Robert JAKUBOWSKI*
Adam KONIECZNY
Marek ORKISZ
Zdzisław SIEKIERDA
Piotr WYGONIK
Maria ZARSZYŃSKA

Wtryskiwacz aeracyjny do silnika malego bezzalogowego aparatu latajacego – prezentacja i omówienie wyników badañ

W pracy przestawiono zaproponowane rozwiązanie konstrukcyjne wtryskiwacza, który w przyszłości ma być wykorzystany do rozpylania paliwa w małym bezzałogowym aparacie latającym. Krótko przedstawiono przebieg prac nad wykonaniem modelu wtryskiwacza w metodzie rapid prototyping, a następnie omówiono prowadzone prace badawcze, które miały na celu określić właściwości rozpylanej cieczy. Przedstawiono i omówiono wyniki badań przepływowych oraz makrostruktury rozpylanej strugi cieczy, na podstawie których sformułowano wnioski odnośnie wpływu cech konstrukcyjnych wtryskiwacza i parametrów zasilania na parametry rozpylania.

Słowa kluczowe: *silnik lotniczy, wtryskiwacz aeracyjny, rozpylanie cieczy, natężenie przepływu*

Aeral injector for combustor of small unmanned aircraft – results of investigation

The The conception of the construction of the fuel spray injector for a turbo engine of a small unmanned aircraft is proposed in this paper. The work out of the injector model made in rapid prototyping method is shortly presented. Methods of the injector investigation were described. The results of the injector flow parameters and macrostructure parameters investigation were presented and discussed. They were used to formulate the main conclusion connected with the relation between the injector construction, the injector feeding parameters and spray parameters.

Key words: *aircraft engine, aeral injector, liquid atomization, flow rate*

1. Wstep

W Katedrze Samolotów i Silników Lotniczych Politechniki Rzeszowskiej prace nad bezzałogowymi aparatami latającymi są prowadzone od kilku lat. Jednym z realizowanych w tym zakresie tematów jest opracowanie wtryskiwacza do małego silnika turbinowego, który miałby stanowić w przyszłości napęd tego typu statków powietrznych.

Wyniki wstępnych analiz różnych rozwiązań wtryskiwaczy [13, 14, 15] doprowadzenia paliwa do silnika wskazały, że bardzo korzystne byłoby zastosowanie wtryskiwacza aeracyjnego. Przemawia za tym kilka względów, a przede wszystkim to, że do jego zasilania nie jest wymagana instalacja paliwowa o bardzo wysokim ciśnieniu. Pozwala to na odciążenie konstrukcji przez rezygnację z pompy paliwa wysokiego ciśnienia, a przez to zmniejszenie mocy odbieranej od silnika do jej napędu. Ma to szczególnie istotne znaczenie przy konstruowaniu małych samolotów, gdzie redukcja każdej dodatkowej masy oraz racjonalna gospodarka zasobami energetycznymi silnika pozwala zwiększyć ich właściwości użytkowe.

Kolejną korzystną cechą tego rozwiązania jest to, że przez odpowiednie oddziaływanie konstrukcji wtryskiwacza na przepływające przez niego powietrze i paliwo udaje się uzyskać mieszankę paliwowo-powietrzną o dobrym rozpyleniu i korzystnej mikrostrukturze kropel [1, 5, 7, 8, 16]. We wtryskiwaczu stosowane są bowiem zawirowywacze powietrza w obydwu kanałach o przeciwnych kierunkach zawirowania.

1. Introduction

The work of small unmanned aircrafts has been conducted in Aircrafts and Aircraft Engines Department for a few years. One of the investigated problems is to work out an injector for combustor of small turbo engine. This engine will propel the small unmanned aircraft in the future.

The results of a preliminary analysis of various types of injectors showed that the aeral injector could be a more profitable sprayer in the combustor of the small turbo engine [13, 14, 15]. This is because it cooperates with a low pressure fuel installation. For this reason the fuel installation is lighter (there is no high pressure pump) and the energy consumption lower (does not power the high pressure pump). Finally, we can get a small aircraft with higher capacity and greater energy.

Another advantage of the aeral injector is its construction. There are blade rows with an opposite swirl direction in two channels of it. They give the air-fuel mixture of good macro and microstructure parameters [1, 5, 7, 8, 16].

The high by-pass engines with combustors equipped with injectors of presented types, which are operated these days (for example CFM 56D) are environmentally friendly [12]. The greater amount of air in the combustion zone lowers NO_X emission.

All of the presented aspects caused the start of work out and an investigation of the aeral injector for a small unmanned aircraft. The first stage of the work included: working out of

Eksploatowane obecnie duże silniki lotnicze, których komory spalania wyposażone są we wtryskiwacze tego typu (np. silnik CFM 56D), wskazują na korzystne walory tego rozwiązania z punktu widzenia ekologii [12]. Poprzez zwiększenie udziału powietrza bezpośrednio w strefie spalania obniża się bowiem emisyjność tlenków azotu.

Wszystkie te aspekty spowodowały, że podjęto prace nad opracowaniem i przebadaniem wtryskiwacza aeracyjnego, który mógłby w przyszłości zasilać mały bezzałogowy aparat latający. Pierwszym etapem było opracowanie kształtu wtryskiwacza, jego projekt i wykonanie w metodzie sereolitografii z żywicy epoksydowej, a następnie przeprowadzenie badań przepływowych oraz oceny właściwości makrostruktury rozpylanej cieczy. Wyniki realizacji tego etapu prac zostaną przedstawione w prezentowanym artykule.

2. Wtryskiwacz aeracyjny – koncepcja rozwiazania

Przyjęte rozwiązanie wtryskiwacza schematycznie przedstawiono na rysunku 1. Składa się on z dwóch kanałów przepływowych – wewnętrznego i zewnętrznego, między którymi występuje kanał paliwowy, doprowadzający rozpylaną ciecz do wylotu w kanale wewnętrznym. Podczas pracy wtryskiwacza rozpylana ciecz jest zasysana przez powietrze z kanału wewnętrznego, następnie ulega rozdrobnieniu w wyniku działania wewnętrznego zawirowanego strumienia powietrza. Powstający aerozol jest ponownie rozpylany przez zewnętrzny strumień zawirowanego w przeciwnym kierunku powietrza. Zapewnia to dobre rozpylenie cieczy oraz uzyskanie homogenicznej mieszanki paliwowo-powietrznej.

Projekt części przepływowej wtryskiwacza wykonano z wykorzystaniem programu komputerowego opracowanego w oparciu o zależności konstrukcyjno-przepływowe dla tego typu wtryskiwaczy [2, 4, 6, 9, 11]. Stosunek pól powierzchni przekrojów kanału zewnętrznego i wewnętrznego przyjęto na poziomie 2,4. Grubość szczeliny wypływu cieczy założono na ok. 0,3 mm.

Przyjęto, że przepływ powietrza w obu kanałach wtryskiwacza jest osiowy do momentu występowania palisad łopatkowych, które zawirowują przepływający strumień w obydwu kanałach w przeciwnych kierunkach. Palisadę w kanale wewnętrznym tworzy 7 odpowiednio ukształtowa-

the conception of injector shape, making a project, executing it by epoxide resin in rapid prototyping method, investigating the injector flow losses and macrostructure of spray. The results of this step are presented in this article.

