

The impact of design parameters of injection ducts on gas supply in the spark-ignition engine

This paper presents the research results on gas inlet pressure. Varied configurations of an injection system (varied duct diameters and lengths) and selected engine loads were investigated. The results were studied to specify how the desired time of a pulse to control an injector to provide a correct dose of gas is impacted by an internal diameter and length of injection ducts connecting a pulse gas injector and an inlet duct as well as a diameter of an injection nozzle installed at an intake duct wall. The significance of discrepancies in the mean values of the measurements was investigated and showed that gaseous and dynamic processes in a gas ducts can differ. Accordingly, as regarded engine design parameters, the course of injection in spark-ignition engines and thus the control error of mixture composition are impacted. Our study demonstrates that with increasing duct lengths and decreasing nozzle diameters, the time to inject gaseous fuels can be longer in relation to the time to inject gaseous fuels if an injector is directly connected to the intake duct.

Key words: combustion engine, propane-butane supply, gas piping

Wpływ parametrów konstrukcyjnych przewodów wtryskowych na proces zasilania gazem silnika o zapłonie iskrowym

W artykule przedstawiono wyniki badań ciśnienia w przewodzie gazowym. Badania wykonano dla różnych konfiguracji układu wtryskowego (średnica i długość przewodu) oraz wybranych warunków obciążenia silnika. Uzyskane wyniki poddano analizie pod kątem wpływu wartości średnicy wewnętrznej i długości przewodu gazowego łączącego impulsowy zawór gazu z przewodem dolotowym oraz wartości średnicy dyszy wtryskowej zamocowanej w ścianie przewodu dolotowego silnika na potrzebną wartość czasu impulsu sterującego wtryskiwaczem, gwarantującą podanie odpowiedniej dawki paliwa gazowego. Przeprowadzona analiza istotności różnic wartości średnich wykonanych pomiarów wykazała zróżnicowanie procesów gazodynamicznych w przewodzie gazowym. Zróżnicowanie to w zależności od parametrów konstrukcyjnych wpływa na przebieg wtrysku w silniku o zapłonie iskrowym. Tym samym wpływa na błąd sterowania składem mieszanki. Na podstawie analizy wyników wykazano, że zwiększająca się długość przewodu i zmniejszająca się średnica dyszy powodują zwiększenie czasu wtrysku paliwa gazowego w stosunku do wartości czasu wtrysku wtryskiwacza bezpośrednio połączony z przewodem dolotowym.

Słowa kluczowe: silnik spalinowy, zasilanie gazem propan-butan, przewody gazowe

1. Wprowadzenie

We wszystkich rynkowych rozwiązaniach układ zasilania paliwem gazowym jest systemem zależnym, w którym elektroniczny sterownik układu wtrysku paliwa gazowego wykorzystuje informacje elektronicznego sterownika układu wtrysku benzyny podczas pracy na gazie. Zadaniem układu sterowania wtryskiem gazu jest precyzyjne odmierzenie i podanie (wtrysnięcie) dawki paliwa do układu dolotowego silnika. Wtryskiwacz gazu w nielicznych rozwiązaniach jest zamontowany bezpośrednio w przewodzie dolotowym. Najczęściej połączony jest przewodem wtryskowym z dyszą wtryskową wkręconą do kolektora dolotowego. Świadectwo homologacji sposobu montażu instalacji przystosowującej dany typ pojazdu do zasilania gazem nie odnosi się do informacji o długości i średnicy przewodów gazowych czy średnicy dysz wtryskowych. Tym samym jedynie od doświadczenia monterów zależy dobór parametrów konstrukcyjnych instalacji gazowej w zakresie

montażu wtryskiwaczy w silniku. Dobór parametrów przewodu gazowego istotnie wpływa na pracę instalacji gazowej w samochodzie. Ponadto, można pozostawić w dalszym ciągu swobodę monterowi co do wartości parametrów konstrukcyjnych przewodu gazowego, pod warunkiem, że program sterujący wtryskiem będzie zawierał procedury korygujące czas wtrysku gazu od czynników konstrukcyjnych i warunków pracy.

Wartości średnicy wewnętrznej i długości przewodu gazowego łączącego impulsowy zawór gazu z przewodem dolotowym oraz wartość średnicy dyszy wtryskowej zamocowanej w ścianie przewodu dolotowego silnika istotnie wpływają na potrzebną wartość czasu impulsu sterującego wtryskiwaczem, gwarantującą podanie odpowiedniej dawki paliwa gazowego [5, 6, 8]. Kierując się względami praktycznymi, monter instalacji gazowej dobiera indywidualnie do montowanej instalacji samochodowej średnicę dyszy wtryskowej oraz jak najmniejszą długość przewodu gazowego.

Wtryskiwacz wkręcony bezpośrednio w ściankę przewodu dolotowego w stosunku do wtryskiwacza gazowego połączonego z przewodem dolotowym za pomocą przewodu gazowego może posiadać zmienioną charakterystykę dawkowania paliwa. Istnieje możliwość wprowadzenia procedur korygujących wartość czasu impulsu sterującego wtryskiwaczem w zależności od parametrów konstrukcyjnych gazowego przewodu dolotowego. Współczynnik korekcyjny k_{pld} funkcjonuje w równaniu:

$$t_{wtr} = t_{wtr}^M * k_{pld}$$

gdzie:

t_{wtr}^M – czas impulsu sterującego wtryskiwaczem umieszczonym bezpośrednio w ściance przewodu dolotowego, gdzie M stanowi część oznaczenia,

t_{wtr} – czas impulsu sterującego wtryskiwaczem połączonym przewodem gazowym z przewodem dolotowym,

k_{pld} – współczynnik korygujący wpływ wartości średnicy wewnętrznej i długości przewodu gazowego łączącego impulsowy wtryskiwacz z przewodem dolotowym oraz wartość średnicy dyszy wtryskowej zamocowanej w ściance przewodu dolotowego.

