ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1995
Seria: TRANSPORT z.24 Nr kol.1268

Jan FILIPCZYK
Eugeniusz KRZEMIEŃ

BADANIA SYMULACYJNE PRZEPŁYWU CZYNNIKA ROBOCZEGO PRZEZ UKŁAD DOLOTOWY SILNIKA ZI ZASILANEGO GAZEM

Streszczenie. Podjęto próbę opracowania metodyki wyznaczania parametrów przepływu czynnika roboczego przez układ dolotowy silnika o zapłonie iskrowym, zasilanego paliwami płynnymi odparowanymi w procesie napełniania cylindra lub gazowymi, ze szczególnym określeniem wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych układu dolotowego na napełnienie cylindrów. Opracowano na podstawie ogólnie znanych zależności model obliczeniowy zmian wartości współczynnika napełnienia w zależności od wartości parametrów konstrukcyjnych i własności czynnika roboczego. Przeprowadzono badania symulacyjne wrażliwości modelu na zmianę podstawowych parametrów konstrukcyjnych oraz dokonano weryfikacji wyników na modelu fizycznym. Przeprowadzono badania na stanowisku hamownianym z uwzględnieniem zmian parametrów konstrukcyjnych układu dolotowego dla paliwa gazowego.

SIMULATION STUDIES ON MIXTURE FLOWING THROUGH GAS FED SI ENGINE INLET MANIFOLG

Summary. We have represented the trial of carrying out the method of defining parameters of mixture flowing through an inlet manifold of SI engines fed with liquid fuel vaporized in the process of filling a cylinder or gas fuels with particular defining the influence of selected design parameters of an inlet manifold on cylinder filling. The computing model was designed for changes of filling coefficient value in relation to design parameter values and mixture properties.

Simulation studies on model sensitiveness to changes of main design parameters and results verification was carried out on physical model. Tests were carried out on a dynamometr stand taking into considerationthe changes of an inlet manifold design parameters for gas fuel.

1. WPROWADZENIE

O efektywności pracy silnika w głównej mierze decyduje stopień napełnienia cylindrów. Możliwie duże napełnienie cylindrów silnika wytwarzaną mieszanką paliwowo-powietrzną można uzyskać przede wszystkim na drodze odpowiedniego dopracowania konstrukcyjnego układów dolotowego i wylotowego. Optymalizacja pod względem aerodynamicznym poszczególnych elementów konstrukcyjnych układu dolotowego umożliwia ograniczenie oporów przepływu mieszanki oraz wykorzystanie doładowania dynamicznego.

2. MODEL OBLICZENIOWY

Przyjmując, że proces wymiany ładunku odbywa się zgodnie z suwami napełnienia i opróżnienia, otrzymuje się zależność na stopień napełnienia w postaci

$$\eta_v = \frac{\varepsilon\ p_1 T_0}{\varepsilon - 1 p_0 T_1} - \frac{1\ p_2 T_0}{\varepsilon - 1 p_0 T_2}, \tag{1}$$

gdzie indeksy oznaczają:

1 - parametry końca procesu napełnienia,

2 - parametry końca procesu opróżniania,

0 - parametry odniesienia.

Ze względu na uzależnienie całego procesu wymiany ładunku od warunków przepływowych można przyjąć, że zależność między parametrami jest izentropowa, tzn.

$$\frac{T_1}{T_0} = \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}} \qquad \frac{T_2}{T_0} = \left(\frac{p_2}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}} \tag{2}$$

Po przekształceniach (1) otrzymuje się:

$$\eta_v = \frac{\varepsilon}{\varepsilon\ 1}\left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{1}{k}} - \frac{1}{\varepsilon\ 1}\left(\frac{p_2}{p_0}\right)^{\frac{1}{k}} \tag{3}$$

