

Prof. WSTE dr hab. inż. Benedykt LITKE

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

ZNACZENIE LICZB PODOBIENSTWA W BADANIACH MODELOWYCH PROCESÓW TERMODYNOMICZNYCH SILNIKÓW CIEPLNYCH

Streszczenie

Wstęp i cele: Badania modelowe wymagają spełnienia warunku równości odpowiednich liczb podobieństwa. W większości przypadków równoczesne spełnienie warunku równości wszystkich liczb podobieństwa opisujących dane zjawisko nie jest możliwe. Nie wszystkie kryteria mają jednakowe znaczenie w badanym zagadnieniu. Na podstawie analizy i eksperymentów można ustalić które z nich spełniają dominującą rolę. Niestety, tylko dzięki rezygnacji z mało ważnych liczb podobieństwa, jest możliwe zrealizowanie badań. W pracy zaprezentowano przykłady badań silników zrealizowanych przy ograniczonym podobieństwie modelowym.

Materiał i metody: Materiał oparto na wykonanych badaniach modelowych. W pracy zastosowano metodę analityczno-doświadczalną.

Wyniki: Ustalono współczynniki wymiany ładunku w funkcji ciśnienia przepłukania z zastosowaniem dwóch zestawów cieczy metanol/trójchloroetylen oraz metanol/roztwór wodny.

Wniosek: Przedstawione wyniki badań potwierdzają możliwość uzyskania dostatecznie dokładnych informacji dotyczących procesu wymiany ładunku przy niecałkowicie spełnionych warunkach podobieństwa modelowego.

Słowa kluczowe: Silniki spalinowe tłokowe, wymiana ładunku w silnikach dwusuwowych, badania modelowe, liczby podobieństwa w badaniach modelowych.

(Otrzymano: 17.09.2017; Zrecenzowano: 20.09.2017; Zaakceptowano: 25.09.2017)

SIGNIFICANCE OF SIMILARITY NUMBERS IN A MODEL TESTING OF THERMODYNAMIC PROCESSES IN THE HEAT ENGINE

Abstract

Introduction and aim: Model studies require the fulfilment of the condition of equality of corresponding numbers of similarity. In most cases, simultaneous fulfilment of the condition of equality of all similarities describing a given phenomenon is not possible. Not all criteria are equally relevant in the study. Based on the analysis and experiments one can determine which of them are dominant. Unfortunately, only thanks to the resignation of the little important numbers of similarity, it is possible to carry out research. The paper presents examples of research of engines realized with limited model similarity.

Material and methods: The material was based on model studies. An analytical-experimental method has been used in the paper.

Results: The load exchange coefficients were calculated as a flushing pressure using two sets of methanol-trichlorethylene liquid and methanol-water solution.

Conclusion: The presented results confirm the possibility of obtaining sufficiently detailed information on the process of cargo exchange under incomplete conditions of model similarity.

Keywords: Piston internal combustion engines, charge exchange in two-stroke engines, model tests, similarities in model tests.

(Received: 17.09.2017; Revised: 20.09.2017; Accepted: 25.09.2017)

1. Wstęp

Procesy termodynamiczne w silnikach spalinowych przebiegają według odpowiednich praw. Zagadnienia przepływowe, w których występuje równocześnie wymiana ciepła opisują następujące zależności [1]:

- równanie ciągłości strugi

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{c}) = 0, \quad (1)$$

- równanie ruchu (równanie Navier-Stokesa)

$$\frac{\partial \vec{c}}{\partial t} + \vec{c} \cdot \text{grad}(\vec{c}) = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad}(p) + \nu \cdot \nabla^2 \vec{c} + \frac{1}{3} \nu \cdot \text{grad}[\text{div}(\vec{c})], \quad (2)$$

