ANALIZA MOŻLIWOŚCI ODDZIAŁYWANIA NA MIKROSTRUKTURĘ STRUGI ROZPYLANEGO PALIWA

Hubert KUSZEWSKI

W artykule przedstawiono wpływ najważniejszych parametrów związanych z wtryskiem paliwa na mikrostrukturę generowanej strugi. Zaprezentowano przykładowe obliczenia średniej średnicy Sautera. W tym celu posłużono się modelem opracowanym przez Hiroyasu, Arai i Tabata. W dalszej części przedstawiono przykładowe wyniki badań mikrostruktury przeprowadzone z wykorzystaniem systemu PDPA.

1. WSTĘP

Rozpylanie paliwa w silniku wysokoprężnym jest jednym z ważniejszych zagadnień, na które należy zwrócić uwagę przy optymalizacji systemu spalania. Istotne jest przy tym, takie dobranie parametrów konstrukcyjnych układu wtryskowego i przestrzeni spalania, aby w każdych warunkach pracy silnika zapewnione były właściwe parametry makrostruktury i mikrostruktury rozpylanego paliwa. Makrostruktura rozpylanego paliwa najczęściej opisywana jest przez zasięg czoła strugi, kąt wierzchołkowy strugi oraz rozkład paliwa w strudze kropel [2,4,7,8].

Mikrostruktura strugi paliwa związana jest z jakością rozpylania i dotyczy kropel zawartych w strudze. Parametry mikrostruktury determinują m.in. rozkład paliwa w poprzecznym przekroju cylindra. Jakość rozpylania paliwa charakteryzuje się dokładnością i jednorodnością rozpylania. Dokładność rozpylania informuje o wielkości powstałych kropel, zaś jednorodność o ilości kropel o jednakowej średnicy. Mikrostruktura strugi zwykle charakteryzowana jest przez:

- średnice kropel,
- widmo rozpylania (rozkład ilości, masy i objętości kropel),
- prędkości kropel.

W silniku wysokoprężnym, paliwo wypływające z rozpylacza ulega pierwotnemu rozpadowi na krople o różnych średnicach. Jest to spowodowane oddziaływaniem w strudze sił związanych z burzliwością przepływu oraz napięciem powierzchniowym rozpylanej cieczy. Krople te poruszają się w ośrodku gazowym wewnątrz cylindra i dlatego na ich powierzchniach powstaje rozkład ciśnień związany z oporami przepływu. Gdy wypadkowa siła zewnętrznego ciśnienia przewyższy siły napięcia powierzchniowego, krople tracą stateczność i ulegają wtórnemu rozpadowi [7,8,9]. W związku z tym, struga paliwa tworzona wewnątrz cylindra silnika składa się ze zbioru kropel o zróżnicowanych średnicach.

Istnieje cały szereg możliwości oddziaływania na parametry mikrostruktury rozpylania. Najczęściej dokonuje się tego na drodze modyfikacji parametrów wtrysku paliwa (np. zwiększenie ciśnienia wtrysku) oraz odpowiedniej organizacji ruchów ładunku wewnątrz cylindra. Duży wpływ na kształtowanie mikrostruktury rozpylania wywierają także parametry fizyko-chemiczne paliwa (np. lepkość paliwa) oraz parametry konstrukcyjne rozpylacza (np. średnice otworków rozpylacza).