2. Stanowisko badawcze i zakres badań

Badania wykonywane były na silniku spalinywym o zapłonie iskrowym o oznaczeniu Holden C20LE, na którym zamontowana została instalacja sekwencyjnego wtrysku gazu. Wyjaśnienie zjawisk towarzyszących tworzeniu mieszanki i ich wpływu na proces spalania zrealizowano podczas badań stanowiskowych.

Badania wykonywane były w ściśle określonych warunkach pracy (stała prędkość obrotowa silnika oraz przypisane do niej ciśnienie w kolektorze dolotowym, stały współczynnik nadmiaru powietrza). Zgodnie z danymi opisanymi w pozycjach literatury [1, 7], z których wynika, że zakres małych prędkości obrotowych silnika stanowi około 30% czasu pracy silnika, badania realizowane były dla prędkości obrotowej silnika równej 1500 i 1900 obr/min. Autor rozprawy doktorskiej [3] udowodnił, że łączny czas trwania stanów ustalonych silnika stanowi około 67% ogólnego czasu wszystkich stanów pracy silnika.

Warunki pracy podczas badań zostały wyrażone przez:

a) obciążenie:

– Punkt A: prędkość obrotowa, $n=1500$ obr/min, ciśnienie w kolektorze dolotowym $p_{dol}=40$ kPa;

– Punkt B: prędkość obrotowa, $n=1900$ obr/min, ciśnienie w kolektorze dolotowym $p_{dol}=60$ kPa;

b) temperaturę cieczy chłodzącej $T_{ch}=80^{\circ}C$,

c) temperaturę oleju smarującego $T_{ol}=80^{\circ}C$,

d) wartość współczynnika składu mieszanki $\lambda=1,00 \pm 0,02$.

Dla wszystkich stanów pracy określonych przez parametry konstrukcyjne przewodów, dysz wtryskowych oraz współczynnik nadmiaru powietrza wykonane zostały pomiary ciśnienia w kilku punktach instalacji gazowej. Dwa pierwsze punkty pomiarowe ciśnienia służyły do kontroli poprawności działania systemu wtrysku gazu:

1 - w zespole wtryskowym,

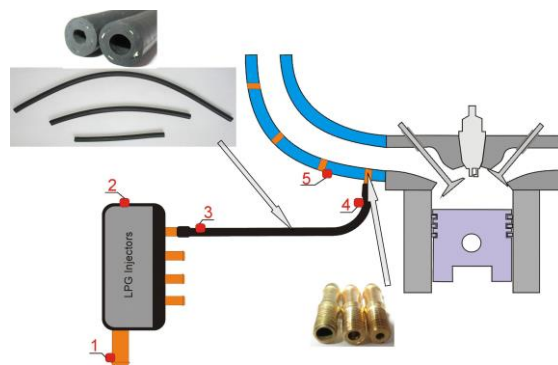
2 - w dwóch charakterystycznych punktach zespołu wtryskowego

Pozostałe punkty pomiarowe ciśnienia na drodze gazu od reduktora do kolektora dolotowego służyły do analizy zagadnienia przebiegu zasilania:

3 - na wejściu do przewodu gazowego,

4 - na wyjściu z przewodu gazowego,

5 - w przewodzie dolotowym.



Rys. 1. Punkty montażowe pomiaru ciśnienia w instalacji gazowej obciążeniu.

Fig. 1. Installation points to measure the gas system pressure

3. Badania stanowkowe

Podczas działania silnika w każdych warunkach badań prowadzono dla mieszanki stechiometrycznej. Uzyskanie współczynnika namiaru powietrza o wartości $1,00 \pm 0,02$ prowadzono poprzez regulację czasu wtrysku t_{wtr} . Dawka paliwa była podawana jednokrotnie w trakcie cyklu pracy silnika. Wybór punktów obciążeniowych był wynikiem analizy literatury, z której wynika, że intensywność zjawisk przepływowych w układzie dolotowym jest większa dla małych obciążeń silnika [2, 4].

Badania doświadczalne wykonano w stanach ustalonych pracy silnika. Badano wpływ parametrów konstrukcyjnych przewodów gazowych na proces zasilania gazem propan-butan silnika o zapłonie iskrowym. Dla każdego wariantu obciążenia i konfiguracji wymiarów przewodów gazowych ustawiano stały kąt początku wtrysku $0^{\circ}OWK$ względem górnego martwego położenia tłoka (początek suwu dolotu).

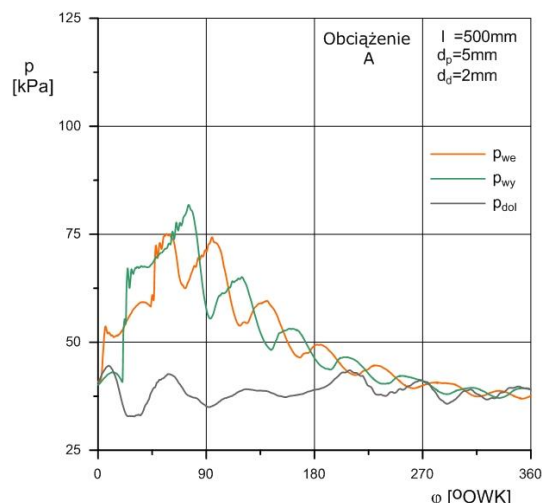
Poniżej przedstawiono przebiegi ciśnienia wewnątrz przewodu gazowego w zależności od konfiguracji układu i warunków obciążenia silnika.