- równanie energii

$$\frac{d}{dt} \left(i + \frac{c^2}{2} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} + \vec{F} \cdot \vec{c} + \nu \vec{c} \cdot \nabla^2 \vec{c} + \frac{1}{3} \nu \vec{c} \cdot \text{grad}[\text{div}(\rho \vec{c})] + \frac{1}{\rho} \text{div}[\lambda \cdot \text{grad}(T)], \quad (3)$$

- równanie stanu gazów doskonałych

$$\frac{p}{\rho} = RT, \quad (4)$$

- równanie wymiany ciepła na granicy płynu i ciała stałego

$$\alpha \cdot \Delta T = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (5)$$

- równanie przewodnictwa ciepła

$$\frac{\partial T}{\partial t} + c_x \frac{\partial T}{\partial x} + c_y \frac{\partial T}{\partial y} + c_z \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \nabla^2 T, \quad (6)$$

gdzie p - ciśnienie [N/m^2], t - czas [s], ρ - gęstość [kg/m^3], \vec{c} - wektor prędkości [m/s], \vec{F} - wektor siły [N], ν - współczynnik lepkości kinematycznej [m^2/s], i - entalpia spoczynkowa właściwa [J/kg], λ - współczynnik przewodzenia ciepła [$\text{W/m}\cdot\text{K}$], T - temperatura [K], R - stała gazowa indywidualna [J/kg·K], α - współczynnik przejmowania ciepła [$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$], x, y, z - kierunki, c_x, c_y, c_z - współrzędne wektora prędkości odpowiednio w kierunku x, y oraz z .

W przypadku konieczności uwzględnienia innych zjawisk, na przykład dyfuzji molekularnej lub napięcia powierzchniowego liczba równań opisująca proces będzie większa.

Rozwiązanie powyższych równań, nawet przy znacznych uproszczeniach, nie jest możliwe. Badania na rzeczywistym silniku są również trudne, kosztowne a czas ich trwania długi.

Przy założeniu, że gaz biorący udział w procesie przepływu jest nieściśliwy, tzn. Gęstość jest stała, ciśnienie p oraz kinetyczny współczynnik lepkości są stałe oraz nie występuje wymiana ciepła przez przewodzenie zagadnienie upraszcza się pozostawiając do rozwiązania tylko zależności o decydującym znaczeniu [1], [6], to jest:

- równanie ciągłości strugi,
- równanie równowagi sił dla kierunków x, y, z .

W układzie podobnym, mianowicie w modelu obowiązują identyczne równania z tą różnicą, że poszczególne parametry fizyczne czynników mają inne wartości.

Najlepszym sposobem uzyskania w krótkim czasie wystarczająco dokładnych informacji są badania modelowe. Dzięki prostocie i względnie małym kosztom jest to najkorzystniejszy sposób badania niektórych procesów zachodzących w silnikach spalinowych, w szczególności wymiany ładunku, tworzenia mieszanki powietrzno-paliwowej, a nawet procesu spalania.

2. Zależności spełniające podobieństwo modelowe w badaniach procesów termodynamicznych

Aby przebieg procesu termodynamicznego w modelu i silniku był podobny musi być spełniony warunek równości liczb podobieństwa. Po przyjęciu skal dla poszczególnych wielkości fizycznych występujących w obiekcie i modelu i podstawieniu ich do wyżej wymienionych równań dla modelu otrzymuje się liczby (kryteria) podobieństwa [1], [5]. Są to:

➤ liczba Strouhala

$$St = \frac{l}{c \cdot t} = \frac{l'}{c' \cdot t'}, \quad (7)$$

➤ liczba Reynoldsa

$$Re = \frac{c \cdot l}{\nu} = \frac{c' \cdot l'}{\nu}, \quad (8)$$

➤ liczba Eulera

$$Eu = \frac{p}{\rho \cdot c^2} = \frac{p'}{\rho' \cdot c'^2}, \quad (9)$$

➤ liczba Frouda

$$Fr = \frac{g \cdot l}{c^2} = \frac{g' \cdot l'}{c'^2}. \quad (10)$$

gdzie c - prędkość [m/s], g - przyspieszenie ziemskie [m/s^2], l - wymiar [m], p - ciśnienie [N/m^2], t - czas [s], ρ - gęstość [kg/m^3], ν - współczynnik lepkości kinematycznej [m^2/s].

