odprowadzona do ścianek komory spalania:

$$\frac{dQ_w}{d\varphi} = \frac{dQ_{wu}}{d\varphi} + \frac{dQ_{wb}}{d\varphi} \quad (10)$$

gdzie:

m, m_b, m_u – masa ładunku znajdującego się odpowiednio: w cylindrze silnika, w strefie spalin, w strefie mieszanki [kg],

I_b, I_u – pełna (fizyczna i chemiczna) entalpia odpowiednio: w strefie spalin, w strefie mieszanki [J],

p – ciśnienie indykowane [Pa],

Q, Q_{wb}, Q_{wu} – energia cieplna odpowiednio: dopływająca do strefy mieszanki, odprowadzona do ścianek komory spalania w strefie spalin, odprowadzona do ścianek komory spalania w strefie mieszanki [J],

R_b, R_u – indywidualna stała gazowa odpowiednio: w strefie spalin, w strefie mieszanki [J/kgK],

T_b, T_u – temperatura odpowiednio: w strefie spalin, w strefie mieszanki [K],

U_b, U_u – energia wewnętrzna odpowiednio: strefy spalin, strefy mieszanki [J],

V_b, V_i, V_u – chwilowa objętość odpowiednio: strefy spalin, komory spalania, strefy mieszanki [m³],

W_{db} , W_{du} – wartość opałowa odpowiednio: strefy spalin (dla chwilowego składu spalin), strefy mieszanki [J/kg],

x – stopień wypalenia ładunku [-],

y – stopień wyzwolenia energii chemicznej zawartej w paliwie [-].

Przyjęto adiabatyczny front płomienia, w którym nie następuje przepływ energii cieplnej między strefami $dQ=0$. Mieszanekę i spaliny traktujemy jako gazy półdoskonałe. Energię chemiczną mieszanki i spalin (zawierających jeszcze składniki palne) wyrażono za pomocą wartości opałowej. Przyjęto brak zanieczyszczeń ładunku w cylindrze spalinami pochodzącymi z poprzedniego cyklu pracy silnika.

Pełną (fizyczną i chemiczną) entalpię i energię wewnętrzną ładunku i spalin przyjęto jako:

$$u_u = W_{du} + c_{vu} \int_{T_o}^{T_u} (T_u - T_o) - R_u T_o \quad (11)$$

$$u_b = W_{db} + c_{vb} \int_{T_o}^{T_b} (T_b - T_o) - R_b T_o \quad (12)$$

$$i_u = W_{du} + c_{pu} \int_{T_o}^{T_u} (T_u - T_o) \quad (13)$$

$$i_b = W_{db} + c_{pb} \int_{T_o}^{T_b} (T_b - T_o) \quad (14)$$

gdzie:

c_{pb} , c_{pu} – właściwa pojemność cieplna (ciepło właściwe) przy stałym ciśnieniu odpowiednio: strefy spalin, strefy mieszanki [J/kgK],

c_{vb} , c_{vu} – właściwa pojemność cieplna (ciepło właściwe) przy stałej objętości odpowiednio: strefy spalin, strefy mieszanki [J/kgK],

i_b , i_u – pełna (fizyczna i chemiczna) entalpia właściwa odpowiednio: strefy spalin, strefy mieszanki [J/kg],

T_o – temperatura odniesienia [K],

u_b , u_u – energia wewnętrzna właściwa odpowiednio: strefy spalin, strefy mieszanki [J/kg],

Średnią wartość temperatury w cylindrze przyjęto jako średnią ważoną z energii wewnętrznej:

$$T_{sr} = \frac{(1-x)c_{vu} \int_{T_o}^{T_u} T_u + xc_{vb} \int_{T_o}^{T_b} T_b}{(1-x)c_{vu} \int_{T_o}^{T_u} + xc_{vb} \int_{T_o}^{T_b}} \quad (15)$$

W modelu dwustrefowym spalania uwzględniono elementarną wymianę ciepła pomiędzy czynnikiem roboczym, a ściankami przestrzeni roboczej (głowicy, powierzchni tłoka i tulei cylindrowej). W pracy [2] wykorzystano wzór oparty na zależności Newtona:

$$dQ_w = \omega^{-1} \alpha \sum_{i=1}^3 A_i(\varphi)(T_{sr}(\varphi) - T_{sc}) d\varphi \quad (16)$$

gdzie:

