

## USE OF THEORY OF SIMILARITY IN DEPENDENCE ANALYSIS OF AIR-FUEL RATIO MEAN TEMPERATURE AND BOUNDARY CONDITIONS IN DIESEL TURBO ENGINE

Jarosław Kobryń, Krystian Wilk

The Silesian University of Technology  
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Poland  
tel.: +48 32 6034453  
e-mail: jaroslaw.kobryn@polsl.pl

### Abstract

The paper proposes a way of analysing phenomena that take place in diesel turbo engine, making use of the checked in practice similarity numbers, applied in estimation of gas flames in diffusion gas burners. Some dependences of mean burning temperature on boundary conditions have been acquired, such as  $\lambda$  and mean velocity of flow through inlet valve. Authors undertook hypothesis that the criterion similarity numbers used for estimation of diffusive flames of gas- industrial burners could be used for estimation phenomena occurring in combustion engines. This permits basing on similarity theory on conclusion of parameters dimension for different combustion engines.

In industrial burner dimensions of cylindrical combustion chamber do not change at the time of, whereas in combustion engine changes only combustion chamber length. A following similarity is the manner of substrate feeding into combustion chamber. The combustion process of the fuel is in both runs a similar process, with this however a difference that in industrial burners it runs impromptu continuous, and the CI engine begins and finishes in 4 piston-strokes cycles. Authors presented data concerning of the free flow area between valve seat and valve head as well results of calculations of CI engine with supercharging.

**Keywords:** combustion engines, diesel engine, theory of similarity

## ZASTOSOWANIE TEORII PODOBIENSTWA DO ANALIZY ZALEŻNOŚCI ŚREDNIEJ TEMPERATURY ŁADUNKU OD WARUNKÓW BRZEGOWYCH W SILNIKU ZS Z DOŁADOWANIEM

### Streszczenie

W pracy zaproponowano sposób analizy zjawisk zachodzących w silniku ZS z doładowaniem wykorzystując sprawdzone w praktyce liczby kryterialne podobieństwa zastosowane w ocenie gazowych płomieni dyfuzyjnych palników przemysłowych. Uzyskano zależności średniej temperatury spalania od warunków brzegowych takich jak współczynnik nadmiaru powietrza i średniej prędkości przepływu powietrza przez zawód dolotowy. Autorzy przyjęli hipotezę, że liczby kryterialne podobieństwa wykorzystywane do oceny dyfuzyjnych płomieni gazowych palników przemysłowych mogą być zastosowane do oceny zjawisk zachodzących w silnikach spalinowych. Pozwala to w oparciu o teorię podobieństwa na wnioskowanie o wielkości parametrów różnych silników spalinowych.

W palniku przemysłowym wymiary cylindrycznej komory spalania nie zmieniają się w czasie, natomiast w silniku spalinowym zmienia się tylko długość komory spalania. Kolejnym podobieństwem jest sposób doprowadzenia substratów do komory spalania. Proces spalania paliwa jest w obu sytuacjach procesem podobnym, z tą jednak różnicą, że w palnikach przemysłowych przebiega w sposób ciągły, a silniku ZS

rozpoczyna się i kończy w okresach co 4 suwy tłoka. Autorzy zaprezentowali dane dotyczące Swobodnego pola przepływu między gniazdem a grzybkim zaworu oraz wyniki obliczeń silnika ZS z doładowaniem