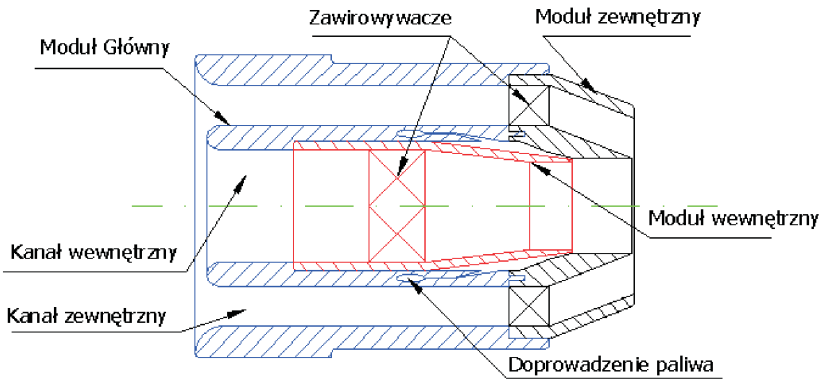
2. Conception of aeral injector

The diagram of the aeral injector is presented in Fig 1. The injector consists of two flow channels – internal and external. The fuel supply pipe is between them. Fuel is supplied to the outlet of an internal channel. The spray liquid is sucked by air flow through the internal channel during the injector work. Liquid is broken-up by swirl air in this channel. Aerosol is sprayed again by opposite directed swirl flow in the external channel. It gives a good droplet size reduction and homogenization of spray.

The analytical calculation of injector was done with the use of the computer program which included internal channel flow and the flow through blade cascade rows [2, 4, 6, 9 11]. The external to internal channel area ratio was 2.4. The width of the fuel supply gap was 0.3 mm.

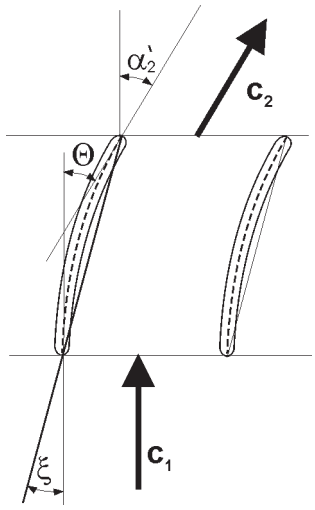
The flow through both channels was taken as axial to the blade rows. Blades swirl flow in opposite direction. There are 7 blades in the internal cascade and 13 blades in the external cascade. The blades camber line is a circular arc. The profile thickness is fixed at 0.7 mm. The arrangement of the blades in the cascades gives axial inflow with 0° of incident angle. The outlet angle of the blades is describe by α_2'. Profile geometry is shown in Fig. 2. For the purpose of the investigation the inserts with blades rows with stagger angle of 10°, 15°, 20°, 25° (swirl angle 20°, 30°, 40°, 50°) were done for both channels.

The injector has the modular structure, Fig. 3. It gives a possibility to investigate various angles of flow swirl by using only one injector with the replaceable inserts of the blades rows for internal and external channels. Modules and the injector casing were done from ep-



Rys. 1. Schemat wtryskiwacza aeracyjnego

Fig 1. Diagram of aeral injector



Rys. 2. Wycinek palisady łopatkowej z pokazaniem przyjętej nomenklatury oznaczeń

Fig. 2. Blades palisade

c_1, c_2 – wektory prędkości napływu i spływu z palisady zawirowującej wtryskiwacz/*vectors of flow in and out of palisade velocity*; ξ – kąt zaklinowania profilu w palisadzie/*stagger angel*; – kąt skręcenia łopatki/*blade swirl angle*;

– konstrukcyjny kąt na spływie z łopatki/*blade outlet angle*

nych łopatek, a w kanale zewnętrznym 13 łopatek. Szkieletowa łopatek jest łukiem koła, a grubość profilu jest stała i wynosi 0,7 mm. Łopatki tak są ustawione w palisadach, że krawędź napływu łopatek jest w osi kanału, natomiast krawędź spływu jest odchylona od kierunku osiowego o zadany kąt α_2'. Geometrię profilu z zaznaczonymi kątami przedstawiono na rysunku 2. W celach badawczych wykonano dla obydwu kanałów wkładki z łopatkami o kącie zaklinowania profilu wynoszącym 10°, 15°, 20° i 25°, co daje kąty zawirowania wkładek odpowiednio 20°, 30°, 40° i 50°.

W celu prowadzenia badań dla różnych kątów zawirowania łopatek bez konieczności budowania kilku wtryskiwaczy opracowano wtryskiwacz o budowie modułowej, rys. 3. Moduły wykonano metodą stereolitografii z żywicy epoksydowej, co znacząco obniżyło koszty i przyśpieszyło czas realizacji w stosunku do wykonania w metalu. Przez to jednakże ograniczony został obszar zastosowań do rozpylania wody, ponieważ paliwo spowodowałoby rozpuszczenia wtryskiwacza.

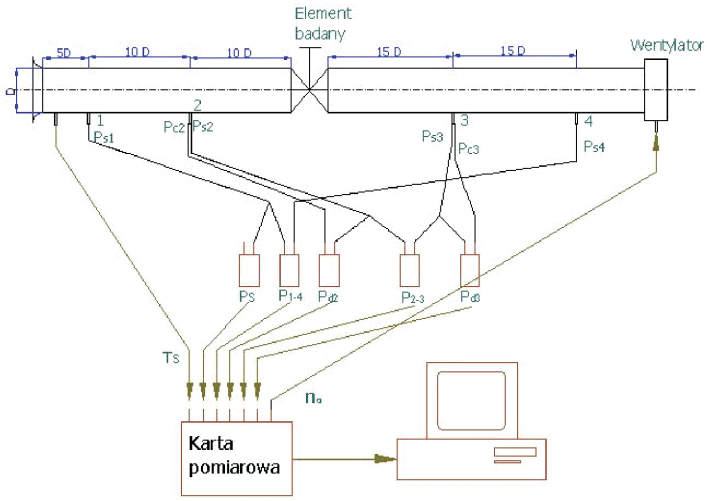
3. Badanie wlasciwosci przeplywowych wtryskiwacza

Charakterystyki przepływowe wtryskiwacza wyznaczono na podstawie wyników pomiarów wykonanych na stanowisku badawczym, którego schemat przedstawiono na rysunku 4. Na podstawie badań określono zależność współczynnika strat ciśnienia we wtryskiwaczu ζ_w i związanego z tym współczynnika natężenia przepływu μ [13, 14] od wydatku powietrza przepływającego przez wtryskiwacz.

Stratę ciśnienia we wtryskiwaczu wyznaczono z zależności:

$$\zeta_w = \frac{2\left(2\cdot\Delta p_{2-3} - \Delta p_{1-4}\right)}{\rho\cdot U^2} \qquad (1)$$

gdzie: Δp – zmiana ciśnienia miedzy określonym przekrojami kanału przepływowego, ρ – gęstość powietrza, U – prędkość przepływu powietrza.

