

STUDY OF FLOW CHARACTERISTICS AND MEAN DIAMETER OF DROPLETS INSIDE SPRAY CONE OF SWIRL INJECTOR

Wiesław Glinka¹, Tadeusz Litwin¹, Tadeusz Opara²

1) Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Ciepłej
00-665 Warszawa, ul. Nowowiejska 21/25

tel. (48-22) 660 52 66, fax. (48-22) 825 05 65, e-mail: glinka@itc.pw.edu.pl

2) Politechnika Radomska, Instytut Mechaniki Stosowanej
26-600 Radom, ul. Krasickiego 54

tel. (48-48) 361 71 29, fax. (48-48) 361 71 32, e-mail: tadeuszopara@civ.pl

Abstract

The paper presents results of preliminary measurements of the flow characteristics and the mean diameter of aerosol droplets inside the spray cone of the swirl injector of changeable geometry. The research stand equipped with a registered apparatus providing computer processing of measurement data was design and built. The injector liquid flow rate was measured using the volumetric method. The mean diameter of spray droplets was evaluated by studying diffraction of the plane-parallel light wave propagating through the spray cone. Measurements were carried out for the overpressure of the dispersed liquid in the range of $0-25 \times 10^5$ Pa.

BADANIE CHARAKTERYSTYKI PRZEPIYWOWEJ I PRZECIĘTNEJ ŚREDNICY KROPEL W STOŻKU ROZPYLANIA WTRYSKIWACZA WIROWEGO

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki wstępnych pomiarów charakterystyki przepływowej i przeciętnej średnicy kropeł aerozolu w stożku rozpylania wtryskiwacza wirowego o zmiennej geometrii. Skonstruowano i uruchomiono stanowisko badawcze wyposażone w aparaturę rejestrującą z komputerowym przetwarzaniem danych pomiarowych. Wydatek wtryskiwacza zmierzono metodą objętościową. Przeciętna średnica kropeł widma rozpylenia została określona poprzez badanie dyfrakcji płaskorównoległej fali świetlnej propagującej przez stożek rozpylania. Pomiar przeprowadzono dla nadciśnienia rozpylanej cieczy w zakresie $0-25 \times 10^5$ Pa.

1. Wprowadzenie

Podstawowym zadaniem wtryskiwaczy jest dostarczenie do silnika określonej ilości paliwa rozdrobnionego w stopniu umożliwiającym jego odparowanie oraz wytworzenie jednorodnej mieszanki par z powietrzem w celu osiągnięcia wysokiej sprawności spalania. Odpowiednie rozpylenie materiału pędnego powinno również zapewniać wysoką stateczność oraz ciągłość spalania bez zdmuchiwania i gaśnięcia płomienia we wszystkich zakresach pracy silnika, a także właściwy rozkład temperatury spalin w przekroju wylotowym komory spalania.

W trakcie eksploatacji silników spalinowych występują często odstępstwa od nominalnych parametrów pracy poszczególnych wtryskiwaczy. Polegają one głównie na zmianie widma rozpylenia wytworzonego aerozolu paliwowego $\rho(D)$, powiększaniu się odstępstw od osiowo-symetrycznego rozkładu funkcji opisującej przestrzenny rozkład kropeł w stożku $I(r, \phi, \Delta p)$ oraz zmianę charakterystyki przepływowej $Q(\Delta p)$. W turbinowych silnikach lotniczych (odrzutowych, śmigłowych i śmigłowcowych) skutkuje to deformacją rozkładu pola

temperatury $t(l, r, \phi)$ we wszystkich przekrojach kanału przepływowego od komory spalania, aż do dyszy wylotowej, przegrzewaniem się ścianek tych komór, kierownic i łopatek turbin, jak również spadkiem ciągu (lub mocy) oraz wzrostem jednostkowego zużycia paliwa. Z tych powodów bardzo istotną rolę odgrywa diagnostyka, umożliwiająca właściwą selekcję wtryskiwaczy.

