

Jarosław KOBRYŃ, Krystian WILK

## ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA LICZB PODOBIENSTWA OPISUJĄCYCH GAZOWE PŁOMIENIE DYFUZYJNE DO OCENY ZJAWISK ZACHODZĄCYCH W SILNIKU ZS

**Streszczenie.** W pracy zaproponowano sposób analizy zjawisk zachodzących w silniku ZS wykorzystując sprawdzone w praktyce liczby kryterialne podobieństwa zastosowane w ocenie gazowych płomieni dyfuzyjnych palników przemysłowych. Liczby te wyznaczono na podstawie danych hamownianych silnika ZS.

## ANALYSIS OF A POSSIBILITY TO APPLY SIMILARITY NUMBERS DESCRIBING DIFFUSION GAS FLAMES TO ESTIMATE PHENOMENA TAKING PLACE IN DIESEL ENGINE

**Summary.** The paper proposes a way of analysing phenomena that take place in diesel engine, making use of the checked in practice similarity numbers applied in estimation of gas flames in diffusion gas burners. The numbers were selected on the basis of data of diesel engine testing.

### Oznaczenia

$A_a$  – najmniejsze pole poprzecznego przekroju swobodnego przepływu przez szczelinę zaworu dolotowego [ $m^2$ ],

$A_g$  – pole przekroju wylotowego [ $m^2$ ],

$c$  – udział gramowy węgla w paliwie [ $kg C/kg$  paliwa],

$D$  – średnica komory spalania, średnica cylindra [ $m$ ],

$d_a, d_c$  – średnice gniazda zaworu dolotowego [ $m$ ],

$d_{aw}, d_{cw}$  – średnice gniazda zaworu wydechowego [ $m$ ],

$d_o$  – zastępcza średnica [ $m$ ],

$F$  – pole poprzecznego przekroju cylindra [ $m^2$ ],

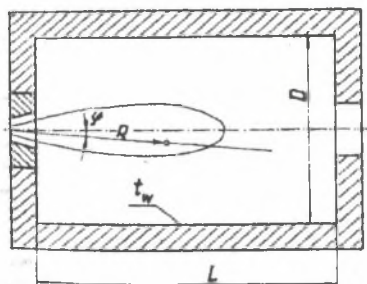
$H$  – wznios zaworu [ $m$ ],

$h$  – udział gramowy wodoru w paliwie [ $kg H_2/kg$  paliwa],

$i_a$	– entalpia właściwa powietrza [J/kg],
$i_g$	– entalpia właściwa paliwa [J/kg],
$i_o$	– pełna (chemiczna i fizyczna) entalpia właściwa [J/kg],
$k$	– współczynnik komory spalania [ $m^{1/3}$ ],
$K1, K2$	– liczby kryterialne podobieństwa [-],
$L$	– długość komory spalania, skok tłoka [m],
$m$	– stosunek mas strumieni [-],
$\dot{m}_a$	– masa strumienia powietrza [kg/s],
$\dot{m}_k$	– masa strumienia paliwa [kg/s],
$n$	– prędkość obrotowa [ $s^{-1}$ ],
$n_{amin}$	– teoretyczne zapotrzebowanie powietrza do spalenia jednostki paliwa [kmol pow./kmol paliwa],
$n_{awmin}$	– teoretyczne zapotrzebowanie powietrza wilgotnego do spalenia jednostki paliwa [kmol pow./kmol paliwa],
$n_c$	– jednostkowa ilość węgla w paliwie [kmol C/kg paliwa],
$n_{H2}$	– jednostkowa ilość wodoru w paliwie [kmol $H_2$ /kg paliwa],
$n_{O2}$	– jednostkowa ilość tlenu w paliwie [kmol $O_2$ /kg paliwa],
$s$	– udział gramowy siarki w paliwie [kg S/kg paliwa],
$T_a$	– temperatura powietrza [K],
$T_g$	– temperatura paliwa [K],
$\dot{V}_a$	– strumień objętości powietrza [ $m^3/s$ ],
$\dot{V}_k$	– strumień objętości paliwa [ $m^3/s$ ],
$w$	– stosunek prędkości [-],
$w_a$	– prędkość wyptywu powietrza [m/s],
$w_{asr}$	– średnia prędkość przepływu powietrza przepływającego przez zawór dolotowy [m/s],
$w_g$	– prędkość wyptywu paliwa [m/s],
$w_o$	– prędkość wyptywu [m/s],
$W_d$	– wartość opałowa [J/kg],
$X_{-a}$	– molowy stopień zawilżenia powietrza atmosferycznego [kmol $H_2O$ /kmol $a_s$ ],
$\alpha$	– kąt przyłgni zaworu [ $^\circ$ ],
$\lambda$	– stosunek nadmiaru powietrza [-],
$\eta_{efo}$	– efektywny współczynnik lepkości [kg/(ms)],
$\rho_o$	– gęstość [ $kg/m^3$ ],
$\rho_g$	– gęstość paliwa [ $kg/m^3$ ],
$\rho_a$	– gęstość powietrza [ $kg/m^3$ ].