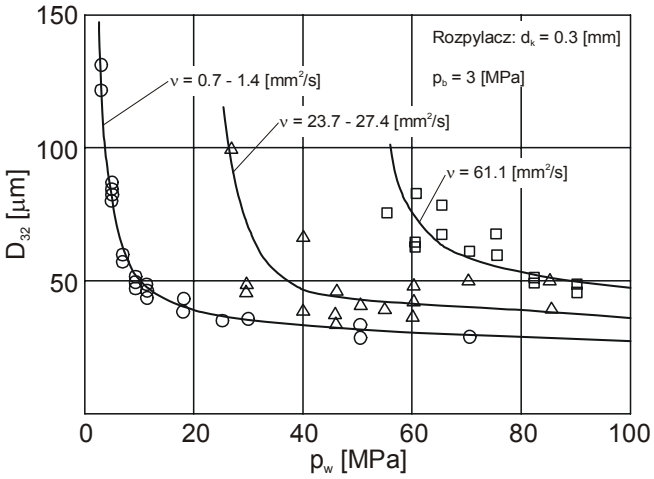
W artykule omówiono wpływ warunków związanych z wtryskiem paliwa na mikrostrukturę rozpylanego paliwa. Szczególną uwagę zwrócono na te parametry, które decydują o pierwotnym rozpadzie strugi i wtórnym rozpadzie kropel, a tym samym bezpośrednio oddziałują na średnice kropel. Dokonano także obliczeń średniej średnicy Sautera, wykorzystując w tym celu model opracowany przez Hiroyasu, Arai i Tabata. W dalszej części zaprezentowano wybrane wyniki dotyczące pomiarów mikrostruktury strugi

paliwa rozpylanego przez wtryskiwacz prototypowy z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy i porównano ją z mikrostrukturą strugi tworzoną w tych samych warunkach przez rozpylacz klasyczny. Mikrostrukturę strugi paliwa oceniano na podstawie średnic kropel paliwa w wybranych punktach rozpylonej strugi.

2. ODDZIAŁYWANIE NA MIKROSTRUKTURĘ ROZPYLANEGO PALIWA

Średnica kropli pozostaje najbardziej poglądowym parametrem określającym wielkość kropli i jest zarazem najczęściej wykorzystywanym parametrem oceny mikrostruktury rozpylania. Średnica kropel ma zasadnicze znaczenie w procesie odparowywania paliwa i wykorzystania powietrza, a więc wpływa bezpośrednio na okres opóźnienia samozapłonu. Ocena jakości rozpylenia dokonywana jest na podstawie strugi teoretycznej, złożonej z kropel o jednakowych średnicach.

Najczęściej wykorzystywaną średnicą jest średnia średnica według definicji Sautera (*SMD – Sauter Mean Diameter*), ze względu na jej bezpośredni związek z parowaniem i spalaniem kropli [8,9]. Średnica SMD zakłada równość powierzchni i objętości rzeczywistej i teoretycznej strugi.



Rys. 1. Wpływ ciśnienia wtrysku p_w na średnicę SMD (D_{32}) dla różnych lepkości kinematycznych paliwa ν [5]

Makrostruktura strugi jest związana z wielkością utworzonych kropel, dlatego też te parametry, które kształtują zarys strugi wpływają również na jej mikrostrukturę. Jeśli nie rozpatruje się widma rozpylania, to dokładność rozpylania wyrażona wielkością kropel może być określona na podstawie średniej średnicy Sautera. Jak dowodzą wyniki wielu badań, duży wpływ na średnicę SMD wywierają własności fizyczne paliwa. I tak wzrost lepkości i napięcia powierzchniowego paliwa łączy się ze zwiększeniem średnicy SMD. Natomiast wzrost ciśnienia wtrysku powoduje zmniejszenie tej średnicy [1,3]. Wpływ ciśnienia wtrysku i lepkości paliwa na średnicę SMD przedstawiono na rys. 1.

Także parametry konstrukcyjne rozpylacza wywierają wpływ na średnicę SMD. I tak np. zmniejszenie średnicy otworka wylotowego w rozpylaczu klasycznym polepsza rozpylanie paliwa, a więc zmniejsza się też wtedy średnica SMD [5]. Wpływ wywiera też stosunek długości do średnicy otworka rozpylacza l_r/d_k, przy czym jest on silniejszy dla mniejszych ciśnień wtrysku. Z badań przeprowadzonych przez Hiroyasu i Arai [5] wynika, że istnieje pewna optymalna wartość stosunku l_r/d_k, dla której rozpylanie paliwa rozpylaczem klasycznym jest najlepsze.