Metody diagnozowania wtryskiwaczy można podzielić na badania makrostruktury i mikrostruktury rozpylanej cieczy. Kontrolne pomiary wydatku paliwa $Q(\Delta p)$, kąta stożka rozpylenia $\alpha(\Delta p)$, nierównomierności obwodowej $I(\phi, \Delta p)$ oraz promieniowej $I(r, \Delta p)$ nie stanowią wystarczającego kryterium oceny wtryskiwaczy, gdyż nie uwzględniają one informacji o stopniu rozdrobnienia aerozolu paliwowego, co stanowi poważną „lukę diagnostyczną” w procesie oceny ich zdatności [1,2]. Przydatne stają się informacje o mikrostrukturze stożka rozpylenia, to jest widmie średnic kropeł $\rho(D)$, ich rozkładzie przestrzennym $D(x, y, z)$ oraz prędkości $v(x, y, z)$. Pomiary mikrostruktury rozpylonej cieczy są skomplikowanym zadaniem eksperymentalnym z powodu małych rozmiarów badanego obiektu oraz jego znacznej zmienności w czasie i przestrzeni. Trudności spowodowane są dużą liczbą wytwarzanych kropeł, szerokim zakresem ich średnic, zróżnicowaniem ich prędkości oraz zmianą kształtu i wymiarów w trakcie ruchu.

W diagnostyce znaczenie może mieć metoda badania aerozoli paliwowych charakteryzująca się relatywnie wysoką dokładnością pomiaru i krótkim czasem jego trwania, niską pracochłonnością opracowania wyników oraz niskimi kosztami aparatury. Proces pomiarowy nie powinien zaburzać strugi w zbyt dużym stopniu. Istotną jest możliwość rejestracji kropeł o średnicy poniżej 50 μm , jak również poznanie przestrzennej struktury rozpylonej strugi [7].

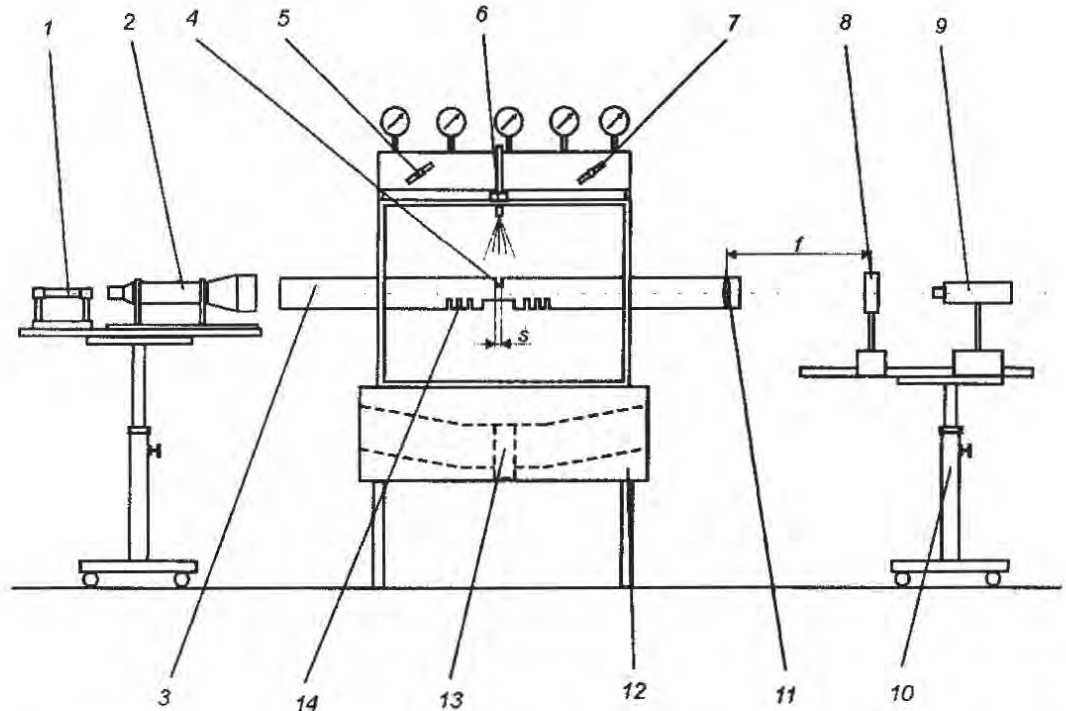
Większość stosowanych metod spełnia tylko wybiórczo powyższe wymagania. Zaletą metod fotograficznych jest niski koszt aparatury, natomiast poważną wadą jest skomplikowany proces przetwarzania danych. Podobne trudności w analizie danych występują w metodzie holografii, pozwalającej uzyskiwać obraz dużej objętości strugi kropeł. Metody śladowe, pomimo nieskomplikowanego przeprowadzania pomiarów i niskich kosztów są obciążone wieloma błędami.