Zmiany ciśnień p_1 i p_2 odbywają się względem p_0, a przyrosty ich wartości wynikają z oporów przepływu:

$$p_1 = p_0 - \Delta p_1 \tag{4}$$

$$p_2 = p_0 - \Delta p_2$$

Stopień napełnienia osiąga wartość równą 1, jeżeli natężenie przepływu przez silnik w czasie przemieszczania tłoka od ZZP do WZP ze średnią prędkością wynosi

$$m = V_{ss}\rho_{00}\frac{n}{30} \tag{5}$$

Korzystając z równania ciągłości dla przepływu przez szczelinę zaworową można zapisać, że

$$\frac{n}{30}V_{ss} = A_2\omega_2, \tag{6}$$

skąd prędkość przepływu przez szczelinę wyraża się wzorem:

$$\omega_2 = \frac{V_{ss}}{A_2}\frac{n}{30}, \tag{7}$$

gdzie:

A_z - pole szczeliny zaworowej.

Przyrost ciśnienia stanowi stratę powstałą na skutek oporów przepływu:

$$\Delta p = (1 + \zeta)\frac{\rho_0\omega_2^2}{2}, \tag{8}$$

gdzie:

ζ - współczynnik strat ciśnienia.

W przypadku przepływu nieściśliwego między μ_z a ζ istnieje związek:

$$\mu_z = \frac{1}{\sqrt{1+\zeta}} \tag{9}$$

Przekształcając (8) można otrzymać

$$\Delta p = \frac{1}{\mu_z^2}\frac{\rho_0}{2}\left(\frac{V_{ss}}{30A_2}\right)^2 n^2 \tag{10}$$

$$\eta_v = \frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}\left[1-\frac{1}{\mu_{zd}^2}\frac{\rho_0}{2\rho_0}\left(\frac{V_{ss}}{30A_{zd}}\right)^2 n^2\right]^{\frac{1}{k}}+\frac{1}{\varepsilon-1}\left[1+\frac{1}{\mu_{zw}^2}\frac{\rho_0}{2\rho_0}\left(\frac{V_{ss}}{30A_{zw}}\right)^2 n^2\right]^{\frac{1}{k}} \tag{11}$$

gdzie:

μ_{zd}, A_{zd}, A_{zw} - odpowiednio: współczynnik przepływu i pole szczeliny zaworowej układu dolotowego i wylotowego.

Moc potrzebną do pokonania oporów przepływu przez poszczególne układy opisuje zależność:

$$p = \Delta p v, \tag{12}$$

gdzie:

v - objętościowe natężenie przepływu.

Biorąc pod uwagę (5), zależność na rzeczywistą wartość v przyjmuje postać:

$$v = \mu_z V_{ss}\frac{n}{30} \tag{13}$$

Z zależności (10) i (13) otrzymuje się zależność na moc potrzebną do pokonania oporów przepływu w postaci

$$\Delta p = \frac{1-\mu_2^2}{\mu_z^2}\left(\frac{V_{ss}}{30}\right)^3\frac{\rho_0}{2A_z^2}n^3 \tag{14}$$

Jako wartości średnie współczynnika przepływu i pola szczeliny zaworowej można przyjąć wartości odpowiadające średniej prędkości tłoka lub obliczone za pomocą zależności

$$\overline{u}_z = \frac{1}{\alpha_2-\alpha_1}\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} u_z(\alpha_1)\,d\alpha_1,$$

$$\overline{A}_z = \frac{1}{\alpha_2-\alpha_1}\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} A_z(\alpha_1)\,d\alpha_1, \tag{15}$$

gdzie:

$\mu_z(\alpha_1)$, $A_z(\alpha_1)$ - wartość współczynnika przepływu i pola szczeliny zaworowej w zależności od kąta OWK,

α_1, α_2 - odpowiednio kąty otwarcia i zamknięcia zaworu.

Ciśnienie czynnika roboczego przed zaworem dołotowym jest sumą ciśnienia statycznego, ciśnienia od sił bezwładności oraz od drgań powstających w układzie dolotowym przemieszczającego się słupa powietrza lub mieszanki.