Trudności przy eksperymentalnym określaniu średnic kropel zdecydowały o powszechnym wykorzystywaniu do tego celu modeli opracowanych z wykorzystaniem analizy wymiarowej i bazujących na liczbach kryterialnych. Przedstawione zależności 1, 2 i 3

[6] prezentują w taki sposób zbudowany model, który pozwala na obliczenie średniej średnicy Sautera.

Względna średnica SMD - $\frac{\overline{x}_{32}}{D}$:

$$\frac{\overline{x}_{32}}{D} = \mathrm{MAX}[\frac{\overline{x}_{32}^{LS}}{D}, \frac{\overline{x}_{32}^{HS}}{D}] \tag{1}$$

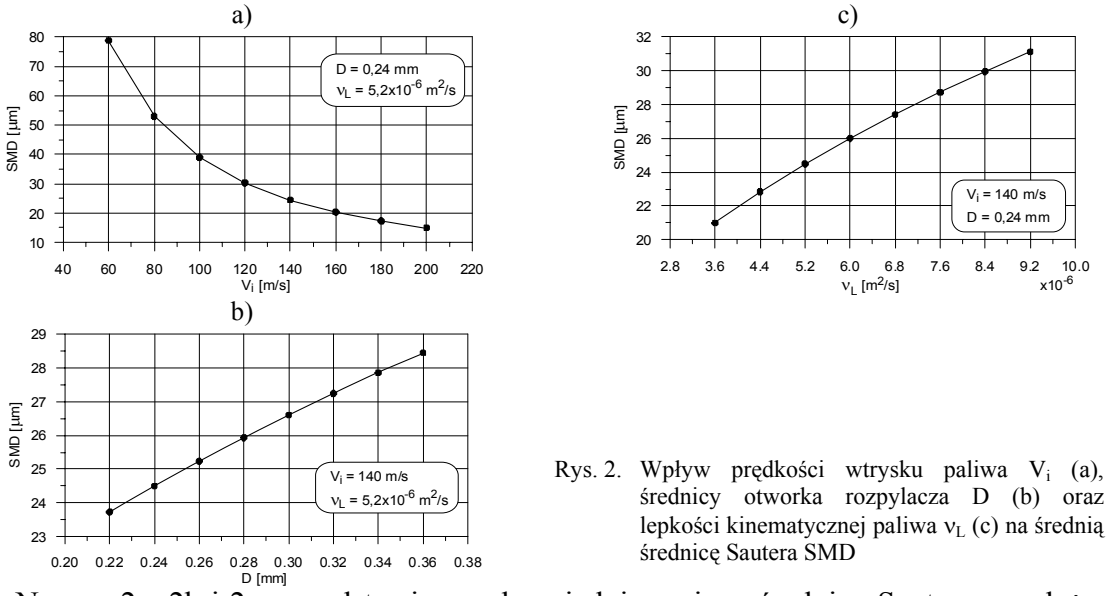
Względna średnica SMD dla niecałkowitego rozpylenia - $\frac{\overline{x}_{32}^{LS}}{D}$:

$$\frac{\overline{x}_{32}^{LS}}{D} = 4{,}12 \cdot \mathrm{Re}^{0{,}12} \cdot \mathrm{We}^{-0{,}75} \cdot \left(\frac{\mu_L}{\mu_A}\right)^{0{,}54} \cdot \left(\frac{\rho_L}{\rho_A}\right)^{0{,}18} \tag{2}$$

Względna średnica SMD dla całkowitego rozpylenia - $\frac{\overline{x}_{32}^{HS}}{D}$:

$$\frac{\overline{x}_{32}^{HS}}{D} = 0{,}38 \cdot \mathrm{Re}^{0{,}25} \cdot \mathrm{We}^{-0{,}32} \cdot \left(\frac{\mu_L}{\mu_A}\right)^{0{,}37} \cdot \left(\frac{\rho_L}{\rho_A}\right)^{-0{,}47} \tag{3}$$

gdzie:
D; średnica otworka rozpylacza, μ_L; lepkość dynamiczna paliwa, μ_A; lepkość dynamiczna powietrza, ν_L; lepkość kinematyczna paliwa, ρ_L; gęstość paliwa, ρ_A; gęstość powietrza, σ_L; napięcie powierzchniowe paliwa, V_i; prędkość wtrysku, We; liczba Webera, Re; liczba Reynoldsa.



