

Cezary I. Bocheński*

WPŁYW CIŚNIENIA WTRYSKU I LEPKOŚCI OLEJU NAPĘDOWEGO NA PROCES ROZPYLENIA PALIWA W SILNIKACH Z ZS

Streszczenie. Lepkość paliwa jest miarą tarcia wewnętrznego, charakteryzującą opór jaki występuje przy przepływie. Paliwo o większej lepkości charakteryzuje się bardziej uporządkowanym polem prędkości, szczególnie przy wysokich ciśnieniach. Różna lepkości paliw wtryskiwanych przy różnych ciśnieniach wpływa na silną niejednorodność pola prędkości.

Słowa kluczowe: wtrysk, lepkość oleju, rozpylenie paliwa

WSTĘP

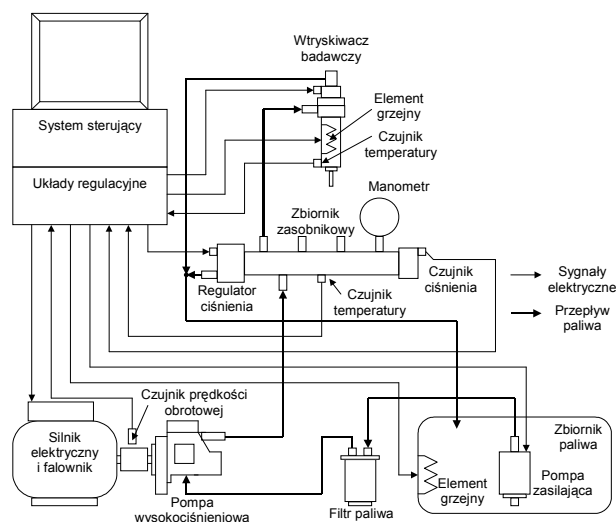
Silniki z zapłonem samoczynnym (zs) są podstawowym źródłem napędu samochodów ciężarowych oraz ciągników i maszyn rolniczych. Coraz ostrzejsze przepisy w zakresie ochrony środowiska naturalnego spowodowały szukanie nowych sposobów obniżenia zawartości związków toksycznych spalin. Aby sprostać wymaganiom zawartym w tych przepisach wprowadzono m. in. wysokociśnieniowy, elektronicznie sterowany system wtrysku Common Rail. Nowe systemy doprowadzania paliwa mają szereg zalet, pozwalających na poprawę procesu spalania.

STANOWISKO I METODY BADAWCZE

Zbudowane stanowisko pozwala na zmianę w szerokim zakresie parametrów badawczych. Możliwe jest sterowanie układem pomiarowym oraz takimi parametrami jak ciśnienie i temperatura paliwa, czas wtrysku i wielkość dawki, dwufazowe doprowadzanie paliwa i inne. W stanowisku badawczym wykorzystano układ wtryskowy typu Common Rail, stosowany w silniku z zs OM611, produkowanym przez firmę Daimler i Chrysler. Schemat stanowiska przedstawia rys. 1. Do sterowania procesem doprowadzania paliwa wykorzystano komputer klasy PC oraz układy sterujące

* Prof. dr hab. Cezary I. Bocheński, Instytut Inżynierii Mechanicznej Politechniki Warszawskiej

– silnika elektrycznego, napędu pompy, regulatora ciśnienia paliwa, pracy wtryskiwacza oraz regulacji temperatury paliwa.



Rys. 1. Schemat ogólny stanowiska badawczego z systemu wtrysku paliwa typu Common Rail

Fig. 1. General draft of the worked out testing stand for the fuel injection system Common Rail type.

Komora doświadczalna, do której jest wtryskiwane paliwo, umożliwia wizualizację procesu tworzenia strugi. W doświadczeniach wykorzystano metodę smugoskopową oraz metodę PIV (Particle Image Velocimetry), umożliwiającą rejestrację procesu przy bardzo krótkich czasach ekspozycji (nanosekundy) i określenie struktury rozpylonej strugi, jej głębokości penetracji oraz rozkładu prędkości w strudze. Do badań wykonano dwa paliwa doświadczalne o znacznie różniące się lepkości – paliwo 1 o lepkości $4,7 \text{ mm}^2/\text{s}$ oraz paliwo 2 o lepkości $1,7 \text{ mm}^2/\text{s}$. Pozostałe właściwości paliwa, mające wpływ na rozpylenie strugi, wynosiły:

– gęstość, kg/m^3	paliwo 1 $\rightarrow 803,53 \pm 0,03$;	paliwo 2 $\rightarrow 826,04 \pm 0,03$
– napięcie powierzchniowe, J/m^2	paliwo 1 $\rightarrow 35,9 \times 10^{-3}$;	paliwo 2 $\rightarrow 36,8 \times 10^{-3}$

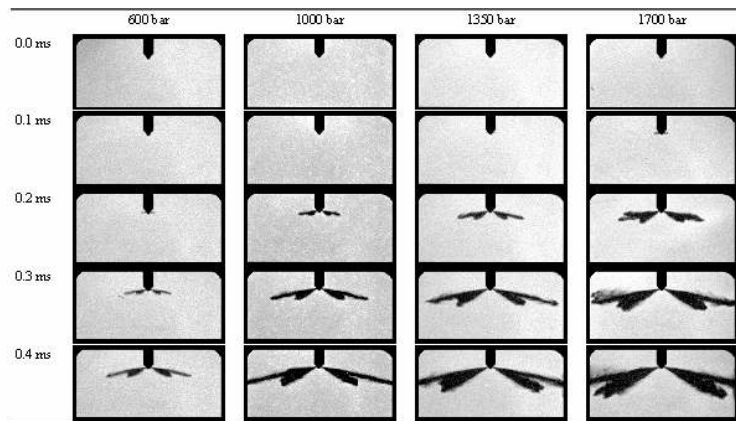
W badaniach kontrolowano temperaturę wtryskiwanego paliwa. Stosowano różne ciśnienia wtrysku – 60, 100, 135 oraz 170 MPa.

BADANIE WPŁYWU CIŚNIENIA WTRYSKU PALIWA NA PROCES TWORZENIA STRUGI

Badania przeprowadzono przy użyciu dwóch technik pomiarowych, co pozwoliło na pełniejszą ocenę uzyskanych wyników badań.

Metoda smugowa badania procesu wtrysku

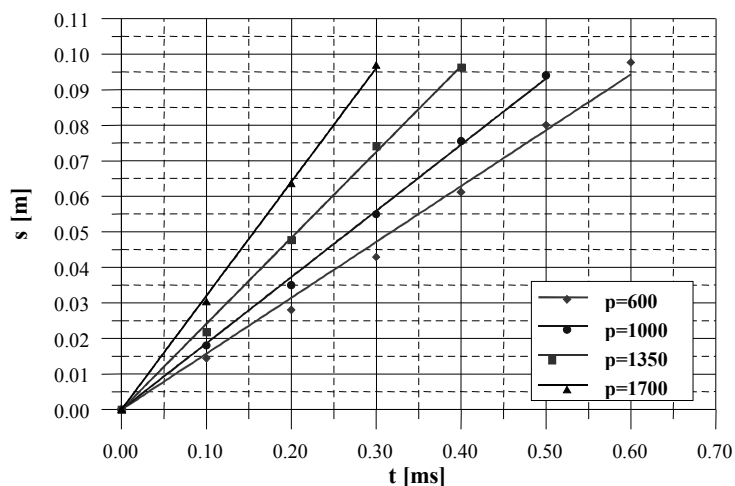
Metoda ta wykorzystuje różnice w jasności oświetlenia, przechodzącego przez strugę, wskutek zmiany współczynnika załamania światła. Współczynnik ten zależy od gęstości ośrodka. Metoda smugowa wykorzystuje zmiany jasności oświetlenia do oceny badanego obszaru. W badaniach wykorzystano smugoskop soczewkowy z laserowym źródłem światła o częstotliwości błysków 10 000 Hz oraz kamerę bębnową. Zmianę obrazu strugi paliwa, dla różnych ciśnień przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Widok strugi paliwa w płaszczyźnie osi wtryskiwacza przy różnych ciśnieniach

Fig. 2. View on fuel spray in the plane vertical to injector axle for different pressures