Znaczną część z przedstawionych powyżej wymagań spełnia metoda dyfrakcyjna [1-5]. Wykorzystana w niej jest dyfrakcja Fraunhofer'a płasko-równoległej, spójnej fali świetlnej propagującej w obszarze stożka rozpylenia. Wiązka świetlna rozproszona na kropli wytwarza charakterystyczne pierścienie dyfrakcyjne, których rozmiary są odwrotnie proporcjonalne do jej średnicy. Cechą szczególną tej metody jest to, że obraz generowany przez krople nie zależy od ich położenia w strudze, co umożliwia prowadzenie pomiarów w trakcie ich ruchu z dowolną prędkością. Zaletą metody dyfrakcyjnej jest krótki czas rejestracji powstających obrazów dyfrakcyjnych oraz możliwość wyznaczenia przeciętnej średnicy kropeł $D_s(\Delta p)$ ze stosunkowo dużej objętości stożka rozpylenia. Zaleta ta eliminuje jednak możliwość poznania przestrzennej struktury badanej strugi cieczy. Zastosowana w badaniach metoda dyfrakcji światła wymaga spełnienia następujących założeń:

- ośrodek dyspersyjny i rozpylona ciecz są optycznie jednorodne i izotropowe,
- długość fali światła padającego jest równa długości fali światła rozproszonego,
- kształt kropeł jest kulisty a ich średnica większa od długości fali świetlnej,
- średnia odległość między kroplami jest kilkakrotnie większa od długości fali świetlnej,
- pominięte jest wzajemne oddziaływanie fal ugiętych na sąsiednich kroplach,
- rozkład przestrzenny kropeł w strudze jest przypadkowy,
- fala świetlna ulega jednokrotnej dyfrakcji.

Na obraz dyfrakcyjny mają wpływ wszystkie krople znajdujące się w przestrzeni pomiarowej. Rozkład natężenia światła rejestrowany w płaszczyźnie ogniskowej obiektywu realizującego transformację Fouriera obrazu dyfrakcyjnego jest bowiem superpozycją obra-

zów wytwarzanych przez każdą kroplę. Z tego wynika podstawowa właściwość tej wersji metody dyfrakcyjnej polegająca na tym, że sumowanie – a w końcowym efekcie uśrednianie – następuje na etapie zjawisk fizycznych. Zredukowanie informacji o widmie rozpylania $\rho(D)$ do wartości przeciętnej D_s (średniej arytmetycznej), nazywanej niekiedy średnicą zastępczą D_z , jest pewnym ograniczeniem tej metody, które może być jej zaletą, w przypadku prowadzenia seryjnych badań porównawczych. Ta właśnie cecha omawianej metody dyfrakcyjnej wraz z reprezentatywnością obszaru pomiarowego, przesądza o jej przydatności w diagnostyce urządzeń wytwarzających aerozole paliwowe.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego do pomiarów charakterystyki przepływowej $Q(\Delta p)$ oraz przeciętnej średnicy kropeł $D_s(\Delta p)=D_z(\Delta p)$ w stożku rozpylania wtryskiwacza wirowego

