

THE MEASURING VERIFICATION OF NUMERICAL SIMULATION AIRFLOW IN COMBUSTION ENGINES INLET TRACK

Czesław Kolanek, Marcin Tkaczyk

Politechnika Wroclawska
Wydział Mechaniczny
Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn
Zakład Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych
ul. Łukasiewicza 7/9; 50-371 WROCLAW
tel./fax: +4871 3477918
e-mail marcin.tkaczyk@pwr.wroc.pl

Abstract

This work contains description of air velocity area in combustion engines cylinder during filling stroke. The values was determined in two stages of flow simulation. First- the simulation of filling the cylinder on laboratory place connect with measurement of velocity distribution of air in cylinder. Second stage – the simulation of flow used numerical program Fluent, based on finite of volume methods. Achieved the analysis of errors appearing during the measurements and numerical way. Made an investigation of comparative analysis of simulation results and determined the numerical description methods the airflow in combustions engines inlet tracks. Schemat stanowiska pomiarowego, stanowisko do pomiaru rozkładu prędkości w cylindrze, wektorowe pole prędkości w układzie dolotowym silnika VW 1,9 TDI, wykresy pola prędkości V_Y oraz V_Z na płaszczyźnie xy , oraz porównanie wartości pozyskanych na drodze pomiarowej i analitycznej są przedstawione artykule. Scheme of measuring stand, measuring stand distribution of velocity in cylinder, The vectorial velocity field in inlet system of the VW 1,9 TDI engine, diagrams of velocity field V_Y and V_Z on xy plane, comparison the values get in measurement and numerical way are presented in the paper. Introduced method can be useful for the simulation of the air flow in the intake of the engine and to the similar class systems.

Keywords: combustion engines, combustion processes, modelling

POMIAROWA WERYFIKACJA NUMERYCZNEJ SYMULACJI PRZEPŁYWU POWIETRZA W UKŁADZIE DOLOTOWYM SILNIKA SPALINOWEGO

Streszczenie

Praca zawiera opis pola prędkości powietrza w cylindrze silnika spalinowego podczas suwu napełniania. Przedstawione wielkości zostały wyznaczone w dwóch etapach symulacji przepływu. Pierwszym była symulacja napełniania cylindra na stanowisku laboratoryjnym połączona z pomiarami rozkładu prędkości powietrza we wnętrzu cylindra. Drugi etap, to symulacja wspomnianego przepływu z wykorzystaniem numerycznego programu Fluent, opartego na metodzie objętości skończonych. Dokonano analizy błędów pojawiających się na drodze pomiarowej jak i numerycznej. Przeprowadzono analizę porównawczą wyników symulacji, na podstawie której określono wytyczne co do sposobu opisu numerycznego przepływu powietrza w układach dolotowych silników spalinowych. Schemat stanowiska pomiarowego, stanowisko do pomiaru rozkładu prędkości w cylindrze, wektorowe pole prędkości w układzie dolotowym silnika VW 1,9 TDI, wykresy pola prędkości V_Y oraz V_Z na płaszczyźnie xy oraz porównanie wartości pozyskanych na drodze pomiarowej i analitycznej są przedstawione artykule. Przedstawiona metoda może być przydatna do symulacji przepływu powietrza w układzie dolotowym silnika oraz w odniesieniu do układów o podobnej klasie.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, procesy spalania, modelowanie

1. Wstęp

Rozwój motoryzacji jest determinowany (między innymi) przez wyniki prac nad poprawą ogólnej sprawności silników napędowych.