Wartość ciśnienia czynnika roboczego w zależności od drgań można obliczyć rozwiązując równanie:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 = P_1\alpha_{tt}$$

$$P_1 = \frac{3V_0}{V_k + 3V_c} \tag{16}$$

$$\omega_0 = \frac{\alpha}{l}\sqrt{\frac{3V_k}{V_k+3V_c}}$$

Dla zakresu pod- i nadkrytycznego rozwiązanie przyjmie postać:

$$x(l) = \frac{P_1 R\omega^2\cos(\omega t)}{\omega_0^2-\omega^2}, \tag{17}$$

gdzie:

ω_0 - częstość drgań własnych,

ω - częstość siły wymuszającej drgania.

Dla zakresu krytycznego

$$x(l) = 0{,}5RP_1\omega t\,\sin(\omega t) \tag{18}$$

Ciśnienia czynnika przed zaworem dolotowym można określić wzorem:

$$\Delta p_d \cong \sigma K_p \varepsilon, \tag{19}$$

gdzie:

K_p - moduł ściśliwości powietrza,

ϵ - wydłużenie względne.

W postaci różniczkowej wydłużenie względne można wyrazić wzorem:

$$\varepsilon = \frac{\delta x_m}{\delta \mu} \tag{20}$$

Przy założeniu proporcjonalności przemieszczenia do odległości do przekroju bazowego można zapisać:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{l} \tag{21}$$

Ciśnienie dynamiczne powstałe w wyniku drgań czynnika roboczego można obliczyć z zależności:

dla zakresu pod- i nadkrytycznego

$$\Delta p_a = \rho_0 \alpha^2 \frac{P_1 R \omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \cos(\alpha t), \tag{22}$$

dla zakresu krytycznego

$$\Delta p_n = -0,5\rho),\alpha^2 P_1 R \omega t \sin(\omega t), \tag{23}$$

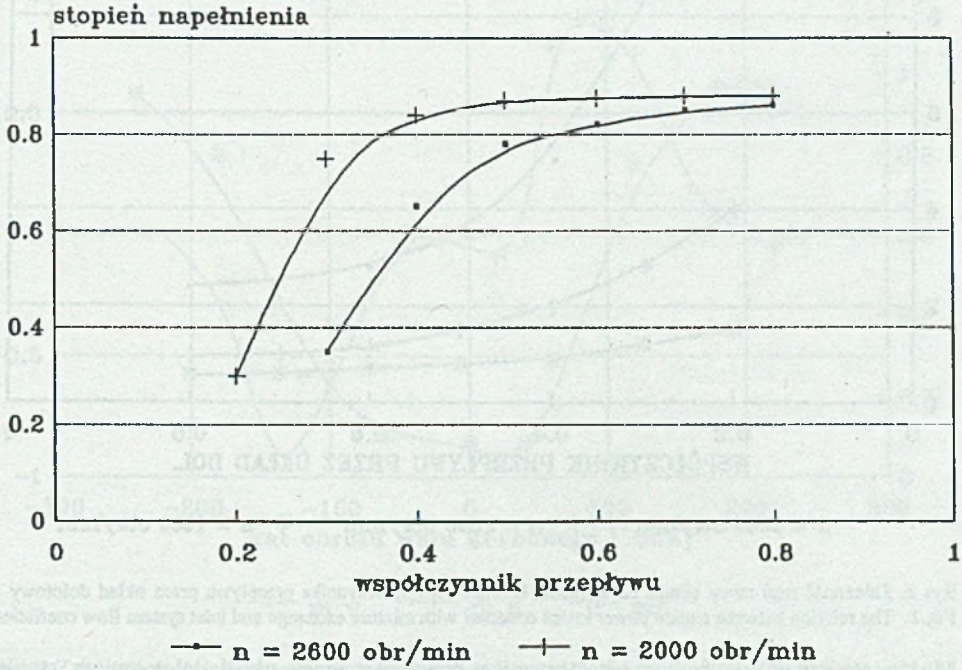
gdzie:

a - prędkość dźwięku.

Dla celów analizy porównawczej objętość układu dolotowego podzielono na element wspólny W i objętości indywidualne I dla poszczególnych cylindrów.