Ponadto substancje zastosowane w modelu muszą oddziaływać na siebie tak samo jak czynniki termodynamiczne w silniku. Wielkości oznaczone indeksem ' dotyczą modelu.

3. Zależności spełniające podobieństwo modelowe w procesie wymiany ładunku

W procesie wymiany ładunku biorą udział w zasadzie tylko dwa różne czynniki, to jest spaliny usuwane z cylindra silnika i dopływające powietrze przepływające.

Chcąc uzyskać w badaniach modelowych taki sam przebieg procesu wymiany ładunku jak w silniku należy spełnić warunek równości liczb podobieństwa, podanych we wzorach (7)-(10), a ponadto zastosować substancje podlegające dyfuzji podobnie jak gazy w silniku.

Dla czynników 1 i 2 biorących udział w wymianie ładunku w silniku i modelu obowiązują następujące zależności [1]-[3]:

$$\frac{St_2}{St_1} = \frac{St'_2}{St'_1}, \quad (11)$$

$$\frac{Re_2}{Re_1} = \frac{Re'_2}{Re'_1}, \quad (12)$$

$$\frac{Eu_2}{Eu_1} = \frac{Eu'_2}{Eu'_1}, \quad (13)$$

$$\frac{Fr_2}{Fr_1} = \frac{Fr'_2}{Fr'_1}. \quad (14)$$

Zależności (11)-(14) są ważne zarówno wtedy, gdy czynniki 1 i 2 są wymieszane, jak i gdy nie tworzą mieszaniny. Analogiczne zależności można uzyskać dla większej liczby czynników.

W badaniach modelowych wymiany ładunku, po przyjęciu założeń:

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{l'_2}{l'_1}, \quad (15)$$

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{t'_2}{t'_1}, \quad (16)$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p'_2}{p'_1}, \quad (17)$$

zachodzi potrzeba spełnienia, poza liczbami podobieństwa, dodatkowo następujących warunków:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\rho'_2}{\rho'_1}, \quad (18)$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{v'_2}{v'_1}. \quad (19)$$

Z powyższych rozważań wynika, że w celu uzyskania podobieństwa modelowego musi być spełniona równość liczb Strouhala, Reynoldsa, Eulera i Frouda oraz stosunków gęstości i współczynnika lepkości kinematycznej.