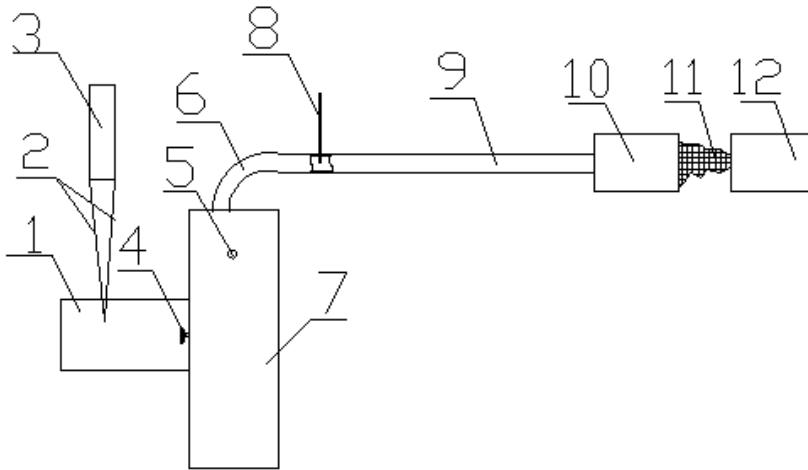
Jedną z dróg osiągnięcia wyższej sprawności silnika spalinowego prowadzi poprzez zwiększenie napełnienia cylindrów powietrzem jak również wytworzenie przepływu sprzyjającego osiągnięciu oczekiwanego przez konstruktora rozkładu mieszanki paliwowo powietrznej. Konstrukcja układu dolotowego o niskim oporze przepływu, w oczekiwany sposób formującego strugi powietrza jak również umożliwiającego wykorzystanie zjawisk falowych powstających podczas pracy silnika do celów poprawy napełnienia frapowała projektantów. Koszty ponoszone na badania laboratoryjne zachęcały do podejmowania prób matematycznego opisu zjawisk występujących w układach dolotowych. Niestety, większość prób analityczno-obliczeniowego ujęcia procesu napełniania cylindra silnika spalinowego, bazowała na założeniach upraszczających, co powodowało niską dokładność, w następstwie nieprzydatność ich wyników do celów praktycznych. Wprowadzone dawno temu matematyczne opisy zjawisk fizycznych, implementowane na siatki numeryczne ze względu na niską wydajność maszyn obliczeniowych, stosowane były do zagadnień jedno- lub dwuwymiarowych [3]. Zauważalny w ostatnich czasach szybki rozwój maszyn obliczeniowych wraz z doskonaleniem komercyjnych programów numerycznych umożliwia aplikacje opisu matematycznego do zastosowań w technice. Rozwój symulacji 3D jest najbardziej owocnym rozwiązaniem opisu pracy urządzeń o złożonej geometrii. Zawsze jednak powstaje pytanie o dokładność wyników obliczeń numerycznych. Przykładem opisu matematycznego zjawisk przepływu jest wykorzystanie komercyjnego oprogramowania o nazwie Fluent do wyznaczania rozkładu prędkości strug powietrza zasilaających cylinder silnika spalinowego i doświadczalna weryfikacja wyników obliczeń przy wykorzystaniu anemometrii laserowej.

2. Eksperyment laboratoryjno-numeryczny

Eksperyment laboratoryjno-numeryczny obejmował wyznaczenie prędkości przepływającego powietrza w uproszczonym modelu układu dolotowego silnika spalinowego VW 1.9 TDI (rys. 1) oraz symulację numeryczną laboratoryjnego układu dolotowego. Uproszczenie zastosowane w laboratoryjnym modelu polegało na sposobie wywołania przepływu powietrza od wlotu kolektora dolotowego przez kanały przewodu dolotowego do cylindra silnika. Pominięcie tłoka i usytuowanie w jego miejscu wylotu umożliwiło wytworzenie warunków podobnych do panujących w funkcjonującym silniku podczas suwu napełnienia, gdy wał korbowy obróci się o ćwierć obrotu. By przepływ zbliżyć do przepływu występującego w pracującym silniku układ pomiarowy rozszerzono o wyznaczenie, a następnie korekcję prędkości w przewodzie łączącym wentylator z kolektorem. W związku z przyjętymi założeniami część badawcza obejmowała pomiar: uśrednionej prędkości za wentylatorem kanałowym i chwilowe rozkłady prędkości we wnętrzu cylindra.

Zbudowano stanowisko pomiarowe (rys.1), które zgodnie z kierunkiem przepływu powietrza, składa się z następujących elementów:

- Wytwornicy mgły parafinowej (12) Alpha F-80Z firmy Antari. Wybrano taki sposób barwienia płynu (11) ze względu na niewielką zmianę parametrów powietrza, którego prędkość wyznaczano.
- Wentylatora kanałowego (10) o podwyższonym sprężu, dobranego pod względem ciśnienia i wydajności tak, by wywoływał jeden z przepływów występujących w silniku spalinowym. Wentylator był połączony z kolektorem dolotowym (6) przewodem (9), którego stosunek długości h , do średnicy d przewodu przekraczał 12 ($h/d > 12$). Wymieniony zabieg poczyniono w celu zniwelowania zaburzeń w przepływie powietrza na skutek zawirowań od wentylatora (10).