3. WYNIKI BADAŃ

Obiektem badań był silnik PERKINS AD3.152 adaptowany do zasilania paliwem gazowym, z elektronicznym zapłonem bezstykowym. Pomiarów parametrów przepływu przez układ dolotowy i ich wpływu na parametry eksploatacyjne silnika dokonano na hamownianym stanowisku badawczym.

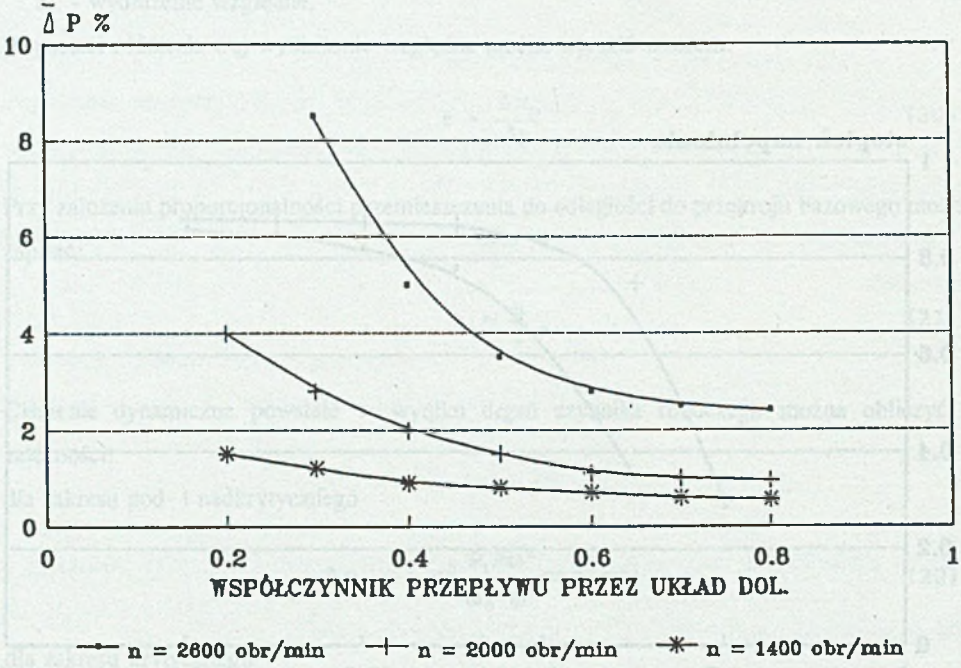


Rys.1. Zależność stopnia napełnienia od współczynnika przepływu układu dolotowego dla różnych wartości obrotowych

Fig.1. The relation between filling size and inlet system flow coefficient for different engine speed values

Na podstawie przyjętego modelu obliczeniowego dokonano numerycznej oceny wpływu poszczególnych parametrów układu dolotowego na stopień napełnienia cylindrów. Na rysunku 1

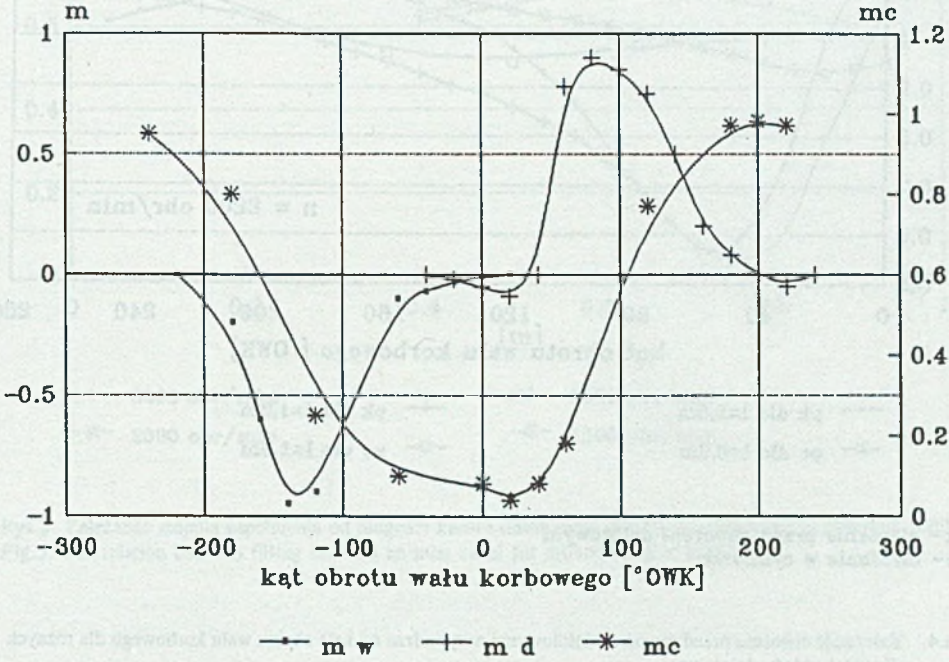
przedstawiono wyniki badania zależności stopnia napełnienia od współczynnika przepływu przez układ dolotowy dla różnych prędkości obrotowych. Na rysunku 2 przedstawiono obliczeniową zależność strat mocy silnika na wymianę ładunku od współczynnika przepływu przez układ dolotowy.