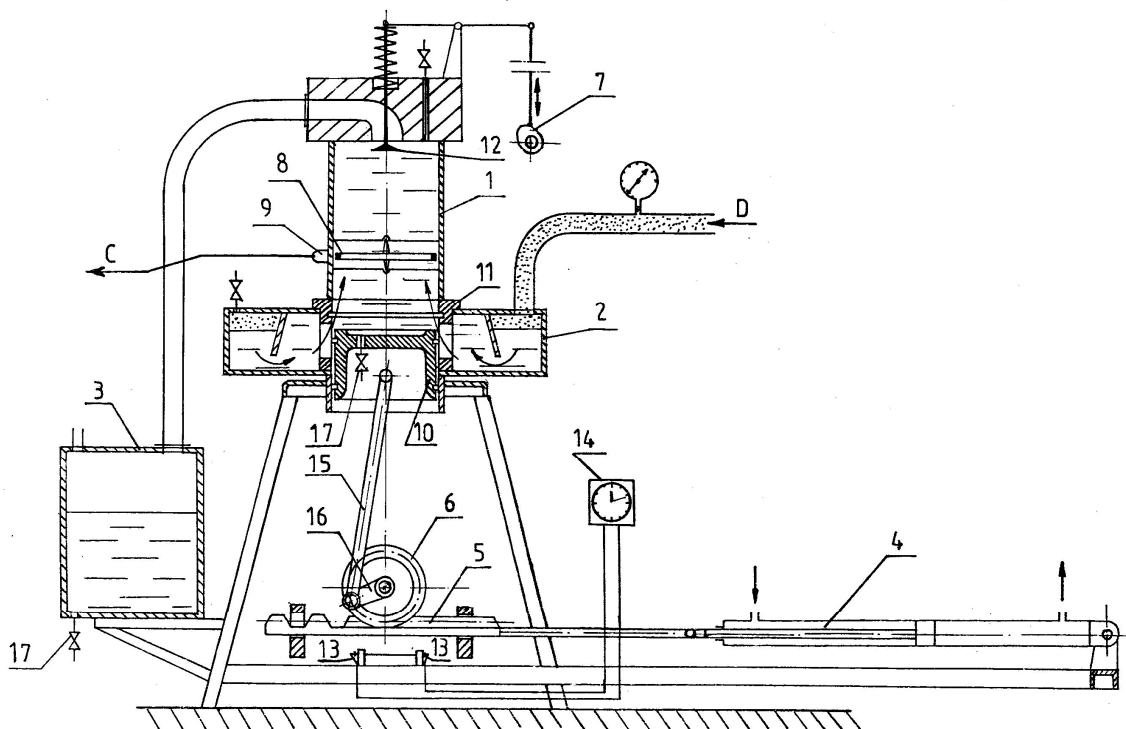
Zrealizowanie idealnego modelu według powyższych warunków jest praktycznie niemożliwe. Dlatego, dla umożliwienia przeprowadzenia badań, konieczne jest przyjęcie pewnych dopuszczalnych założeń upraszczających. Aby tego dokonać niezbędna jest znajomość znaczenia poszczególnych kryteriów w badanym procesie i wówczas zrezygnowanie z tych, które nie mają istotnego wpływu na wyniki badań.

4. Badania wymiany ładunku przy niepełnym podobieństwie modelowym

Ocenę procesu wymiany ładunku wolnoobrotowych silników dwusuwowych można uzyskać na podstawie badań modelowych, w których spaliny i powietrze przepływające silnika imitują odpowiednio dobrane cieczce [2]-[5], [7].

Zbudowany w Zakładzie Maszyn Ciepłych Okrętowych Politechniki Szczecińskiej model silnika dwusuwowego o przepłykanu wzdłużnym [3]-[4] pokazany na rysunku 1 umożliwia wykonywanie pojedynczych wymian ładunku.

Jednorazowe przepłykanie następuje, gdy tłok poruszany przez układ korbowy, najpierw odślania a następnie przysłania okna dolotowe. W tym czasie ciecz imitująca powietrze przepływające, pod określonym ciśnieniem, wpływa przez okna dolotowe do cylindra. Mieszanina cieczy wypływająca z cylindra przez otwór wylotowy gromadzona jest w zbiorniku wylotowym. Pomiar ciśnienia w zasobniku, objętości i gęstości cieczy imitujących spaliny i powietrze oraz ich mieszaniny ze zbiornika wylotowego, umożliwiają określenie wszystkich wielkości charakteryzujących proces wymiany ładunku.



Rys. 1. Schemat stanowiska do badań modelowych wymiany ładunku metodą cieczową:
 1 - cylinder, 2 - zasobnik cieczy przepływającej, 3 - zbiornik cieczy wypchniętej z cylindra,
 4 - siłownik hydrauliczny, 5 - zębatka napędowa, 6 - koło zębate napędu, 7 - krzywka zaworu wylotowego,
 8 - anemometr, 9 - czujnik indukcyjny, 10 - tłok, 11 - tuleja z oknami dolotowymi, 12 - zawór wylotowy,
 13 - wyłączniki krańcowe, 14 - miernik czasu, 15 - korbwód, 16 - ramię korby, 17 - zawory spustowe,
 C - połączenie czujnika 9 z rejestratorem impulsów, D - doprowadzenia sprężonego powietrza