Rys. 2. Wpływ prędkości wtrysku paliwa V_i (a), średnicy otworka rozpylacza D (b) oraz lepkości kinematycznej paliwa ν_L (c) na średnią średnicę Sautera SMD

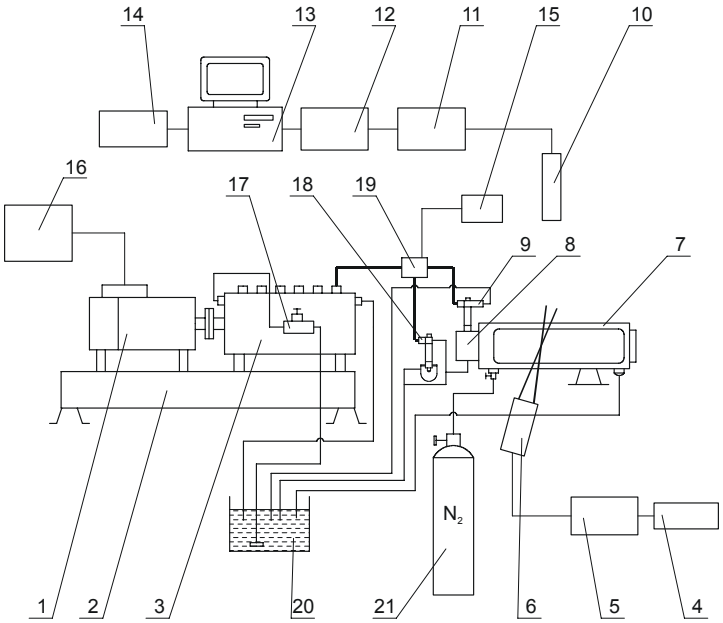
Na rys. 2a, 2b i 2c przedstawiono odpowiednio zmiany średnicy Sautera w zależności od prędkości wtrysku paliwa, średnicy otworka rozpylacza i lepkości paliwa, obliczone na podstawie zależności (1), (2) i (3). Jak widać z rys. 2a, zwiększenie prędkości wtrysku paliwa, np. w wyniku zwiększenia ciśnienia wtrysku paliwa, jest skutecznym sposobem na zmniejszenie średniej średnicy Sautera. Podobnie, korzystne jest zmniejszenie średnic otworków rozpylacza (rys.2b) i stosowanie paliwa o mniejszej lepkości (rys. 2c).

Analiza widma rozpylania umożliwia dokładniejszą ocenę jakości rozdrobnienia paliwa, w porównaniu ze średnią średnicą zastępczą. Jest to zależność funkcyjna ilości Δn kropel o średnicach leżących w przedziale (D-D/2; D+D/2) od średnicy D. W ujęciu statystyki

matematycznej jest to zatem rozkład średnic kropel [8]. Na podstawie pomiaru średnic i ilości kropel można dobrać jedno z teoretycznych widm, co umożliwia dokładniejsze porównywanie jakości rozpylania uzyskiwanych w różnych warunkach.

3. BADANIA MIKROSTRUKTURY ROZPYLANIA

Badania mikrostruktury rozpylanego paliwa przeprowadzono dla wtryskiwacza z klasycznym rozpylaczem wielootworkowym (D1LMK 140/M2) oraz wtryskiwacza o specjalnej, nowo opracowanej konstrukcji z rozpylaczem, w którym iglica wykonuje ruch obrotowo-zwrotny. Rozpylacz ten oznaczono literą „B". Charakterystyczną cechą wtryskiwacza nowego typu jest zmienność przekrojów otworków wylotowych w czasie trwania wtrysku [8].