Kiedy przy ciśnieniu występującym w konwencjonalnych układach paliwowych obserwujemy początek wypływu paliwa z dyszy, struga paliwa przy ciśnieniu 170 MPa osiąga już ścianki komory. Struga paliwa o wyższym ciśnieniu charakteryzuje się nie tylko większą szybkością penetracji, ale również większym rozpyleniem (zwiększenie objętości strugi). Wzrost ciśnienia wpływa również na zwiększenie jednorodności strugi i zmniejszenie wielkości kropli. Średnica Sautera (SMD) kropeł przy wzroście ciśnienia od 70 do 130 MPa uległa zmniejszeniu w granicach od 41 do 47%. Zmianę drogi czoła strugi przy różnych ciśnieniach przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Wykres zmiany drogi strugi paliwa przy różnych ciśnieniach

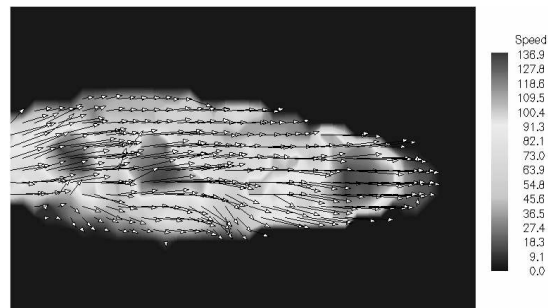
Fig. 3. Chart of fuel spray way change for different pressures

Zmiana ciśnienia od wartości 60 do 170 MPa spowodowała około dwukrotny wzrost prędkości strugi. W celu pełniejszej oceny wtrysku paliwa przy różnych ciśnieniach przeprowadzono badania struktury, głębokości penetracji oraz rozkładu prędkości w strudze paliwa. Badania wykonano przy użyciu unikalnej metody PIV.

Metoda PIV

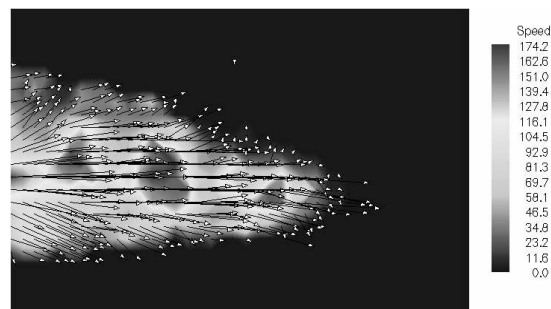
System PIV (Particle Image Velocimetry) pozwala na zobrazowanie pola prędkości w obserwowanej przestrzeni pomiarowej, w której rozpylone krople naświetlane są dwoma, krótko po sobie następującymi impulsami laserowymi. Czas pojedynczego impulsu laserowego wynosi kilka nanosekund, natomiast czas pomiędzy pulsami kilka mikrosekund. Rozproszenie światła przez krople umożliwia zapis obrazu przez kamerę do zdjęć szybkich o dużej czasowej i przestrzennej zdolności rozdzielczej.

Przeprowadzono badania paliwa handlowego, wykonując oznaczenia struktury oraz pola prędkości na czole rozpylonej strugi w funkcji ciśnienia wtrysku. Zapisano obrazy procesu rozpylenia dla różnych czasów, licząc od początku wtrysku, co pozwoliło na wyznaczenie zmian prędkości w funkcji czasu. Przykładowe pole prędkości przy ciśnieniu 50 MPa przedstawia rys. 4, a przy ciśnieniu 100 MPa rys. 5. Zmianę prędkości w funkcji czasu trwania wtrysku i badanych ciśnień przedstawia rys. 6.



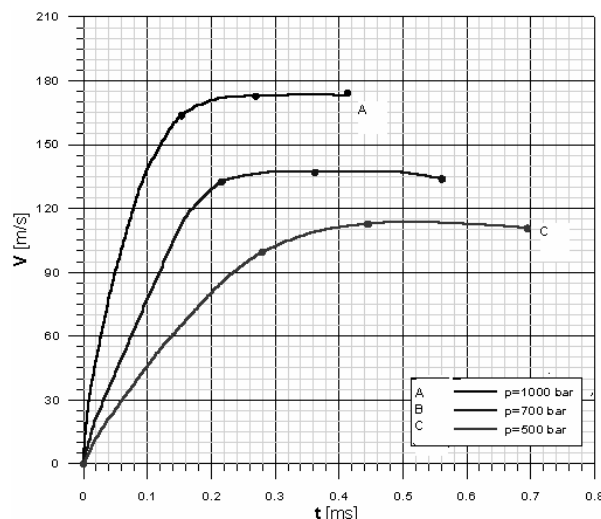
Rys. 4. Pole prędkości rozpylanego paliwa handlowego przy ciśnieniu wtrysku 70 MPa po czasie 0,36 ms od początku wtrysku