Zródło: Opracowanie własne Autora

Fig. 1. The scheme of the modelling tests of fluid charge exchange

1 - cylinder, 2 - flushing fluid reservoir, 3 - reservoir of fluid pushed out of the cylinder,
 4 - hydraulic servo-motor, 5 - driving rack, 6 - gear-wheel of drive, 7 - cam of the outlet valve,
 8 - anemometer, 9 - inductive sensor, 10 - piston, 11 - sleeve of the inlet ports, 12 - outlet valve,
 13 - limit switches, 14 - time meter, 15 - connecting rod, 16 - crank arm, 17 - draining valves,
 C - connection of sensor 9 with pulse recorder, D - inputs of compressed air

Source: Elaboration of the Author

W przedstawionych badaniach przyjęto znaczne uproszczenia, polegające na odstępstwach od dokładnego spełnienia warunków podobieństwa. Badania metodą modelowania cieczowego prowadzono w firmie Sulzer podczas opracowywania silników serii RD [6]. Zastosowane ciecze, to jest trójchloroetylen zamiast powietrza i alkohol imitujący spaliny dokładnie spełniały warunek równości stosunków gęstości i lepkości.

Z uwagi na trudności spełnienia wszystkich warunków podobieństwa modelowego, w firmie Sulzer wykonano eksperymenty w celu stwierdzenia w jakim stopniu badania mogą być uproszczone. Na modelu dwuwymiarowym obserwowano przebieg rozprzestrzeniania się oraz zasięg strumienia czterochloroetylenu wypływającego przez otwór do obszaru wypełnionego cyklohexanem [2], przy różnych wartościach liczb Reynoldsa i Frouda. W kolejnych doświadczeniach wartości tych liczb były następujące:

- $Re = 325000$ i $Fr = \infty$,
- $Re = 28000$ i $Fr = \infty$,
- $Re = 64000$ i $Fr = 11$,
- $Re = 46500$ i $Fr = 5,9$.

Obrazy uzyskane w kolejnych doświadczeniach nie różniły się w stopniu zauważalnym. Na tej podstawie przyjęto założenie, że kryteria Reynoldsa i Frouda nie mają istotnego wpływu na przebieg badanego zjawiska [7].

Przeprowadzone tam później badania modelowe wymiany ładunku i tworzenia mieszanki palnej potwierdziły, że liczby Reynoldsa i Frouda oraz stosunki kinematycznych współczynników lepkości nie mają znaczenia. Dzięki temu realizacja badań była znacznie ułatwiona, gdyż wystarczyło spełnienie tylko trzech kryteriów podobieństwa, to jest równości:

➤ liczb Strouhala

$$St = St' \quad (20)$$

➤ liczb Eulera

$$Eu = Eu' \quad (21)$$

oraz stosunków gęstości czynników w silniku i modelu przedstawionych wzorem (18).

W badaniach wymiany ładunku na stanowisku powyższe warunki spełniały zestawy cieczy trójchloroetylen - alkohol [3], natomiast podczas badań wymiany ładunku i tworzenia mieszanki silnika zasilanego gazem zestaw czterochloroetylen-cyklohexan [2].

Wyżej wymienione ciecze charakteryzują się pewnymi niekorzystnymi właściwościami z punktu widzenia bezpieczeństwa pracy. Pary trójchloroetylenu (nazwa handlowa tri) jak również pozostałych cieczy są szkodliwe dla zdrowia, a ponadto alkohole są cieczami łatwopalnymi. Trójchloroetylen i czterochloroetylen są stosunkowo drogie i działają niszcząco na elementy gumowe stanowiska. Wymienione cechy stwarzają znaczne utrudnienia w prowadzeniu badań.