Rys.2. Zależność strat mocy silnika na wymianę ładunku od współczynnika przepływu przez układ dolotowy
Fig.2. The relation between engine power losses conected with mixture exchange and inlet system flow coefficient

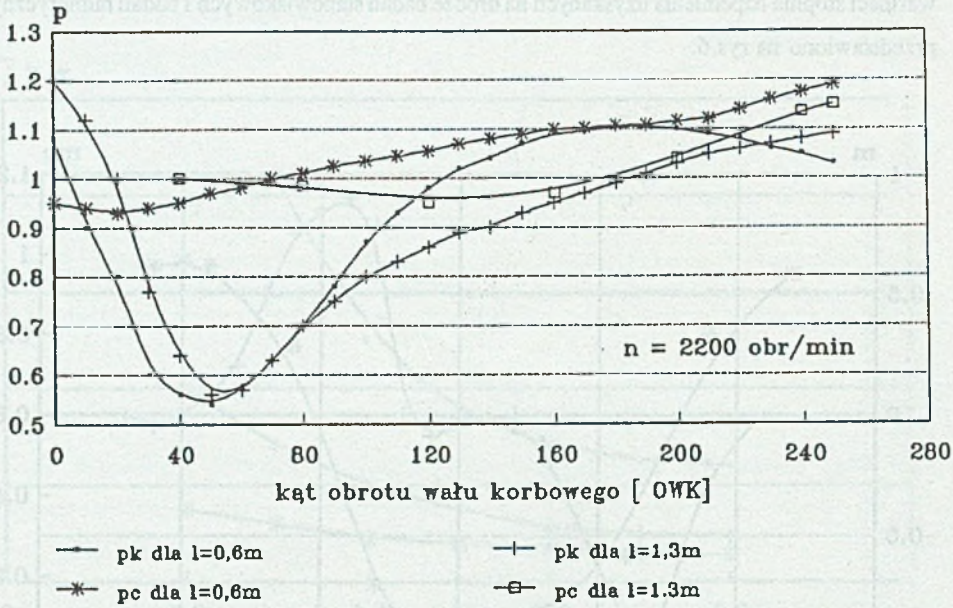
Można stwierdzić, iż wpływ współczynnika przepływu przez układ dolotowy na stopień napełnienia ma istotne znaczenie w przypadku dużych oporów przepływu. Na rysunku 3 przedstawiono zależność względnej wartości natężenia przepływu i masy ładunku w cylindrze od kąta obrotu wału korbowego. Rysunek 4 przedstawia zmianę ciśnienia czynnika roboczego przed zaworem dolotowym i w cylindrze dla różnych długości kanału dolotowego. Wyniki badań

pozwalają na wyznaczenie punktów efektywnego początku i końca napełnienia, co pozwala na właściwy dobór parametrów układu dolotowego i faz rozrządu. Na rysunku 5 przedstawiono zakres zamin stopnia napełnienia od długości układu dolotowego dla różnych prędkości obrotowych silnika, będący wynikiem badań silnika na stanowisku hamownianym. Porównanie wartości stopnia napełnienia uzyskanych na drodze badań stanowiskowych i badań numerycznych przedstawiono na rys.6.



