

Jakub CZAJKA
Ireneusz PIELECHA
Krzysztof WISŁOCKI

PTNSS-2009-SS3-C089

A comparative analysis of diesel fuel injection parameters in piezoelectric and electromagnetic fuel injectors

The paper presents the results of a comparative analysis of the changes in the injection spray shape and penetration and its vertex angle during the injection through piezoelectric and electromagnetic fuel injectors. The results of the observation of the fuel spray with the use of high speed camera (100 μ s frame frequency) have been presented. Moreover, the parameterization and digital processing (including its automation) of the obtained image have too been presented. The influence of the pressure and the timing of the injection on the variable-in-time spray parameters have been shown. A mathematical model describing these relations has been proposed.

Key words: fuel injection, injection spray indexes, fuel spray parameters, electromagnetic injectors, piezoelectric injectors, optical investigations

Analiza porównawcza parametrów wtrysku paliwa wtryskiwaczy piezoelektrycznych i elektromagnetycznych do silników o ZS

W artykule przedstawiono wyniki badań porównawczych zmiany kształtu i zasięgu strugi wtryskiwanego paliwa oraz jej kąta wierzchołkowego w czasie trwania wtrysku, dla wtryskiwaczy piezoelektrycznych i elektromagnetycznych. Zaprezentowano wyniki obserwacji strugi paliwa prowadzone z wykorzystaniem kamery do szybkiego filmowania rejestrowane co 100 μ s. Omówiono sposób parametryzacji i cyfrowej obróbki oraz jej automatyzacji otrzymanego materiału zdjęciowego. Wykazano wpływ ciśnienia i czasu wtrysku na zmienne w czasie parametry strugi. Zaproponowano model matematyczny opisujący te zależności.

Słowa kluczowe: wtrysk paliwa, parametry strugi paliwa, wtryskiwacze elektromagnetyczne, wtryskiwacze piezoelektryczne, badania optyczne

1. Introduction

Electromagnetic injectors applied in diesel fuel injection systems are being phased out and piezoelectric injectors are gradually coming in. Such a replacement allows a wider selection of the timing of the injection of the individual phases of the injection and their duration. The differences between the obtained parameters of the injected fuel spray are very significant in the aspect of mixture formation.

Electromagnetic injectors were used in the first and second generation common rail (CR) systems. The reason for their withdrawal in favor of the piezoelectric injectors is the lack of the possibility of obtaining small time intervals between the subsequent fuel doses in a single engine operating cycle. Hence, the number of injections was limited to three or four in a single cycle. Piezoelectric injectors are fitted in third generation CR systems. Their main advantage is the possibility of a multiple division of the fuel dose into doses of relatively short durations. The build of the piezoelectric injector by Bosch has been shown in Fig. 1.

The characteristics of the electromagnetic injectors in the form of the pressure courses and the control current have been shown in Figs. 2 and 3.

The issue discussed in this paper consisted in the application of optical observation and digital analysis of the obtained images of the fuel spray development in order to determine the comparative fuel spray indexes and on this

1. Wprowadzenie

Wtryskiwacze elektromagnetyczne układów wtryskowych silników o zapłonie samoczynnym zastępuje się obecnie układami wtryskiwaczy piezoelektrycznych. Pozwala to w większym niż dotychczas zakresie na zmianę czasu odstępu pomiędzy wtryskami kolejnych części dawki paliwa oraz czasu ich trwania. Różnice między uzyskiwanymi parametrami wtryskiwanej strugi paliwa są bardzo istotne w aspekcie procesu tworzenia mieszanki palnej.

Wtryskiwacze elektromagnetyczne były wykorzystywane w układach *common rail* (CR) pierwszej i drugiej generacji. Powodem ich wycofania na korzyść wtryskiwaczy piezokwarcowych jest brak możliwości uzyskania małych odstępów czasu między kolejnymi dawkami wtryskiwanego paliwa podczas jednego cyklu pracy silnika. Z tego powodu ograniczano liczbę wtryskiwanych dawek do trzech lub czterech. Wtryskiwacze piezoelektryczne są wykorzystywane w układach CR trzeciej generacji. Ich główną zaletą jest możliwość uzyskania wielokrotnego podziału dawki paliwa ze względnie krótkimi czasami między kolejnymi dawkami paliwa. Budowę wtryskiwacza piezokwarcowego firmy Bosch przedstawiono na rys. 1.

Charakterystyki wtryskiwacza elektromagnetycznego w postaci przebiegu ciśnienia i prądu sterującego przedstawiono na rys. 2 i 3.

Podjęty problem badawczy polegał na zastosowaniu metody optycznej obserwacji i cyfrowej analizy uzyskiwa-

basis providing and objective assessment of the fuel injection and spraying process.

A particularly significant issue was to explain how the basic injection parameters (injection pressure, duration of the injection, hole diameter) influence the change in the selected indexes that are possible to determine for the injected fuel spray. The authors also tried to collect proper research material that would be used to determine the functional relations between these parameters and the values of the comparative indexes. Such a relation – expressed in the form of model dependencies – could be used to predict a shape, vertex angle and the speed of the spray front for the assumed values of these parameters.

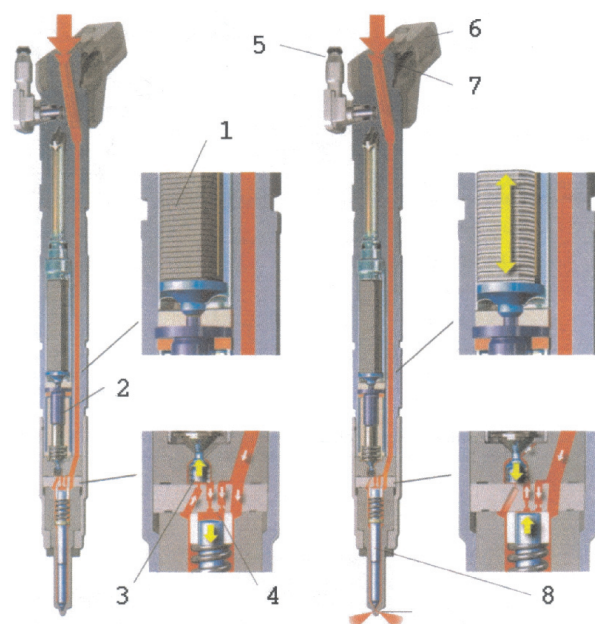


Fig. 1. Piezoelectric injector by Bosch (1 – piezoelectric actuator, 2 – hydraulic converter, 3 – control valve, 4 – control chamber, 5 – fuel overflow outlet, 6 – electrical connection, 7 – high pressure fuel, 8 – needle)

Rys. 1. Piezoelektrycznie sterowany wtryskiwacz firmy Bosch: 1 – silownik piezoelektryczny, 2 – przetwornik hydrauliczny, 3 – zawór sterujący, 4 – komora sterująca, 5 – przelew paliwa, 6 – złącze elektryczne, 7 – paliwo pod wysokim ciśnieniem, 8 – iglica rozpylacza

2. Research methodology

For the investigations related to the above mentioned relations and dependencies a test stand of own design was used (Fig. 4) that comprised the following elements:

- a) common rail pump and injector testing stand (Fig. 5),
- b) common rail fuel injector testing device,
- c) high speed camera HSS5 by LaVision (Table 1, Fig. 6),
- d) a test stand synchronizing unit (*sequencer*).

