

Jarosław KOBRYŃ, Krystian WILK

## ANALIZA LICZB KRYTERIALNYCH PODOBIEŃSTWA POD KĄTEM ICH ZASTOSOWANIA W BILANSIE ENERGII SILNIKA SPALINOWEGO

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono najczęściej stosowane w opisie zjawisk zachodzących w silniku spalinowym liczby kryterialne podobieństwa. Przeanalizowano krajową i zagraniczną literaturę w celu znalezienia istniejących zastosowań liczb podobieństwa. Dokonano też oceny możliwości badań parametrów wchodzących w skład przedstawionych liczb podobieństwa.

## SIMILARITY NUMBERS ANALYSIS FROM THE POINT OF VIEW OF USING THEM IN MOTOR CAR ENGINE ENERGY BALANCE

**Summary.** The work lists similarity numbers mostly used in descriptions of phenomena taking place in motor – car engine. To find the existent use of similarity numbers both Polish and foreign literary references were studied. Also research possibility of parameters, that the presented similarity numbers consist of, was estimated.

### 1. WPROWADZENIE

Teoria podobieństwa jest nie tylko jednym ze sposobów analizy wyników badań, lecz również służy do oceny, porównania i polepszenia istniejących konstrukcji. Pozwala opisać dane zjawisko za pomocą bezwymiarowych wielkości zwanych kryteriami podobieństwa.

Modelowanie matematyczne z wykorzystaniem tej metody niejednokrotnie daje bardzo dobre odwzorowanie rzeczywistości.

### 2. LICZBY KRYTERIALNE PODOBIEŃSTWA

Liczby te (nazywane też często kryteriami lub inwariantami podobieństwa), uzyskuje się poprzez dogłębną analizę badanego zjawiska za pomocą teorii podobieństwa. Są one bezwymiarową kombinacją wielkości fizycznych opisujących zjawisko i oznaczane są najczęściej literą  $K$ .

Niektóre liczby kryterialne podobieństwa są spotykane tak często w danej gałęzi techniki, że otrzymały dla skrócenia zapisu nazwy:

- liczba Reynoldsa  $Re$  określa podobieństwo hydrodynamiczne ruchu [3],
- liczba Strouhala oznaczana jako  $Ho$  [1],  $Str$  [2] lub  $S$ , zwana jest też liczbą równoczesności i charakteryzuje nieustalony przepływ [3] (w przypadku ruchu ustalonego liczba ta nie ma znaczenia[1]),

- liczba Eulera  $Eu$  dotyczy podobieństwa hydraulicznego i charakteryzuje siły ciśnienia [3],
- liczba Frouda  $Fr$  opisuje podobieństwo siły ciężkości [3],
- liczba Macha  $Ma$  [1],
- liczba Stokesa  $Sto$  [1],
- liczba Galileusza  $Ga$  [3],
- liczba Archimedesesa  $Ar$  [3],
- liczba Grashofa  $Gr$  [3],
- liczba Fouriera  $Fo$  jest charakterystyczna dla nieustalonego przepływu ciepła i wyraża zredukowany czas [3],
- liczba Pecleta  $Pe$  określa podobieństwo rozkładu temperatury [3],
- liczba Nusselta  $Nu$  przedstawia w postaci zredukowanej współczynnik wnikania ciepła i charakteryzuje podobieństwo warunków przyściennych dla przepływu ciepła [3],
- liczba Prandtla  $Pr$  określa podobieństwo rodzaju płynu [3],
- liczba Kirpiczewa  $Ki$  [2],
- liczba Biota  $Bi$  [2],
- liczba Stanton'a  $St$  [2],
- liczba kondensacji  $Ko$  [2],
- liczba Ohnesorga  $Oh$  [5],
- liczba Webera  $We$  [2],
- liczba Schmidta  $Sc$  [9],
- liczba Lewisa  $Le$  [9],
- liczba Sherwooda  $Sh$ , zwana też dyfuzyjną liczbą Nusselta  $Nu_D$  [9],
- liczba Cauchy'ego  $Ca$  [2].