Wszystkie wyniki badań przedstawiono w funkcji obrotu wału korbowego dla wartości 0°OWK tj. dla położenia tłoka w górnym martwym położeniu suwu dolotu.

Tuż przed rozpoczęciem wtrysku w przewodzie gazowym znajduje się mieszanina gazów o dość przypadkowym składzie. Po zakończeniu poprzedniego wtrysku w przewodzie gazowym znajdował się wyłącznie gaz. Następujący po nim okres braku podawania paliwa gazowego i trwający przepływ powietrza w przewodzie dolotowym powodowały, że z wnętrza przewodu gazowego wypłynęła pewna część gazu i ciśnienia się wyrównały. Oczywiście warunkiem takiego zjawiska musi być mniejsze ciśnienie w układzie dolotowym w stosunku do ciśnienia w przewodzie dolotowym. Analogicznie, zwiększone ciśnienie w przewodzie dolotowym, wywołane falą ciśnienia dynamicznego lub przepływem zwrotnym spalin z cylindra do układu dolotowego na początku procesu napełniania, wywołuje przepływ powietrza i spalin z poprzedniego cyklu silnikowego do wnętrza przewodu gazowego. Do tego należy uwzględnić ciągle trwające zjawisko dyfuzji gazów sprzyjające mieszaniu się gazu z przewodu gazowego i gazu z układu dolotowego. Dlatego właśnie na początku następnego wtrysku w przewodzie dolotowym znajduje się dość nieokreślona mieszanina propanu–butanu, powietrza i spalin. Gwałtowny wypływ gazu z impulsowego zaworu gazu do przewodu gazowego generuje w przewodzie gazowym falę ciśnienia. W pierwszym okresie wypływu gaz z wtryskiwacza szybciej napływa do przewodu gazowego niż znajdujące się w nim gazy zdążą odpłynąć do przewodu dolotowego. W przewodzie wylotowym następuje spiętrzenie ciśnienia, które przy długich przewodach może osiągnąć duże wartości. Wzrost ciśnienia za wtryskiwaczem powoduje powstanie fali spiętrzającej ciśnienie. Fala ciśnienia przemieszcza się w kierunku końca przewodu wylotowego z lokalną prędkością dźwięku, znacznie większą niż prędkość przepływającego gazu. Chwila otwarcia wtryskiwacza ma istotny wpływ na wielkość pierwotnego impulsu ciśnienia. Fale ciśnienia napotykają przeszkody w postaci zagięć i przewężeń, od których się odbijają i powracają jako fale w kierunku wtryskiwacza. Fala podciśnienia powoduje intensywny przepływ powietrza z przewodu dolotowego do przewodu gazowego. Fale ciśnienia spotykają się w przewodzie dolotowym, gdzie nakładając się na siebie tworzą nowy układ fal ciśnienia.

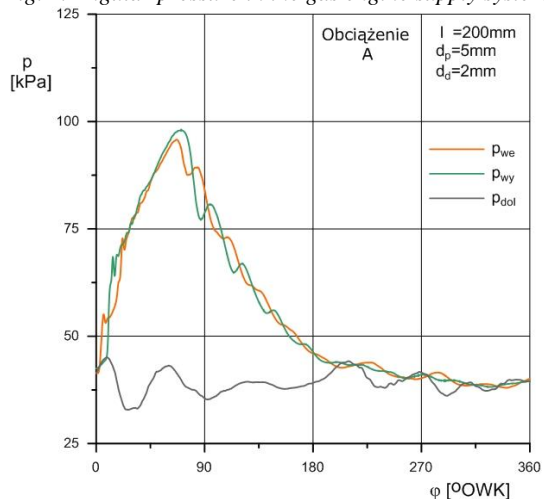
Na rysunkach 2-4 przedstawiono przebiegi kątowe ciśnienia na wejściu do przewodu gazowego p_{we} , na wyjściu z przewodu gazowego p_{wy} oraz w przewodzie dolotowym p_{dot} . Rysunki zawierają informacje o warunkach badań (obciążenie A lub B) oraz zestawie parametrów konstrukcyjnych przewodów dolotowych: długości przewodu l , średnicy przewodu d_p oraz średnicy dyszy d_d .

Rysunki 2-3 służą ilustracji wpływu długości przewodu dolotowego na przesunięcie czasowe pomiędzy sygnałem ciśnienia na wejściu i sygnałem ciśnienia na wyjściu przewodu gazowego. Zwłoka czasowa widoczna na początku wtrysku jest tym większa im dłuższy jest przewód gazowy. Oznacza to, że dla dłuższego przewodu paliwo gazowe pokonuje drogę wtryskiwacz–cylinder silnikowy o tę zwiększoną zwłokę dłużej. Skutkiem jest zmiana przebiegu czasowego procesu tworzenia mieszanki, depozycji paliwa w komorze spalania, przebieg spalania i efekty spalania.