**Słowa kluczowe:** silniki spalinowe, ZS, teoria podobieństwa

## Oznaczenia

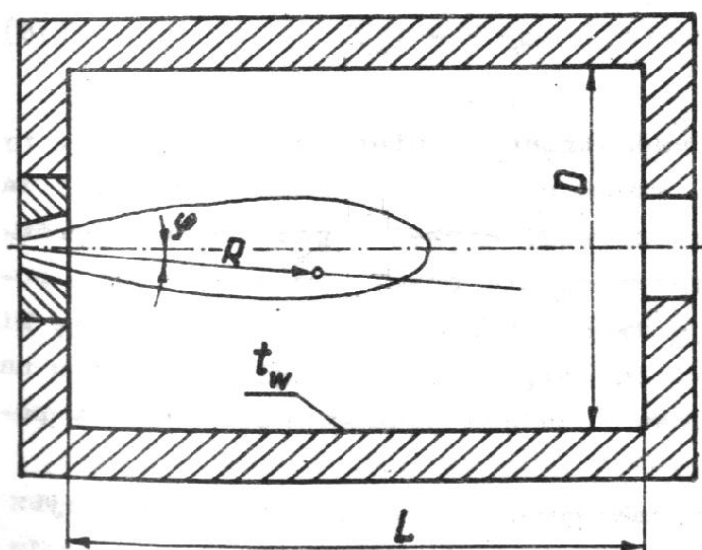
- $A$  – chwilowe pole poprzecznego przekroju swobodnego przepływu przez szczelinę zaworu dolotowego [ $m^2$ ],
- $A_{sr}$  – średnie pole poprzecznego przekroju swobodnego przepływu przez szczelinę zaworu dolotowego [ $m^2$ ],
- $D$  – średnica komory spalania, średnica cylindra [m],
- $d_a, d_c$  – średnice gniazda zaworu dolotowego [m],
- $d_o$  – zastępcza średnica [m],
- $H$  – wznios zaworu [m],
- $i_a$  – entalpia właściwa powietrza [J/kg],
- $i_g$  – entalpia właściwa paliwa [J/kg],
- $i_o$  – pełna (chemiczna i fizyczna) entalpia właściwa [J/kg],
- $K1, K2$  – liczby kryterialne podobieństwa [-],
- $L$  – długość komory spalania, skok tłoka [m],
- $m$  – stosunek mas strumieni [-],
- $\dot{m}_a$  – masa strumienia powietrza [kg/s],
- $\dot{m}_g$  – masa strumienia paliwa [kg/s],
- $n$  – prędkość obrotowa [ $s^{-1}$ ],
- $T_a$  – temperatura powietrza [K],
- $T_g$  – temperatura paliwa [K],
- $T_{sr}$  – średnia temperatura spalania [K],
- $\dot{V}_a$  – strumień objętości powietrza [ $m^3/s$ ],
- $\dot{V}_g$  – strumień objętości paliwa [ $m^3/s$ ],
- $V_s$  – objętość skokowa silnika [ $m^3$ ],
- $w$  – stosunek prędkości [-],
- $w_a$  – prędkość wypływu powietrza [m/s],
- $w_{os}$  – średnia prędkość przepływu powietrza przepływającego przez zawór dolotowy [m/s],
- $w_g$  – prędkość wypływu paliwa [m/s],
- $w_o$  – prędkość wypływu [m/s],
- $W_d$  – wartość opałowa [J/kg],
- $\alpha$  – kąt przyłgni zaworu [ $^\circ$ ],
- $\eta_{efo}$  – efektywny współczynnik lepkości [kg/(ms)],
- $\rho_o$  – gęstość [ $kg/m^3$ ],
- $\rho_m$  – gęstość mieszanki [ $kg/m^3$ ],
- $\tau_o$  – czas wg wałka rozrządu [ $^\circ OWR$ ].

## 1. Wprowadzenie

Teoria podobieństwa wykorzystuje analizę bezwymiarowych kombinacji wielkości fizycznych opisujących zjawisko zwanych liczbami kryterialnymi podobieństwa. W celu

uzyskania zmian wartości liczb kryterialnych można zmieniać wartości dowolnych wartości tworzących te liczby i nie powinno to mieć wpływu na końcowy wynik.