1 - moduł laserowy ML-4PM-660-50, 2 - luneta ZHL-LL, 3 - tuba ochronna, 4 - szczelina wlotowa, 5 - zawór regulacji wydatku rozpylanej cieczy, 6 - badany wtryskiwacz, 7 - zawór regulacji dopływu powietrza, 8 - matówka w płaszczyźnie obrazowej, 9 - kamera, 10 - stolik regulacyjny, 11 - obiektyw realizujący transformację Fouriera, 12 - komora pomiarowa, 13 - spływ cieczy z komory pomiarowej, 14 - otwory odpływowe w rurze

Fig. 1. Scheme of research stand for measurements of flow characteristics $Q(\Delta p)$ and mean diameter of droplets $D_s(\Delta p)=D_z(\Delta p)$ inside spray cone of swirl injector

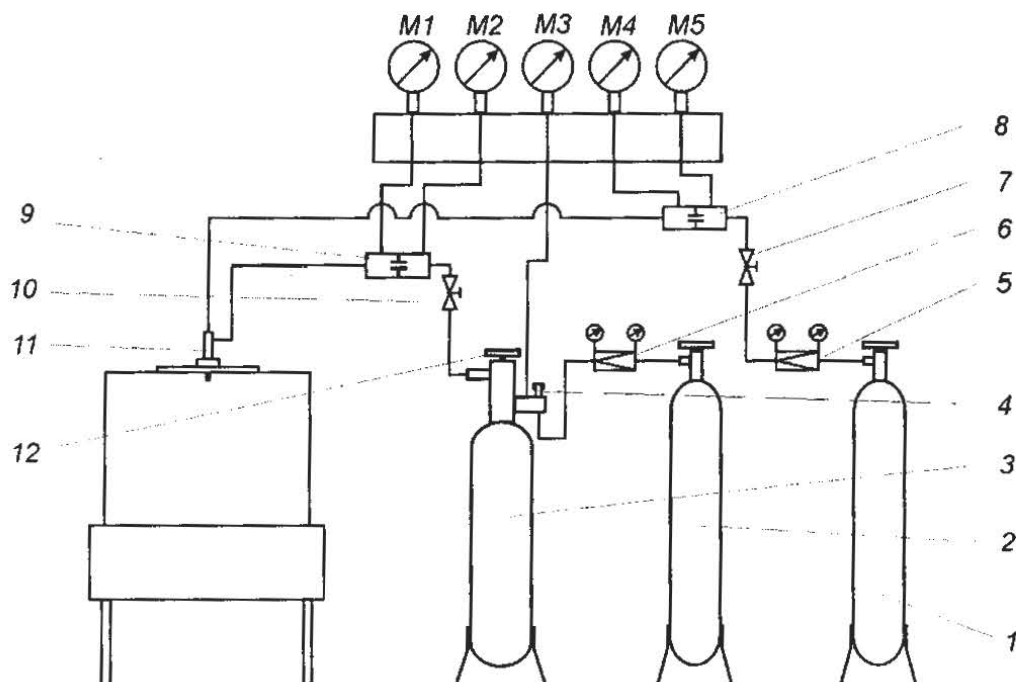
1 - laser module ML-4PM-660-50, 2 - collimator ZHL-LL, 3 - protection pipe, 4 - gap, 5 - valve for controlling of liquid rate, 6 - injector, 7 - valve for controlling of air rate, 8 - focusing screen at image plane, 9 - camera, 10 - laboratory table, 11 - lens for Fourier transformation, 12 - measurement chamber, 13 - run-off of liquid from measurement chamber, 14 - run-off holes in pipe

2. Stanowisko badawcze

Pomiary umożliwiające określenie charakterystyki przepływowej $Q(\Delta p)$ oraz wyznaczenie przeciętnej średnicy kropeł $D_s(\Delta p)$ w stożku rozpylania wtryskiwacza wirowego, przeprowadzono na stanowisku badawczym, którego schemat pokazano na rys. 1. W stanowisku tym można wyróżnić trzy podstawowe zespoły:

- układ generujący płaską falę monochromatyczną,
- komorę badawczą,
- układ rejestracji i przetwarzania obrazów dyfrakcyjnych.