Rys. 2. Przebiegi kątowe ciśnienia w układzie zasilania silnika gazowego

Fig. 2. Angular pressure in the gas engine supply system

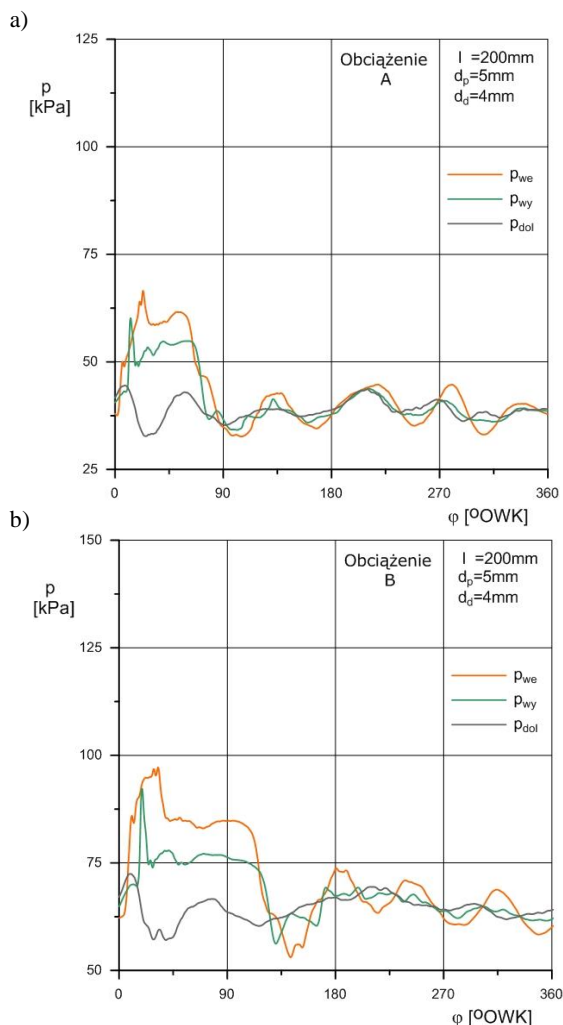


Rys. 3. Przebiegi kątowe ciśnienia w układzie zasilania silnika

Fig. 3. Angular pressure in the engine supply system

Ciśnienie wtrysku paliwa gazowego zależne jest od ciśnienia powietrza w układzie dolotowym. Aby zapewnić zdolność przepływu krytycznego (dla kontroli wydatku wtryskiwacza) wraz ze zwiększeniem się ciśnienia w układzie dolotowym rośnie również ciśnienie zasilania gazu. Konstruktorzy regulatorów ciśnienia starają się aby różnica była stała przez cały okres pracy silnika. Niestety nie są

w stanie osiągnąć idealnej jakości regulacji ciśnienia gazu. W przypadku gazu LPG regulator ciśnienia połączony jest z parownikiem, komplikującym proces stabilizacji ciśnienia gazu. O ciśnieniu gazu w reduktorze (regulatorze ciśnienia) decyduje ciśnienie odparowanego paliwa ciekłego zaś proces parowania charakteryzuje duża zwłoka działania. Podczas badań oba punkty obciążeniowe (A i B) różniły się wartością ciśnienia w dolocie na poziomie 20 kPa. Ciśnienie zasilania gazu również charakteryzowała podobna różnica pomiędzy obydwoma punktami obciążenia. Jednak przeprowadzone badania dowiodły, że różnica ciśnienia wejściowego i wyjściowego nie są liniowo skorelowane z różnicą wartości ciśnienia zasilania, co pokazuje rysunek 4. W efekcie czas wypływu paliwa gazowego nie był liniowo skorelowany z czasem otwarcia wtryskiwacza w obu punktach obciążeniowych.



Rys. 4. Przebiegi kątowe ciśnienia w układzie zasilania silnika gazowego: a) mniejsze obciążenie, b) większe obciążenie

Fig. 4. Angular pressure in the gas engine supply system: a) low load, b) high load

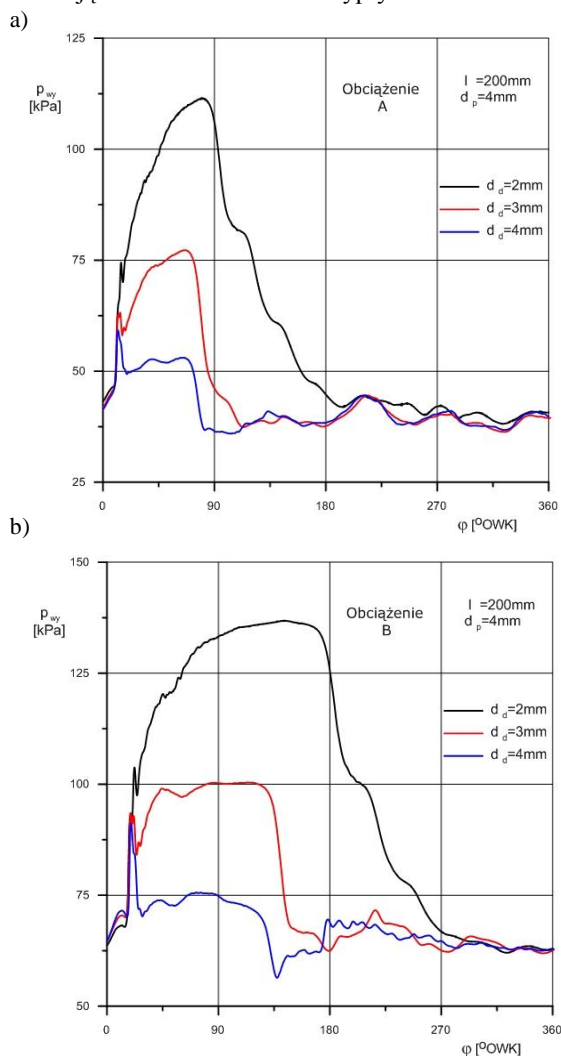
4. Analiza wyników badań

W celu dalszej analizy wyników badań sporządzono porównawcze wykresy przebiegów ciśnienia na wyjściu z przewodu gazowego. Na podstawie tych przebiegów można ocenić wartość czasu podawania paliwa do wnętrza przewodu dolotowego. Zmiana czasu wypływu paliwa ma swoje konsekwencje w procesie spalania. W zależności od czasowego przebiegu przepływu gazu zmienia się rozkład paliwa w cylindrze na początku zapłonu. Skład mieszanki gazowo-powietrznej znajdującej się wówczas w pobliżu świecy zapłonowej determinuje przebieg spalania. Aerodynamika gazów i skład mieszanki w pobliżu świecy zapłonowej tuż przed zapłonem determinują wzrost jądra płomienia w fazie inicjacji zapłonowej oraz rozprzestrzenianie się płomienia i prędkość spalania. Wprowadzenie paliwa do układu dolotowego w dłuższym czasie może zatem skutkować zmianą parametrów procesu roboczego silnika.