W celu uniknięcia wspomnianych niedogodności wykonano w Politechnice Szczecińskiej trzy próby zastosowania innych cieczy, nie spełniających warunków podobieństwa modelowego. Zbadano kilka zestawów cieczy imitujących powietrze przepływające i spaliny, a wyniki pomiarów porównano z uzyskanymi przy zastosowaniu cieczy, które dość dokładnie spełniają warunki podobieństwa, to jest trójchloroetylenu (tri) i alkoholu metylowego (metanol). Stosunki gęstości oraz współczynników lepkości kinematycznych spalin do powietrza i trójchloroetylenu do metanolu są następujące:

$$\frac{\rho_s}{\rho_p} = \frac{0,88}{1,6} = 0,55, \quad (22)$$

$$\frac{\rho_a}{\rho_t} = \frac{820}{1466} = 0,558, \quad (23)$$

oraz

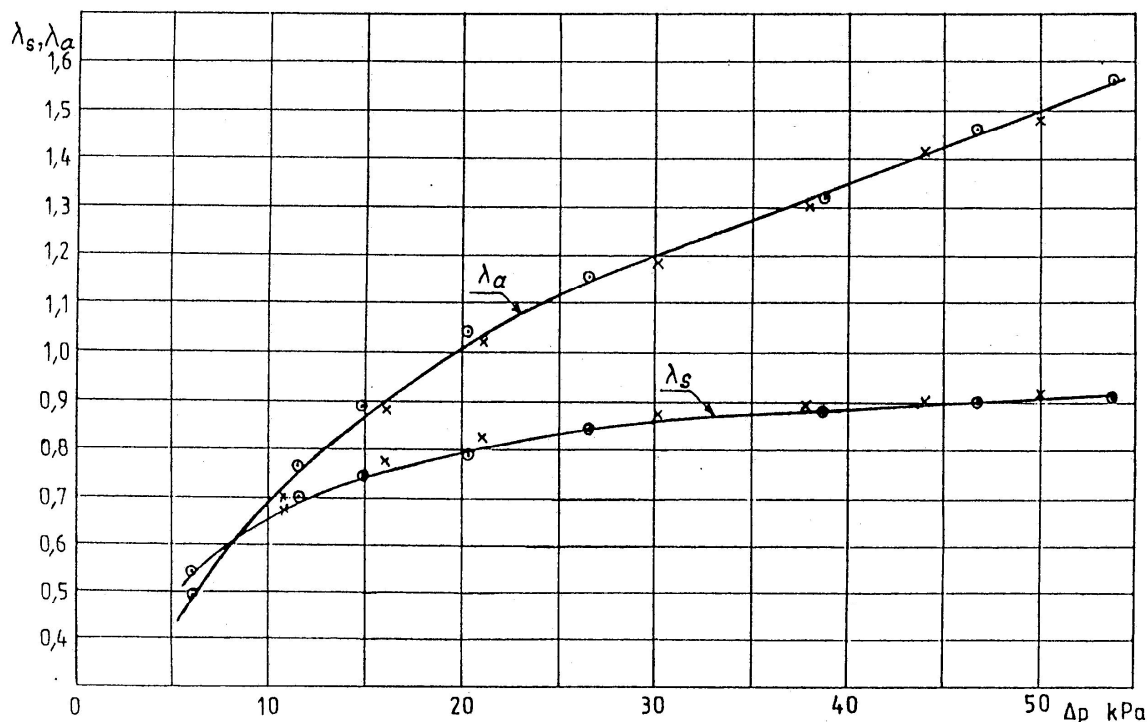
$$\frac{v_s}{v_p} = \frac{33}{11} = 3, \quad (24)$$

$$\frac{v_a}{v_t} = \frac{1,74}{0,595} = 2,93. \quad (25)$$

Rysunek 2 przedstawia wyniki pomiarów współczynnika napełnienia η_v i współczynnika ilości powietrza ładującego λ_t w funkcji różnicy ciśnień Δp przed oknami dolotowymi p_d i na wylocie z głowicy p_s , gdzie

$$\Delta p = p_d - p_s, \quad (26)$$

przy zastosowaniu dwóch zestawów cieczy 1 i 2.