The tests were performed for two different multi hole injectors, yet, each time only a single fuel spray was observed and analyzed. The injection occurred into the open space i.e. into ambient conditions. At this stage of the investigation the authors did not investigate the influence of the chamber backpressure on the fuel spray shape, atomization and spray front displacement.

In the observed space no air motion occurred. Hence, only the transverse gravity force acted on the individual droplets in the fuel

nych obrazów rozwoju strugi wtryskiwanego paliwa w celu wyznaczenia wskaźników porównawczych strugi i na ich podstawie dokonania zobiektywizowanej oceny przebiegu procesu wtrysku i rozpylenia paliwa. Szczególnie istotnym zagadnieniem było wyjaśnienie, w jaki sposób podstawowe parametry wtrysku (ciśnienie wtrysku, czas trwania wtrysku, średnica otworków rozpylacza) wpływają na zmianę wybranych wskaźników porównawczych możliwych do określenia dla strugi wtryskiwanego paliwa. Dążono także do zebrania odpowiedniego materiału badawczego, który mógłby posłużyć do określenia związków funkcjonalnych pomiędzy tymi parametrami, a wartościami wskaźników porównawczych. Związek taki – ujęty w postaci zależności modelowych – mógłby posłużyć do przewidywania określonego kształtu, kąta wierzchołkowego i prędkości czoła strugi dla założonych wartości tych parametrów.

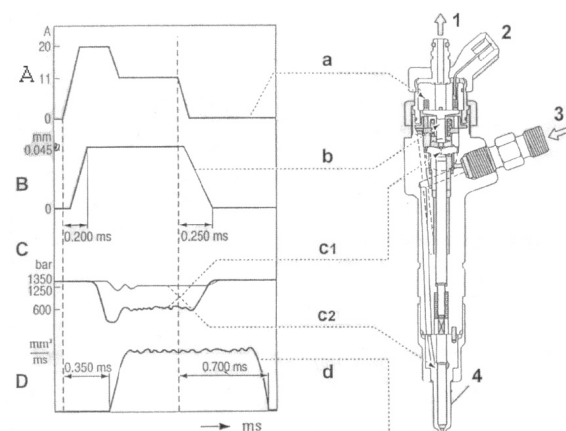


Fig. 2. Basic characteristics of an electromagnetic injector by Bosch; A – control current of the electrovalve coil, B – valve pusher displacement, C – course of pressures, C1 – control chamber, C2 – nozzle chamber, D – course of fuel injection

Rys. 2. Podstawowe charakterystyki wtryskiwacza elektromagnetycznego firmy Bosch: A – prąd sterujący cewką elektrozaworu, B – wznios popychacza zaworu, C – przebieg ciśnień, C1 – komora sterująca, C2 – komora rozpylacza, D – przebieg wtrysku paliwa

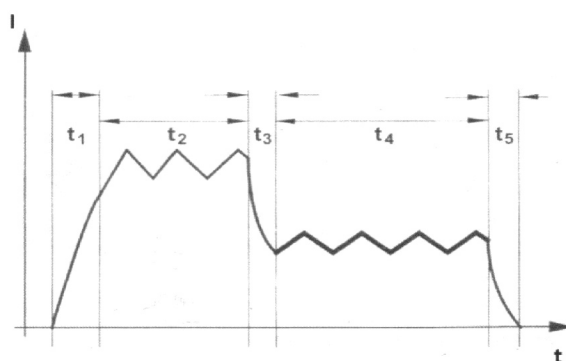


Fig. 3. The course of the current controlling the electromagnetic valve of the injector; I – intensity, t – duration, t₁ – power supply from the capacitor, t₂ – attracting current of the valve pusher, t₃ – capacitor charging, t₄ – valve pusher holding current, t₅ – coil power supply disconnected

Rys. 3. Przebieg prądu sterującego elektromagnetycznym zaworem wtryskiwacza: I – natężenie, t – czas trwania, t₁ – zasilanie z kondensatora, t₂ – prąd przyciągania popychacza zaworu, t₃ – ładowanie kondensatora, t₄ – prąd podtrzymania popychacza zaworu, t₅ – odłączenie zasilania cewki

spray. At the outflow speed of approximately 150 m/s this force is of little influence on the fuel spray indexes under analysis.

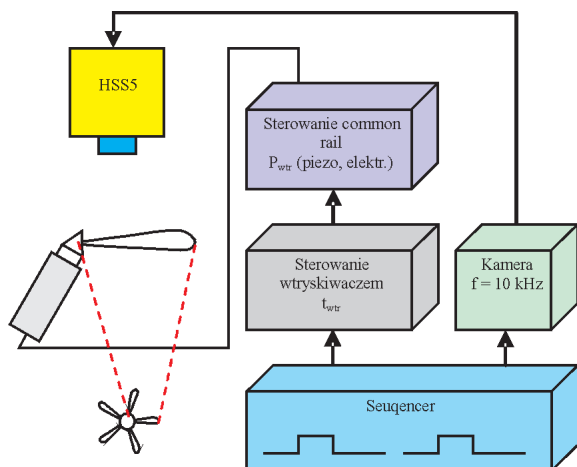


Fig. 4. Schematics of the stand measuring the geometrical parameters of the fuel spray

Rys. 4. Schemat stanowiska do pomiaru parametrów geometrycznych strugi paliwa

Table 1. Basic technical data of the high speed camera 5 [6]

Tabela 1. Podstawowe dane techniczne kamery High Speed Star 5 [6]

Image converter/typ przetwornika obrazu	CMOS
Photo cathode pixel size/wielkość piksela	17 × 17 μm
Maximum resolution/rozdzielczość maksymalna	1024 × 1024 pix
Maximum filming speed/maksymalna prędkość filmowania	3 000 images/sec, at resolution 1024 × 1024 10 000 images/sec, at resolution 512 × 512 30 000 images/sec, at resolution 256 × 256 250 000 images/sec, at resolution 128 × 16
Spectrum/zakres widmowy	380 nm do 800 nm

The tests were performed for different values of the injection pressure and different injector opening timings which resulted in different fuel doses. The quantity of the fuel dose for given parameters was selected with the use of the device for the tests of the common rail injection system. The injection was initiated electronically through the sequencer. A synchronous signal initiated the recording, which began just before the onset of the injection process and ended after a time specified so that the filming sequence comprised the whole injection process and a short time after its end; usually it took approximately 30 frames i.e. 3 ms of the recording time. The injection lasted 0,2-1,0 ms depending on the size of the fuel dose.