Zaproponowane w pracy liczby kryterialne używane były w badaniach nad gazowymi płomieniami dyfuzyjnymi gazowych palników przemysłowych [1]. Komory spalania palników przemysłowych wykazują podobieństwo do komory spalania silnika spalinowego (Rys. 1.). W palniku przemysłowym wymiary cylindrycznej komory spalania ( $D$ ,  $L$ ) nie zmieniają się w czasie, natomiast w silniku spalinowym zmienia się tylko długość komory spalania ( $L$ ) zależnie od  $\text{°OWK}$ . Kolejnym podobieństwem jest sposób doprowadzenia substratów do komory spalania. W analizowanych palnikach do komory spalania doprowadzone były oddzielnie paliwo i powietrze, co oczywiście ma miejsce również w silniku ZS. Proces spalania paliwa jest w obu przypadkach także procesem podobnym, z tą jednak różnicą, że w palnikach przemysłowych przebiega w sposób ciągły, a silniku ZS rozpoczyna się i kończy w okresach co 4 suwy tłoka.



Rys. 1. Schemat komory spalania palników przemysłowych  
 Fig. 1. The scheme of a combustion chamber in a diffusion flame burner

Zaproponowane w pracy [1] dwie liczby kryterialne najlepiej opisujące warunki brzegowe postanowiono zastosować w analizie wyników badań silnika ZS z doładowaniem.

## 2. Liczby kryterialne podobieństwa [1]

Analizowane w pracy liczby kryterialne podobieństwa oznaczono jako  $K_1$  i  $K_2$ . Liczba  $K_1$  jest tzw. efektywną liczbą Reynoldsa. Zawiera ona informacje o wymiarach komory spalania, o rodzaju paliwa oraz o wielkości pól przekrojów wylotowych, czyli o najistotniejszych cechach konstrukcyjnych komory spalania.

$$K_1 = \frac{\rho_o w_o d_o}{\eta_{efo}} \quad (1)$$

Liczba  $K_2$  charakteryzuje stosunek energii kinetycznej do pełnej entalpii strugi. Zawiera dane o wartości opałowej paliwa, o stopniu podgrzania i prędkościach wypływu substratów.

$$K_2 = \frac{w_o^2}{i_o} \quad (2)$$

Analizując zagadnienie doprowadzenia substratów do komory spalania dogodnie jest wprowadzić do rozważań strugę zastępczą. Parametry tej strugi oblicza się wg następujących wzorów:

- gęstość  $\rho_o$  (palnik przemysłowy)

$$\rho_o = \frac{\dot{m}_g + \dot{m}_a}{\dot{V}_g + \dot{V}_a} \quad (3)$$

W celu porównania różnych silników w pracy zaproponowano inną postać strumienia objętości (silnik ZS), przyjmując iż suma strumieni objętości substratów spalania może być zastąpiona iloczynem prędkości obrotowej silnika i objętości skokowej cylindra (stan przed rozpoczęciem sprężania, czyli przed zmianą parametrów dopływającego ładunku: p, V, T):

$$\rho_o = \frac{\dot{m}_g + \dot{m}_a}{nV_s} \quad (4)$$

- prędkość wypływu  $w_o$  (palnik przemysłowy)

$$w_o = \frac{\dot{m}_g w_g + \dot{m}_a w_a}{\dot{m}_g + \dot{m}_a} \quad (5)$$

w pracy wykorzystano powyższy wzór bez zmian dla silnika ZS,

- zastępcza średnica  $d_o$  (palnik przemysłowy)

$$d_o = 2\sqrt{\frac{\dot{m}_g + \dot{m}_a}{\pi\rho_o w_o}} \quad (6)$$

w pracy wykorzystano powyższy wzór bez zmian dla silnika ZS,

- pełna (chemiczna i fizyczna) entalpia właściwa  $i_o$  (palnik przemysłowy)

$$i_o = \frac{\dot{m}_g (W_d + i_g) + \dot{m}_a i_a}{\dot{m}_g + \dot{m}_a} \quad (7)$$

przy założeniu, że substraty z powyższego równania są zimne (nie podgrzane), pełna entalpia właściwa przyjmuje postać:

$$i_o = \frac{W_d}{1+m} \quad (8)$$

w pracy wykorzystano powyższy wzór bez zmian dla silnika ZS,

- efektywny współczynnik lepkości  $\eta_{efo}$  (palnik przemysłowy):

$$\eta_{efo} = 0,012 D^{\frac{2}{3}} L^{-\frac{1}{3}} \rho_o^{\frac{2}{3}} \left( \dot{m}_g w_g^2 + \dot{m}_a w_a^2 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

W pracy przyjęto założenie, że powyższy wzór opisuje również silnik ZS.