Rys. 3. Schemat stanowiska do badań mikrostruktury strugi rozpylanego paliwa z wykorzystaniem aparatury PDPA i LDV, 1-silnik elektryczny napędzający pompę wtryskową, 2-wspornik, 3-rzędowa pompa wtryskowa P56-01, 4-laser, 5-komórka Bragga, 6-nadajnik optyczny, 7-komora wizualizacyjna, 8-uchwyt mocujący badany wtryskiwacz, 9-badany wtryskiwacz, 10-odbiornik optyczny, 11-blok detektorów, 12-analizator sygnałów, 13-komputer ze specjalistycznym oprogramowaniem, 14-drukarka, 15- sterownik zaworu przełączającego, 16-falownik, 17-pompa zasilająca pompy wtryskowej, 18-wtryskiwacz pomocniczy, 19-zawór przełączający, 20-zbiornik paliwa, 21-butla z azotem

Aby zapewnić jak najbardziej zbliżone warunki związane z rozpylaniem, do badań wybrano rozpylacze trzyotworkowe klasyczny i prototypowy, dla których średnice otworków w iglicy d_i (dla wtryskiwacza B) są takie same jak średnice otworków w korpusie rozpylacza d_k dla wtryskiwacza klasycznego. Średnice otworków w korpusie rozpylacza prototypowego d_k wynosiły 0,60 mm.

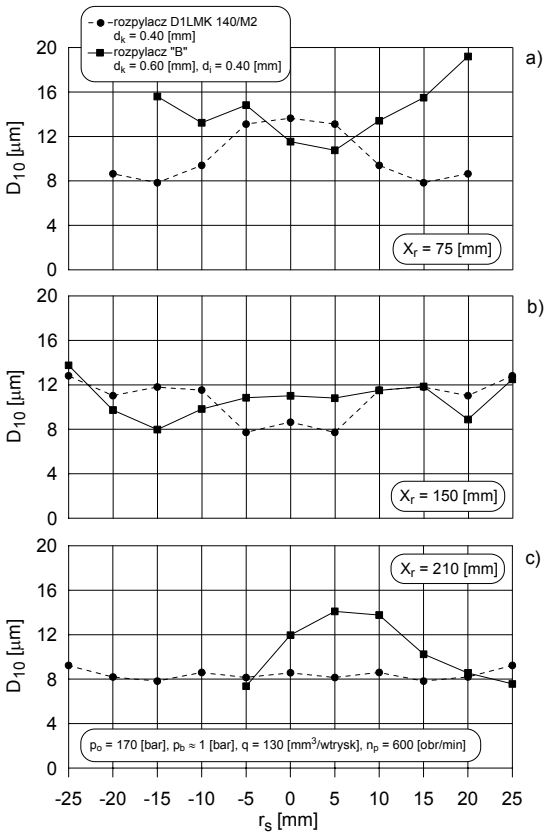
Badania mikrostruktury strugi rozpylanego paliwa przeprowadzono w Instytucie Lotnictwa w Warszawie. W tym celu zbudowano specjalne stanowisko badawcze, którego schemat przedstawiono na rys. 3. Aparaturę badawczą stanowiły: Laser Doppler Velocimeter (LDV) oraz Phase Doppler Particle Analyzer (PDPA). Aparatura ta została wyprodukowana przez amerykańską firmę Aerometrics. Zespół LDV służy do pomiarów składowych prędkości kropel paliwa, natomiast PDPA do pomiarów wymiarów kropel paliwa.