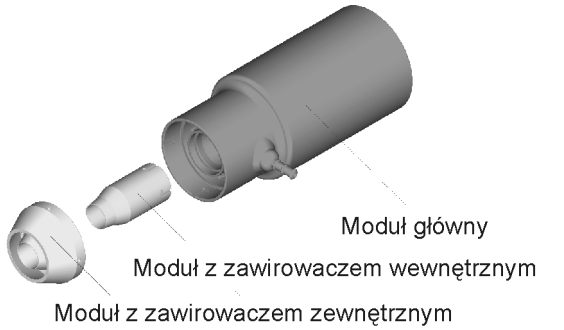


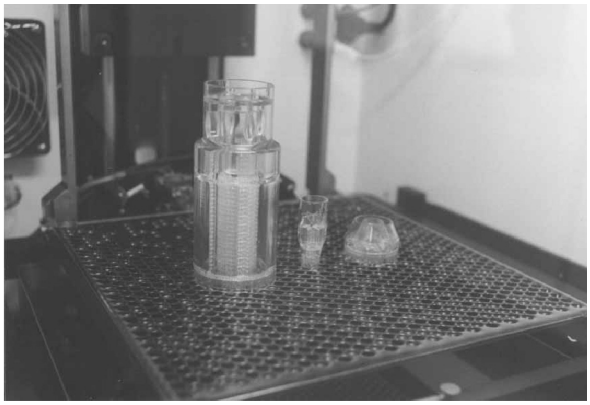
Rys. 4. Schemat stanowiska do określania strat przepływowych wtryskiwacza aeracyjnego, 1...4 – punkty pomiaru ciśnienia

Fig. 4. Diagram of facility for determination of aeral injector flow characteristics, 1...4 the section of pressure measurements

D – średnica wlotu do stanowiska pomiarowego/*cross section area of the facility inlet*, p – ciśnienie/*pressure*, T – temperature/*temperature*, n_o – obroty wentylatora/*fan rotations*

oxide resin in rapid prototyping method. This technology reduces cost and time of the execution compared with the metal execution. For this reason the epoxide injector has got limitations. It could by used with water only, because fuel could dissolve the injector.





Rys. 3. Moduły wtryskiwacza – projekt komputerowy oraz po wykonaniu z żywicy epoksydowej metodą stereolitografii

Fig. 3. Injector modules – conception project and injector made by rapid prototyping methods

3. Injector flow characteristics investigation

The flow characteristics of the injector was done with the use of test bed whose diagram was shown in Fig 4. The relationship between pressure drop coefficient ζ_w, flow coefficient μ and air flow through the injector was done during these investigations.

Pressure drop coefficient was calculated from Eq. 1, where: Δp – pressure change between flow channels sections, ρ – air density, U – air flow speed.

The flow coefficient was calculated from Eq. 2, where: p – static pressure, p_d – dynamic pressure, c_p – specific heat, T – temperature, k – air isentropic index.

Both two presented parameters were analyzed. They are interrelated [13, 14] for this reason the flow coefficient characteristic is presented in this paper (Fig. 5) and pressure drop characteristic is omitted. The nomenclature in the Figure 5 is: w – the angle of the blade stagger in internal channel, z – the angle of the blade stagger in external channel, kadłub – results for injector frame without blades.

The presented results show that injector causes the significant flow losses. The source of them is the

Współczynnik natężenia przepływu wtryskiwacza wyznaczono z zależności:

$$\mu = \sqrt{\frac{2 \cdot p_{d3}}{\rho_{otoczenia}}} \cdot \rho_{otoczenia} \Bigg/ \sqrt{2c_p \cdot T_{otoczenia} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_3}{p_{otoczenia}}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} \cdot$$

$$\cdot \rho_{otoczenia} \cdot \left(\frac{p_3}{p_{otoczenia}}\right)^{\frac{1}{k}} \qquad (2)$$

gdzie: p – ciśnienie statyczne, p_d – ciśnienie dynamiczne, c_p – ciepło właściwe powietrza przy stałym ciśnieniu, T – temperatura, k – wykładnik izentropy dla powietrza.

Analizie poddano obydwa wskaźniki określające straty przepływowe we wtryskiwaczu. Jednakże ze względu na to, że są one ze sobą związane zostanie zaprezentowana jedynie charakterystyka współczynnika natężenia przepływu (rys. 5). Przyjęta nomenklatura w opisie wykresu oznacza kąt zaklinowania łopatek w kanałach: w – wewnętrznym, z – zewnętrznym. Kadłub określa wyniki uzyskane podczas badania kadłuba bez wkładek zawirowujących.

Uzyskane wyniki wskazują, że konstrukcja wtryskiwacza powoduje znaczące straty przepływu, których źródłem jest już sam kadłub wtryskiwacza. Łopatki zawirowujące strumień w kanałach tylko nieznacznie powiększają wartość generowanych strat przepływowych. Wzrost wydatku przepływającego powietrza zmniejsza straty przepływu (wzrost współczynnika natężenia przepływu, który dla maksymalnych badanych wydatków wynosi 0,14).

Przeprowadzone badania pozwoliły znaleźć korelacje między liczbą Reynoldsa a współczynnikiem strat ciśnienia na łopatkach zawirowujących wyrażone zależnościami – dla łopatek w kanale zewnętrznym:

$$\zeta_{lop_kan_zew} = 5{,}5678 \times \mathrm{Re}^{-0{,}3402} \qquad (3)$$

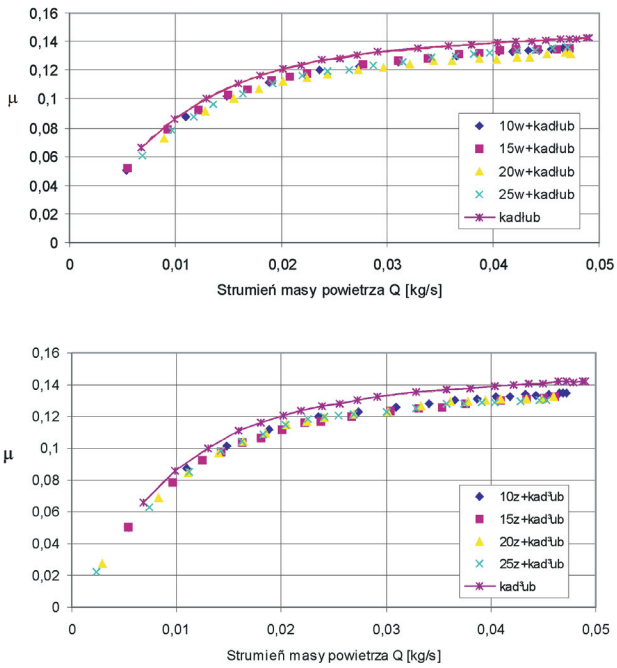
dla łopatek w kanale wewnętrznym:

$$\zeta_{lop_kan_wew} = 11{,}173 \times \mathrm{Re}^{-0{,}4183} \qquad (4)$$

Zależności te wykorzystano w analitycznych obliczeniach przepływu przez wtryskiwacz.

4. Badanie makrostruktury cieczy rozpylanej przez wtryskiwacz

Badania makrostruktury rozpylanej cieczy obejmowały swoim zakresem określenie zależności kąta rozpylenia i rozkładu strugi cieczy w zależności od parametrów zasilania wtryskiwacza oraz jego cech konstrukcyjnych. Badania prowadzono na stanowisku, którego schemat przedstawiono na rysunku 6. Do pomiaru kąta rozpylenia wykorzystano szybkoklatkową kamerę CCD oraz oprogramowanie Corel, natomiast do pomiaru rozkładu strumienia cieczy skonstruowano specjalną sondę grzebieniową, którą zamocowano w komorze pomiarowej tak, że powierzchnia wlotu do sondy znajdowała się w odległości 100 mm, a następnie 200 mm od wylotu z wtryskiwacza.