Źródłem światła układu generującego falę monochromatyczną jest moduł laserowy o mocy wyjściowej 40 mW i długości fali 0.66 μm . Wiązka światła lasera jest przetwarzana w falę płaską za pomocą lunety ZHL-LL. Komora badawcza składa się z przeszklonej części pomiarowej oraz komory zlewowej. W jej górnej części mocowany jest badany wtryskiwacz. Optyczny tor pomiarowy jest separowany przez tubę ochronną, spełniającą rolę osłony optycznej. Regulowany otwór wlotowy w jej środkowej części pozwala na ograniczenie przestrzeni badawczej (oświetlonej przez wiązkę świetlną) w takim stopniu, aby w każdym zakresie pracy wtryskiwacza spełnione było założenie o jednokrotnej dyfrakcji.



Rys. 2. Schemat zasilania stanowiska

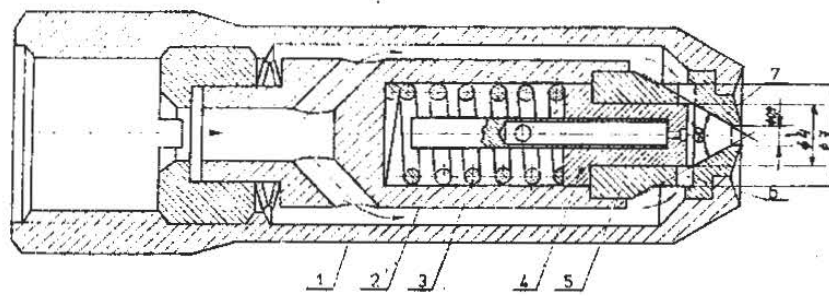
1,2 – butle z powietrzem, 3 – butla z cieczą, 4 – upust powietrza, 5,6 – reduktory ciśnienia, 7 – zawór regulacji powietrza, 8 – kolektor pomiaru wydatku powietrza, 9 – kolektor pomiaru wydatku wody, 10 – zawór regulacji wydatku cieczy, 11 – badany wtryskiwacz, 12 – zawór odcinający, M1+M5 – manometry

Fig. 2. Scheme of supplying system

1,2 – air cylinders, 3 – liquid cylinder, 4 – air bleeding, 5,6 – air regulators, 7 – air register, 8 – collector for measuring air rate, 9 – collector for measuring water flow rate, 10 – control valve of water flow rate, 11 – injector, 12 – stopcock, M1+M5 – manometers

Płyn do wtryskiwacza dostarczany jest z układu syfonowego, który tworzy butla częściowo wypełniona cieczą z poduszką powietrzną o ciśnieniu zadawanym z butli. Układ został wyposażony w drugą butlę z powietrzem przeznaczoną do zasilania wtryskiwaczy pneumatycznych. Zespół kontrolno-pomiarowy umożliwia precyzyjną regulację wydatków paliwa i powietrza. Schemat układu zasilania jest przedstawiony na rys. 2.

Układ odbiorczy składa się z obiektywu o ogniskowej $f=500$ mm, za pomocą którego dokonuje się transformacji Fouriera wiązki rozproszonej na kroplach aerozolu, matówki oraz kamery CCD. Obraz dyfrakcyjny, powstający w płaszczyźnie ogniskowej, był rejestrowany i przetwarzany przez program opracowany dla potrzeb metody. Badania przeprowadzono dla jednokanałowego wtryskiwacza wirowego, opracowanego i wykonanego w Instytucie Lotnictwa przez dr inż. J.M. Kowalskiego. Schemat wtryskiwacza pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Wtryskiwacz wirowy o zmiennej geometrii