The obtained recording sequences were digitally recorded and then analyzed through DaVis by LaVision [1]. Using the original software, the authors developed their own system allowing the determining of:

- the spray front penetration,
- the spray front speed,
- the angle of the spray cone.

2. Metodyka badawcza

Do poszukiwania wspomnianych związków i zależności wykorzystano stanowisko badawcze własnej konstrukcji (rys. 4), które składało się z następujących elementów:

- a) stanowiska testowania pomp i wtryskiwaczy systemów *common rail* (rys. 5),
- b) testera wtryskiwaczy paliwa – *common rail*,
- c) kamery do szybkiego filmowania HSS5 firmy LaVision (tab. 1, rys. 6),
- d) jednostki synchronizującej pracę stanowiska badawczego, tzw. *sequencera*.

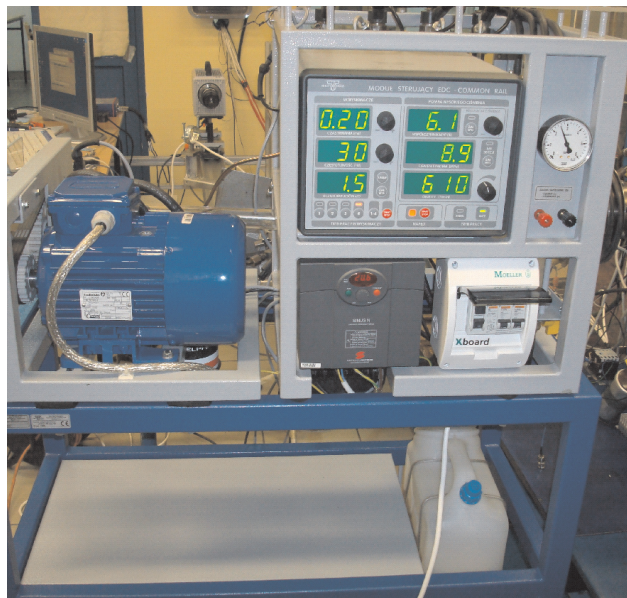


Fig. 5. A system for the parameter adjustment of the testing device for the common rail injectors

Rys. 5. Układ regulacji parametrów nastawczych stanowiska do badania wtryskiwaczy systemów *common rail*



Fig. 6. High speed camera High Speed Star 5 [6]

Rys. 6. Kamera do szybkich zdjęć typu High Speed Star 5 [6]

Badania przeprowadzono dla 2 różnych wtryskiwaczy wielootworkowych, jednak każdorazowo obserwowano i analizowano tylko jedną strugę paliwa. Wtrysk odbywał się do otwartej przestrzeni, czyli do ośrodka o parametrach otoczenia. Na tym etapie badań zrezygnowano z badania

The area covered by the spray of the injected fuel was recognized based on the parameters of individual points in the image recorded in the resolution of 512×512 pixels. The droplets reflect light that illuminated the observed area. Two halogen lamps were used for that purpose 0,5 kW each placed approximately 1 meter from the fuel spray. The evaluation of the luminance parameter of individual pixels of the recorded images constituted a basis for the identification of the area covered by the fuel spray and allowed an analysis of the geometrical parameters of the fuel spray and the assessment of their changes in the course of the injection and immediately after its end.

The software enabling the processing of the recorded images of the fuel spray atomization is based on the macros of the CL (*command language*) implemented in DaVis. The software contains a series of procedures that allow (Fig. 7):

- 1) a selection of the central point of the injector,
- 2) a selection of the injector diameter,
- 3) determining of the luminance for the background center and the fuel spray,
- 4) a selection of the points forming the spray cone,
- 5) a selection of the number of the injector holes.

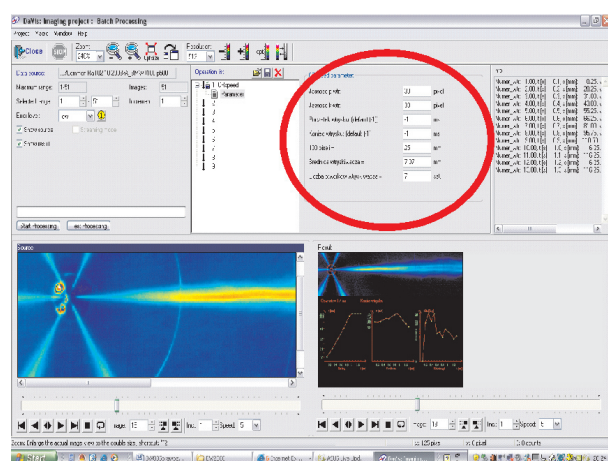


Fig. 7. Screenshot of the image processing software enabling the selection of the basic processing parameters (area circled red)

Rys. 7. Ekran do obróbki zdjęć rejestrowanej strugi paliwa z możliwością zadawania podstawowych parametrów obróbki (obszar objęty czerwonym okręgiem)

For safety reasons (toxicity of the diesel oil vapor) during the simulation of the injection a calibration fluid was used (Kalibrol). The physical chemical parameters of Kalibrol have been shown in Table 2 (based on PN-88/C-96181).

In order to determine the penetration of the spray front in the first stage of the calculations the background was deleted from the image where the fuel spray occurs. Then, in an automated way the pixels of luminance higher than 20 units were searched for from left to right in order to determine the end of the fuel spray. Knowing the coordinates of the injector adjustment and the coordinates of the spray end the spray penetration was determined. In the software an additional procedure was used that graphically presented the values during the calculations.

Knowing the penetration of the spray front the calculation of the speed of the spray front was possible through determining of the value of parameter dS/dt .

wpływu przeciwcisnienia panującego w komorze na kształt strugi, proces jej rozpylenia i przemieszczania się frontu.

W przestrzeni obserwacji nie występował żaden dający się zaobserwować ruch powietrza. Tak więc na rejestrowaną poziomą strugę działała tylko poprzeczna siła pochodząca od siły ciężkości działającej na poszczególne krople w strudze. Przy prędkości wypływu rzędu 150 m/s siła ta ma jednak bardzo mały wpływ na analizowane wskaźniki strugi.