Teoria podobieństwa wskazuje, że w celu uzyskania zmian wartości liczb kryterialnych można zmieniać wartości dowolnych wartości tworzących te liczby i nie powinno to mieć wpływu na końcowy wynik.

### 3. Wyznaczenie K1 i K2 dla silnika ZS

Wykorzystano dane badań hamownianych silnika z zapłonem samoczynnym z doładowaniem z pracy [2] (Tab. 1).

Parametry silnika:

Pojemność silnika: 2390 cm<sup>3</sup>

Moc nominalna: 85 kW

Stopień sprężania: 20,2:1

D = 0,082 m

L = 0,0904 m

Liczba cylindrów: 5

Parametry paliwa:

$\rho_{pal} = 843 \text{ kg/m}^3$

Tab. 1. Wyniki badań silnika ZS [2]

Tab. 1. Test results of CI engine [2]

	1	2	3	4	5	6	7	8
$\lambda$	5,3	4,04	3,11	2,48	2,03	1,85	1,69	1,52
$\dot{m}_g$	0,00032 1111	0,00044 83	0,00060 7778	0,00077 7222	0,00096 61	0,001067	0,00117 5	0,00131 8
$\dot{m}_a$	0,02519 4444	0,02682 22	0,02803 8889	0,02851 1111	0,02896 67	0,029206	0,02936 1	0,02967 2
$\rho_a$	1,754	1,863	1,9386	1,9729	2,01	2,0218	2,0358	2,0611
n	0,00065 1667	0,00065 1667	0,00065 1667	0,00065 1667	0,00065 1667	0,0006516 67	0,00065 1667	0,00065 1667

### 4. Średnia temperatura spalania

Temperatura w cylindrze zależna jest od chwilowego czasu cyklu. W badaniach przyjęto za wartość początkową temperaturę ładunku w chwili zamknięcia zaworów dolotowych, natomiast za końcową – temperaturę spalin w chwili otwarcia zaworów wylotowych. Średnią temperaturę dla tego okresu, określoną jako średnią temperaturę spalania określono według wzoru:

$$T_{sr} = \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} T(\tau) d\tau \quad (10)$$

Wyznaczono także bezwymiarową zredukowaną temperaturę dla otrzymanej średniej temperatury uzależniając ją od temperatury kalorymetrycznej paliwa jako:

$$\theta = \frac{T_{sr} - T_o}{T_k - T_o} . \quad (11)$$

### 5. Średnia prędkości przepływu powietrza przez zawór dolotowy

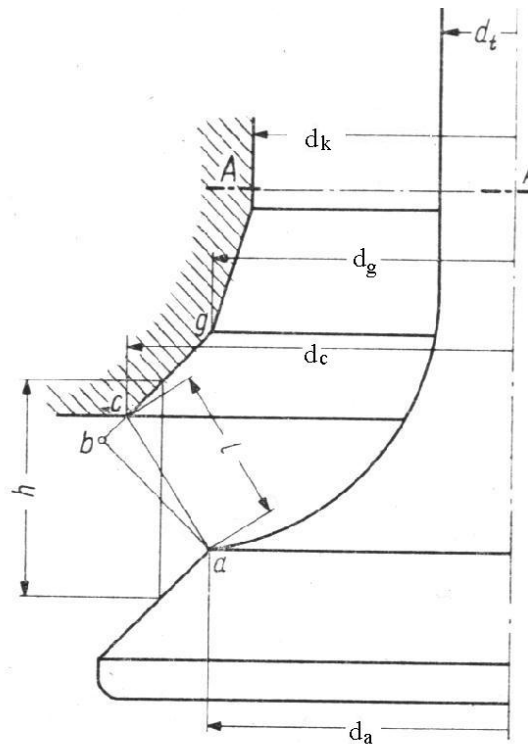
Prędkość  $w$  przepływu powietrza przepływającego przez zawór dolotowy wyznaczono z równania (7):