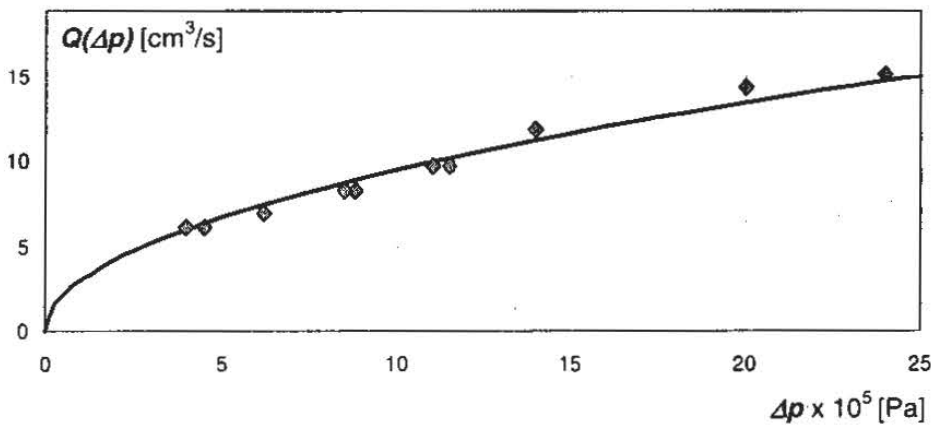
1 - korpus rozpylacza, 2 - komora sprężyny, 3 - sprężyna, 4 - tłoczek, 5 - zawirowywacz, 6 - kanaliki zawirowywacza, 7 - dysza rozpylacza

Fig. 3. Swirl injector of changeable geometry

1 - nozzle holder, 2 - spring chamber, 3 - spring, 4 - piston, 5 - swirler, 6 - swirler ducts, 7 - nozzle

3. Charakterystyka przepływowa wtryskiwacza

Pierwsza seria badań została przeprowadzona z wykorzystaniem wody jako płynu roboczego. Charakterystyka przepływowa $Q(\Delta p)$ wtryskiwacza wyznaczona metodą objętościową jest pokazana na rys. 4.



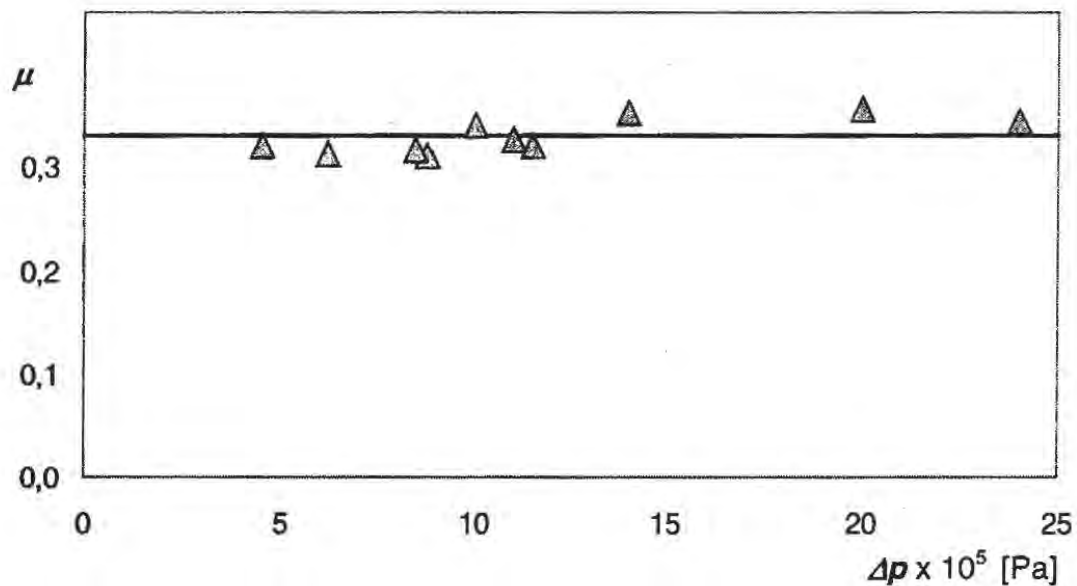
Rys. 4. Charakterystyka przepływowa $Q(\Delta p)$ wtryskiwacza wirowego o zmiennej geometrii

Fig. 4. Flow characteristics $Q(\Delta p)$ of swirl injector of changeable geometry

Charakterystyka przepływowa wtryskiwacza, czyli zależność jego wydatku od spadku ciśnienia rozpylanego płynu w przekroju wylotowym zostały aproksymowana przez zależność teoretyczną

$$Q(\Delta p) = \mu A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

w której μ jest współczynnikiem wypływu przez otwór o powierzchni A , zaś ρ - gęstością rozpylanej cieczy. Współczynnik wypływu $\mu(\Delta p)$ tylko w niewielkim stopniu zmienia się wraz ze zmianą spadku ciśnienia (rys.5) a jego średnia wartość wynosi $\mu_{sr} = 0.33$.