Badania prowadzono dla różnych wartości ciśnienia wtrysku i różnych czasów otwarcia wtryskiwacza powodujących zróżnicowanie dawki wtryskiwanego paliwa. Wielkość dawki dla określonych parametrów ustalono z wykorzystaniem stanowiska do badania systemu wtryskowego typu *common rail*. Proces wtrysku był wyzwalany elektronicznie z układu tzw. *sequencera*. Synchroniczny sygnał uruchamiał filmowanie, które rozpoczynało się bezpośrednio przed rozpoczęciem wtrysku, a kończyło po czasie określonym w taki sposób, aby sekwencja filmowania obejmowała cały proces wtrysku oraz krótki czas po jego zakończeniu; zwykle obejmowało to ok. 30 klatek zdjęciowych, czyli 3 ms czasu filmowania. Wtrysk trwał – w zależności od wielkości dawki – 0,2–1,0 ms.

Uzyskane sekwencje filmowe zapisywano w sposób cyfrowy, a następnie poddawano je analizie, do której wykorzystywany był program narzędziowy DaVis firmy LaVision [1]. Wykorzystując oryginalne oprogramowanie, opracowano autorski program pozwalający na określenie:

- zasięgu czoła strugi
- prędkości czoła strugi
- kąta stożka strugi.

Obszar objęty strugą wtryskiwanego paliwa rozpoznawany był na podstawie parametrów poszczególnych punktów obrazu zapisywanego z rozdzielczością 512×512 pikseli. Krople strugi odbijają na swojej powierzchni światło, którym obszar obserwacji był oświetlony. Do tego celu użyto dwóch lamp halogenowych, każda o mocy 0,5 kW, umieszczonych w odległości ok. 1 m od strugi paliwa. Ocena parametru luminancji poszczególnych pikseli zarejestrowanych obrazów stanowiła podstawę wyróżnienia obszaru objętego strugą paliwa i pozwoliła na przeprowadzenie analizy parametrów geometrycznych strugi wtryskiwanego paliwa oraz oceny ich zmiany w czasie trwania wtrysku, a także bezpośrednio po jego zakończeniu.

Program pozwalający na obróbkę rejestrowanych zdjęć rozpylenia strugi opracowano na bazie makr programu CL (*command language*) zaimplementowanego w programie DaVis. Program zawiera wiele procedur pozwalających na (rys. 7):

- 1) wybór centralnego punktu wtryskiwacza,
- 2) wybór średnicy wtryskiwacza,
- 3) określenie wartości luminancji dla ośrodka tła i strugi paliwa,
- 4) wybór punktów tworzącej stożka strugi,
- 5) wybór liczby otworków wtryskiwacza.

Do symulowania wtrysku paliwa podczas badań używano płynu kalibracyjnego typu Kalibrol ze względu na bezpieczeństwo i szkodliwość oparów oleju napędowego.

The recording speed of 10 kHz allows the application of a maximum resolution of the recorded image of 512×512 pixels. The focal distance of the camera allowed a recording of a fuel spray of a maximum length < 120 mm. Such a small length at some measuring points allows the recording of the fuel onset only (the fuel spray is outside the recording area if a larger dose is being injected).

The last part was to determine the vertex angle of the fuel spray (Fig. 8).

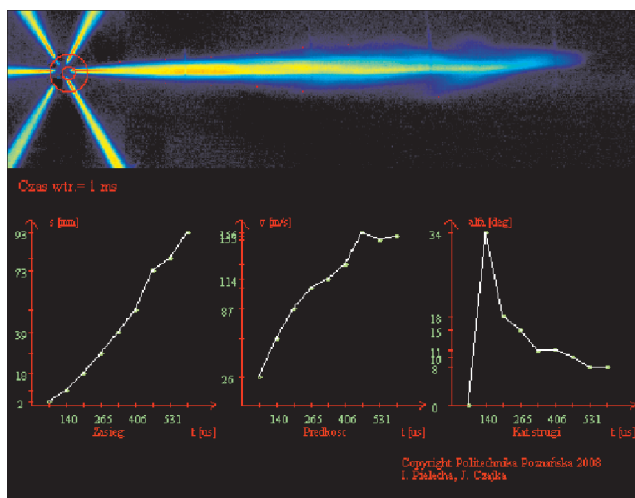


Fig. 8. Example view of the fuel spray geometrical parameter calculations

Rys. 8. Przykładowe obliczenia parametrów geometrycznych strugi paliwa

The theoretical initial speed of the fuel outflow from injector V has been determined based on the following dependence:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_{\text{pal}}}} \quad (1)$$

The result of the experiments was correlated with the results of the model experiments. Taking the investigations of Hiroyasu [4] into account the fuel spray penetration was determined based on the following dependence:

$$\text{For } \tau < \tau_{\text{break}} \quad S = 0.39 \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_{\text{pal}}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \tau, \quad (2)$$

$$\text{for } \tau > \tau_{\text{break}} \quad S = 2.95 \cdot \left(\frac{\Delta P}{\rho_{\text{pow}}} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot (d_o \cdot \tau)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

where τ_{break} denotes time after which a continuous fuel spray disintegrates into droplets, which is:

$$\tau_{\text{rozp}} = \frac{29 \cdot \rho_{\text{pal}} \cdot d_o}{(\rho_{\text{pow}} \cdot \Delta P)^{\frac{1}{2}}}, \quad (4)$$

where: $\Delta P = P_{\text{wtr}} - P_{\text{ot}}$ – pressure difference between the injector and in the ambient air [Pa], ρ_{pal} , ρ_{pow} – fuel and gas densities [kg/m³], d_o – injector hole diameter [m], t – time [s].

Parametry fizykochemiczne Kalibrolu przedstawiono w tab. 2 (na podst. PN-88/C-96181).

Table 2. Characteristics of the applied fuel– Kalibrol Lux [5]

Tabela 2. Charakterystyka stosowanego paliwa – Kalibrol Lux [5]

Parameters/parametry	Value/wartość
Density/gęstość @20°C	832 kg/m ³
Kinematic viscosity/lepkość kinematyczna @40°C	2,60 mm ² /s
Ignition point/temperatura zapłonu	88°C
Turbidity point/temperatura mętnienia	–11°C
Resistance to foaming/odporność na pienienie @25°C	80 cm ³ of foam

W celu określenia zasięgu czoła strugi w pierwszym etapie obliczeń odejmowano tło od każdego zdjęcia, w którym występuje struga wtryskiwanego paliwa. Następnie w sposób zautomatyzowany poszukiwano od strony prawej do lewej pikseli o luminancji większej niż 20 jednostek w celu określenia końca strugi. Znając współrzędne ustawienia wtryskiwacza oraz współrzędne końca strugi, określano zasięg strugi wtryskiwanego paliwa. W programie zastosowano dodatkowo procedurę, która w czasie obliczeń dokonywała graficznej prezentacji obliczonych wartości.

Znając zasięg czoła strugi, można było obliczyć prędkości czoła strugi przez wyznaczenie wartości parametru dS/dt .