Rys. 2. Współczynniki wymiany ładunku η_v i λ_t w funkcji ciśnienia przepłukania Δp z zastosowaniem dwóch zestawów cieczy:

o - metanol-trójchloroetylen, x - metanol-roztwór wodny NaCl

Źródło: Opracowanie własne Autora

Fig. 2. Charge exchange coefficients η_v i λ_t as a function of the rinse pressure Δp using two sets of fluid:

o - methanol-trichlorethylene, x - methanol-water solution NaCl

Source: Elaboration of the Author

Pierwszy z nich, wymieniony wyżej tri-metanol, spełniał kryteria podobieństwa, drugi nie, gdyż stosunek gęstości:

$$\frac{\rho'_2}{\rho'_1} = \frac{793}{1160} = 0,68. \quad (27)$$

Stosunku lepkości tego zestawu nie określono, ponieważ nie ma on istotnego znaczenia.

Widoczne na rysunku 2 różnice wartości wyników pomiarów są nieznaczne i mieszają się w granicach błędów pomiarów. Można więc przyjąć, że przebiegi wymiany ładunku uzyskane przy użyciu zestawu cieczy nie spełniających określonych kryteriów podobieństwa są identyczne jak przy zastosowaniu cieczy spełniających wymagane warunki, to jest warunek (20) i warunek (21) oraz

$$Re = Re' \quad (28)$$

a ponadto warunki (18) i (19).

5. Wnioski

- Przedstawione wyniki badań potwierdzają możliwość uzyskiwania dostatecznie dokładnych informacji dotyczących procesu wymiany ładunku przy nie całkowicie spełnionych warunkach podobieństwa modelowego.

- Istnieje też możliwość badań innych rodzajów procesów zachodzących w silniku przy niepełnym podobieństwie modelowym. Przykładem mogą być badania przy użyciu cieczy procesu rozprzestrzeniania się strugi paliwa płynnego wtrysniętego do komory spalania, tworzenia mieszanki powietrzno-paliwowej jak i spalania w cylindrze silnika o zapłonie samoczynnym, wykonane w firmie Sulzer [5].
- Dzięki zrezygowaniu z praw podobieństwa o małym znaczeniu możliwe było spełnienie warunków o dominującej roli w rozpatrywanych zjawiskach.

Literatura

- [1] Bukowski J.: *Mechanika płynów*. Warszawa: PWN, 1970.
- [2] Dedeoglu N.: *Beitrag zur Klärung der Strömungsprobleme bei der Spülung und Gemischbildung im Gasmotor mit Hilfe Modeluntersuchungen*. Motortechnische Zeitschrift 1969, Vol. 30, No. 1.
- [3] Litke B.: *Badania wymiany ładunku w cylindrze metodą modelowania cieczowego w zastosowaniu do silników dwusuwowych o przepłukaniu wzdłużnym*. Praca doktorska, Politechnika Szczecińska, Szczecin 1975.
- [4] Litke B.: *Badania układów wymiany ładunku silników dwusuwowych o przepłukaniu wzdłużnym metodą modelowania cieczowego*. Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej Nr 519, Wyd. Politechniki Szczecińskiej, 1995.
- [5] Lustgarten G.: *Modelluntersuchungen zur Gemischbildung und Verbrennung im Dieselmotor*. Sulzer-Forschungsheft, 1974.
- [6] Müller L.: *Teoria podobieństwa mechanicznego*. Warszawa: WKiŁ, 1961.
- [7] Stoffel R.: *Weiterentwicklung von Spülung und Turboaufladung der Sulzer-RD Motoren*. Motortechnische Zeitschrift, Vol. 24, No. 11.