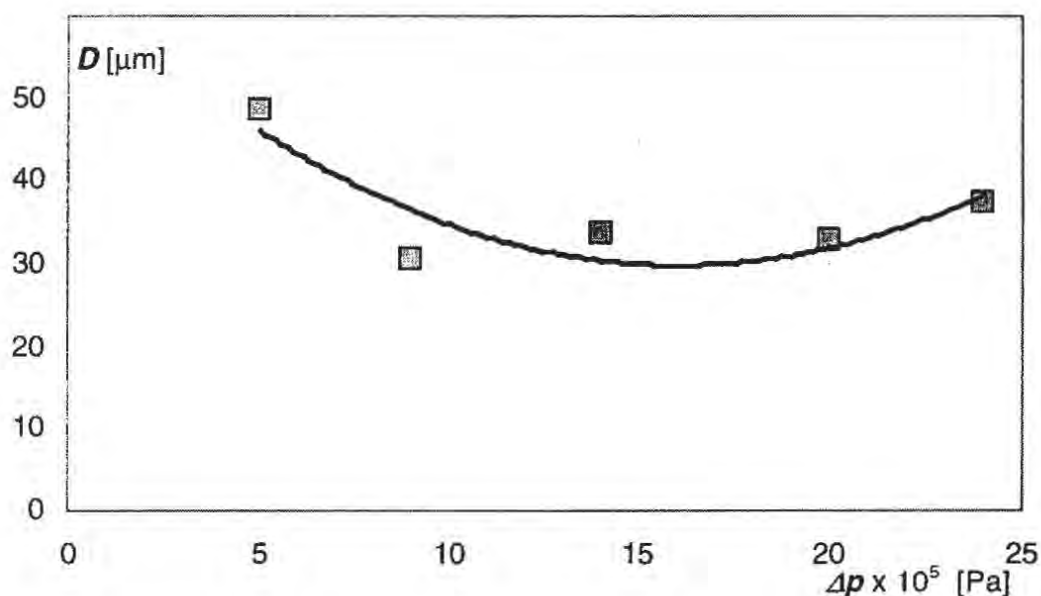
Rys. 5. Współczynnik wypływu $\mu(\Delta p)$ wtryskiwacza wirowego o zmiennej geometrii
 Fig. 5. Outflow factor $\mu(\Delta p)$ of swirl injector of changeable geometry

4. Przeciętna średnica kropeł w stożku rozpylania

Pomiary przeciętnej średnicy kropeł $D_s(\Delta p)$ były dokonywane w przestrzeni stożka oświetlonej płaską falą monochromatyczną. Przestrzeń ta miała kształt quasi-dysku o średnicy 77 mm, którego środek oddalony był o 225 mm od dyszy wtryskiwacza. Szerokość tego dysku była nieco większa od wymiaru s otworu w tubie ochronnej (rys.1). Objętość przestrzeni pomiarowej wynosiła około 250 ml i można ją uznać za reprezentatywną.

Pomiary przeprowadzone dla różnych ciśnień wtrysku Δp , obejmowały rejestrację obrazów dyfrakcyjnych powstających po przejściu fali świetlnej przez wyodrębniony obszar stożka rozpylania. Z obrazów tych wyznaczano uśredniony rozkład natężenia światła $I(r)$ w funkcji promienia wodzącego r , określającego odległość od wybranego punktu do osi optycznej toru pomiarowego. Rozkłady te były podstawą do określenia przeciętnej średnicy kropeł aerozolu D_s .

W zastosowanej metodzie, szczegółowo omówionej w pracach [1-5], przyjęto model jednokrotnej dyfrakcji fali świetlnej na kroplach badanego aerozolu. Błąd względny pomiaru przeciętnej średnicy oszacowano $\Delta D/D=5+10\%$. Obliczone wartości średnich średnic kropeł widma rozpylania wody dla różnych spadków ciśnienia wtrysku Δp zostały pokazane na rys. 6.