Rys. 5. Zależność współczynnika natężenia przepływu wtryskiwacza od strumienia masy powietrza

Fig. 5. Characteristic of flow rate vs. air flow mass

injector frame itself. The blades only insignificantly increase flow losses. The increase of air flow through the injector reduces flow losses and causes the flow coefficient growth ($\mu_{max} = 0.14$)

The results of the analysis give the correlation between Reynolds Number and pressure drop coefficient in the injector blades. For blades in external channel it is given in Eq. 3 and for blades in internal channel – in Eq. 4.

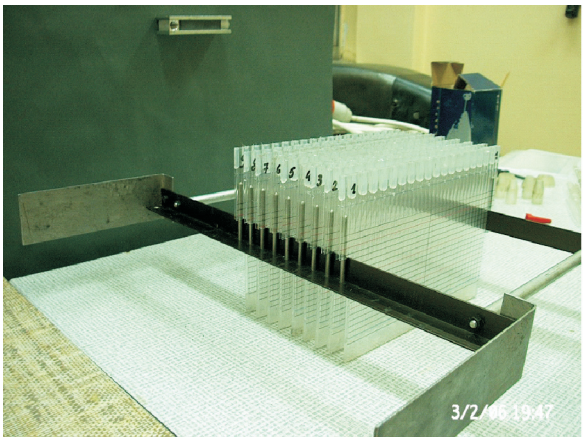
That correlation was used in analytical analysis of flow through the injector.

4. Investigation of spray macrostructure

The investigations of spray macrostructure consist of spray angle and drops distribution analysis as a function of the injector construction and its fiddling parameters. The draft of the test stand is shown in Fig. 6. The CCD camera and computer program Corel were used for spray angle measurement. Special probe was designed and executed for the evaluation of the drops distribution. The probe was initialized in the measurement chamber 100 mm and 200 mm away from the injector outlet.

It was a great problem to design such a probe. It should accumulate drops and make possible air flow through it. It is a serious problem because the great amount of air flows through the aeral injector. The probe consists of 9 combs mounted in the holder (Fig. 7). Two adjacent pipes of the combs are connected and make the U-tube. One U-tube inlet is closed (Fig. 8). In this tube is hollowed the hole by which air is carried off from the probe.

Konstrukcja sondy stanowiła osobny problem do rozwiązania. Musiała ona bowiem zatrzymywać rozpylaną ciecz, a przy tym zapewniać przepływ powietrza, którego duże ilości przepływają przez wtryskiwacz aeracyjny. Opracowane rozwiązanie składa się 9 grzebieni zamocowanych w uchwycie (rys. 7). Dodatkowo, po dwa sąsiednie kanały grzebienia są połączone w U-rurkę z zaślepionym wlotem do jednego z kanałów (rys. 8). W kanale tym nawiercony jest otwór, który odprowadza powietrze z sondy.



Rys. 7. Sonda grzebieniowa

Fig 7. Comb probe

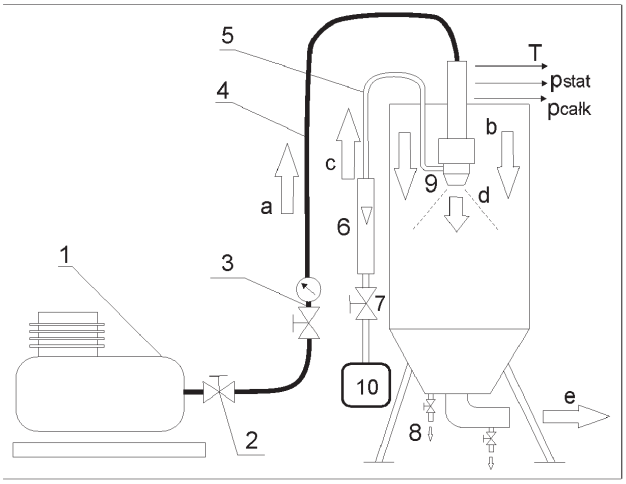
5. Badania kata rozpylenia strugi

Badania kąta rozpylenia strugi przeprowadzono dla czterech konfiguracji wkładek zawirowujących wg danych zawartych w tablicy 1.

Na rysunku 9 przedstawiono zależność kąta rozpylenia strugi cieczy od ciśnienia powietrza dostarczanego do wtryskiwacza przy maksymalnym wydatku rozpylanej cieczy. Uzyskane wyniki wskazują, że ze wzrostem względnego ciśnienia zasilania rozpylającego powietrza do wartości ok. 50% zmniejsza się kąt rozpylenia strugi. Następnie stabilizuje się na ustalonym prawie stałym poziomie.

Charakter uzyskanych wyników można wytłumaczyć analizując parametry przepływu przez wtryskiwacz. Stwierdzono, że przy ciśnieniu względnym ok. 50% występuje przepływ krytyczny i dalsze zwiększanie ciśnienia zasilania powyżej tej wartości nie powoduje zwiększenia ilości przepływającego powietrza. Natomiast poniżej tej wartości ciśnienia zwiększanie ciśnienia powietrza zasilającego wtryskiwacz powoduje wzrost wydatku przepływającego powietrza, które rozkłada się na kanały wtryskiwacza proporcjonalnie do ich pól powierzchni. Ponieważ stosunek pola powierzchni kanału zewnętrznego do wewnętrznego wynosi ok. 2,4, stąd ilość powietrza przepływającego w kanale zewnętrznym do ilości powietrza przepływającego w kanale wewnętrznym wtryskiwacza zwiększa się ze wzrostem ciśnienia zasilania. Konsekwencją tego jest „gaszenie" stożka i zmniejszanie się kąta rozpylenia strugi.

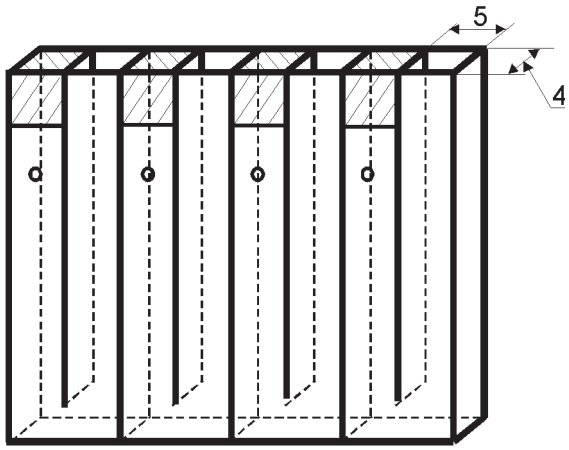
Przy tych samych parametrach zasilania wartość kąta rozpylenia strugi jest tym większa im większy jest kąt zawirowania wkładek wtryskiwacza. Lepiej jest to widoczne na rysunku 10, gdzie przedstawiono zależność kąta rozpylenia



Rys. 6. Schemat stanowiska do badań wtryskiwacza

Fig. 6. Diagram of facility to injector investigation

1) sprężarka/ *compressor*, 2) zawór główny/*valve*, 3) zawór regulacyjny z filtrem i manometrem/*control valve with manometr*, 4) elastyczny przewód doprowadzający sprężone powietrze/*flexible conductor*, 5) przewód doprowadzający ciecz/*conductor of water*, 6) przepływomierz/*flowmeter*, 7) zawór sterujący przepływem cieczy/ *water flow control valve*, 8) zawór odprowadzający skroploną ciecz/ *offtake of condensed water*, 9) wtryskiwacz aeracyjny/*aeral injector*, 10) zbiornik wyrównawczy cieczy/ *equalizing tank*,
a) strumień sprężonego powietrza/*flow of compressed air*,
b) strumień powietrza opływającego/*round injector air flow*,
c) strumień cieczy/*water flow*, *d)* struga rozpylonej mieszanki cieczy i powietrza/*spray*, *e)* odprowadzenie powietrza z komory pomiarowej/*air offtake*



Rys. 8. Schemat pojedynczego grzebienia sondy

Fig. 8. Scheme of single comb of probe

5. Spray angel investigation

The investigation of spray angle was conducted for four configurations of swirl inserts in the injector (Table 1).