Dla obu wtryskiwaczy ustalono następujące warunki badań:

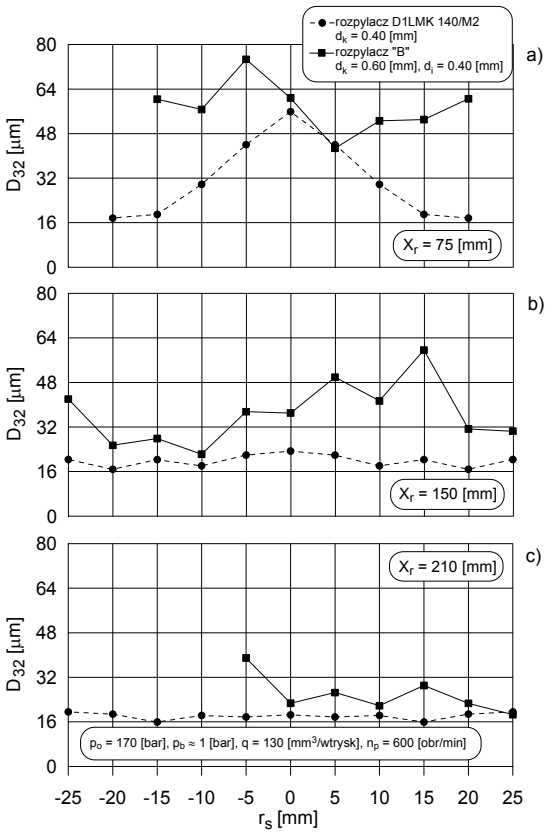
- statyczne ciśnienie otwarcia wtryskiwaczy 170 [bar],
- prędkość obrotowa wałka krzywkowego pompy wtryskowej n_p = 600 obr/min,
- dawka paliwa q = 130 mm^3/wtrysk,
- przeciwciśnienie w komorze wizualizacyjnej, do której wtryskiwano paliwo było równe ciśnieniu otoczenia, tj. $p_b \approx 1$ bar.

Pomiary mikrostruktury strugi prowadzono w płaszczyznach prostopadłych do osi strugi i odległych o 75, 150 oraz 210 mm od otworka rozpylającego. Odległości te ustalano wzdłuż osi strugi, która stanowiła przedłużenie osi otworka wylotowego w korpusie

rozpylacza. Punkty pomiarowe zlokalizowano w różnej odległości r_s od osi strugi. Dokładny opis metodyki pomiaru znajduje się w pracach [7,8].



Rys. 4. Zmiany średniej średnicy arytmetycznej D_{10} kropel paliwa w funkcji odległości od osi strugi r_s dla wtryskiwacza klasycznego i z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy w różnych odległościach X_r od rozpylacza: a) 75 mm, b) 150 mm, c) 210 mm



Rys. 5. Zmiany średnicy Sautera D_{32} kropel paliwa w funkcji odległości od osi strugi r_s dla wtryskiwacza klasycznego i z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy w różnych odległościach X_r od rozpylacza: a) 75 mm, b) 150 mm, c) 210 mm

Na rys. 4 i 5 przedstawiono porównanie średniej średnicy arytmetycznej D_{10} i średnicy Sautera D_{32} kropel paliwa w strugach wytwarzanych przez rozpylacz klasyczny i z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy. Jak widać z rys. 4 najmniejsze różnice w wartościach średnic D_{10} dla strug tworzonych przez oba typy rozpylaczy stwierdzono w odległości 150 mm od rozpylacza. Wówczas średnica D_{10} dla obu wtryskiwaczy zawierała się w granicach 8÷12 μm. Największe wartości średnicy D_{10} wystąpiły w przypadku obu rozpylaczy w płaszczyźnie położonej najbliżej otworka wylotowego (X_r = 75 mm). Może to wskazywać na rozszczepienie strugi tworzonej rozpylaczem z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy na dwie części, z dwoma odrębnie zaznaczonymi rdzeniami. Najmniejsze wartości średnic D_{32} dla strugi wytwarzanej przez rozpylacz z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy uzyskano dla punktów pomiarowych zlokalizowanych w pobliżu „rozszczepienia strugi". W tych punktach pomiarowych, jak wykazała wizualizacja rozwoju strugi [8], zaobserwowano lokalny zanik kropel paliwa wynikający ze zniekształcenia strugi. Należy jednak podkreślić, iż tak charakterystyczny kształt strugi rozpylanego paliwa wytwarzanej rozpylaczem z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy uzyskano w warunkach wtrysku do atmosfery.