## 1. WPROWADZENIE

Badania prowadzone nad gazowymi płomieniami dyfuzyjnymi gazowych palników przemysłowych pozwoliły wyznaczyć szereg liczb kryterialnych podobieństwa. Liczby te pomogły opracować formuły badanego zagadnienia. Zaproponowane w pracy [1] dwie liczby kryterialne najlepiej opisujące warunki brzegowe postanowiono zastosować w analizie wyników badań silnika spalinowego. Komory spalania palników przemysłowych wykazują podobieństwo do komory spalania silnika spalinowego (rys. 1).



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

## 2. LICZBY KRYTERIALNE PODOBIENSTWA [1]

Liczby kryterialne podobieństwa są bezwymiarowymi kombinacjami wielkości fizycznych opisujących zjawisko. 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  $\rho_o$

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

- prędkość wypływu  $w_o$

$$w_o = \frac{\dot{m}_g w_g + \dot{m}_a w_a}{\dot{m}_g + \dot{m}_a} \quad (4)$$

- zastępcza średnica  $d_o$

$$d_o = 2 \sqrt{\frac{\dot{m}_g + \dot{m}_a}{\pi \rho_o w_o}} \quad (5)$$

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

$$i_o = \frac{\dot{m}_g (W_d + i_g) + \dot{m}_a i_a}{\dot{m}_g + \dot{m}_a} \quad (6)$$

- efektywny współczynnik lepkości  $\eta_{efo}$

$$\eta_{efo} = 0,012 D^{\frac{2}{3}} L^{\frac{1}{3}} \rho_o^{\frac{2}{3}} \left( \dot{m}_k w_k^2 + \dot{m}_a w_a^2 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

Podstawiając równania (3), (4), (5) i (7) do równania (1) można po przekształceniach przedstawić liczbę  $K_1$  w postaci:

$$K_1 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\left( 1 + \lambda n_{a \min} \frac{T_a}{T_k} \right)^{\frac{1}{6}} (1 + mw)^{\frac{1}{2}}}{(1+m)^{\frac{1}{6}} (1+mw^2)^{\frac{1}{3}}} A_k^{\frac{1}{6}} \frac{1}{k} \quad (8)$$

gdzie:

$$m = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_k} \quad (9)$$

$$w = \frac{w_a}{w_k} \quad (10)$$

$$k = 0,012 D^{\frac{2}{3}} L^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

Przy założeniu, że substraty z równania (6) są zimne (nie podgrzane), pełna entalpia właściwa przyjmuje postać:

$$i_a = \frac{W_d}{1+m} \quad (12)$$

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. ANALIZA PODOBIENSTWA PARAMETRÓW

Podobieństwo wykazują:

- kształt komory spalania, a więc i jej charakterystyczne wymiary  $D$  i  $L$ ,
- parametry paliwa,
- parametry związane z przepływem.

Tablica 1

Parametry liczb kryterialnych [1, 3]

Parametr	Palnik przemysłowy	Silnik spalinowy
$A_g$	pole przekroju wylotowego	najmniejsze pole poprzecznego przekroju swobodnego przepływu przez szczelinę zaworu wydechowego
$D$	średnica komory spalania	średnica cylindra
$L$	długość komory spalania	skok tłoka
$m_a^*$	masa strumienia powietrza	czasowe masowe zużycie powietrza
$m_k^*$	masa strumienia paliwa	czasowe masowe zużycie paliwa
$n_{amin}$	teoretyczne zapotrzebowanie powietrza do spalania jednostki paliwa	teoretyczne zapotrzebowanie powietrza do spalania jednostki paliwa
$T_a$	temperatura powietrza	temperatura powietrza
$T_k$	temperatura paliwa	temperatura paliwa
$w_a$	prędkość wypływu powietrza	prędkość wypływu powietrza przez zawór (zawory) dolotowe
$w_k$	prędkość wypływu paliwa	prędkość wypływu paliwa
$W_d$	wartość opałowa	wartość opałowa
$\lambda$	stosunek nadmiaru powietrza	stosunek nadmiaru powietrza