The relationship between the angle of spray and pressure of air supplied to the injector for maximal discharge of water is presented in Fig. 9. As it is seen air pressure increases to 50% and it causes the reduction of the spray angle. For greater pressure of air (> 50%) the spray angle stabilizes and pressure increase does not change it.

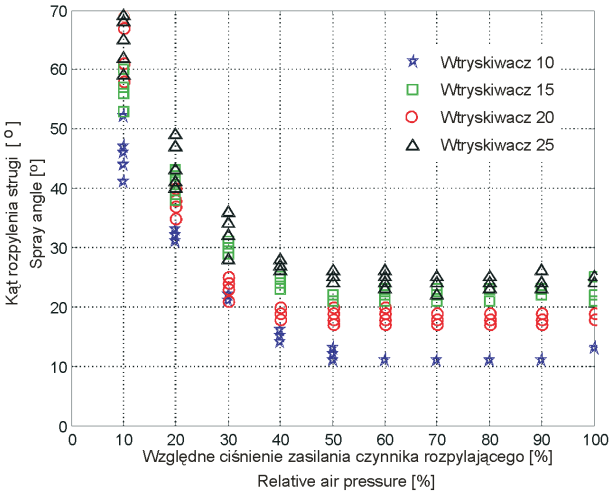
Tablica 1. Konfiguracja wtryskiwacza

Table 1. Configurations of injector

Nazwa/Name	Kąt spływu łopatki wkładki wewnętrznej [°]/ *Blade outlet angel of internal insert [°]*	Kąt spływu łopatki wkładki zewnętrznej [°]/ *Blade outlet angel of external insert [°]*
Wtryskiwacz 10/ *Injector 10*	10	10
Wtryskiwacz 15/ *Injector 15*	15	15
Wtryskiwacz 20/ *Injector 20*	20	20
Wtryskiwacz 25/ *Injector 25*	25	25

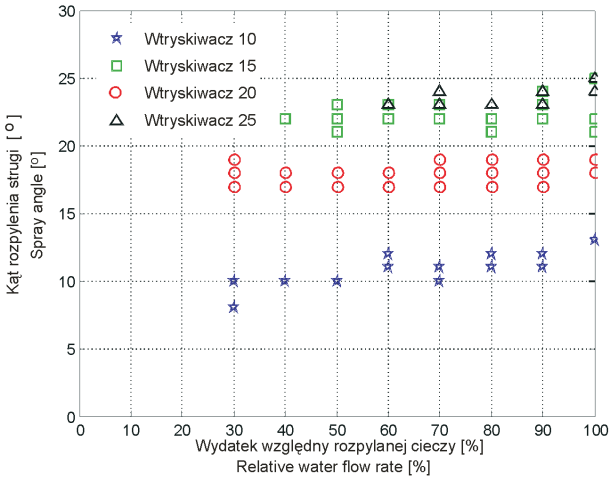
It could be explained by the analysis of flow through injector. It is shown that the flow of air achieves critical parameters about 50% of maximum pressure. For this reason the increasing of air pressure to above 50% does not change air flow. On the other hand when the air pressure is over 50%, the increasing of air pressure leads to the increasing of air flow, and it is proportional to the areas of injector channels. The ratio of external to internal area is 2.4, hence external to internal channel flow ratio increases with the increasing pressure. It causes the reduction of the spray angle.

During the analysis how the construction of the injector influences on the spray angle it was observed that when the feeding parameters are similar, then for greater swirl angles of the inserts, the increase of them causes the smaller



Rys. 9. Zależność kąta rozpylenia strugi dla maksymalnego wydatku rozpylanej cieczy oraz względnego ciśnienia zasilania czynnika rozpylającego

Fig. 9. The influence of air pressure on spray angle for maximum water flow rate



Rys. 10. Zależność kąta rozpylenia strugi dla maksymalnego ciśnienia zasilania czynnika rozpylającego od względnego wydatku rozpylanej cieczy

Fig 10. The influence of water flow rate on spray angle for maximum pressure of air

strugi od zmiany wydatku rozpylanej cieczy przy maksymalnym ciśnieniu powietrza zasilającego. Dodatkowo można tutaj zauważyć, że w zakresie małych wartości kątów zawirowania wkładek, zwiększanie ich zawirowania powoduje większe przyrosty kąta rozpylenia, aniżeli dla większych wartości kątów zawirowania. Uzasadnienie tego można znaleźć w teorii przepływów przez palisady łopatkowe [3]. Wyniki badań prowadzonych w tym zakresie wskazują, że ze wzrostem kąta skręcenia łopatek wzrasta kąt odchylenia strugi na krawędzi spływu, czyli nasila się efekt „niedokręcenia" strumienia. Stąd rzeczywisty kąt skręcenia strugi przy większych kątach skręcenia palisady przyrasta wolniej, a to powoduje mniejsze przyrosty kąta rozpylenia strugi.

Wyniki przedstawione na rysunku 10 wskazują także na to, że przy maksymalnym ciśnieniu rozpylającego powietrza zmiana wydatku rozpylanej cieczy nie powoduje znaczących zmian kąta rozpylenia dla jednej konfiguracji wkła-

spray angle increase. It is seen in Fig. 10 very well, where the angle of spray versus water flow is presented for maximum pressure of air. It is seen in this figure that for small swirl angles of the inserts, the angle changes cause the greater spray angle changes than for great swirl angle of the inserts. It could be explained on the basis of the palisade theory [3]. According to this the increase of blades camber angle causes the increase of deviation angle. For this reason the flow outlet angle increases more slowly than the blade outlet angle for greater swirl angles of inserts.

The results, presented in Fig. 10 show that for maximum air pressure, water flow changes do not influence significantly on spray angle for one configuration of the injector inserts. The increase of water flow causes a very small increase of spray angle.

dek zawirowujących wtryskiwacza. Można stwierdzić, że zwiększanie wydatku cieczy rozpylanej we wtryskiwaczu przy stałych parametrach zasilania czynnikiem rozpylającym powoduje zwiększanie kąta rozpylenia strugi w bardzo nieznacznym zakresie (nieco większe przy małym kącie zawirowania wkładek).

6. Zakresy pracy wtryskiwacza

Analiza zdjęć rozpylanej strugi cieczy pozwoliła określić parametry zasilania dla których wtryskiwacz pracował stabilnie, a rozpylana struga cieczy cechowała się znaczącym rozdrobnieniem kropel. Pozwoliło to wskazać dla badanych wtryskiwaczy zakresy parametrów zasilania, w których pracowały one poprawnie; m.in. dla maksymalnego ciśnienia powietrza zasilającego wtryskiwacz minimalne wartości wydatków rozpylanej cieczy, od których praca wtryskiwacza była stabilna przedstawiono w tablicy 2. Stwierdzono także, że ze wzrostem kąta zawirowania wkładek, dla maksymalnego przepływu powietrza przez wtryskiwacz, wzrastała wartość minimalnego wydatku przepływu rozpylanej cieczy, od której wtryskiwacz pracuje stabilnie.

