

WPLYW CIŚNIENIA WTRYSKU I LEPKOŚCI PALIWA NA WIELKOŚĆ KROPEL W STRUDZE PALIWA W SILNIKU Z ZAPŁONEM SAMOCZYNNYM

Cezary Bocheński¹, Antoni Jankowski²

¹ Katedra Organizacji i Inżynierii Produkcji,
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

² Samodzielna Pracownia Badań Zespołów Silników Tłokowych,
Instytut Lotnictwa w Warszawie

Wstęp

Silnik z zapłonem samoczynnym (ZS) jest podstawowym źródłem napędu pojazdów w transporcie ciężkim, rolnictwie a także w znacznej części pojazdów dostawczych i osobowych. Ma też wiele innych zastosowań zarówno stacjonarnych, jak i w środkach transportu (morskiego a nawet lotniczego). Silnik ten ma wysoką sprawność ogólną, dużą trwałość i niezawodność oraz mniejszą emisję niektórych związków toksycznych.

Wśród producentów pojazdów zauważa się wyraźny wzrost stosowania do napędu pojazdów silników z ZS. Jednocześnie coraz ostrzejsze wymagania dotyczące emisji spalin wymuszają na producentach silników z ZS szukania nowych środków technicznych w celu jej obniżenia. Dotychczas obniżenie toksyczności spalin w silniku z ZS realizowano głównie przez dobór parametrów konstrukcyjnych silnika, systemów spalania oraz układu oczyszczania spalin. Tego typu metody mają ograniczony zakres. Dążenie do dalszego obniżenia toksyczności spalin poprzez dobór właściwości oleju napędowego jest nowym, oryginalnym kierunkiem w dziedzinie ochrony środowiska naturalnego. Stąd też w ostatnich latach w USA, jak również w Europie, ma miejsce radykalne zaostrezenie jakościowych wymagań do paliw silników z ZS.

W najnowszych konstrukcjach silników z ZS znajduje powszechne zastosowanie nowy system wysokociśnieniowego, elektronicznie sterowanego wtrysku paliwa (Common Rail).

Mechanizm tworzenia strugi paliwa

Rozpad strugi związany jest z zaburzeniami na jej powierzchni wskutek działania zewnętrznych i wewnętrznych sił. Powstałe krople mogą ulec dalszemu rozpadowi, kiedy znajdują się w obszarach zmiennych ciśnień dynamicznych rosnących wraz ze wzrostem prędkości względnej, występującej szczególnie przy wyso-

kich ciśnieniach wtrysku. Na krople oddziałują siły aerodynamiczne i wywołane napięciem powierzchniowym. Przy wzroście siły aerodynamicznej następuje deformacja i dalszy rozpad [WALMSLEY, YULE 2000]. Kryterium deformacji prowadzącej do wtórnego rozpadu kropli jest krytyczna liczba Webera, kiedy $W_c \geq W_{c,kr}$, przy czym liczba W_c opisana jest równaniem:

$$W_c = \frac{\zeta \cdot w^2 \cdot d}{\sigma} \quad (1)$$

gdzie:

- w – prędkość względna kropli
- ζ – gęstość gazu
- d – średnice kropli
- σ – napięcie powierzchniowe

Przy wysokich ciśnieniach wtrysku, jak w układach zasobnikowych (Common Rail), wzrasta prędkość względna kropli, co ma wpływ na rozpad wtórny. Na wielkość i rozkład krolek ma też duży wpływ lepkość paliwa i napięcie powierzchniowe. Wzrost lepkości dynamicznej powoduje zwiększony zasięg strugi oraz zmniejszenie jej objętości. Lepkość i napięcie powierzchniowe wpływają na wielkość średnicy kropli, zgodnie z zależnością empiryczną:

$$r = \frac{3\sigma}{E_p - A\mu \cdot w} \quad (2)$$

gdzie:

- E_p – energia pulsacji
- μ, σ – lepkość dynamiczna i napięcie powierzchniowe

Badania PIV struktury i rozkładu prędkości w strudze przy wysokich ciśnieniach wtrysku i zmienności lepkości

Badania wykonano na specjalnym stanowisku, umożliwiającym realizację pojedynczego wtrysku (także wielofazowego), przy zmiennych ciśnieniach oraz przy zastosowaniu wizualizacji procesu [BOCHEŃSKI 2002]. Przeprowadzono badania dwóch paliw o właściwościach podanych w tabeli 1.