#### 4. WYZNACZENIE $K_1$ I $K_2$ DLA SILNIKA ZS

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

Parametry silnika:

$$D = 0,082 \text{ m}$$

$$L = 0,0904 \text{ m}$$

Liczba cylindrów – 5

Parametry paliwa:

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

$$c = 0,86$$

$$h = 0,135$$

$$s = 0,005$$

Wartość opałową paliwa  $W_d$  obliczono wg wzoru [4]:

$$W_d = 32800c + 120040h + 9260s \quad (13)$$

Teoretyczne zapotrzebowanie na powietrze atmosferyczne do procesu spalania wynosi [4]:

$$n_{amin} = \frac{\left( n_c + \frac{1}{2} n_{H_2} \right)}{0,21} \quad (14)$$

gdzie:

$$n_c = \frac{c}{12} + \frac{s}{32} \quad (15)$$

$$n_{H_2} = \frac{h}{2} \quad (16)$$

W rzeczywistości powietrze zawiera wilgoć [4]:

$$n_{ow \min} = (1 + X_{za}) n_{o \min} \quad (17)$$

W pracy przyjęto  $X_{za} = 0,014160$  [2].

Średnią prędkość  $w_{a \text{sr}}$  przepływu powietrza przepływającego przez zawór dolotowy wyznaczono z równania [7]:

$$w_{sr} = \frac{\dot{m}_a}{A_a \rho_a} \quad (18)$$

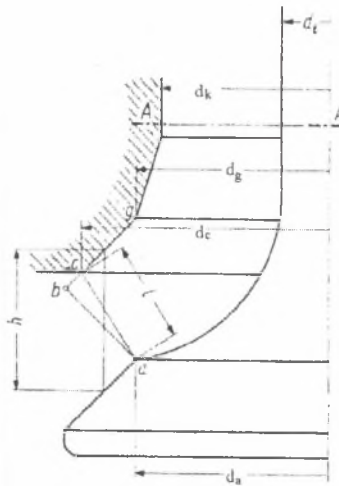
Swobodne pole przepływu pomiędzy gniazdem a grzybkim zaworu (rys.2) obliczono z zależności [5]:

$$A_a = \frac{\pi(d_a + d_c)}{2} \sqrt{\left(H - \frac{d_c - d_a}{2 \operatorname{tg} \alpha}\right)^2 + \left(\frac{d_c - d_a}{2}\right)^2} \quad (19)$$

Analogicznie dla zaworu wydechowego.

Na podstawie analizy istniejących konstrukcji silników spalinowych przyjęto z silnika o takiej samej średnicy cylindra i takiej samej objętości skokowej [6]:

- jeden zawór dolotowy na cylinder,
- $d_a = 0,0331$  m,
- $d_c = 0,0391$  m,
- $\alpha = 45^\circ$ ,
- $H = 0,0071$  m,
- $d_{aw} = 0,0261$  m,
- $d_{cw} = 0,0321$  m,

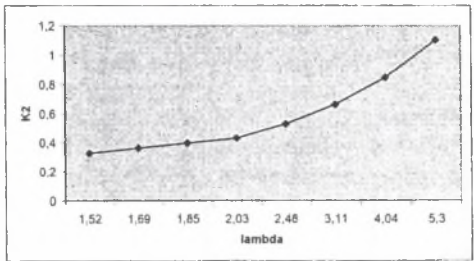
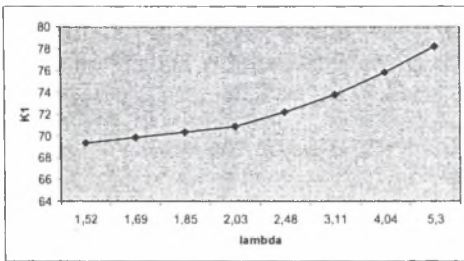


Rys. 2. Swobodne pole przepływu między gniazdem a grzybkim zaworu  
Fig. 2. Free float area at valve opening