Tabela 1

## Fizykalne znaczenie liczb podobieństwa

Liczba kryterialna	Oznaczenia
$Re = \frac{\rho w l}{\eta} = \frac{w l}{\nu}$	$a$ – prędkość dźwięku $a_T$ – współczynnik wyrównywania temperatury $c$ – ciepło właściwe odniesione do jednostki objętości
$Str = \frac{w \tau}{l}$	$d$ – średnica strugi cieczy $D_c$ – współczynnik dyfuzji odniesiony do różnicy koncentracji
$Fr = \frac{g l}{w^2}$	$D_p$ – współczynnik dyfuzji odniesiony do różnicy ciśnienia $E$ – moduł sprężystości podłużnej
$Eu = \frac{p}{\rho w^2}$	$g$ – przyspieszenie ziemskie $l$ – długość obiektu $p$ – ciśnienie
$Ma = \frac{w}{a}$	$r$ – ciepło utajone kondensacji $T$ – temperatura $w$ – prędkość przepływu
$Sto = Re Eu = \frac{\Delta p l}{\nu \eta}$	$\alpha$ – współczynnik wnikania ciepła $\beta$ – współczynnik objętościowej rozszerzalności
$Ga = Fr Re^2 = \frac{g l^3}{\nu^2}$	$\beta_p$ – współczynnik wymiany masy odniesiony do różnicy ciśnień

$Ar = Ga \frac{\rho_o - \rho}{\rho_o} = \frac{gl^3}{v^2} \frac{\rho_o - \rho}{\rho_o}$	
$Gr = \frac{gl^3}{v^2} \beta(T_1 - T_2) h$	$\eta$ – lepkość $\lambda$ – współczynnik przewodzenia ciepła
$Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2}$	$\rho$ – gęstość $\sigma$ – napięcie powierzchniowe cieczy
$Fo = \frac{a\tau}{l^2}$	$\tau$ – czas $\nu$ – współczynnik lepkości kinematycznej
$Pe = Re Pr = \frac{wl}{a}$	
$Nu = \frac{cd}{\lambda}$	
$Pr = \frac{\nu}{a_T}$	
$Ki = \frac{ql}{\lambda(T_1 - T_2)}$	
$Bi = \frac{cd}{\lambda}$	
$St = \frac{Nu}{Re Pr} = \frac{\alpha}{cw}$	
$Ko = \frac{r}{c(T_1 - T_2)}$	
$Oh = \frac{\eta_f}{\sqrt{D\rho_f\sigma}}$	
$We = \frac{\rho w^2 d}{\sigma}$	
$Sc = \frac{\nu}{D_c}$	
$Le = \frac{a_T}{D_c}$	
$Sh = \frac{\beta_p d}{D_p}$	
$Ca = \frac{w}{\sqrt{E/\rho}}$	

### 3. ZASTOSOWANIA

Przyjmując jako obiekt silnik spalinowy znaleziono następujące zastosowania:

- w układach wtryskowych Re i Oh [5],
- w procesach rozpylania paliwa We, Re, Oh, La [9],
- parowanie kropeł paliwa Re, Nu, Sc, Pr, Le, Sh [9],
- w układach dolotowych Re przy określaniu zmian współczynnika wpływu zaworu dolotowego [6], Re, Nu [4],
- w układach wylotowych (wydechowych) Re, Nu, Pr [13] oraz przy określaniu współczynnika konwekcji ciepła Re, Nu [11],
- przepływ ciepła w silniku Bi i Fo [7], Re, Nu, Pr [4],
- w metodzie termooanemometrycznej pomiaru prędkości ładunku wewnątrz cylindra Re, Nu [8],
- w przepływie turbulentnym [10], Re [12],
- krytyczny warunek zapłonu Nu[9],
- obliczanie współczynnika przejmowania ciepła pomiędzy czynnikiem roboczym a ściankami otaczającymi komorę spalania Nu, Pe, Re (min. Nusselt, Jaklitsch, Briling, Eichelberg, Pflaum, Elser, Oguri, Rozenblit, Czirkow, Sitkey, Annand, Woschnia).