Tabela 1; Table 1

Właściwości badanych paliw
Test of fuel properties

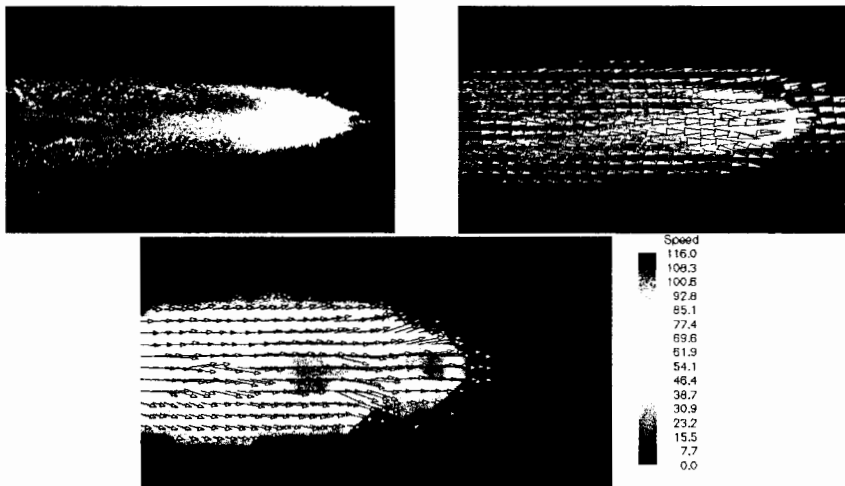
Wyszczególnienie Specification	Lepkość dynamiczna Dynamic viscosity ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	Gęstość Density ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Napięcie powierzchniowe Surface Tension ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)
Paliwo Nr 1; Fuel No. 1	4,7	803,53	$35,9 \cdot 10^{-3}$
Paliwo Nr 2; Fuel No. 2	1,7	826,04	$36,8 \cdot 10^{-3}$

Do badań wykorzystano zasobnikowy system paliwowy, z możliwością zmiany ciśnienia wtrysku od 60 MPa do 170 MPa. W celu określenia struktury i rozkładu prędkości wykonano badania przy użyciu układu badawczego PIV (Particle Image Velocimetry).

Rozkład wektorów i pola prędkości dla paliwa 1, przy ciśnieniu 50 MPa po $t = 0,64$ ms, przedstawia rysunek 1, a przy ciśnieniu 100 MPa po $0,39$ ms przedstawia rysunek 2. Natomiast rozkład wektorów i pole prędkości dla paliwa 2, przy ciśnieniu 100 MPa po $0,44$ ms (w odległości 65 mm) przedstawia rysunek 3.

Dla obu badanych paliw wzrost ciśnienia spowodował większe ujednorodnienie prędkości oraz zaburzenia w polu prędkości, sprzyjające homogenizacji mieszaniny paliwowo-powietrznej. Obszar występowania samozapłonu w modelu objętościowym jest na czole strugi, gdzie występują najkorzystniejsze warunki termodynamiczne, prowadzące do intensyfikacji dyfuzji.

Przy wzroście lepkości zmniejsza się objętość rozpylonego paliwa, obserwuje się większy zasięg strugi oraz wzrost prędkości na jej czole. Mimo braku pełnej powtarzalności wyników badań, wymienione tendencje występują również przy innych warunkach doświadczenia.