Prędkość filmowania 10 kHz pozwala na zastosowanie maksymalnej rozdzielczości rejestrowanego obrazu wynoszącej 512×512 pikseli. Ogniskowa kamery pozwalała w takim przypadku na zarejestrowanie strugi o maksymalnej długości < 120 mm. Tak niewielka długość pozwala w niektórych punktach pomiarowych na zarejestrowanie tylko początku wtrysku (struga wtryskiwanego paliwa jest poza obszarem rejestracji podczas wtryskiwania większej dawki).

Ostatnim etapem programu było wyznaczenie kąta wierzchołkowego strugi rozpylanego paliwa (rys. 8).

Teoretyczną prędkość początkową wypływu paliwa z wtryskiwacza V określono na podstawie zależności (1).

Wynik badań eksperymentalnych skorelowano z wynikami badań modelowanych. Uwzględniając badania Hiroyasu [4], wyznaczono zasięg strugi wtryskiwanego paliwa na podstawie zależności (2) i (3),

gdzie τ_{rozp} oznacza czas, po którym ciągła struga ciekłego paliwa rozpada się na krople i który wynosi (4),

gdzie: $\Delta P = P_{\text{wtr}} - P_{\text{ot}}$ – różnica ciśnień we wtryskiwaczu i otoczeniu [Pa], ρ_{pal} , ρ_{pow} – gęstości paliwa i gazu [kg/m³], d_o – średnica otworka rozpylacza [m], t – czas [s].

Zasięg strugi według Hiroyasu porównano z wynikami badań Denta [2] na podstawie wzoru (5),

gdzie: T_{pow} – oznacza temperaturę powietrza.

Do wyznaczenia teoretycznego zasięgu strugi konieczna jest znajomość liczby i średnicy otworków rozpylacza. Ze względu na brak odpowiednich danych fabrycznych wyko-

The fuel spray penetration according to Hiroyasu was compared with the Dent test result [2] based on the following formula:

$$S = 3.36 \cdot \left(\frac{\Delta P}{\rho_{\text{pow}}} \right)^{0.25} \cdot (d_o t)^{0.5} \cdot \left(\frac{294}{T_{\text{pow}}} \right)^{0.25} \quad (5)$$

where: T_{pow} – denotes air temperature.

In order to determine the theoretical fuel spray penetration it is necessary to know the number of injector holes and their diameter. Due to a lack of manufacturer's technical data, microscopic photographs were taken that allowed to determine the diameters of the injector holes: 0,132 mm for the electromagnetic injector and 0,145 mm – for the piezoelectric injector, Fig. 9.

3. Test results analysis

The analysis of the test results has been performed in relation to the speed of fuel outflow from the injector nozzle, fuel spray penetration and vertex angle of the fuel spray. The evaluation of the initial speed of the fuel spray from the injector has been presented based on dependence (1); the obtained values are contained in Table 3.

The sequences of images of the fuel injection for the electromagnetic and piezoelectric injectors have been shown in Figs. 10a and 10b respectively. It has been observed that in the case of the piezoelectric injector the fuel spray form in the time approximately 30% shorter after the electric control pulse than it is in the case of the electromagnetic injector.

This fact is confirmed by the courses of the dependencies of the fuel spray penetration on the duration of the injection as shown in Fig. 11.

Table 3. The calculated speed of the fuel outflow from the injector for different values of the injection pressure

Tabela 3. Obliczone prędkości wypływu paliwa z wtryskiwacza dla różnych wartości ciśnienia wtrysku

No.	P_{wtr} [MPa]	P_{ot} [MPa]	V [m/s]
1.	30	0,1	187,89
2.	50		242,73
3.	70		287,28
4.	90		325,80
5.	110		360,22

The recorded images of the process of spray propagation were used to determine the dependence of its penetration on the duration of the injection. The test results performed at the pressures of 50 and 90 MPa have been presented in Figs 11 and 12. The maximum spray penetration for the electromagnetic injector at the pressure of 50 MPa and the opening time 600 ms was 87 mm (Fig. 11), and for the piezoelectric injector at the same injection parameters – 114 mm, Fig. 12. Such a large difference in the spray penetration is caused by the difference in the diameter of the injector holes. For the opening time of the injector 600 ms and the pressure in the accumulator 90 MPa, the determining of the maximum penetration was not possible because in the case

nano zdjęcia mikroskopowe, które pozwoliły na ustalenie średnic otworków wtryskowych: 0,132 mm dla wtryskiwacza elektromagnetycznego i 0,145 mm – dla piezoelektrycznego (rys. 9).

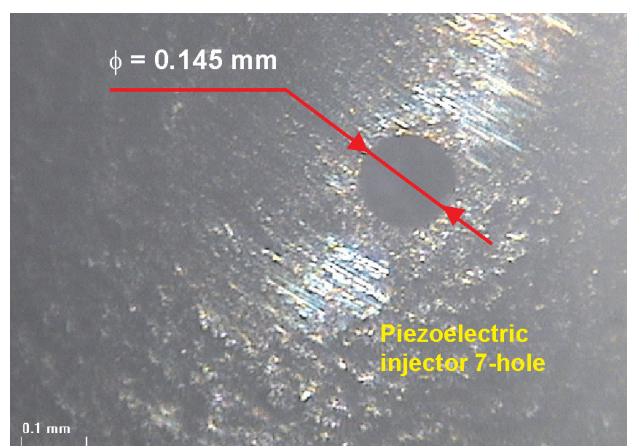
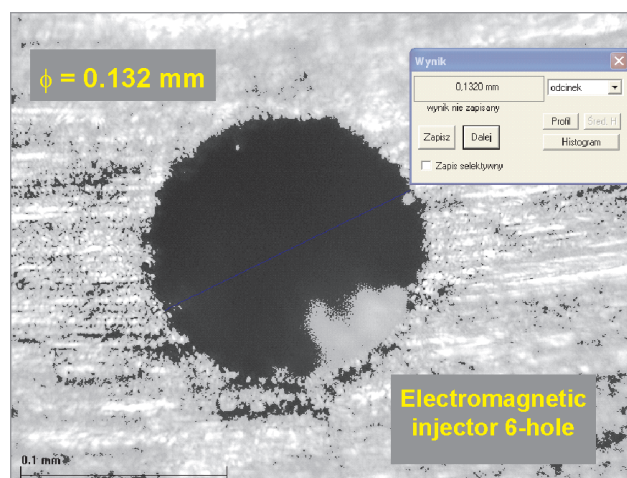


Fig. 9. Dimensions of the injector hole under investigation

Rys. 9. Wymiary otworków badanych wtryskiwaczy

3. Analiza wyników badań

Analizę wyników obserwacji przeprowadzono w odniesieniu do prędkości wypływu paliwa z rozpylacza, zasięgu strugi i kąta wierzchołkowego strugi wtryskiwanego paliwa. Obliczeniową ocenę prędkości początkowej wypływu paliwa z wtryskiwacza przeprowadzono na podstawie zależności (1); uzyskane wartości zawiera tabela 3.