$$w_{sr} = \frac{\dot{m}_a}{A_{sr} \rho_a} . \quad (12)$$

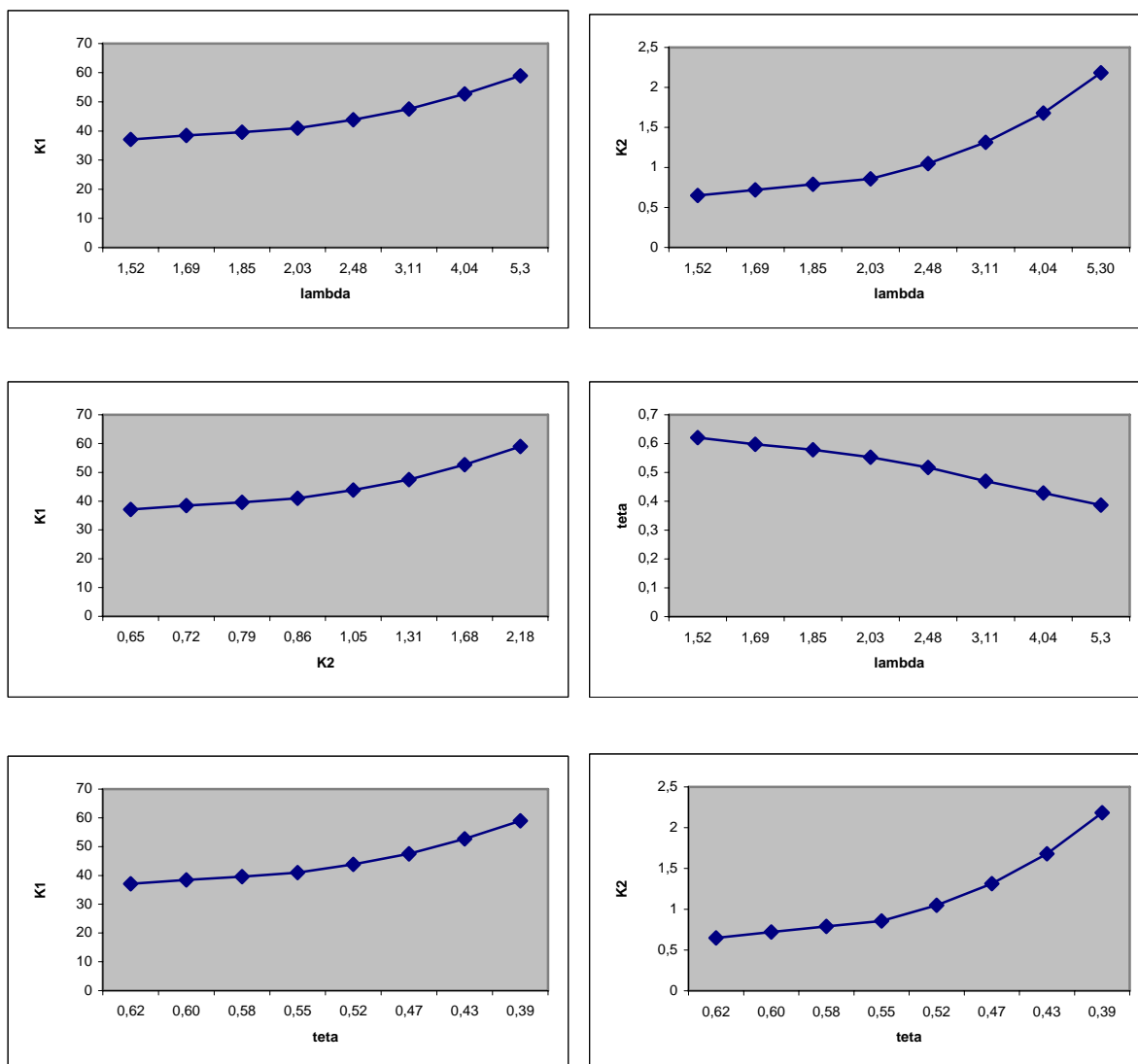
Swobodne pole przepływu pomiędzy gniazdem a grzybkiem zaworu (rys.2) obliczono z zależności (5):