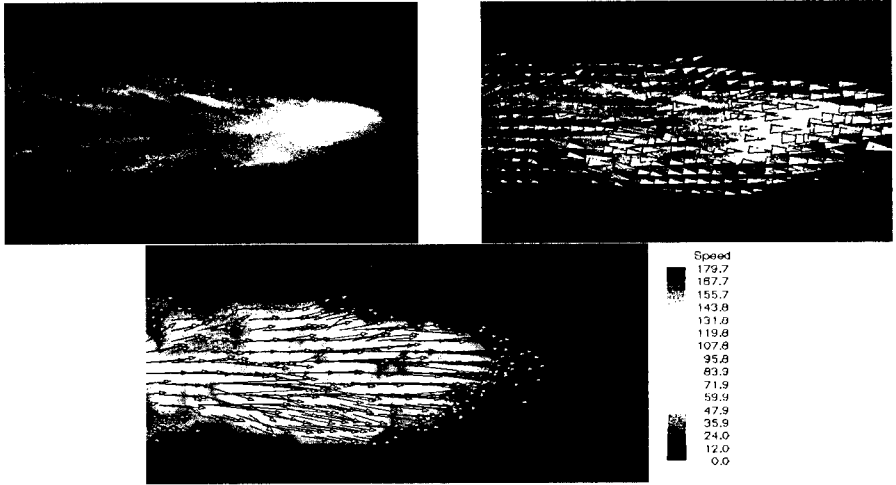


Rys. 1. Rozkład wektorów i pola prędkości dla paliwa Nr 1, przy ciśnieniu 50 MPa
Fig. 1. PIV flow pattern with velocity vectors for No. 1 fuel at 50 MPa pressure

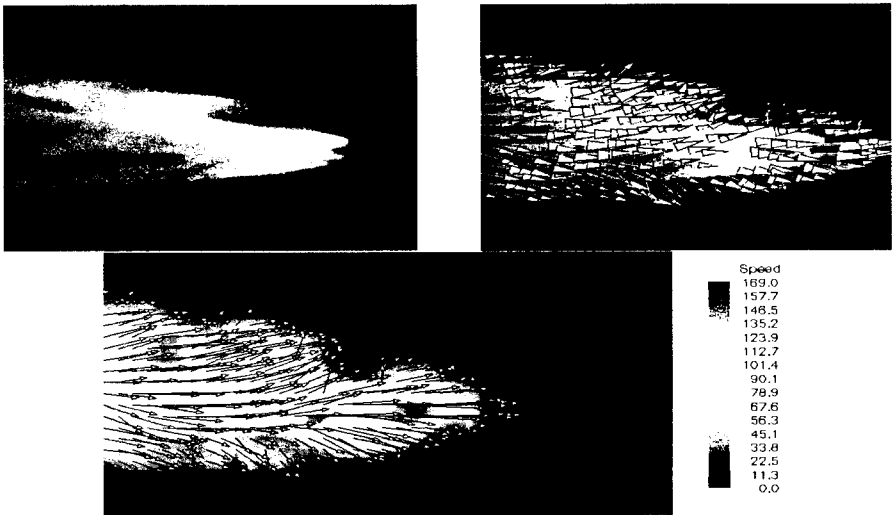
Badania strugi paliwa metodami LDV i PDPA

W badaniach rozpylonej strugi paliwa, w warunkach odzwierciedlających warunki silnika ZS, ważna jest również znajomość wielkości i rozkładu kropeł w strudze paliwa. W warunkach silnikowych krople mają różne średnice, w zależności od warunków wypływu i właściwości paliwa. Badania przeprowadzono przy wykorzystaniu laserowej aparatury LDV (Laser Doppler Velocimeter) i PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer), firmy Aerometrics (USA), wchodzącej w skład korporacji optycznej TSI, przy czym stosowany był laser firmy Spectra Physics. Pomiary realizuje się w przestrzeni pomiarowej, która zdeterminowana jest przez przecinające się dwa promienie laserowe, zerowy i dopplerowski [JANKOWSKI i in. 2001]. Przestrzeń ta występuje w obszarze ogniska optycznego nadajnika laserowego i ma kształt bryły romboidalnej, której maksymalne wymiary w bada-

nym układzie optycznym wynosiły 17,6 x 1,4 x 1,4 mm. Średnica promienia laserowego wynosiła 1,4 mm; odległości promienia zerowego i dopplerowskiego wynosiła 39,74 mm oraz odległość ogniskowa wynosiła 250 mm. Wymiary przestrzeni pomiarowej można zmieniać za pomocą układu optycznego nadajnika, który powinien być projektowany do przewidywanego zakresu średnic kropeł występujących w strudze rozpylanego paliwa.