Rys.1. Schemat stanowiska pomiarowego –opis elementów w tekście poniżej
 Fig. 1. Scheme of measuring stand

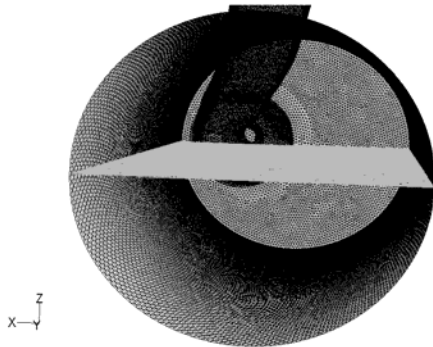
- Punktu pomiarowego (8) przystosowany do zamontowania termooanemometru, z którego użyciem przeprowadzono pomiar uśrednionej prędkości we wnętrzu przewodu łączącego wentylator kanałowy (10) z kolektorem dolotowym (8).
- Układu dolotowego silnika spalinowego 1.9 TDI wraz z cylindrem. W skład konstrukcji wchodził: kolektor dolotowy (6), głowica silnikowa (7) z zaworami (4), wałkiem rozrządu (5) i elementami przenoszącymi napęd. Cylinder silnika (1) został wykonany ze szkła organicznego, umożliwiające wizualizacje zjawisk przepływowych.
- Sondy anemometru laserowego (3) wysyłająca promienie laserowe (2).
- Dwukanałowy anemometr laserowy firmy Dantec.

Wyznaczono z użyciem termooanemometru wartość prędkości powietrza $v = 7$ m/s we wnętrzu przewodu łączącego wentylator kanałowy z kolektorem dolotowym (rys.1).

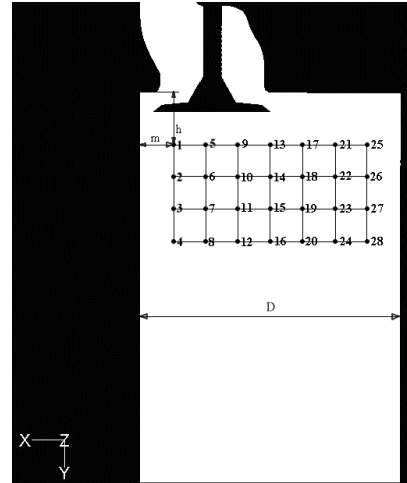
Przeprowadzono pomiary we wnętrzu cylindra z użyciem anemometru laserowego (rys. 4). Zakres pomiarowy obejmował wyznaczenie składowych prędkości V_Y , V_Z powietrza w punktach znajdujących się na płaszczyźnie xy (rys. 3). Zdecydowano się na płaszczyznę leżącą w osi symetrii i średnicy cylindra (rys. 2).

Przyjęto plan pomiarowy wyznaczania prędkości w dwudziestu ośmiu punktach rozmieszczonych co 10mm względem siebie (rys. 3). Punkt nr 1 został usytuowany w odległości $h=17$ mm od płaszczyzny głowicy i $m=10$ mm od wewnętrznej powierzchni tulei cylindrowej o średnicy $D=\text{Ø}80$ mm.

Część numeryczna doświadczenia polegała na transformacji geometrii laboratoryjnego modelu na postać cyfrową, szczegółowo opisanego w pracy [1]. Następnie symulacja obejmowała stacjonarny przepływ powietrza od wlotu kolektora dolotowego poprzez kanały w głowicy, cylinder silnika do wylotu, za który przyjęto przekrój cylindra odpowiadający położeniu denka tłoka w DMP (rys. 5). Skomplikowany kształt objętości ograniczającej przepływające powietrze w symulowanym układzie, oraz potrzeba uzyskania dokładnych wyników obliczeń rozkładu prędkości w cylindrze silnika, skłoniły do możliwie wiernego odwzorowania geometrii. Celowym było wykorzystanie maszyn współrzędnościowych wykazujących dokładność pomiaru rzędu mikrometrów, a co najważniejsze wyznaczających wymiary przedmiotów o kształcie nieforemnym.