4. PODSUMOWANIE

Najważniejszymi i zarazem najczęściej stosowanymi parametrami oceny mikrostruktury rozpylanego paliwa są średnice kropel, widmo rozpylenia i także prędkość kropel. Najbardziej poglądowym parametrem określającym wielkość tworzonych w procesie rozpylania kropel jest ich średnica. Spośród wielu warunków związanych z wtryskiem paliwa, duży wpływ na średnią średnicę Sautera wywiera prędkość wtrysku paliwa, średnica otworka rozpylacza oraz lepkość paliwa. Potwierdzeniem tego są równania modelowe, które bardzo często budowane są w oparciu o dane eksperymentalne i przy wykorzystaniu narzędzi dostarczonych przez analizę wymiarową.

Pomiary średnic kropel mogą być realizowane przy użyciu specjalistycznej aparatury typu PDPA. Zaprezentowane wyniki badań mikrostruktury strugi rozpylanego paliwa wskazują, że struga generowana przez rozpylacz nowej konstrukcji, w którym iglica wykonuje ruch obrotowo-zwrotny, charakteryzuje się innymi własnościami w stosunku do strugi generowanej przez wtryskiwacz klasyczny. Jednym z istotnych czynników, który może być wykorzystany do kształtowania mikrostruktury rozpylania jest więc zastosowanie zmiennych przekrojów otworków wylotowych rozpylacza.

LITERATURA

[1] Abata D.L., Stroia B.J., Beck N.J., Roach A.R.: Diesel Engine Flame Photographs With High Pressure Injection. SAE Transactions 1988.

[2] Arcoumanis C., Gavaises M., French B.: Effect of Fuel Injection Processes on the Structure of Diesel Sprays. SAE Transactions 1997.

[3] Beck N.J., Uyehara O.A., Johnson W.P.: Effects of Fuel Injection on Diesel Combustion. SAE Transactions 1988.

[4] Binder K., Hilburger W.: Influence of the Relative Motions of Air and Fuel Vapor on the Mixture Formation Processes of the Direct Injection Diesel Engine. SAE Transactions 1981.

[5] Hiroyasu H., Arai M.: Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines. SAE Transactions 1990.

[6] Hiroyasu H., Arai M., Tabata M.: Empirical Equations for the Sauter Mean Diameter of a Diesel Spray. SAE Transactions 1989.

[7] Kuszewski H.: Badania mikrostruktury strugi paliwa rozpylanego przez wtryskiwacz klasyczny i z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy. Materiały XVI Konferencji Międzynarodowej nt. „Metody Obliczeniowe i Badawcze w Rozwoju Pojazdów Samochodowych i Maszyn Roboczych Samojezdnych", „Zarządzanie i Marketing w Motoryzacji", SAKON 2005, Rzeszów 2005.

[8] Kuszewski H.: Wpływ zmiennych przekrojów wylotowych wtryskiwacza z obrotową iglicą na rozpylanie oleju napędowego. Praca Doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2003.

[9] Kuszewski H., Ustrzycki A.: Wpływ warunków wtrysku na mikrostrukturę strugi rozpylanego paliwa. Науково-технічний збирник No 16 `2008, Вісник / Національного транспортного університету, Київ 2008.

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF IMPACT ON A MICROSTRUCTURE OF FUEL SPRAY

In the paper the effect of the most important parameters connected with fuel injection on the microstructure of fuel spray is presented. An examples of calculation of Sauter mean diameter are presented. For this purpose, a model developed by Hiroyasu, Arai and Tabata was used. Next section presents selected results of microstructure study conducted with using the PDPA measurement system.