Sekwencję obrazów wtrysku paliwa dla wtryskiwacza elektromagnetycznego oraz piezoelektrycznego przedstawiono odpowiednio na rys. 10a i 10b. Stwierdzono, że w przypadku wtryskiwacza piezoelektrycznego struga wtryskiwanego paliwa formuje się w czasie o ok. 30% krótszym po pojawieniu się elektrycznego impulsu sterującego niż w przypadku wtryskiwacza elektromagnetycznego. Potwierdzają to przebiegi zależności zasięgu strugi paliwa od czasu trwania wtrysku pokazane na rys. 11.

Zarejestrowane zdjęcia procesu rozprzestrzeniania się strugi wykorzystano do wyznaczenia zależności jej zasięgu w czasie trwania wtrysku. Wyniki badań przeprowadzonych przy ciśnieniach wtrysku 50 i 90 MPa przedstawiono na rys.

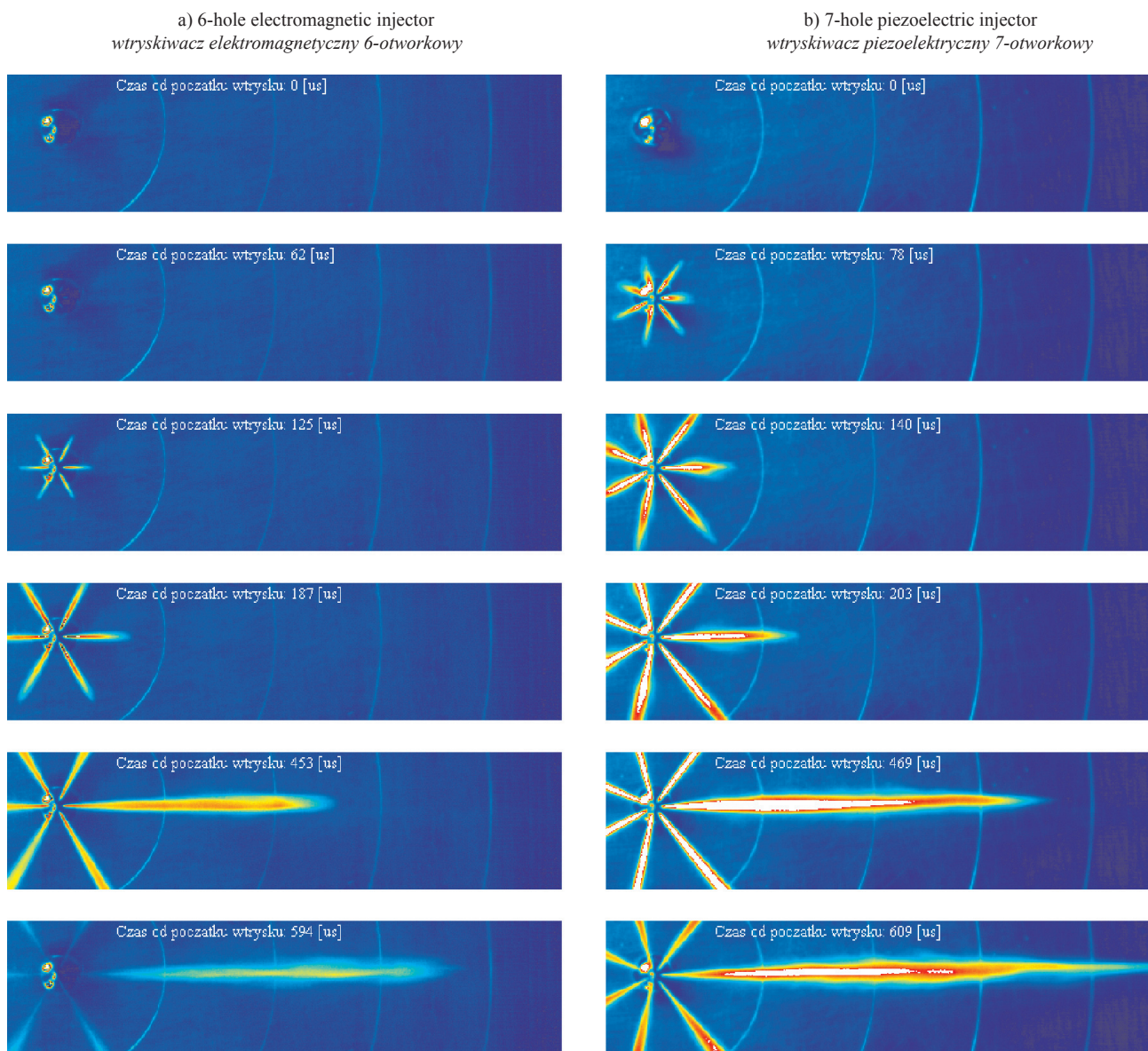


Fig. 10. The courses of the fuel injection for the electromagnetic injector a) and the piezoelectric injector b) (injection parameters $P_{\text{wtr}} = 50$ MPa, $t_{\text{wtr}} = 0,60$ ms, kalibrol, $P_{\text{ot}} = 0,1$ MPa)

Rys. 10. Przebiegi wtrysku paliwa dla wtryskiwacza elektromagnetycznego a) oraz piezoelektrycznego b) (parametry wtrysku $P_{\text{wtr}} = 50$ MPa, $t_{\text{wtr}} = 0,60$ ms, kalibrol, $P_{\text{ot}} = 0,1$ MPa)

of both the electromagnetic and piezoelectric injectors the fuel spray exceeded the recording area as soon as 500 ms after the initiation of the injection.

While evaluating the penetration of the fuel spray based on the recorded observations it has been noted in both cases that the fuel spray appears approximately 100 μs after the control injector opening pulse but its full formation takes place in the piezoelectric injector approximately 30% time sooner than it is in the case of the electromagnetic injector. In the final phase of the injection the penetration obtained for the piezoelectric injector is approximately 20 mm larger than for the electromagnetic injector, Fig. 11. Similar trends have been observed during the tests performed for the injection pressure increased from 50 to 90 MPa, Fig. 12, yet, as soon as approximately 150 μs before the end of the injection the fuel spray left the visible area ($S > 114$ mm).

11 i 12. Maksymalny zasięg dla wtryskiwacza elektromagnetycznego przy ciśnieniu 50 MPa i czasie otwarcia 600 μs wynosił 87 mm (rys 11), natomiast dla wtryskiwacza piezoelektrycznego przy tych samych parametrach wtrysku – 114 mm (rys. 12). Tak duża różnica w zasięgu wtryskiwacza jest spowodowana różnicą w wielkości otworków. Dla czasu otwarcia wtryskiwacza 600 μs i ciśnienia w zasobniku 90 MPa nie było możliwe określenie maksymalnego zasięgu, ponieważ zarówno dla wtryskiwacza elektro- i piezoelektrycznego struga wtryskiwanego paliwa wykraczała poza zasięg filmowania już po około 500 μs od początku trwania wtrysku.