Rys.3. Zależność względnej wartości natężenia przepływu i masy ładunku w cylindrze od kąta obrotu wału korbowego

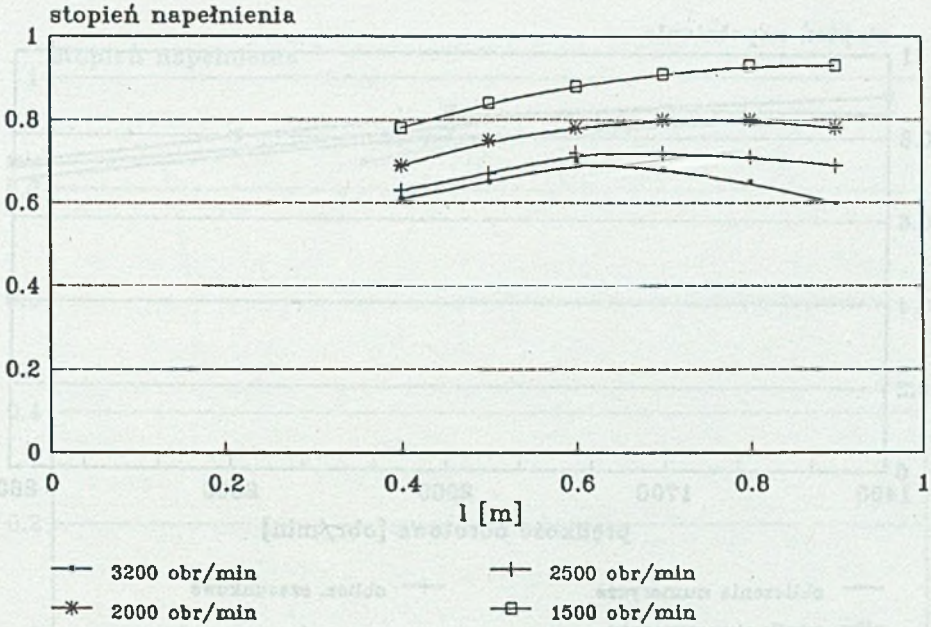
Fig.3. The relation between relative flow intensity value, mixture quantity in a cylinder and crank angle



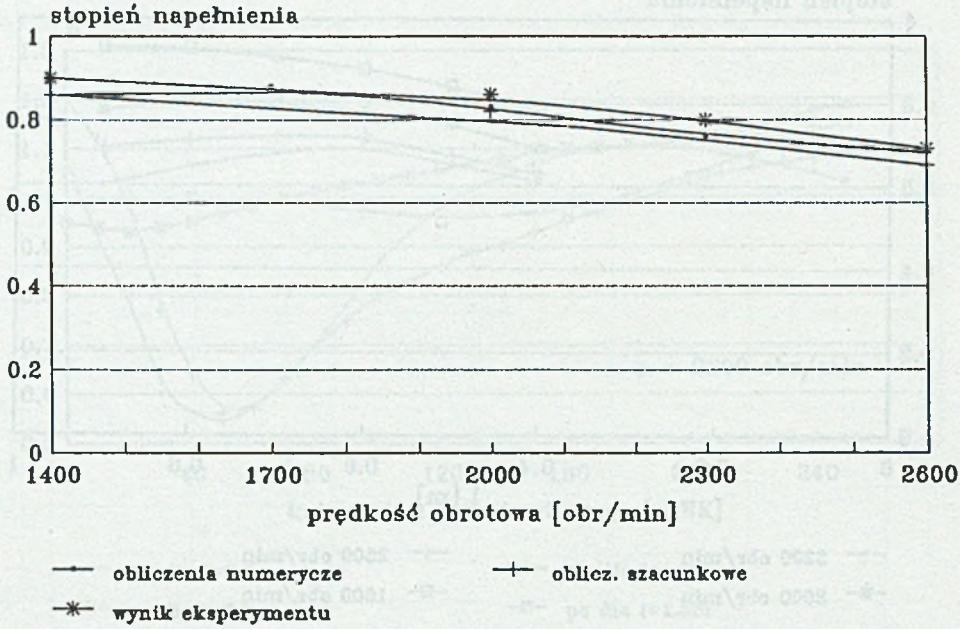
pk- ciśnienie przed zaworem dolotowym
pc- ciśnienie w cylindrze