Na rysunkach 5–7 pokazano przebiegi ciśnienia na wyjściu z przewodu gazowego dla różnych wariantów parametrów konstrukcyjnych i obciążeń. Rysunek 5 pokazuje wpływ średnicy dyszy wtryskowej na przebieg kątowy ciśnienia na końcu przewodu gazowego w warunkach małej długości i małej średnicy przewodu gazowego. Zarówno dla mniejszego obciążenia (rysunek 5a) jak i większego obciążenia (rysunek 5b) zmniejszenie średnicy prowadzi do znacznego wzrostu ciśnienia w przewodzie i wydłużenia czasu podawania paliwa gazowego. Zarówno dla mniejszego jak i większego obciążenia zmniejszenie średnicy dyszy z 4 mm do 2 mm spowodowało zwiększenie czasu wypływu paliwa o około 170%. Rysunek 6 pokazuje wyniki badań, kiedy do długiego przewodu gazowego zastosowano powiększoną średnicę przewodu z 4 mm do 5 mm. Wydłużenie czasu wypływu paliwa gazowego było jeszcze większe i osiągnęło wartość 363% w warunkach mniejszego obciążenia i 430% w warunkach większego obciążenia. Przyczynami zwiększenia czasu wypływu jest oczywiście zwiększenie objętości przewodu gazowego oraz zmniejszenie efektywnego pola przekroju wypływowego dyszy wtryskowej. Charakterystyczny jest przebieg ciśnień w przewodzie gazowym dla kombinacji dużej długości i średnicy przewodu. Na rysunkach wyraźnie widoczna jest pojawiająca się fala drgań ciśnienia świadcząca o powstaniu rezonansu w przewodzie gazowym.

Rysunek 7 ilustruje wpływ długości przewodu gazowego na przebieg wypływu gazu z przewodu gazowego do układu dolotu. Po zmianie średnicy dyszy na małą (2 mm) zauważono lekkie wydłużenie czasu wypływu paliwa gazowego, o około 8% w przypadku mniejszego obciążenia i o 40% w warunkach większego obciążenia – rysunek 7. Zwiększenie grubości przewodu gazowego z 4 mm do 5 mm zmieniło te relacje. W warunkach mniej-

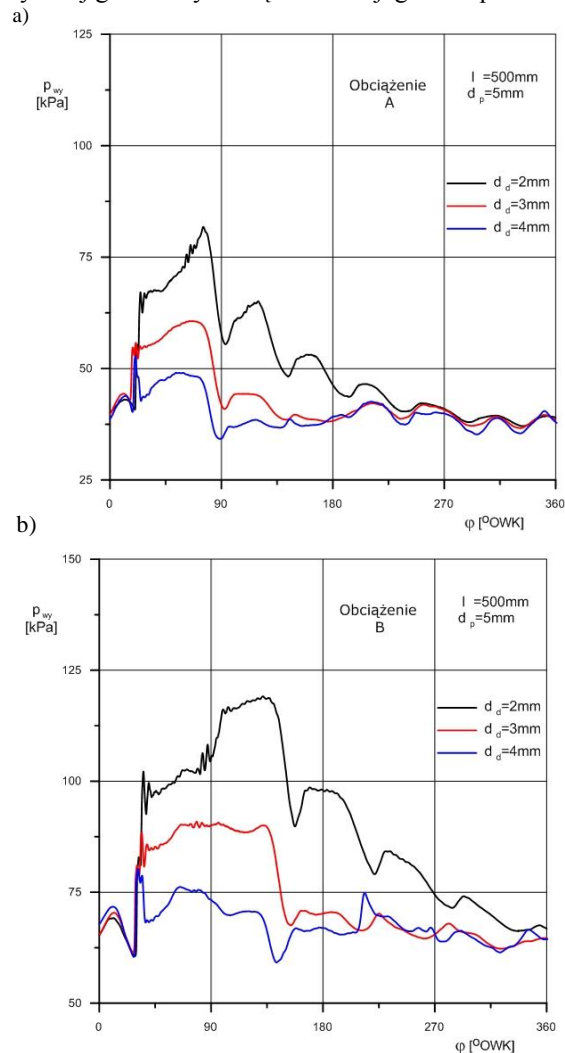
szego obciążenia wydłużenie wypływu gazu zwiększyło się o 19% lecz dla dużego obciążenia zarejestrowano zmniejszenie czasu wypływu gazu o około 8%. Przyczyną takich niekonsekwencji była fala stojąca ciśnienia w przewodzie gazowym. Swoją obecnością zmieniła przebieg czasowy relacji (ciśnienie w przewodzie–ciśnienie w dolocie) doprowadzając do skrócenia czasu wypływu.



Rys. 5. Wpływ średnicy dyszy wtryskowej na przebieg kątowy ciśnienia na końcu przewodu gazowego w warunkach małej długości i małej średnicy przewodu gazowego: a) mniejsze obciążenie, b) większe obciążenie
Fig. 5. Impact of the injection nozzle diameter on the angular pressure at the end of the gas duct for the gas duct of short length and small diameter: a) low load, b) high load

Wartość ciśnienia na początku przewodu gazowego determinuje masowy strumień przepływu gazu z zaworu gazu. W zależności od stosunku ciśnień wewnątrz zaworu gazu i na początku przewodu gazowego, strumień gazu przepływający z zaworu gazu do przewodu może być przepływem podkrytycznym lub krytycznym.