Niestabilna praca wtryskiwacza wyrażała się tym, że rozpylana ciecz była nierównomiernie podawana przez wtryskiwacz (rys. 11a). Wtryskiwacz pracował pulsacyjnie podając zwiększoną, a następnie zmniejszoną dawkę cieczy. Wynikało to najprawdopodobniej stąd, że przepływające powietrze stanowiło znaczący opór dla podawanej dawki cieczy. Zwiększenie zawirowania wkładek dodatkowo wyhamowywało strumień powietrza w strefie podawania cieczy do wtryskiwacza. Dlatego przy większym zawirowaniu wkładek rozpylana ciecz musi być podawana pod większym ciśnieniem (większy wydatek). W zastosowaniu do silnika turbinowego ma to uzasadnienie, bowiem większemu wydatkowi powietrza przepływającego przez silnik towarzyszy większy wydatek paliwa dostarczanego do komory spalania.

Przy maksymalnym wydatku cieczy i niskim ciśnieniu zasilania powietrzem (mały przepływ powietrza) zaobserwowano natomiast słabe rozdrobnienie kropel (rys. 11b). Występowało ono dla wszystkich konfiguracji wtryskiwacza podczas badań wykonanych dla parametrów zasilania wynoszących odpowiednio: maksymalny wydatek rozpylanej cieczy i 10% względnego ciśnienia przepływającego powietrza. Jest to spowodowane zbyt małym wydatkiem powietrza, przez co proces aeracji nie jest na tyle skuteczny, aby odpowiednio rozdrobnić rozpylaną strugę cieczy.

6. Injector operating range

The photo analysis of spray gives a possibility to determine the injector operating range. In this area the injector worked in the stable way and the spray had a good refinement of drops. It allowed to show feeding parameters range when the injector worked correctly.

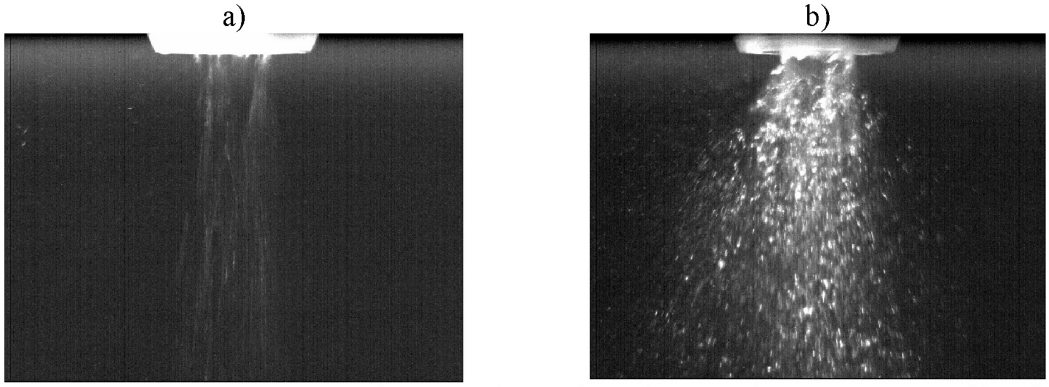
For maximum air pressure the minimal water flow when the injector work was stable is presented in Table 2. This gave a possibility to conclude that with the increase of the swirl angles of inserts for maximum air flow through the injector the minimum water flow increases for stable injector work.

Tablica 2. Minimalny wydatek rozpylanej cieczy, przy którym wtryskiwacz pracuje poprawnie dla maksymalnego ciśnienia zasilania powietrzem

Table 2. Minimal water flow rate from what injector works correctly, when air pressure is maximum

Wtryskiwacz/*Injector*	Minimalny wydatek rozpylane cieczy [%]/ *Minimum water flow rate [%]*
Wtryskiwacz 10	30
Wtryskiwacz 15	30
Wtryskiwacz 20	40
Wtryskiwacz 25	60

Unstable injector work can be observed as an irregular angle change of spray (Fig. 11a). The injector worked pulsatory. The various water charges were supplied to spray. It was a result of high air drag for water supplied to the injector channel, which was intensified by swirl angles increase. For this reason water was stopped in the inlet to injector channel, and when its pressure grew enough, it overcame air drag and inflow to the channel. This phenomenon was pulsatory. The increase of swirl angle of inserts caused the increase of water pressure (flow) in the inlet to the injector channel to overcome air flow drag. It is justified for turbo engine because the increase of air flow requires the increase of fuel amount supplied to the combustor.



Rys. 11. Niepoprawna praca wtryskiwacza: a) niejednorodnie rozpylana struga cieczy, b) małe rozdrobnienie kropel

Fig 11. Incorrect work of injector: a) non-homogenous spray, b) big drops in spray

7. Badanie rozkladu cieczy rozpylanej przez wtryskiwacz

Ze względu na ograniczenia eksploatacyjne wtryskiwacza jakie określono na podstawie badań kąta rozpylenia strugi oraz to, że najkorzystniejsze parametry ze względu na proces spalania wykazywał wtryskiwacz z wkładkami 25° badania rozkładu cieczy rozpylanej przez wtryskiwacz wykonano dla wtryskiwacza 25 z nastawami: względne ciśnienie powietrza zasilającego 10, 20 i 30% oraz względny wydatek wody od 60 do 100%.

Wyniki badań rozkładu gęstości strumienia cieczy rozpylanej przez wtryskiwacz wskazują, że maksymalny wydatek cieczy występuje w pobliżu osi wtryskiwacza i wraz z oddalaniem się od niej zmniejsza się. Dodatkowo, rozkład jest zbliżony do osiowosymetrycznego. Przykładowe wyniki zamieszczono na rysunku 12, gdzie wartości wydatku przedstawiono w postaci względnej:

$$\bar{q} = \frac{q_V}{q_{V_max}} \tag{5}$$

gdzie: $\bar{q}$ – względna gęstość zraszania, q_V, q_{V_max} – objętościowy wydatek strumienia cieczy i maksymalny objętościowy wydatek strumienia cieczy dla pojedynczego badania.

Ze względu na zbliżony do osiowosymetrycznego charakter otrzymanych rozkładów gęstości cieczy rozpylanej przez wtryskiwacz dokonano uśrednienia otrzymanych wyników po okręgach. W wyniku tego otrzymano zagadnienie dwuwymiarowe określające rozkład gęstości rozpylanej cieczy po promieniu od osi wtryskiwacza. Porównanie wyników pozwoliło zauważyć, że zmiany obszaru zraszania ze zwiększaniem wydatku rozpylanej cieczy zależą od ciśnienia powietrza zasilającego wtryskiwacz.

Dla względnego ciśnienia zasilania powietrzem 10% zwiększanie wydatku rozpylanej cieczy powoduje wysmuklenie uzyskanej charakterystyki, natomiast dla względnego ciśnienia powietrza 30% zwiększanie wydatku wody powoduje jej pogrubienie (por. rys. 13). Linią przerywaną

For maximum water flow through the injector and small pressure of air flow the weak refinement of drops was observed (Fig. 11b). It was seen for all configurations of the injector during the investigation for maximum water flow and small air pressure (about 10%). It was caused by too little air flow, and this led to incorrect process of aeration.