Rys.4. Zależność ciśnienia przed zaworem dolotowym i w cylindrze od kąta obrotu wału korbowego dla różnych długości układu dolotowego

Fig.4. The relation between the pressure before inlet value and in a cylinder and crank angle for different lenght of inlet system



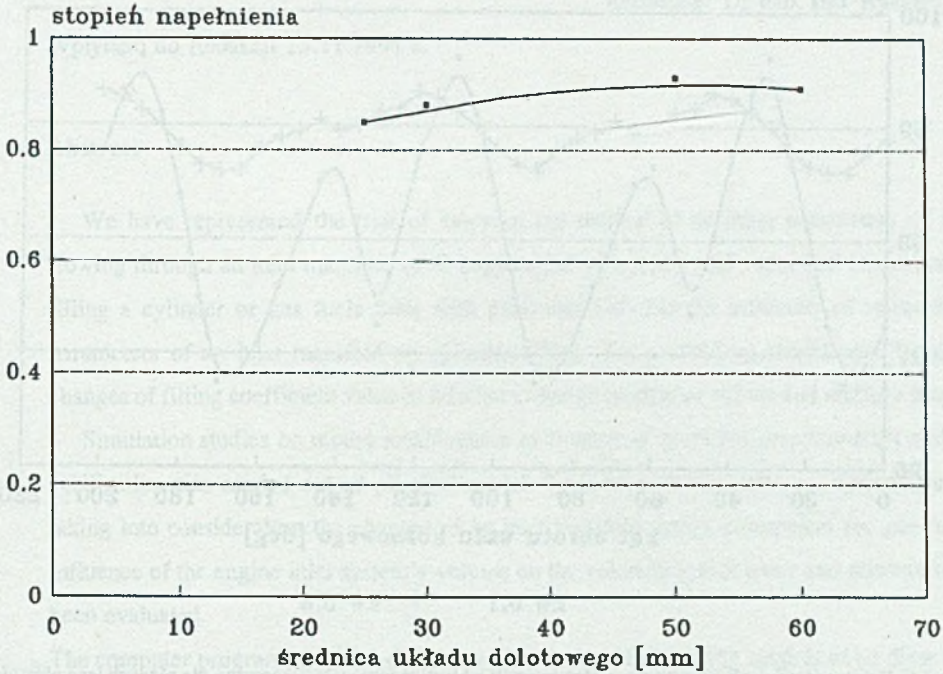
Rys.5. Zależność stopnia napełnienia od długości kanału dolotowego dla różnych prędkości obrotowych silnika
Fig.5. The relation between filling size and an inlet canal for different engine speed



Rys.6. Zależność stopnia napełnienia do prędkości obrotowej silnika
Fig.6. The relation between filling size and engine speed