Fig. 4. Velocity field of the sprayed commercial fuel at the injection pressure 70 MPa for the time 0,36 ms since the injection start



Rys. 5. Pole prędkości rozpylonego paliwa handlowego przy ciśnieniu wtrysku 100 MPa po czasie 0,41 ms od początku wtrysku

Fig. 5. Velocity field of the sprayed commercial fuel at the injection pressure 100 MPa for the time 0,41 ms since the injection start



Rys. 6. Zmiana prędkości w funkcji czasu trwania procesu wtrysku dla: paliwa norm przy ciśnieniu wtrysku $p = 50, 70, 100$ MPa; po czasie 0,5 ms od otwarcia wtryskiwacza

Fig. 6. Change of velocity in the function of the injection process duration time for: regular fuel, injection pressure $p = 50, 70, 100$ MPa; injector opening time 0,5 ms

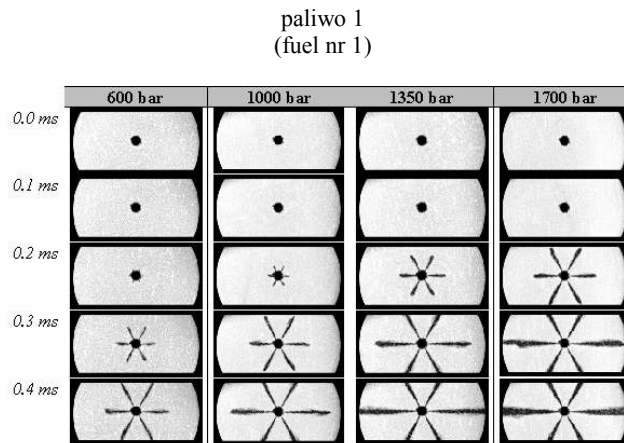
Maksymalne prędkości czoła rozpylonego paliwa są osiągane po czasie ok. 0,4 ms przy ciśnieniu wtrysku 50 MPa, po ok. 0,2 ms przy ciśnieniu 100 MPa. Maksymalne prędkości dla badanego zakresu ciśnień zmieniają się od 135 do 175 m/s. Stała maksymalna prędkość utrzymuje się przez okres od 0,2 do 0,3 ms. W początkowej fazie wtrysku największe prędkości występują u wylotu dyszy, a po czasie ok. 0,4 ms przesuwają się w okolice czoła i środka strugi. Obszar największych prędkości nie ma charakteru ciągłego. Na czole strugi prędkości kropel są mniejsze. Wzrost ciśnienia powoduje bardziej równomierny rozkład pola prędkości i struktury strugi oraz brak wyraźnych obszarów z dużymi prędkościami. Wzrost ciśnienia daje ponadto dalszy zasięg strugi, jej homogenizację oraz zwiększoną objętość rozpylenia. W objętości strugi obserwuje się przy tym nierównomierny i nieciągły rozkład prędkości. Proces tworzenia strugi nie ma powtarzalności. Przeprowadzone badania metodą PIV dają nowe informacje o zmianach strukturalnych w strudze paliwa przy zmiennym ciśnieniu. Dalsza homogenizacja procesu, nierównomierny rozkład prędkości oraz wzrost objętości rozpylenia przyczyniają się do poprawy warunków tworzenia mieszaniny paliwowo-powietrznej oraz lepszego rozpylania.

BADANIE WPLYWU LEPKOŚCI PALIWA NA PROCES TWORZENIA STRUGI

Lepkość zależy od składu chemicznego i technologii przeróbki ropy naftowej. Ponadto jest bardzo silnie zależna od temperatury i ciśnienia. Ze wzrostem lepkości rośnie zasięg strugi, która jest bardziej zwarta i ma większe krople.