Rys. 6. Przeciętna średnica kropeł aerozolu $D_s(\Delta p)$ w zależności od ciśnienia wtrysku
 Fig. 6. Mean diameter of aerosol droplets $D_s(\Delta p)$ depending on injection pressure

Przeciętna średnica kropeł w stożku rozpylenia D_s początkowo maleje, co wynika ze wzrostu prędkości wypływu cieczy z dyszy wtryskiwacza. Dla spadku ciśnienia Δp w zakresie $(10 \div 20) \times 10^5$ Pa, krople mają najmniejszą średnicę $D_s = 30 \div 35 \mu\text{m}$. Dalszy wzrost ciśnienia tłoczenia cieczy powoduje nieznaczny wzrost wymiarów kropeł.

5. Wnioski

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że charakterystyka przepływu $Q(\Delta p)$ wykazuje dużą zbieżność z zależnością teoretyczną, a współczynnik wypływu $\mu(\Delta p) \approx 0.33$ ma niemal stałą wartość w całym zakresie ciśnienia toczenia cieczy. Pomiar przeciętnej średnicy kropeł $D_s(\Delta p)$ pozwalają na określenie przedziału ciśnienia wtrysku Δp , w którym osiąga ona wartości minimalne D_{min} . Eksperymentalne wyznaczenie tego obszaru jest istotne, ponieważ trudno jest w sposób wiarygodny określić go teoretycznie [6-8]. Pomimo ogromnego postępu w numerycznej mechanice płynów, próby analitycznego wyznaczenia widma rozpylenia $\rho(D)$ prowadzą jedynie do wyników jakościowo zgodnych z danymi eksperymentalnymi (i to tylko dla najprostszych rozwiązań konstrukcyjnych wtryskiwaczy). Zastosowana metoda dyfrakcyjna potwierdziła swoją efektywność i przydatność do tego typu badań. Należy jednak podkreślić, że jej realizacja techniczna jest trudna, a przetworzenie zarejestrowanych danych bardzo czasochłonne, pomimo zastosowania wielu algorytmów numerycznych.

Przy opracowaniu metodyki pomiarów mikrostruktury stożka rozpylenia wtryskiwaczy wirowych oraz analizie uzyskanych wyników wykorzystano prace z tego zakresu prowadzone w Zakładzie Napędów Lotniczych i Termodynamiki ITL WAT [1-5].

Praca została zrealizowana w ramach projektu badawczego nr 8 T12D 002 21 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych.

- [1] Praca zbiorowa pod redakcją naukową M. Orkisz.: *Turbinowe silniki lotnicze w ujęciu problemowym*. Polskie Naukowo–Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne, Lublin 2000
- [2] Opara T.A.: *Metrologiczne aspekty badania zjawisk zachodzących w stożku rozpylania wtryskiwaczy paliwa turbinowych silników lotniczych*. WAT, Warszawa 1996
- [3] Opara T.A.: *Diffraction measurement methods of sizes of drops in quasi-monodisperse aerosol*, *Optica Applicata*, Vol. XXX, No 4, 2000
- [4] Opara T.A.: *Diffraction methods of drop size measurement in polydisperse media*, *Optica Applicata*, Vol. XXXI, No 1, 2001
- [5] Opara T.A.: *Test stands for measuring the average diameter of the fuel aerosol drops by diffraction method*, *Optica Applicata*, Vol. XXXI, No 1, 2001
- [6] Orzechowski Z., Prywer J.: *Rozpylanie cieczy*. WNT, Warszawa 1991
- [7] Orzechowski Z., Prywer J.: *Rozpylanie cieczy w urządzeniach energetycznych*, WNT Warszawa 1994
- [8] Prywer J.: *Wpływ parametrów konstrukcyjnych rozpylaczy strumieniowo-wirowych na ich właściwości*, *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej nr 916, Rozprawy Naukowe z. 317*, Łódź 2003