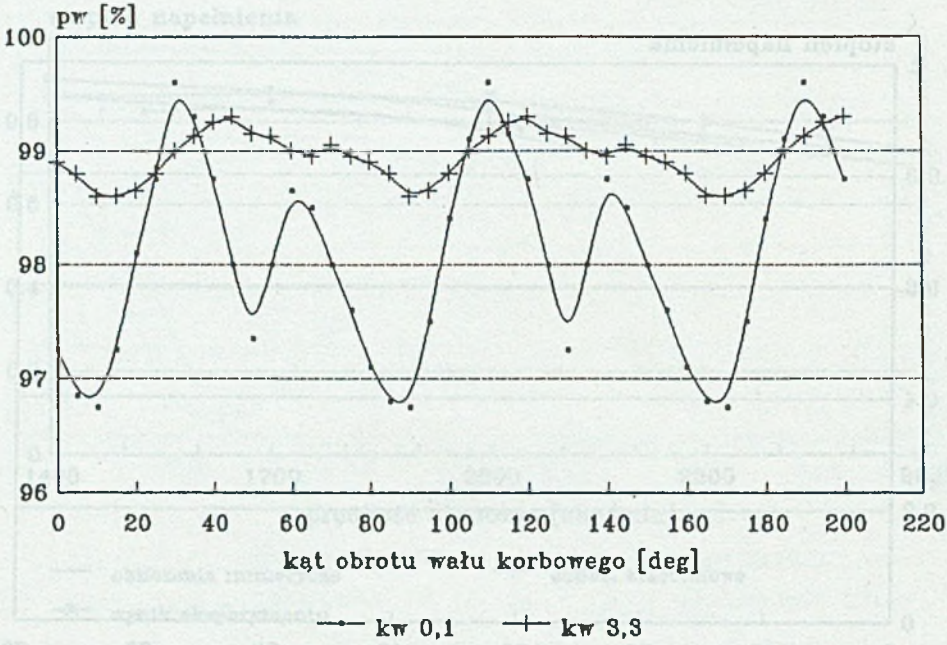
4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Jak wykazały badania, występuje związek pomiędzy długością układu dolotowego a optymalną średnicą kanałów. Dla każdej długości rezonansowej istnieje optymalna średnica zapewniająca maksymalne wartości stopnia napełnienia (rysunek 7). Jednak zakres zmian stopnia napełnienia w zależności od średnicy kanału dolotowego jest stosunkowo niewielki i przy prawidłowym obliczeniu średnicy, przy uwzględnieniu przepływu masy, może być pominięty.



Rys.7. Zależność maksymalnej wartości stopnia napełnienia do średnicy układu dolotowego
Fig.7. The relation between maximum filling size value with inlet manifold diameter

Na stopień napełnienia istotny wpływ ma rozdział objętości układu dolotowego na objętość wspólną i objętości indywidualne. Zwiększenie objętości wspólnej powoduje zwiększenie wartości średniej ciśnienia oraz zmniejszenie pulsacji w układzie dolotowym (rysunek 8). Stopień napełnienia osiąga największą wartość dla bardzo małej objętości indywidualnej, co w przypadku silników zasilanych gazem nie wpływa w sposób znaczący na rozdział mieszanki i jej jednorodność w poszczególnych cylindrach.



Rys.8. Zależność ciśnienia panującego w elemencie W od kąta obrotu wału korbowego dla różnych jego objętości
Fig.8. The influence of pressure in W element for its different volumes on crank angle

5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych numerycznych badań symulacyjnych i badań stanowiskowych przepływu czynnika roboczego przez układ dolotowy stwierdzono:

- odpowiednio dobranymi wielkościami poszczególnych objętości układu dolotowego można wpływać na stopień napełnienia cylindrów i warunki tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej,

- kryterium stopnia napełnienia nie może być pomijane przy stosowaniu kryterium jakości mieszanki w optymalizacji układu dolotowego i układu zasilania,
- wzrost objętości elementów układu dolotowego zmniejsza pulsację ciśnienia.

Recenzent: Dr hab. inż. Ryszard Barcik

Wpłynęło do Redakcji 15.11.1994 r.

Abstract

We have represented the trial of carrying out method of defining parameters of mixture flowing through an inlet manifold of SI engines fed with liquid fuel vaporized in the process of filling a cylinder or gas fuels fuels with particular defining the influence of selected design parameters of an inlet manifold on cylinder filling. The computing model was designed for changes of filling coefficient value in relation to design parameter values and mixture properties.

Simulation studies on model sensitiveness to changes of main design parameters and results verification was carried out on physical model. Tests were carried out on a dynamometr stand taking into consideration the changes of an inlet manifold design parameters for gas fuel. The influence of the engine inlet system's volume on the volumetric efficiency and mixture ratio has been evaluated.

The computer program has been designet on the basis of the existing models of air flow through the engine inlet system. Numerial research have made it possible, among others, to determine the influence of design on the working medium flow parameters and on the air-fuel mixture creation.