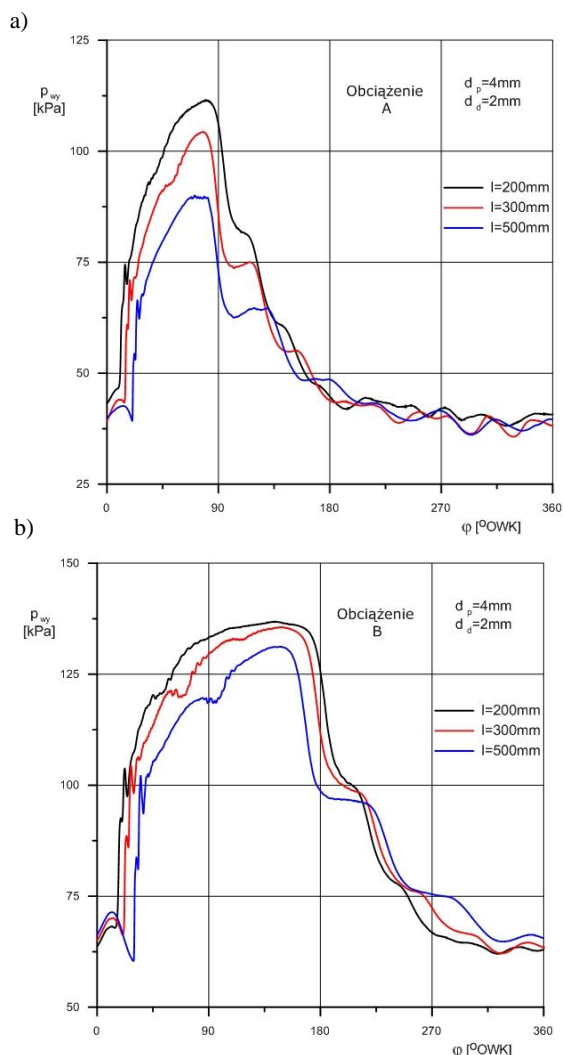
Wypływający z wtryskiwacza, rozprężający się gaz (wewnątrz wtryskiwacza panuje większe ciśnienie niż ciśnienie w przewodzie gazowym) zwiększa swoją prędkość. Wzrost prędkości gazu oznacza wzrost energii kinetycznej gazu. Ponieważ rozprężanie nie jest źródłem energii, wzrost energii kinetycznej gazu odbywa się kosztem jego entalpii.



Rys. 6. Wpływ średnicy dyszy wtryskowej na przebieg kątowy ciśnienia na końcu przewodu gazowego w warunkach dużej długości i dużej średnicy przewodu gazowego: a) mniejsze obciążenie, b) większe obciążenie
Fig. 6. Impact of the injection nozzle diameter on the angular pressure at the end of the gas duct of long length and large diameter: a) low load, b) high load

Dla pewnych wartości przepływu, determinowanych przez temperaturę i ciśnienie gazu, występują krytyczne parametry przepływu, dla których prędkość przepływu równa jest lokalnej prędkości dźwięku. Zmniejszenie stosunku ciśnień przez i za wtryskiwaczem do wartości mniejszej od krytycznej powoduje zmniejszenie prędkości wypływu oraz zmniejszenie masowego strumienia wypływu gazu. Oznacza to, że do silnika dostarczona zostanie niewystarczająca dawka gazu. Sterownik wtry-

sku gazu zwiększa czas otwarcia wtryskiwacza tak, aby utrzymać skład mieszanki na założonym poziomie (najczęściej stechiometrycznym).



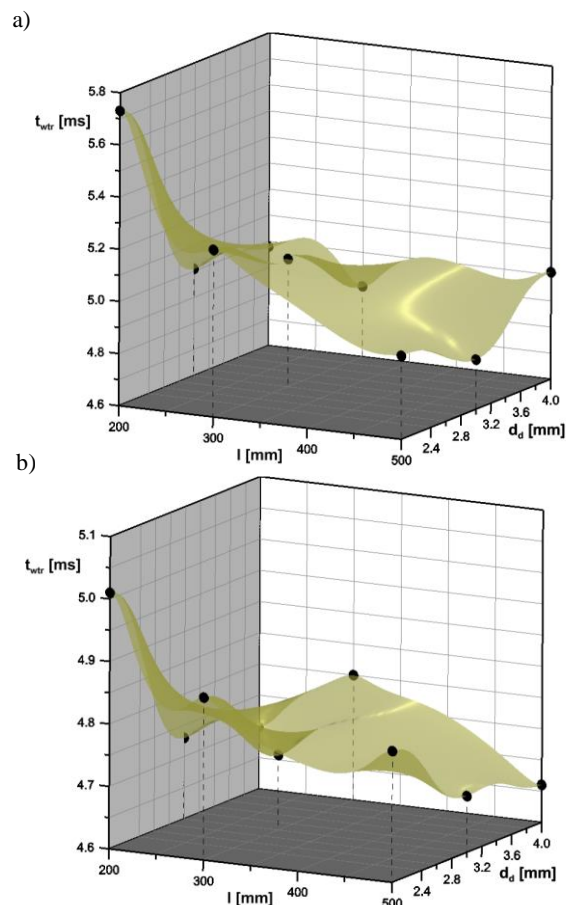
Rys. 7. Wpływ długości przewodu gazowego na przebieg kątowy ciśnienia na końcu przewodu gazowego w warunkach małej średnicy przewodu i małej średnicy dyszy wtryskowej: a) mniejsze obciążenie, b) większe obciążenie

a) Fig. 7. Impact of the gas duct length on the angular pressure at the end of the gas duct for the gas duct of small diameter and the injection nozzle of large diameter: a) low load, b) high load