$$A = \frac{\pi(d_a + d_c)}{2} \sqrt{\left(H - \frac{d_c - d_a}{2 \operatorname{tg} \alpha}\right)^2 + \left(\frac{d_c - d_a}{2}\right)^2} , \quad (13)$$

$$A_{sr} = \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} A(\tau) d\tau . \quad (14)$$



Rys. 2. Swobodne pole przepływu między gniazdem a grzybkiem zaworu  
Fig. 2. Free float area at valve opening



Rys. 3. Wyniki obliczeń silnika ZS z doładowaniem  
Fig. 3. Results of calculation CI engine

## 6. Podsumowanie

- Liczby kryterialne podobieństwa wykorzystywane do oceny gazowych płomieni dyfuzyjnych palników przemysłowych mogą być zastosowane do oceny zjawisk zachodzących w silnikach spalinowych.
- Przypuszcza się na podstawie teorii podobieństwa, że analiza tych liczb pozwoli na wnioskowanie o wielkości parametrów innego silnika spalinowego.
- W celu pełniejszego zobrazowania liczb  $K_1$  i  $K_2$  należałoby przeprowadzić badania i analizę dla różnych warunków brzegowych charakteryzujących pracę silnika spalinowego.
- Dane konstrukcyjne i eksploatacyjne większości silników obecnie produkowanych są trudno dostępne. Przedstawiciele handlowi i stacje obsługowo – naprawcze dysponują bardzo ograniczonymi danymi. Wartości takich wielkości jak skok zaworu, jego średnica, czy nawet czasookresy otwarcia i zamknięcia zaworów są trudno dostępne.

## Literatura

- [1] Wilk, K., *Badania dyfuzyjnych palników gazowych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, ser. Energetyka nr. 785, Gliwice 1984.
- [2] Gustof, P., *Analiza możliwości zastosowania modelu dwustrefowego do badania procesu spalania w silniku o zapłonie samoczynnym*. Praca doktorska. Katowice.
- [3] Jędrzejowski, J., *Obliczanie tłokowego silnika spalinowego*. WNT, Warszawa 1969.
- [4] Szargut, J., *Termodynamika techniczna*. PWN, Warszawa 1991.
- [5] Wiśniewski, S., *Obciążenia cieplne silników tłokowych*. WkiŁ, Warszawa 1972.
- [6] Kowalewicz, A., *Systemy spalania szybkoobrotowych tłokowych silników spalinowych*. WkiŁ, Warszawa 1980.
- [7] Wiśniewski, S., *Podstawy termodynamiki silników spalinowych*. WNT, Warszawa 1963.
- [8] Kobryń, J., Wilk, K., *Analiza możliwości zastosowania liczb podobieństwa opisujących gazowe płomienie dyfuzyjne do oceny zjawisk zachodzących w silniku ZS*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, ser. Transport nr. 57, Gliwice 2005.
- [9] Selamet, E., Selamet, A., Novak, J., *Predicting chemical species in spark – ignition engines*. Energy 29, 2004.
- [10] Chan, S., Zhu, J., *Modelling of engine in – cylinder thermodynamic under high values of ignition retard*. Int. J. Therm. Sci. 40, 2001.