Rys. 2. Rozkład wektorów i pola prędkości dla paliwa Nr 1, przy ciśnieniu 100 MPa
Fig. 2. PIV flow pattern with velocity vectors for No. 1 fuel at 100 MPa pressure



Rys. 3. Rozkład wektorów i pola prędkości dla paliwa Nr 2, przy ciśnieniu 100 MPa
Fig. 3. PIV flow pattern with velocity vectors for No. 2 fuel at 100 MPa pressure

Wielkości kropeł, które mogą być mierzone zawierają się w zakresie od 0,5 μm do nawet 3,822 mm z tym, że najlepsze rezultaty uzyskuje się przy doborze

układu optycznego dopasowanego do strugi rozpylanego paliwa, w której maksymalny wymiar kropeł jest około 300 razy większy od minimalnego. Zakres pomiarowy wymiarów zależy jest obok układu optycznego od rodzaju procesora RSA (Real Time Signal Analyzer), przy czym w dostępnym mogą być rejestrowane przesunięcia fazy promienia lasera od 3° do 350° . W każdym wypadku układ optyczny powinien być zestawiony w sposób, aby maksymalny wymiar kropeł był mniejszy od mniejszej przekątnej przekroju rombu prostokątnego do składowej prędkości strugi paliwa, natomiast minimalny wymiar kropeł, który może być rejestrowany wynosić $0,5 \mu\text{m}$ lub, gdy przesunięcie fazy promienia laserowego wynosi 3° lub jest większe. Układ PDPA do pomiarów wymiarów kropeł jest kalibrowany, natomiast układ LDV do pomiarów prędkości nie wymaga kalibracji. Układ pomiarowy aparatury pozwala na realizację pomiarów prędkości w 3 kierunkach (3D), a zasada pomiaru składowej prędkości polega na rejestracji zmiany częstotliwości promienia laserowego, która jest proporcjonalna do prędkości kropli paliwa. Składowa prędkości może być określona z następującej zależności:

$$v_i = \frac{f_D}{f_0 \cdot 2 \sin \phi} \quad (3)$$

gdzie:

v_i – składowa prędkości kropli

f_D – zmodulowane częstość laserowego promienia dopplerowskiego

f_0 – częstość promienia zerowego

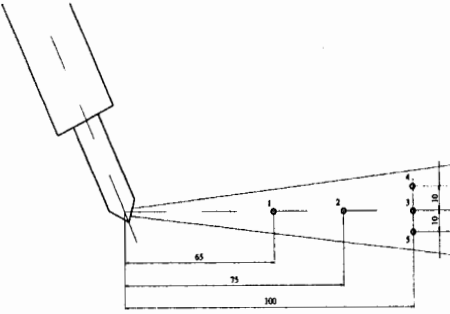
ϕ – kąt przecięcia promienia zerowego i dopplerowskiego

Układ pomiarowy pozwala wykorzystywać 3 różne promienie laserowe: zielony o długości fali $514,5 \text{ nm}$, niebieski o długości fali 488 nm i fioletowy o długości fali $476,5 \text{ nm}$. Pomiar wymiaru kropeł polega na rejestracji odchylenia promienia laserowego przy przejściu przez kroplę, które jest proporcjonalne do jego wymiaru. Kropla paliwa jest obserwowana z 2 detektorów o dwu różnych odległościach AB $10,79 \text{ mm}$ i AC $32,15 \text{ mm}$. Każda kropla jest wielokrotnie mierzona, a wyniki z poszczególnych pomiarów są porównywane i jeżeli różnice pomiarów przekroczą 10% , to te wyniki są odrzucane. Wyniki pomiarów, każdej pojedynczej kropli przemieszczającej się w romboidalnej przestrzeni pomiarowej są zapisywane w pamięci komputera przez 1 PDPA oraz 3 RSA.