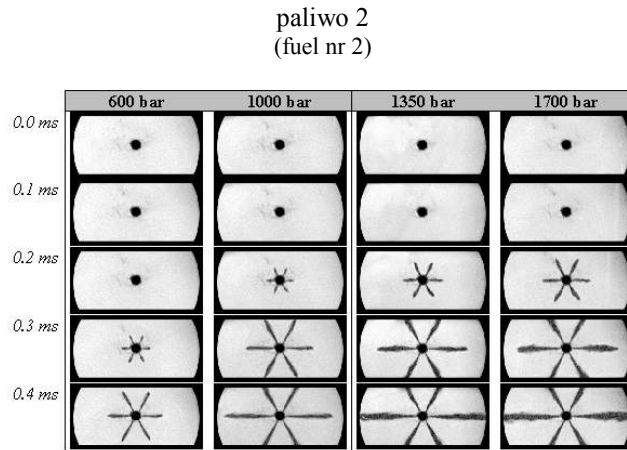
Produkcja olejów napędowych uwzględnia sezonowość ich stosowania. Dlatego lepkość olejów letnich i przejściowych wynosi $2 - 4,5 \text{ mm}^2/\text{s}$, natomiast zimowych zawiera się w granicach $1,8 - 4,0 \text{ mm}^2/\text{s}$. W zależności od rodzaju oleju napędowego zauważa się bardzo duży rozrzut wartości lepkości.

W silnikach nowej generacji powszechnie stosowane są wysokociśnieniowe, elektronicznie sterowane zasobnikowe systemy doprowadzenia paliwa (Common Rail), w których występują ciśnienia do 200 MPa [1, 3]. Tak wysokie ciśnienia w stosunku do rozwiązań konwencjonalnych mają wpływ na zmianę procesu tworzenia strugi. Rozrzut wartości lepkości paliw stosowanych w eksploatacji dodatkowo wpływa na zasięg strugi, objętość rozpylenia czy wielkość kropeł. Przeprowadzone badania miały na celu określenie wpływu lepkości na parametry strugi, przy wysokich ciśnieniach wtrysku. Przebieg procesu rozpylenia w czasie, dla paliw o różnych lepkościach przedstawiają rys. 7 i 8.



Rys. 7. Widok strugi paliwa w płaszczyźnie prostopadłej osi wtryskiwacza przy różnych ciśnieniach (czas wtrysku 1,5 ms, paliwo 1)

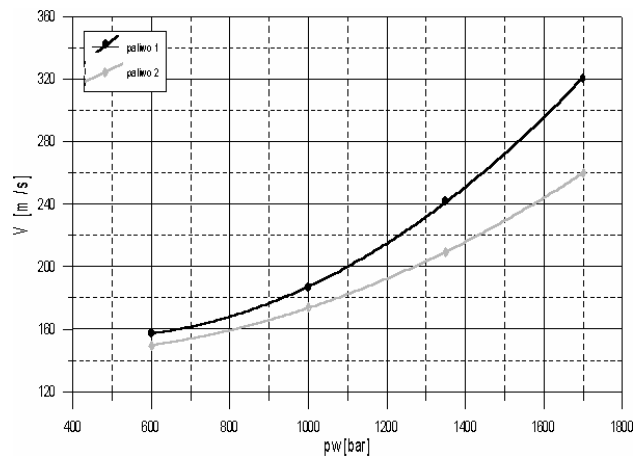
Fig. 7. View on fuel spray in the plane vertical to injector axle for different pressures (injection time 1.5 ms, fuel nr 1)



Rys. 8. Widok strugi paliwa w płaszczyźnie prostopadłej osi wtryskiwacza przy różnych ciśnieniach (czas wtrysku 1,5 ms, paliwo 2)

Fig. 8. View on fuel spray in the plane vertical to injector axle for different pressures (injection time 1.5 ms, fuel nr 2)

Zmianę prędkości strugi różnych paliw przy badanych ciśnieniach przedstawia rys. 9.