W pracy [14] analizującej m.in. procesy spalania wyznaczono i wykorzystywano liczby kryterialne  $K_1$  i  $K_2$ :

$$K_1 = \frac{\rho w d}{\eta_{ef}}$$

$$K_2 = \frac{w^2}{i}$$

gdzie poza wprowadzonymi już oznaczeniami:

- $\eta_{ef}$  – efektywny współczynnik lepkości,
- $i$  – entalpia właściwa.

### 4. PODSUMOWANIE

- Niektóre liczby podobieństwa jak np. Sto, Pe powstały wskutek połączenia ze sobą innych, bardziej znanych liczb np. Re. Wiele liczb podobieństwa nie posiada nazwy, stąd też pomimo ich używania nie zostały poddane analizie w tej pracy.
- Stopień trudności zbadania wielkości będących składowymi liczb podobieństwa zależy od elementu silnika, dla którego odnosimy te liczby. Prawie wcale nie napotykamy na trudności w badaniu wielkości w układzie dolotowym i wylotowym silnika, natomiast nadal napotyka się problemy badając wnętrze cylindra i proces spalania.
- Bogate zastosowanie tych liczb w badaniach na całym świecie pozwala przypuszczać, że niektóre z tych liczb pozwolą dokładniej określić uogólniony bilans energii różnych silników spalinowych.
- Analiza opisanych w pracy liczb kryterialnych  $K_1$  i  $K_2$  pozwala przypuszczać, że jest bardzo możliwe ich zastosowanie w bilansie energii różnych silników spalinowych.

**Literatura**

1. Müller L.: Teoria podobieństwa mechanicznego. WNT, Warszawa 1961.
2. Müller L.: Zastosowania analizy wymiarowej. PWN, Warszawa 1983.
3. Petela R.: Przepływ ciepła. PWN, Warszawa 1983.
4. Rychter T, Teodorczyk A.: Modelowanie matematyczne roboczego cyklu silnika tłokowego. PWN, Warszawa 1990.
5. Rantanen P., Valkonen A., Cronhjort A.: Measurements of diesel spray with a normal size nozzle and a large – scale model. International Journal of Heat and Fluid Flow 20 (1999).
6. Weclas M., Melling A., Durst F.: Flow separation in the inlet valve gap of piston engines. Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 24, 1998.
7. Darkwa K., O'Callaghan P. W.: Green Transport Technology: Analitical studies of a thermochemical store for minimising energy consumption and air pollution from automobile engines. Applied Thermal Engineering Vol. 17, No. 7, 1997.
8. Tutak W.: Pole prędkości w komorze spalania tłokowego silnika ZI. Konferencja Konmot – Autoprogres. Zakopane 2004.
9. Kowalewicz A.: Tworzenie mieszanki i spalanie w silnikach o zapłonie iskrowym. WkiŁ, Warszawa 1984.
10. Wu H.-W., Perng S.-W.: LES analisys of turbulent flow and heat transfer in motored engines with various SGS models. International Journal of Heat and Mass Transfer 45, 2002.
11. Abu-Qudais M.: Instantaneous exhaust gas temperature and velocity for a diesel engine. Applied Energy, Vol. 56, No.1, 1997.
12. Kojima T., Nishiwaki K.: Modeling of flame – wall interaction for combustion and heat transfer in S.I. engines. JSAE Reviev 18, 1997.
13. Depussay E., Mounaim-Rouselle C., Burnel S.: A probe to estimate the local fuel concetration in spark ignition engines: design and validation study of catalytic hot wire probe. Flow Measurement and Instrumentation 12, 2001.
14. Wilk K.: Badania dyfuzyjnych palników gazowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Nr 785. Gliwice 1984.

Recenzent: prof. dr hab. inż. J. Jaskólski

**Abstract**

The work lists similarity numbers that are mostly used in descriptions of phenomena taking place in motor – car engine. Only numbers recognised by names have been analysed, though there are still more similarity numbers that are unknown, rarely used or newly discovered. Rich application of the numbers in research all around the world allows to think, that some of the numbers will make accurate description of generalised energy balance of different motor – car engines more possible.

*Artykuł stanowi sprawozdanie z BW-440/RT1/2004.*