ω – prędkość kątowna wału korbowego [rad/s],

α – współczynnik wnikania ciepła [W/m²K],

$A_i(\varphi)$ – funkcja powierzchni ścian przestrzeni roboczej [m²],

T_{sc} – średnia temperatura ścianek komory spalania [K],

$T_{sr}(\varphi)$ – średnia temperatura czynnika roboczego w cylindrze [K].

3. LICZBY KRYTERIALNE PODOBIEŃSTWA

Liczby podobieństwa są wykorzystywane do opisu procesu spalania, przepływu ciepła, zjawisk turbulencji oraz do procesu wtrysku paliwa. We wcześniejszych pracach zostały one jednak wyznaczone z odmiennych układów równań. W niniejszym artykule podjęto próbę wyznaczenia liczb kryterialnych dla procesu spalania ze znanych w teorii spalania równań różniczkowych. Liczby te powinny opisywać proces spalania we wszystkich rodzajach silników, zarówno ZI jak i ZS.

Znane i powszechnie stosowane są różne sposoby [4] wyznaczania liczb kryterialnych podobieństwa. Analiza wstępna dała podstawy do wyodrębnienia liczb kryterialnych bezpośrednio z analizowanych równań, z wykorzystaniem „metody równań różniczkowych”. Zastosowano również mniej dokładną „metodę analizy wymiarowej”. Jest ona najczęściej wykorzystywana gdy nie jest znany model matematyczny zjawiska. Ma ona jednak pewną wadę, która nie polega na postawieniu błędnej hipotezy, ale na przyjęciu otrzymanej funkcji za pewnik, bez dokładnej jej weryfikacji doświadczalnej. W tym przypadku znane są równania różniczkowe, więc nie ma problemu z określeniem parametrów potrzebnych do wyznaczenia liczb kryterialnych.

Przekształcając więc równania (1), (2), (3), (7), (10) otrzymano sumę elementów U_u , U_b , Q_w , pV_i . Aby uzyskać postać bezwymiarową odniesiono te wielkości do pV_i , jako najbardziej charakterystycznego elementu w tym procesie. Uzyskano więc zapis wymiarowy:

$$\left[\frac{U_u}{pV_i} \right] = \left[\frac{U_b}{pV_i} \right] = \left[\frac{Q_w}{pV_i} \right] = [-] \quad (17)$$

Po analizie kolejnych równań (8), (9), (11), (12), (16) uzupełniono równanie (11) o pozostałe zależności, otrzymując:

$$\begin{aligned} \left[\frac{m_u W_{du}}{pV_i} \right] &= \left[\frac{m_u c_{vu} \frac{T_u}{T_o} (T_u - T_o)}{pV_i} \right] = \left[\frac{m_u R_u T_o}{pV_i} \right] = \left[\frac{m_b W_{db}}{pV_i} \right] = \left[\frac{m_b c_{vb} \frac{T_b}{T_o} (T_b - T_o)}{pV_i} \right] = \\ \left[\frac{m_b R_b T_o}{pV_i} \right] &= \left[\frac{\omega^{-1} \alpha \sum_{i=1}^3 A_i (T_{sr} - T_{sc}) \varphi}{pV_i} \right] = \left[\frac{m_b}{m} \right] = \left[x \left(1 - \frac{W_{db}}{W_{du}} \right) \right] = [-] \end{aligned} \quad (18)$$

Każdy z tych 9 elementów jest więc liczbą kryterialną podobieństwa w tym procesie.

Każde równanie różniczkowe posiada dowolnie dużą liczbę rozwiązań i aby wybrać rozwiązanie odpowiadające rozważanemu zjawisku należy określić warunki jednoznaczności rozwiązania. Całkę równania różniczkowego, będącą rozwiązaniem tego równania można przedstawić jako pewną funkcję liczb podobieństwa, czyli wyrażając wyniki jakiegoś doświadczenia za pomocą liczb podobieństwa otrzymuje się zależność uogólnioną, słuszną dla wszystkich zjawisk podobnych [4].