7. Drops distribution investigation

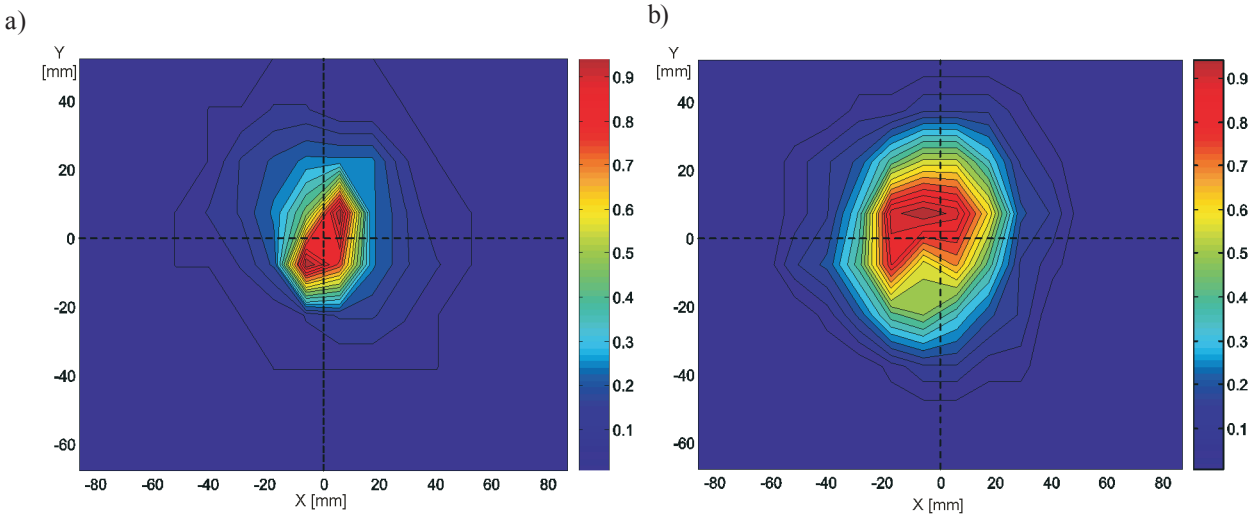
The investigation of drops distribution for aeral injector was done for inserts with 25° of stagger angle. It was caused by the results of the earlier investigation whose analysis showed that this configuration of the injector is more suitable for fuel spraying. The investigations were led for air pressure of 10, 20 and 30% and water flow of 60-100%

The results of drops distribution show that the maximum amount of water is nearly axis of injector, and it decreases with receding from axis. The drops distribution is approximately ax symmetrical. The examples of the results are presented in Fig. 12, where the relative volumetric capacity could be calculated from Eq. 5, where: – relative volumetric capacity of spraying; q_V, q_{V_max} – volumetric flow rate and maximum volumetric flow rate for single test.

The results were averaged by circular method. It was possible to do as the drops distribution was ax symmetric. Since then it was a two-dimensional problem, where the drops volume distribution vs. radius of sprinkle area were presented. The results of the comparison gave a possibility to observe that sprinkle area with the increase of water flow depends on pressure of air flow through the injector.

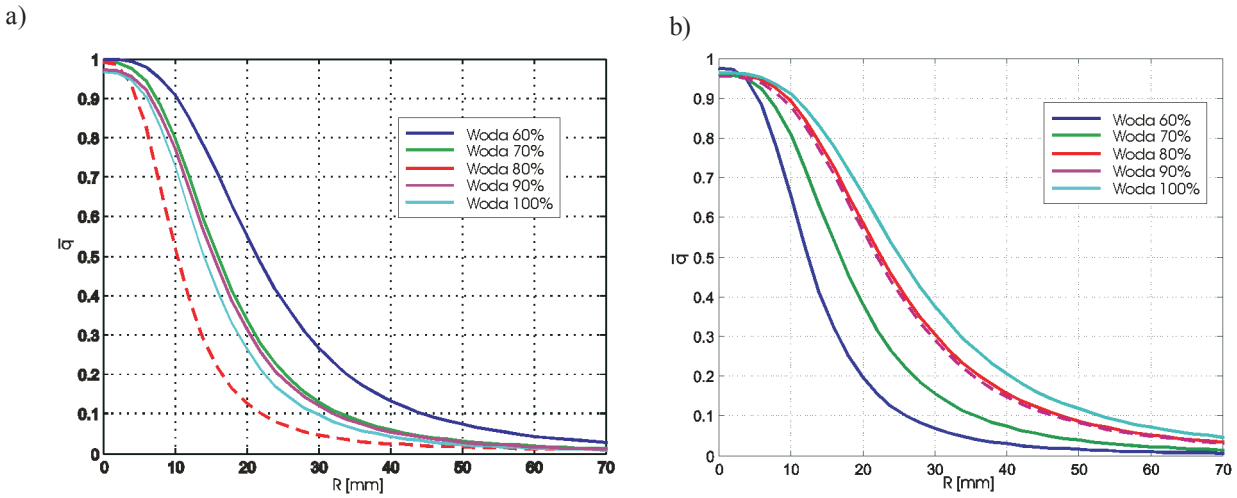
For relative air pressure 10% the increase of water flow causes that the characteristics stays more slender. On the other hand for relative air pressure 30% the increase of water flow causes that the characteristics stays more extensive (see Fig. 13). The lines of characteristics, which differ from that dependency are presented by dashed line.

The results for relative air pressure 20% show that the analyzed relations reverse in this area. The lines of the characteristics for individual water flows are situated in a very



Rys. 12. Względny rozkład gęstości zraszania dla względnego wydatku wody 70% i względnego ciśnienia powietrza: a) 10%, b) 30%

Fig. 12. Distribution of relative drops area for relative water flow rate 70% and relative air pressure: a) 10%, b) 30%



Rys. 13. Zależność uśrednionego rozkładu promieniowego względnej gęstości zraszania dla różnych względnych wydatków cieczy: a) dla względnego ciśnienia powietrza 10%; b) dla względnego ciśnienia zasilania powietrza 30%

Fig. 13. Circular averaging drops distribution for various relative water flow rate: a) for air pressure 10%; b) for air pressure 30%

na wykresach zaznaczono krzywe, które odbiegają od opisanych relacji.

Wyniki uzyskane dla względnego ciśnienia zasilania powietrza 20% wskazują, że w tym zakresie pracy wtryskiwacza następuje odwracanie badanych zależności. Ułożenie linii odpowiadających charakterystykom dla poszczególnych wydatków rozpylanej cieczy jest bardzo chaotyczne. Wyjaśnienie przyczyn tego zjawiska, jak również tego, czy dotyczy ono tylko tego konkretnego wtryskiwacza, czy całej rodziny wtryskiwaczy o podobnej budowie wymaga dalszych prac badawczych.