Rys. 2. Widok przyjętej płaszczyzny pomiarowej *xy*
Fig. 2. The view of cylinder with *xy* measurement plane



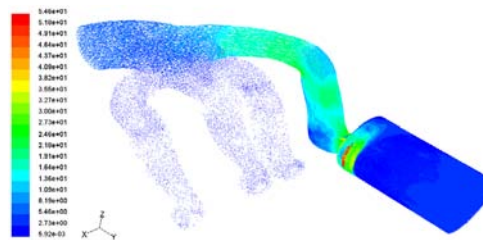
Rys. 3. Widok schematu pomiarowego na płaszczyźnie *xy*
cylindra zawierające 4 wiersze i 7 kolumn
Fig. 3. Scheme of points in *xy* measurement plane

Budowa modelu numerycznego obejmowała:

- odwzorowanie elementów wnętrza układu dolotowego
- transformację geometrii do postaci numerycznej
- połączenie elementów układu
- dyskretyzowanie trójwymiarowej przestrzeni obliczeniowej
- określenie warunków brzegowych
- wybór opisu zjawisk fizycznych
- wybór sposobu aplikacji równań różniczkowych
- przeprowadzenie obliczeń
- wizualizację wyników obliczeń.



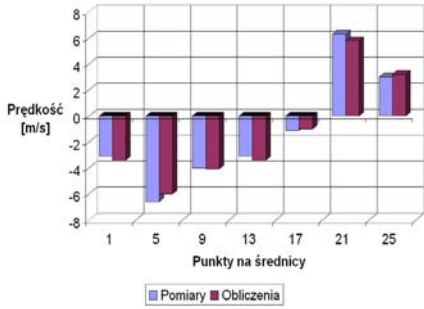
Rys. 4. Stanowisko do pomiaru rozkładu prędkości
w cylindrze
Fig. 4. Measuring position distribution of velocity
in cylinder



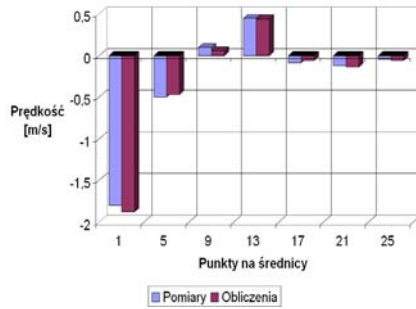
Rys. 5. Wektorowe pole prędkości w układzie dolotowym silnika
VW 1.9 TDI
Fig. 5. The vectorial velocity field in inlet system of the VW 1,9
TDI engine

W przygotowanym modelu zadano warunki odpowiadające przepływowi powietrza w stanowisku laboratoryjnym [2].

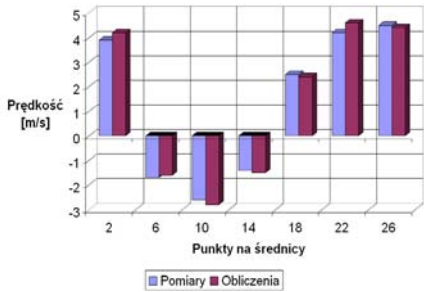
Przyjęto wartości: gęstości powietrza $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$ w temperaturze 297 K, lepkość dynamiczna $\eta=1,7894\text{E-}05 \text{ Pa s}$. Ze względu na liczbę Reynoldsa, której wartość obliczono $\text{Re}=23961$ model przepływu przyjęto jako turbulentny. W pierwszym podejściu obliczeniowym zrezygnowano z



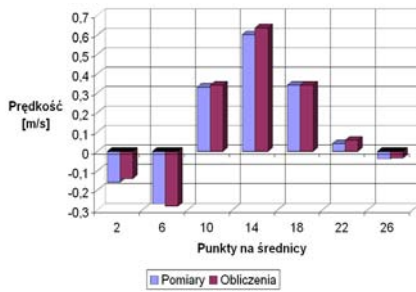
a) Wiersz pierwszy składowa prędkości Y.



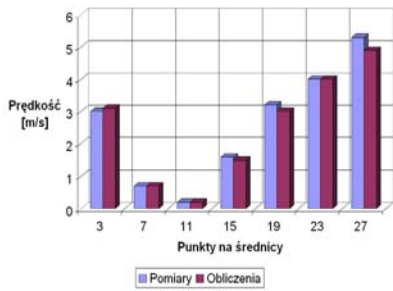
e) Wiersz pierwszy składowa prędkości Z.