Taki przypadek miał miejsce podczas prowadzenia badań stanowiskowych. Największy skutek zmian parametrów konstrukcyjnych przewodu gazowego odnotowano w odniesieniu do czasu wtrysku paliwa, zapewniającego mieszankę stechiometryczną dla ustalonego masowego przepływu powietrza (determinowanego przez założone ciśnienie w układzie dolotowym). Początkowy czas wtrysku, zapisany w pamięci sterownika dla wtryskiwaczy połączonych bezpośrednio z kolektorem dolotowym, musiał zostać skorygowany przy każdej zmianie parametrów konstrukcyjnych przewodu

gazowego. Wpływ parametrów konstrukcyjnych oraz obciążenia silnika na czas wtrysku gazu pokazuje rysunek 8. Analiza uzyskanych charakterystyk pozwoliła na wyliczenie kilku spostrzeżeń:

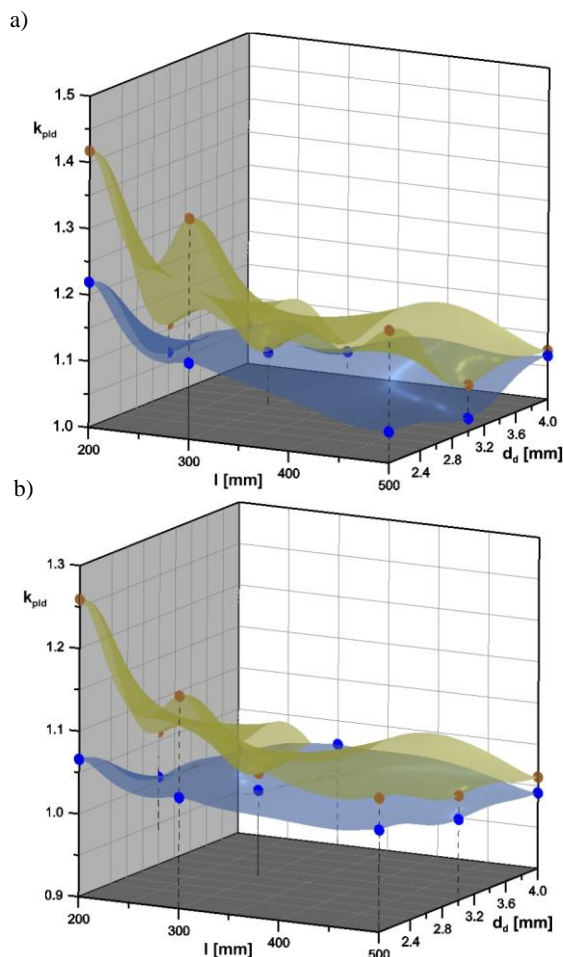
- zwiększająca się długość przewodu i zmniejszająca się średnica dyszy powodowały wspólnie gwałtowny wzrost czasu wtrysku paliwa gazowego,
- wpływ średnicy przewodu gazowego był mniejszy ale też istotny – zmniejszanie średnicy przewodu powodowało wydłużenie czasu wtrysku,



Rys. 8. Charakterystyka czasu wtrysku gazu w funkcji długości przewodu gazowego i średnicy dyszy wtryskowej w warunkach mniejszego obciążenia: a) mała średnica przewodu, b) duża średnica przewodu
Fig. 8. Gas injection time given as a correlation of gas duct length and injection nozzle diameter for low load: a) duct of small diameter, b) duct of large diameter

Jak pokazano powyżej, zróżnicowanie procesów gazodynamicznych w przewodzie gazowym w zależności od jego parametrów konstrukcyjnych wpływa na przebieg wtrysku w silniku o zapłonie iskrowym. Tym samym wpływa na błąd sterowania składem mieszanki. W efekcie koniecznym jest aby algorytm sterowania wtryskiem paliwa gazowego uwzględniał zastosowaną w montażu układu wtryskowego długość przewodu gazowego, jego średnicę, średnicę dyszy wtryskowej i dopasowywał war-

tości współczynników korygujących wtrysk. Jako miarę zróżnicowania korekt wybrano wartości współczynnika korekcyjnego. Obliczone wartości współczynnika korekcyjnego pokazano w postaci charakterystyk na rysunku 9. Żółty kolor ilustruje wyniki uzyskane podczas badań przy większym obciążeniu, kolor niebieski zaś badań przy mniejszym obciążeniu.



Rys. 9. Wpływ obciążenia silnika na charakterystykę współczynnika korekcyjnego k_{pld} w funkcji długości przewodu gazowego i średnicy dyszy wtryskowej: a) mała średnica przewodu, b) duża średnica przewodu, kolor żółty – większe obciążenie, kolor niebieski – mniejsze obciążenie.

Fig. 9. Impact of engine load on correction factor k_{pld} given as a correlation of gas duct length and injection nozzle diameter: a) duct of small diameter, b) duct of large diameter, high load marked yellow, low load marked blue.

Należy wykluczyć równości wartości współczynnika korygującego wpływ parametrów kon-

strukcyjnych gazowego przewodu wtryskowego, uzyskanego dla dwóch różniących się obciążeń silnika. Po założeniu normalnego rozkładu współczynnika proporcjonalności współczynnika korygującego zastosowano procedurę weryfikacyjną opartej na hipotezie zerowej i alternatywnej a następnie wyznaczono poziom istotności α .