8. Podsumowanie

Wyniki prowadzonych badań wtryskiwacza stanowią pierwszy etap prac nad opracowaniem wtryskiwacza aeracyjnego do rozpylania paliwa w turbinowym silniku do napędu małego bezzałogowego aparatu latającego. Umożliwiły one lepsze poznanie tego typu konstrukcji pod względem jej właściwości przepływowych oraz makrostruktury rozpylanej cieczy. Pozwoliły także zwrócić uwagę na konieczność uwzględnienia innych aspektów w trakcie badań, jak na przykład stopnia podziału strumieni między kanały wtryskiwacza, czy sposobu wprowadzenia wtryskiwanej cieczy do wtryskiwacza itp. Wynikające stąd spostrzeżenia będą uwzglę- dnione w kolejnych etapach prac badawczych, które obejmować będą także badania mikrostruktury cieczy. Umożliwi to pozyskanie możliwie najbardziej kompletnej informacji odnośnie zależności pomiędzy cechami konstrukcyjnymi wtryskiwacza oraz parametrami zasilania, a właściwościami rozpylanej strugi cieczy. Efektem tego będzie opracowanie konstrukcji wtryskiwacza, cechującej się wysoką efektywnością rozpylania ze względu na wymagania stawiane od strony procesu spalania oraz parametrów przepływu, jakie będą występować w małym turbinowym silniku lotniczym.

chaotic way in the graph. The explanation of that phenomenon requires future investigations.

8. Conclusions

The presented results of the aeral injector investigations are the first stage of its overall work. They gave a possibility to identify the flow through this type of injectors and to determine spray macrostructure. The conclusion of this stage of the investigation is that, there should be investigated other aspects of the injector features influencing on its characteristics. For example, the injector bypass ratio and methods of water supplying should be investigated. It will be examined in future steps of the injector investigations, where the microstructure will be determined too. Finally, the research should give complete information about the relationship between features of the injector construction, injector supplying parameters and spray characteristics. The project of more effective injector for the combustion process in small turbo engine will be the final effect of the research.

The results of the first step of the aeral injector analysis showed a few profitable features of it. It is possible to shape the spray angles and sprinkle aerie by blades geometry of swirl inserts. The additional information will give the investigation of the injector bypass influencing on spray characteristics. It is seen that this parameter should have the great influence on them.

For this reason the investigations of aeral injector should be continue. All notices from the first step of the investigation will be taken into consideration. It will give the increase of measurements accuracy and broaden them for analyzing parameters taking into account (for example spray microstructure). Simultaneously it will try to solve the problem with the use of CFD programs.

Wykonane badania pozwoliły wskazać na pewne korzystne cechy wtryskiwacza aeracyjnego ze względu na jego przewidywane zastosowanie. Między innymi wskazuje na to możliwość kształtowania kątów rozpylenia oraz gęstość obszaru zraszania przez geometrię wkładek zawirowujących. Dodatkowe informacje w tym zakresie pozwoli uzyskać badanie wpływu stopnia podziału strumieni we wtryskiwaczu na parametry rozpylanej strugi cieczy. Mimo to na podstawie przeprowadzonych badań należy spodziewać się, że zmiana tego parametru będzie istotnie wpływać na pracę wtryskiwacza.

Dalsze prace będą prowadzone w takim kierunku, aby wyeliminować niedociągnięcia, które zauważono podczas pierwszego etapu badań, tak aby zwiększyć precyzję pomiarów oraz rozszerzyć je na analizę innych parametrów, głównie mikrostrukturę rozpylanej cieczy. Równocześnie zostaną podjęte próby, aby w badania stanowiskowe włączyć badania modelowe wtryskiwacza z wykorzystaniem oprogramowania CFD.

Artykuł recenzowany

Dr inż. Robert Jakubowski, adiunkt na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.

Mr. Robert Jakubowski, PhD. MEng. Doctor in the Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics at Rzeszów University of Technology.

Mgr inż. Adam Konieczny, doktorant na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.

Mr. Adam Konieczny, MEng. Postgraduate in the Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics at Rzeszów University of Technology.

Prof. dr hab. inż. Marek Orkisz, profesor na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.

Professor Marek Orkisz, DSc. PhD. MEng. Professor in the Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics at Rzeszów University of Technology.

Mgr inż. Zdzisław Siekierda, pracownik inżynieryjno-techniczny na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.

Mr. Zdzisław Siekierda, MEng. Assistant in the Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics at Rzeszów University of Technology.

Dr inż. Piotr Wygonik, adiunkt na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.

Mr. Piotr Wygonik, PhD. MEng. Doctor in the Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics at Rzeszów University of Technology.

Literatura/*Bibliography*

[1] Cheng R.K., Fable S.A., Schmidt D., Arellano L., Smith K.O.: Development of a Low Swirl Injector concepts for Gas Turbines. Procedings of International Joint Power Conference, New Orleans, USA, June 4–7, 2001.

[2] Chuech S. G-K., Przekwas A. J., Wang C-Y.: Numerical modeling of atomization coaxial liquid/gas jets. Journal of Marine Science and Technology, Vol. 12, No. 4, p. 290–299, 2004.

[3] Dixon S. L.: Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery.

[4] Hansen K.G., Madsen J., Trinh C.M., Ibsen C.H., Solberg T., Hjertager B.H.: A computational and experimental study of the internal flow in a scaled pressure-swirl atomizer. ILASS-Europe 2002, Zaragoza, 9–11 September 2002.

[5] Jóźwik K., Prywer J.: Wpływ parametrów geometrycznych rozpylacza strumieniowo-wirowego na mikrostrukturę rozpylonej strugi – wzorcowanie aparatury i badania wstępne. Arch. Prac IMP PŁ, nr IMP–1186, Łódź 1990.

[6] Konieczny A., Orkisz M.: Model matematyczny przepływu powietrza wewnątrz wtryskiwacza aeracyjnego. Journal of KONES, Vol. 10, No 1–2, Warszawa 2003.

[7] Konieczny A., Orkisz M.: Teoretyczna ocena wpływu wybranych cech geometrycznych i parametrów zasilania na prędkości przepływu przez wtryskiwacz aeracyjny oraz sposób tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej. Journal of KONES, Vol. 10, No. 3–4, Warszawa 2003.

[8] Kubo M., Sakakida A., Liyama A.: Techniques for analyzing swirl injectors of direct-injection gasoline engines and its application. The Fifth International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines (COMODIA 2001), July 14, 2001, Nagoya.

[9] Lin C. A.: Modeling a confined swirling coaxial jet. Center for Turbulence Research, Annular Research Briefs, 1998.

[10] Mao C. P., Wang G., Chigiar N.: The structure and characterization of air assisted swirl atomized sprays. Atomization and Spray Technology, 1986, vol. 2.

[11] Moriyoshi Y., Hu X., Takagi M.: Eksperimentally evaluated spray model for a swirl-type injector. SAE Papers, ISBN: 0-7680-1089-6

[12] Orkisz M.: Turbinowe silniki lotnicze i turbiny gazowe. W: Problemy spalania w silnikach spalinowych – Ekspertyza. PAN, Warszawa 2000.

[13] Orzechowski Z., Prywer J.: Rozpylanie cieczy w urządzeniach energetycznych. WNT, Warszawa 1994.

[14] Orzechowski Z., Prywer J.: Rozpylanie cieczy. WNT, Warszawa 1991.

[15] Prywer J.: Wpływ parametrów konstrukcyjnych rozpylaczy strumieniowo-wirowych na ich właściwości. Politechnika Łódzka, Zeszyty Naukowe nr 916, Łódź 2003.

[16] Valentino G., Auriemma M., Caputo G., Corcione F.E.: Near Nozzle PIV Measurements and Droplets Size Pattern of a GDI Swirled Spray. Procedings Sixth International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines COMODIA 2004, Yokohama, 2004, p. 287–294.

Mgr Maria Zarszyńska, pracownik inżynieryjno-techniczny, matematyk na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.

Ms. Maria Zarszyńska, MSc. Assistant in the Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics at Rzeszów University of Technology.