Rys. 9. Wykres zmiany prędkości strugi paliwa przy różnych ciśnieniach (czas wtrysku 1,5 ms)

Fig. 9. Chart of fuel spray velocity change for different pressures (injection time 1.5 ms)

Wzrost ciśnienia wtrysku od wartości 60 do 170 MPa, spowodował, że po czasie 0,3 ms od początku wtrysku różnica drogi strumienia wynosiła 0,05 m (5 cm) dla paliwa o lepkości 4,7 mm²/s oraz 0,03 m (3 cm) dla paliwa o lepkości 1,7 mm²/s. Wzrost

lepkości powoduje nie tylko zwiększenie zasięgu strugi, ale również mniejsze rozpylenie paliwa oraz wzrost prędkości czoła strugi od 260 do 320 m/s (przy ciśnieniu 170 MPa).

Tak duże różnice zarówno w prędkości strugi, jak też objętości rozpylenia i zasięgu strugi powoduje odmienny przebieg procesu tworzenia mieszaniny paliwowo-powietrznej.

Zastosowana technika badawcza PIV pozwala na określenie nie tylko kształtu strugi, ale również jej struktury i rozkładu wektorów prędkości w różnych odległościach od wylotu z dyszy i odpowiadającym im czasach od początku wtrysku.

Lepkość paliwa ma istotny wpływ na przebieg procesu tworzenia strugi, różny w zależności od ciśnienia wtrysku. Dla paliwa 1, przy ciśnieniu wtrysku 50 MPa obszar największych prędkości (powyżej 120 m/s) zmienia swoje położenie. Wzrost ciśnienia do wartości 70 MPa powodował bardziej równomierny rozkład pola prędkości i brak wyraźnych obszarów z dużymi prędkościami.

W przypadku paliwa 2 (mniejsza lepkość) przy tym samym ciśnieniu wtrysku obserwuje się dalsze zwiększenie objętości strugi i równomierne rozpylenie, przy znacznej zmienności kierunków wektorów prędkości.

Paliwo o większej lepkości charakteryzowało się bardziej uporządkowanym polem prędkości, szczególnie w wysokich ciśnieniach.

W badaniach paliw o różnej lepkości, wtryskiwanych przy różnym ciśnieniu stwierdzono silną niejednorodność pola prędkości.

WNIOSKI KOŃCOWE

Stosowany w nowych systemach doprowadzania paliwa (pompowtryskiwacz typu Common Rail) wzrost ciśnienia zdecydowanie zmienia charakterystykę wtrysku, powodując zwiększenie zasięgu strugi i wzrost jednorodności i prędkości, a także zmianę kąta rozpylenia. Przy zmniejszeniu lepkości paliwa obserwuje się mniej uporządkowany rozkład prędkości oraz zwiększenie objętości przestrzeni rozpylenia.

Ciśnienie wtrysku i lepkość paliwa w podstawowy sposób oddziałują na procesy tworzenia mieszaniny paliwowo-powietrznej, co ma wpływ na toksyczność spalin i zużycie paliwa.

PIŚMIENNICTWO

1. **Bocheński C. I. 2000:** Możliwości zmiany przebiegu wywiązywania ciepła w silniku z zs przy zastosowaniu elektronicznego systemu doprowadzania paliwa Common Rail. Zeszyty Politechniki Warszawskiej nr 1/2000.
2. **Bocheński C.I.; 2001:** *Badania wpływu właściwości fizyko-chemicznych paliwa do silników wysokoprężnych na charakterystykę wtrysku i trwałość elementów układu paliwowego konwencjonalnego i Common Rail.* Projekt badawczy Nr 9TIZD00716 finansowany przez KBN.
3. **Bocheński C. I., Mruk R. 2000:** *Badania wstępne wtrysku paliwa systemu Common Rail.* VIII Sympozjum im. C. Kanafojskiego Politechnika Warszawska, Płock.
4. **Peters A., Pütz W. 1997:** Der neue Vierzylinder – Dieselmotor OM611 mit Common Rail. Einspritzung MTZ 58/12.

INFLUENCE OF INJECTION PRESSURE AND OIL VISCOSITY
ON THE PROCESS OF SPRAY IN ZS ENGINES

Summary. Fuel viscosity in the measure of inner friction resulting from resistance during flow. Fuel with higher viscosity is characterized by a more orderly speed field, especially for high pressure. Different viscosity of flues injected at different pressures results in strong lack of homogeneity in speed field.

Keywords: injection, oil viscosity, fuel spray.

Recenzent: Prof. dr hab. Eugeniusz Krasowski