Oceniając zasięg strugi paliwa na podstawie zarejestrowanych obserwacji, stwierdzono w obu przypadkach, że struga pojawia się ok. 100 μs po podaniu sygnału sterującego otwarciem wtryskiwaczy, lecz jej pełne uformowanie

The analysis of the outflow speed of the fuel in the initial phase of the injection indicates higher values for the piezoelectric injector, resulting from a faster growth of the cross section diameter of the fuel flow due to a quicker needle lift and different injector hole diameters $\Delta\phi = (0,145 - 0,312) = 0,013$ mm. In the case of the piezoelectric injector a higher concentration of the fuel in the spray core was observed, which is indicated by a higher reflected light intensity recorded in the images. A lower value of the vertex angle also confirms the more compact structure.

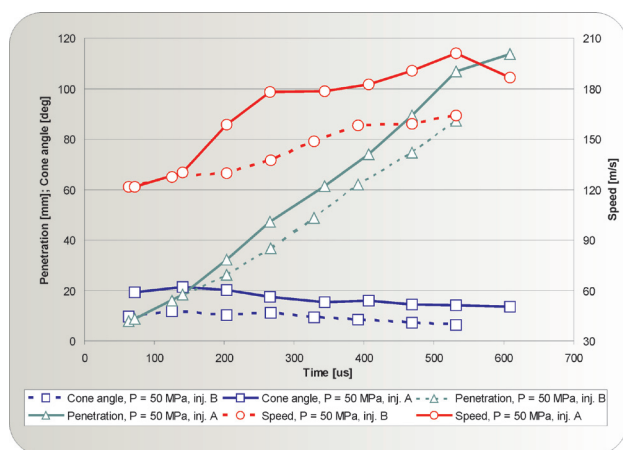


Fig. 11. The comparison of the penetration, speed of the spray front and the spray cone angles at the pressure of 50 MPa ($t_{\text{otw}} = 600$ μs) for the injectors: 7-hole piezoelectric (A) and 6-hole electromagnetic (B)

Rys. 11. Porównanie zasięgu, prędkości czoła strugi oraz kątów stożka strugi przy ciśnieniu 50 MPa ($t_{\text{otw}} = 600$ μs) dla wtryskiwaczy: piezoelektrycznego 7-otworkowego (A) oraz elektromagnetycznego 6-otworkowego (B)

In the case of an injection with the pressure of 50 MPa the speed of spray front propagation can be assessed at 120–180 m/s and the maximum value is reached after approximately 400–450 μs after the onset of the injection. In the mid phase of the injection, the speed of propagation was higher for the piezoelectric injector as compared to an electromagnetic injector by approximately 30–40 m/s. In the case of an injection with the pressure of 90 MPa the speed of spray propagation was approximately 240 m/s for the piezoelectric injector and was by approximately 20 m/s higher than for the electromagnetic injector. In both cases the courses of this speed almost overlap in the initial and final phases of the injection and in the mid phase of the injection the speed is higher by approximately 30–40 m/s for the piezoelectric injector.

As for the vertex angle of the fuel spray it has been observed that it is a bit larger for the piezoelectric injector particularly in the initial injection phase. This difference, however, minimizes as the injection pressure grows.

Comparing the spray cone (Fig. 11, 12) of the electromagnetic and piezoelectric injectors for the pressure of 50 MPa and the opening duration 600 μs we can state that they differ from each other at the beginning of the injection from 36 to 46% (up to approximately 250 μs from the onset of the injection). In the final phase of the injection this differ-

następuje we wtryskiwaczu piezokwarcowym ok. 30% czasu wcześniej niż we wtryskiwaczu elektromagnetycznym. W końcowej fazie wtrysku zasięg uzyskiwany dla wtryskiwacza piezoelektrycznego jest o ok. 20 mm większy niż dla wtryskiwacza elektromagnetycznego (rys. 11). Podobne tendencje zaobserwowano podczas badań przeprowadzonych dla ciśnienia wtrysku zwiększonego z 50 do 90 MPa (rys. 12), jednak już ok. 150 μs przed końcem wtryskiwania struga wykroczyła poza obszar obserwacji ($S > 114$ mm).

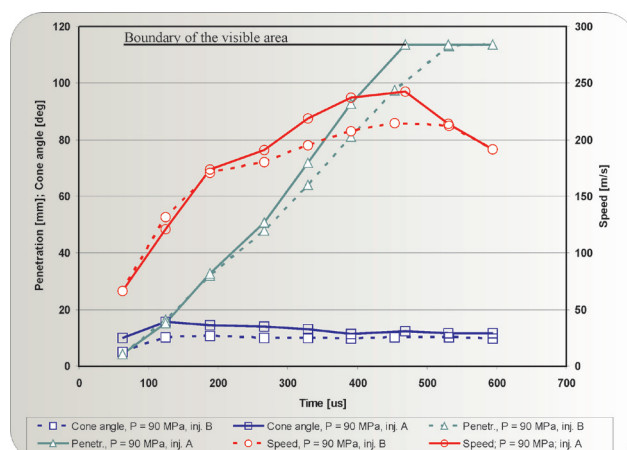


Fig. 12. Penetration, speed of the spray front and the spray cone angle at 90 MPa ($t_{\text{otw}} = 600$ μs) for the injectors: 7-hole piezoelectric (A) and 6-hole electromagnetic (B)

Rys. 12. Zasięg, prędkość czoła strugi oraz kąt stożka strugi przy ciśnieniu 90 MPa ($t_{\text{otw}} = 600$ μs) dla wtryskiwaczy: piezoelektrycznego 7-otworkowego (A) oraz elektromagnetycznego 6-otworkowego (B)

Analiza prędkości wypływu paliwa w początkowej fazie wtrysku wskazuje na większe wartości uzyskane dla wtryskiwacza piezoelektrycznego wynikające z szybszego zwiększania się przekroju przepływu paliwa związanego z szybszym unoszeniem się iglicy wtryskiwacza i różnicy średnicy otworków $\Delta\phi = (0,145 - 0,312) = 0,013$ mm. W odniesieniu do wtryskiwacza piezoelektrycznego stwierdzono także większą koncentrację paliwa w rdzeniu strugi, na co wskazuje większa intensywność światła odbitego zarejestrowana na zdjęciach. O bardziej zwartej strukturze strugi świadczy także mniejsza wartość kąta wierzchołkowego.