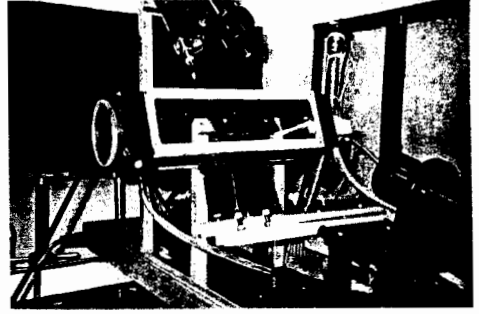
W odniesieniu do układu PDPA dokonano wyboru pięciu średnic pozwalających na określenie parametrów strugi: D_{10} , D_{20} , D_{30} , D_{32} , D_{43} . Średnica D_{10} jest średnicą arytmetyczną i ma znaczenie porównawcze. Średnica D_{20} jest funkcją powierzchni kropeł i umożliwia porównanie średniej powierzchni zmierzonych kropeł. Średnica D_{30} jest funkcją objętości kropeł i umożliwia porównanie objętości zmierzonych kropeł. Średnica D_{32} , średnica Sautera (SMD) jest określana ze stosunku sumy objętości do sumy powierzchni kropeł i jest stosowana do analizy procesów wymiany ciepła i masy. Średnica D_{43} , średnica Herdana jest określana ze stosunku sumy czwartej potęgi średnic kropeł do sumy trzeciej potęgi średnic kropeł. Jest stosowana w analizie procesów spalania i daje lepsze przybliżenie zjawisk obejmujących te procesy. Różnice w wymiarach średnic kropeł są miarą jednorodności wymiarów średnic kropeł w strudze. Im różnice między średnimi średnicami są mniejsze, tym większa jest jednorodność strugi paliwa.

Wybrane punkty pomiarowe, w których dokonywano pomiarów, przedsta-

wiono na rysunku 4. Widok przestrzeni pomiarowej i komory badawczej przedstawiono na rysunku 5.

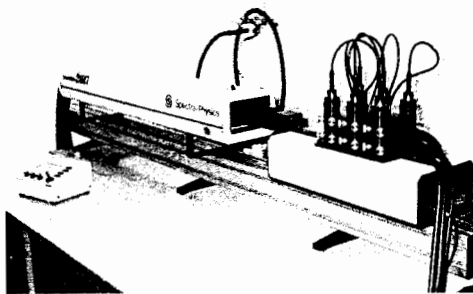


Rys. 4. Punkty pomiarowe
Fig. 4. Measurement points

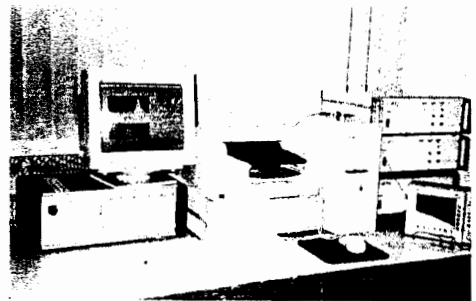


Rys. 5. Widok komory badawczej
Fig. 5. Test chamber view

Dla dokonania wyboru punktów pomiarowych przeprowadzono badania w zakresie odległości od 50 mm do 350 mm od wylotu dyszy wtryskiwacza. Przy dużych odległościach od otworu dyszy uzyskiwano bardziej równomierny rozkład kropeł. W miarę zmniejszania się odległości następował większy rozrzut wyników badań. Ze względu na zbliżenie pracy układu wtryskowego do pracy w warunkach silnikowych wybrano odległość punktów pomiarowych 65, 75, 100 w osi strugi, przy czym w odległości 100 mm wykonano pomiary także w punktach symetrycznych względem osi strugi w odległości 10 mm. Laser pomiarowy wraz z komórką Bragg pozwalającą na uzyskanie z jednego promienia laserowego dwu promieni, zerowego i dopplerowskiego, wraz z układem sześciu światłowodów pozwalających na prowadzenie badań w warunkach rzeczywistych, przedstawiony jest na rysunku 6. Na rysunku 7 przedstawiono układ analizy sygnałów, akwizycji wyników badań w odniesieniu do każdego mierzonego kierunku (promienia lasera – 3 procesory RSA i 1 PDPA) oraz prezentacji wyników badań.