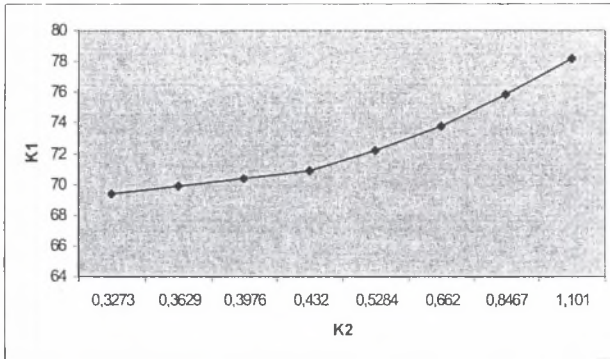
Tabela 2

Dane hamowniane i wyniki obliczeń dla 1 cylindra

Parametr	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
$m_g$	0,0003211 11	0,0004483	0,0006077 78	0,0007772 22	0,0009661	0,001067	0,001175	0,001318
$m_a$	0,0251944 44	0,0268222	0,0280388 89	0,0285111 11	0,0289667	0,029206	0,029361	0,029672
$\rho_a$	1,754	1,863	1,9386	1,9729	2,01	2,0218	2,0358	2,0611
n	0,0006516 67	0,0006516 67	0,0006516 67	0,0006516 67	0,0006516 67	0,0006516 67	0,0006516 67	0,0006516 67
$w_a$	24,820312 16	24,877913	24,992208 37	24,971297 67	24,902016	24,96085	24,92123	24,87614
k	0,0050466 25	0,0050466 25	0,0050466 25	0,0050466 25	0,0050466 25	0,0050466 25	0,0050466 25	0,0050466 25
m	78,460207 61	59,826518	46,133455 21	36,683345 25	29,982749	27,38021	24,98818	22,51686
$i_o$	559,52156 85	730,92627	943,27266 7	1179,8235 99	1434,9824	1566,574	1710,766	1890,545
$T_a$	366	376	384	388	391	394	396	400
$T_g$	338	342	344	343	344	344	343	341
$A_g$	0,0003879	0,0003879	0,0003879	0,0003879	0,0003879	0,0003879	0,0003879	0,0003879
$K_1$	78,209922 13	75,841473	73,793145 17	72,201507 04	70,885781	70,35433	69,86376	69,35414
$w_o$	24,820312 16	24,876966	24,988561 36	24,967290 98	24,899379	24,9559	24,91734	24,87377
$K_2$	1,1010261 81	0,8466838	0,6619805 93	0,5283549 33	0,4320465	0,397553	0,362922	0,327262



Rys. 3. Zależności liczb kryterialnych  $K_1$  i  $K_2$  od obciążenia silnika ( $\lambda$ )  
 Fig. 3. Relations between similarity numbers  $K_1$ ,  $K_2$  and engine load ( $\lambda$ )



Rys. 4. Wzajemne zależności liczb kryterialnych  $K_1$  i  $K_2$

Fig. 4. Correlations of similarity numbers  $K_1$ ,  $K_2$

## 5. PODSUMOWANIE

- Liczby kryterialne podobieństwa wykorzystywane do oceny gazowych płomieni dyfuzyjnych palników przemysłowych mogą być zastosowane do oceny zjawisk zachodzących w silnikach spalinowych.
- Przyпуска się, że analiza tych liczb pozwoli na wnioskowanie o wielkości parametrów innego silnika spalinowego bez konieczności przeprowadzania kosztownych badań na hamowni silnikowej.
- W pracy przeanalizowana została tylko jedna prędkość obrotowa. W celu pełniejszego zobrazowania liczb  $K_1$  i  $K_2$  należałoby przeprowadzić badania i analizę dla kilku innych prędkości obrotowych.

## Literatura

1. Wilk K.: Badania dyfuzyjnych palników gazowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, ser. Energetyka nr 785, Gliwice 1984.
2. Gustof P.: Praca doktorska: Analiza możliwości zastosowania modelu dwustrefowego do badania procesu spalania w silniku o zapłonie samoczynnym. Politechnika Śląska. Gliwice 1998.
3. Jędrzejowski J.: Obliczanie tłokowego silnika spalinowego. WNT, Warszawa 1969.
4. Szargut J.: Termodynamika techniczna. PWN, Warszawa 1991.
5. Kowalewicz A.: Systemy spalania szybkoobrotowych tłokowych silników spalinowych. WkiŁ, Warszawa 1980.
6. Janiszewski T., Falkowski H., Sławski Cz.: Krajowe silniki wysokoprężne – obsługa i naprawa. WkiŁ, Warszawa 1980.
7. Wiśniewski S.: Podstawy termodynamiki silników spalinowych. WNT, Warszawa 1963.