W literaturze statystycznej przyjmuje się cztery zakresy poziomów istotności różnicy: nieistotnej statystycznie – $\alpha > 0,1$; mało istotnej – ; istotnej – ; wysoce istotnej – $\alpha < 0,01$. Weryfikacja wyników statystycznych wykazała, że wpływ obciążenia silnika, wyrażony przez natężenie zużycia paliwa, na wartość współczynnika korygującego wpływ parametrów konstrukcyjnych gazowego przewodu wtryskowego, jest wysoce istotny ($\alpha = 0,0003$).

Oznacza to, że podczas kalibrowania algorytmu sterowania wtryskiem paliwa należy identyfikować charakterystyki współczynnika korygującego wpływ parametrów konstrukcyjnych gazowego przewodu wtryskowego również w funkcji obciążenia silnika. Wprowadzenie w algorytmie wtrysku stałej wartości współczynnika korygującego wpływ parametrów konstrukcyjnych gazowego przewodu wtryskowego będzie niewystarczające.

5. Podsumowanie

Otrzymane wyniki badań potwierdzają wpływ parametrów konstrukcyjnych gazowego przewodu wtryskowego i obciążenia silnika na wartość współczynnika korekcyjnego k_{pld} . Wykazano, że:

1. Zwiększająca się długość przewodu i zmniejszająca się średnica dyszy powodują zwiększenie czasu wtrysku paliwa gazowego w stosunku do wartości czasu wtrysku wtryskiwacza bezpośrednio połączonego z przewodem dolotowym.
2. Zmniejszająca się średnica przewodu gazowego powoduje również zwiększenie czasu wtrysku paliwa gazowego ale wpływ ten jest znacznie mniejszy w porównaniu do oddziaływania długości przewodu i średnicy dyszy.
3. Zwiększające się obciążenie silnika wyrażane przez natężenie zużycia paliwa wywołuje zwiększenie wartości współczynnika korekcyjnego k_{pld} .

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

D średnica/diameter
 d_d średnica dyszy wtryskowej/injection nozzle diameter
 d_p średnica przewodu wtryskowego

k_{pld} współczynnik korygujący wpływ wartości średnicy wewnętrznej i długości przewodu wtryskowego łączącego impulsowy wtryskiwacz gazu z przewodem dolotowym oraz wartości średnicy dyszy wtryskowej zamo-

	cowanej w ścianie przewodu dolotowego/correction factor to correct the impact of the internal diameter and length of the injection duct that connects the gas pulse injector with the inlet duct and the diameter of the injection nozzle at the intake manifold wall
l	długość przewodu wtryskowego/injection duct length
M	moment obrotowy/torque
n	prędkość obrotowa silnika/rotational velocity
p	ciśnienie/pressure
p_{dol}	ciśnienie w kolektorze dolotowym/inlet manifold pressure
p_{we}	ciśnienie na wejściu do przewodu wtryskowego/inlet pressure in the injection duct
p_{wy}	ciśnienie na wyjściu z przewodu wtryskowego/outlet pressure in the injection duct
t	czas/time
t_{wtr}	czas impulsu sterującego wtryskiwaczem połączonym przewodem wtryskowym

	z przewodem dolotowym/time of the pulse to control the injection connected to the injection duct with the inlet duct
t_{wtr}^M	czas impulsu sterującego wtryskiwaczem umieszczonym bezpośrednio w ścianie przewodu dolotowego/time of the pulse to control the injection installed directly at the inlet duct wall
T	temperatura/temperature
T_{ch}	temperatura cieczy chłodzącej silnika/coolant temperature
T_{ol}	temperatura oleju smarującego silnik/lubricant temperature
α	poziom istotności/significance level
φ	kąt obrotu wału korbowego/crank angle
λ	współczynnik nadmiaru powietrza/air-fuel ratio

Bibliography/Literatura

- [1] Almkvist G., Denbratt I., Josefsson G., Magnusson I.: Measurement of fuel film thickness in the inlet port of an SI engine by laser induced fluorescence. SAE Technical Paper Nr 952483/1995.
- [2] Hai L., Feng J.: *Simulation Research on Fuel Injection System of 16V265H Diesel Engine Introduced from U.S.* IEEE, 2010.
- [3] Hawryluk B.: Stochastyczny model samochodowego silnika benzynowego w aspekcie stechiometrycznego składu mieszanki paliwowo-powietrznej. Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, 2001.
- [4] Matkowić K., Jelović M., Jurić J., Konyha Z., Gracanin D.: Interactive Visual Analysis and Exploration of Injection System Simulations. IEEE Visualization, 2005, October 23-28, Minneapolis, USA.
- [5] Merkiż J.: Tendencje rozwojowe silników spalinowych. Silniki Spalinowe, Nr 1/2004.
- [6] Niewiarowski K.: Tłokowe silniki spalinowe. WKŁ, Warszawa, 1983.
- [7] Peters H., Spicher U.: Numerical Analyses of the Combustion Process in a Spark-Ignition Engine. The Japan Society of Mechanical Engineers, Nr 01-204 (20010701), str. 41, 2000.
- [8] Rola M., Wendeker M., Jakliński P., Czarnigowski J., Grabowski Ł., Szlachetka M.: Badania symulacyjne układu zasilania gazem propan-butan silnika o zapłonie iskrowym, PTNSS CONGRESS-2007 P07-C161, Silniki Spalinowe PTNSS-2007-SC3, str. 157-163.

Mr Michał Rola, PhD, Eng.
 Department of Thermodynamics, Fluid Mechanics and Aviation Propulsion Systems, in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology.
 Dr inż. Michał Rola
 Katedra Termodynamiki, Mechaniki Płynów i Napędów Lotniczych na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej.