Rys. 6. Laser Spectra Physics
Fig. 6. Spectra physics laser



Rys. 7. Układ analizy sygnałów
Fig. 7. Signal analyse system

Wyniki badań przeprowadzonych przy wykorzystaniu aparatury laserowej LDV przedstawiono w tabeli 2. Wyniki badań przy wykorzystaniu aparatury laserowej PDPA przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 2; Table 2

Wyniki badań LDV prędkości dla 3 ciśnień wtrysku (p)
w punkcie pomiarowym 1 (rys. 4)

LDV test results of velocity for 3 injection pressure (p)
at one measurement point (Fig. 4)

L.p. No.	p (MPa)	V_1 (m·s ⁻¹)	V_2 (m·s ⁻¹)	V_{fr} (m·s ⁻¹)	V_{RMS} (m·s ⁻¹)	Paliwo; Fuel
1	130	0,22	0,48	0,484	1,664	Nr 1; No. 1
2	100	0,66	0,36	0,663	1,628	
3	70	1,23	0,73	1,235	3,681	
4	130	0,59	0,51	0,585	1,819	Nr 2; No. 2
5	100	0,50	0,39	0,501	1,266	
6	70	1,31	0,39	1,312	2,847	

V_1 – składowa prędkości w kierunku poziomym; component of horizontal velocity

V_2 – składowa prędkości w kierunku pionowym; component of vertical velocity

V_{fr} – prędkość średnia; mean velocity

V_{RMS} – średnie odchylenie kwadratowe prędkości; root mean square of velocity

Tabela 3; Table 3

Wyniki badań PDPA wymiarów kropeł dla 3 ciśnień wtrysku (p)
w punkcie pomiarowym 1

PDPA test results of drop size for 3 injection pressure (p)
at one measurement point

L.p. No	P (MPa)	D_{10} (μm)	D_{20} (μm)	D_{30} (μm)	D_{32} (μm)	D_{43} (μm)	Paliwo; Fuel
1	130	3,830	4,982	4,388	5,328	6,353	Nr 1; No. 1
2	100	4,426	5,117	5,918	7,915	10,070	
3	70	5,109	6,086	7,183	9,990	12,970	
4	130	4,187	4,718	5,295	6,836	7,971	Nr 2; No. 2
5	100	4,451	5,241	6,171	8,554	11,040	
6	70	6,388	7,441	8,807	11,520	14,720	

D_{10} – średnia średnica liniowa kropeł; length mean diameter

D_{20} – średnia średnica powierzchniowa kropeł; surface area mean diameter

D_{30} – średnia średnica objętościowa kropeł; volume mean diameter

D_{32} – średnia średnica Sautera kropeł; Sauter mean diameter – SMD

D_{43} – średnia średnica Herdana kropeł; Herdan mean diameter – SMD

Wnioski

Na fizyczne procesy tworzenia strugi największy wpływ ma lepkość paliwa, gęstość i napięcie powierzchniowe, zależne od składu frakcyjnego, procesu prze-róbki ropy naftowej i dodatków.

Stosując metodę badawczą PIV określono strukturę i rozkład prędkości w strudze; stwierdzono nieciągłości prędkości i zmianę kierunków w poszczególnych obszarach strugi; obraz strugi znacznie różni się dla paliw o odmiennej lepkości.

W związku z małymi wymiarami kropeł bardzo szybko ulegała zmniejszeniu ich prędkość, wystąpiły jednak istotne niejednorodności w odniesieniu do prędkości (RMS), jak również wymiarów.