Podjęto więc próby dokładniejszego rozwiązania ww. równań różniczkowych. Przedstawiona poniżej jest jedną z wielu przebadanych możliwości.

Po dokonaniu kilkudziesięciu przekształceń analizowanych równań modelu procesu spalania otrzymano następującą, bezwymiarową postać:

$$0 = K_1 + K_2 - \frac{R_b}{R_u} \theta K_3 \quad (19)$$

Liczby podobieństwa określają równania:

$$K_1 = \frac{n(I_{bk} - I_{uo})}{N_e} \quad (20)$$

$$K_2 = \frac{n(Q_{wk} - Q_{wo})}{N_e} \quad (21)$$

$$K_3 = \frac{V_o}{V_c} \frac{A_{sr} W_{sr} \tau}{N_e i_c} \left(p_o - \frac{p_o^2}{p_k} \right) \quad (22)$$

oraz bezwymiarową postać temperatury:

$$\theta = \frac{T_{bk}}{T_{uo}} \quad (23)$$

indeksy „o” oznaczają wartości początkowe procesu spalania, a „k” wartości końcowe.

gdzie poza wcześniejszymi oznaczeniami:

w_{sr} – średnia prędkość przepływu mieszanki przez zawór [m/s],

n – prędkość obrotowa silnika [1/s],

i_c – liczba cylindrów [-],

τ - współczynnik liczby suwów [-],

N_e – moc efektywna silnika [W],

A_{sr} – średnie pole przepływu mieszanki przez zawór [m²],

V_o – objętość nad tłokiem na początku spalania [m³],

V_c – objętość nad tłokiem w DMP [m³].

Z innych prób rozwiązań analizowanych równań różniczkowych warto wspomnieć jeszcze o uzyskaniu „równania profilu temperatury”. Jednak ze względu na znaczne skomplikowanie równania nadal trwają prace nad jego sympleksami prawdopodobieństwa.

4. PODSUMOWANIE

Analiza wstępna, będąca celem tej pracy umożliwiła wyselekcjonowanie liczb kryterialnych podobieństwa opisujących przebieg procesu spalania. Przypuszcza się, że analiza tych liczb pozwoli na zmniejszenie nakładów finansowych na badania konkretnego silnika. W celu pełnego zobrazowania liczb kryterialnych należałoby przeprowadzić badania i analizę dla różnych warunków brzegowych, charakteryzujących pracę silnika spalinowego.

W poprzednich analizach [3] wykorzystywano obliczenia z badań laboratoryjnych silnika FIAT 1100 MPI dokonanych w programie Matlab. Stworzony algorytm i napisany program umożliwiły odczyt tylko temperatur poszczególnych stref, co 1°OWK. Aby móc zweryfikować dokonaną w tej pracy teoretyczną hipotezę niezbędne jest wprowadzenie modyfikacji i ponowne przeprowadzenie obliczeń.

Bibliografia

1. Wilk K.: Równania dwustrefowego modelu procesu spalania w silniku. Praca niepublikowana. Zakład Eksploatacji Pojazdów, Instytut Transportu, Wydział Inżynierii Materiałowej, Metalurgii i Transportu, Politechnika Śląska.

2. Wilk K., Kobryń J.: Analiza możliwości wykorzystania uogólnienia zależności parametrów charakterystycznych od wybranych liczb kryterialnych podobieństwa do oceny procesu spalania paliwa w silniku Fiat 1100 MPI. ZN, Pol. Śl. Z. 61 serii Transport 2007.
3. Kobryn J., Wilk K.: Use of theory of similarity in dependence analysis of air-fuel ration mean temperature and boundary conditions in diesel turbo engine. J. Kones, Powertrain Transp. vol. 13 no. 1, 2006.
4. Wilk A., Müller L.: Teoria podobieństwa w badaniach modeli fizycznych i matematycznych. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.

Recenzent: Dr hab. inż. Zdzisław Stelmasiak, prof. Akademii Techniczno - Humanistycznej