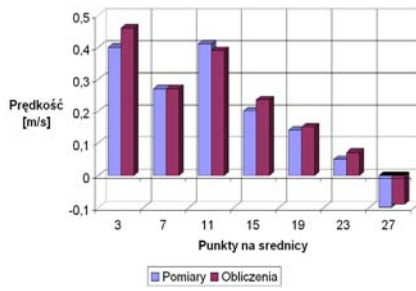
b) Wiersz drugi składowa prędkości Y.



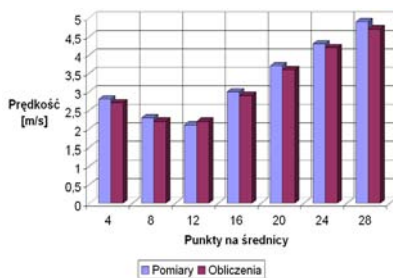
f) Wiersz pierwszy składowa prędkości Z.



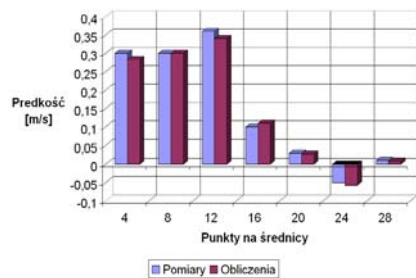
c) Wiersz trzeci składowa prędkości Y.



g) Wiersz pierwszy składowa prędkości Z.



d) Wiersz czwarty składowa prędkości Y.



h) Wiersz pierwszy składowa prędkości Z.

Rys. 6. Wykresy pola prędkości V_Y oraz V_Z na płaszczyźnie xy , porównanie wartości pozyskanych na drodze pomiarowej i analitycznej

Fig. 6. Diagrames of velocity field V_Y and V_Z on xy plane, comparison the values get in measurement and numerical way

zastosowania oferowanego przez program „Fluent” modułu „energy”, a tym samym – z uwzględniania zjawiska przekazywania ciepła.

Obliczenia przeprowadzono w trybie numerycznej dokładności z sześciocyfrową mantysą; jako kres obliczeń przyjęto osiągnięcie przez rozwiązanie numeryczne względem algebraicznego rozwiązania dokładnego zbieżności rzędu 10^{-5} . Zadana dokładność osiągnięto w 400-tu krokach obliczeniowych.

Poniżej przedstawiono fragment stanowiska pomiarowego (rys.6) oraz numeryczną postać tego stanowiska z wektorowym rozkładem prędkości 3D (rys.7).

3. Analiza porównawcza wyników

Wyniki porównania pomiarów rejestrowane i opracowane z dokładnością do setnej części metra na sekundę oraz wyniki obliczeń zaokrąglone do setnej części metra na sekundę zostały porównane (rys. 9). Biorąc pod uwagę składową prędkości Y rozbieżność między pomiarami a obliczeniami wynosi: minimalna 0%, maksymalna 12%, średnia arytmetyczna rozbieżności wartości prędkości z 28 punktów to 6,3%. Analizując składową Z otrzymujemy rozbieżności: min 0%, maksymalna 30%, średnia arytmetyczna rozbieżności wartości prędkości to 10,6%.

4. Wnioski

Przedstawiona metoda jest przydatna do symulacji przepływu powietrza w układzie dolotowym silnika i podobnej klasie układów.

Na dokładność wyniku składają się błędy numeryczne zbieżności rozwiązania dyskretnego z dokładnym, które występują zawsze, ponadto są powiększone o błędy wynikłe z niedoskonałości siatki numerycznej dyskretyzującej model obliczeniowy. Poprawność geometrii modelu obliczeniowego jest sumą dokładności skanowania odlewu wnętrza układu dolotowego oraz obróbki numerycznej modelu.

Część pomiarowa doświadczenia charakteryzuje się błędami występującymi na drodze optycznej, rejestrowaniu impulsów przez fotoelement oraz ich następnym przetworzeniu do postaci cyfrowej. Zaburzeniem przepływającego czynnika przez dym konieczny dla rejestracji ruchu.

Literatura

- [1] Elsner, J. W., Drobniak, S., *Metrologia turbulencji przepływów*, Zakład Narodowy im. Ossolińskich Wrocław-Warszawa-Kraków, 1995.
- [2] Tkaczyk, M., *Symulacja przepływu w układzie dolotowym silnika spalinowego*. Górnictwo odkrywkowe Nr 7-8 (str. 175-178), Wrocław 2006.
- [3] Wislocki, K., *Systemy doładowania szybkoobrotowych silników spalinowych*, Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1991.