Określono średnie średnice kropeł (w tym Sautera i Herdana), ich prędkość i rozkład; wzrost ciśnienia powoduje zmniejszenie średnic; wzrost lepkości powoduje ich zwiększenie.

Dokonano rejestracji wtrysku dwufazowego dla paliw o różnej lepkości, wtryskiwanych przy różnych ciśnieniach oraz odmiennych przeciwcisnieniach w komorze badawczej; stwierdzono szczególnie przy wysokim ciśnieniu wtrysku silny natrysk paliwa na ściankę komory, co zmienia obraz tworzenia strugi i proces tworzenia mieszaniny paliwowo-powietrznej.

Układ wtryskowy zasilanym paliwem nr 1 o mniejszej lepkości generował krople o mniejszej średnicy niż układ zasilany paliwem nr 2 o większej lepkości; średnica Sautera przy ciśnieniu 70 MPa była większa o 28%, przy ciśnieniu 100 MPa - o 8%, a przy ciśnieniu 130 MPa o 15%.

Stwierdzono, że wraz ze wzrostem ciśnienia wtrysku następowało zmniejszenie średnicy kropeł; średnica Sautera (SMD) kropeł przy wzroście ciśnienia od 70 MPa do 130 MPa uległa zmniejszeniu o 47% w odniesieniu do paliwa nr 1 i o 41% w odniesieniu do paliwa nr 2.

Literatura

BOCHEŃSKI C.I. 2002. *Badania wpływu właściwości fizykochemicznych paliwa do silników wysokoprężnych na charakterystykę wtrysku i trwałości elementów układu paliwowego konwencjonalnego i Common Rail*. Projekt badawczy finansowany przez KBN. Warszawa 490 ss.

JANKOWSKI A., SIEMIŃSKA B., SĘCZYK J. 2001. *Badania widma rozpylenia paliwa przez wysokociśnieniowy sterowany elektronicznie układ paliwowy na dynamicznym analizatorze laserowym*. Ilot.3.45.204. Warszawa.

WALMSLEY S.J., YULE A.J. 2000. *A study the sprays produced by fire suppression sprinkler systems*. Proceedings of eighth International Conference on liquid atomization and spray systems. CA, USA, July 2000: 2-4.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, emisja spalin, struga paliwa, metody laserowe PIV, LDV, PDPA

Streszczenie

W artykule przedstawiono mechanizm tworzenia strugi paliwa oraz badania metodami laserowymi PIV, LDV i PDPA strugi paliwa rozpylanego metodą Common Rail. Przedmiotem badań były dwa paliwa o różnych lepkościach. Badania przeprowadzono dla różnych ciśnień wtrysku paliwa. Ujawniono istotny wpływ lepkości na proces rozpylenia paliwa dla silnika z zapłonem samoczynnym, szczególnie na homogenizację mieszaniny, co ma istotny wpływ na emisję składników toksycznych spalin.

INFLUENCE OF INJECTION PRESSURE AND FUEL VISCOSITY ON DROPLET SIZE IN FUEL SPRAY FOR DIESEL ENGINE

Cezary Bocheński¹, Antoni Jankowski²

¹ Department of Production Management and Engineering,
Warszaw Agricultural University, Warszawa

² Internal Combustion Engines Department,
Institute of Aeronautics, Warszawa

Key words: combustion engines; exhaust emissions; fuel spray; PIV, LDV, PDPA laser methods

Summary

Mechanism of fuel spray preparation and the investigation of fuel sprayed with the Common Rail method using PIV, LDV and PDPA laser methods are presented in the paper. Two fuels with different viscosities were tested. Tests were performed for different fuel injection pressures. The tests indicated significant influence of fuel viscosity on fuel preparation process for Diesel engine, especially on mixture homogeneity which is very important for exhaust emission.

Prof. dr hab. Cezary **Bocheński**
Katedra Organizacji i Inżynierii Produkcji
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
ul. Nowoursynowska 166
02-787 WARSZAWA
email: wip_zit@sggw.waw.pl