Przy wtrysku z ciśnieniem 50 MPa prędkość przemieszczania się czoła strugi można ocenić na 120–180 m/s, a wartość maksymalna osiągnięta była po ok. 400–450 μs po początku wtrysku. W środkowej fazie wtrysku prędkość rozprzestrzeniania się strugi była większa dla wtryskiwacza piezoelektrycznego niż wtryskiwacza elektromagnetycznego o ok. 30–40 m/s. Przy wtrysku z ciśnieniem 90 MPa prędkość rozprzestrzeniania się strugi paliwa wyniosła ok. 240 m/s dla wtryskiwacza piezoelektrycznego i była większa o ok. 20 m/s niż dla wtryskiwacza elektromagnetycznego. W obu przypadkach przebiegi tej prędkości prawie się pokrywają w początkowej i końcowej fazie wtrysku, a w fazie środkowej prędkość ta jest większa o ok. 30–40 m/s dla wtryskiwacza piezoelektrycznego.

ence amounts to 56%. The speed of the spray front for both injectors in the initial phase of the injection is similar and in the final injection phase differs by 18%. For the pressure of 90 MPa and time 600 μ s we can carry out a comparison only until 450 μ s from the onset of the injection because, after that time the spray front leaves the recording range, determining of the speed is not possible. At such injection pressure parameters it has been observed that the angle for both injectors differs slightly and its variations amount to approximately 2%. The speed of both sprays (similarly to the pressure of 50 MPa) in the initial phase of the injection is identical and the maximum difference (in the injection time between 300–500 μ s) is 12%.

The results of the analysis of the observations from both measurement series have been compared with the results of the calculations based on the Hiroyasu (formulas 2–4) and Dent (formula 5) models. These models are much different from the obtained results for the values of the maximum spray penetration, particularly for the pressure of 90 MPa, Fig. 13 and 14.

Comparing the results of the calculations with the results of the tests we can observe that the spray penetration values are convergent from the onset of the injection until approximately 200 μ s, i.e. 1/3 of the duration of the injection for the injection pressure of 50 MPa, and until approximately 300 μ s ($\frac{1}{2}$ of the duration) for the pressure of 90 MPa. As the results show, at the end of the injection there is a higher spray penetration than the values obtained in the calculations based on both the Hiroyasu and Dent models. The Dent model renders higher

W odniesieniu do kąta wierzchołkowego strugi paliwa stwierdzono, że jest on nieco większy dla wtryskiwacza piezoelektrycznego, szczególnie w pierwszym okresie trwania wtrysku. Różnica ta jednak zmniejsza się po zwiększeniu ciśnienia wtrysku.

Porównując kąt stożka strugi (rys. 11, 12) dla wtryskiwacza elektro- i piezoelektrycznego dla ciśnienia 50 MPa i czasu otwarcia 600 μ s, można stwierdzić, że różnią się od siebie na początku wtrysku od 36 do 46% (do około 250 μ s od początku wtrysku). W końcowej fazie wtrysku różnica ta wynosi około 56%. Natomiast prędkość czoła strugi dla obu wtryskiwaczy w początkowej fazie wtrysku jest zbliżona, a w końcowej fazie wtrysku różni się o 18%. Dla ciśnienia 90 MPa i czasu 600 μ s porównania możemy dokonywać tylko do około 450 μ s do początku wtrysku, gdyż po tym czasie zasięg strugi wykracza poza zakres filmowania – określenie prędkości nie jest możliwe. Przy takich parametrach ciśnienia wtrysku paliwa stwierdzono, że kąt dla obu wtryskiwaczy różni się nieznacznie, a jego wahania wynoszą około 2%. Prędkość obu strug (podobnie jak przy ciśnieniu 50 MPa) w początkowej fazie wtrysku jest taka sama, a maksymalna różnica (w czasie wtrysku między 300–500 μ s) wynosi 12%.

Wyniki analizy obserwacji z obu serii pomiarowych porównano z wynikami obliczeń uzyskanymi na podstawie modeli Hiroyasu – wzory (2)–(4) i Denta – wzór (5). Modele te znacząco odbiegają od uzyskanych wyników dla wartości maksymalnego zasięgu, szczególnie dla ciśnienia 90 MPa (rys. 13 i 14).

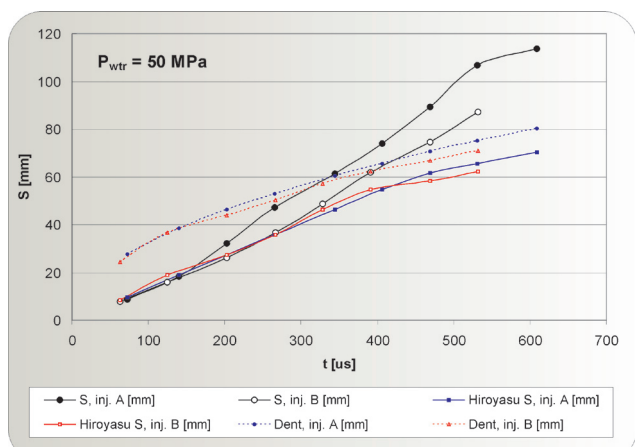


Fig. 13. Calculated and empirical values of the spray front penetration at the pressure of 50 MPa ($t_{\text{otw}} = 600 \mu\text{s}$) for the piezoelectric 7-hole injector (A) and electromagnetic 6-hole injector (B)

Rys. 13. Obliczone i empiryczne wartości zasięgu czoła strugi przy ciśnieniu 50 MPa ($t_{\text{otw}} = 600 \mu\text{s}$) dla wtryskiwaczy: piezoelektrycznego 7-otworkowego (A) oraz elektromagnetycznego 6-otworkowego (B)

spray penetration values than the Hiroyasu model and at the end of the injection there is a smaller difference against the test results. It is worth mentioning that until approximately half of the injection time the Dent model renders higher values than the experimental ones, then the situation reverses. Both models show lower sensitivity to the injection pressure than it would result from the experiments.

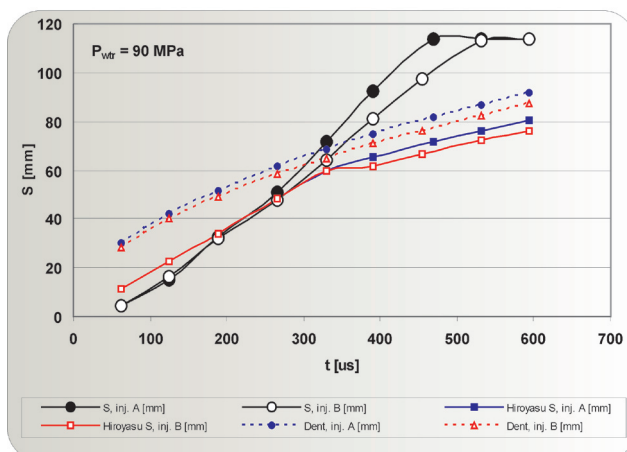


Fig. 14. Calculated and empirical values of the spray front penetration at the pressure of 90 MPa ($t_{\text{otw}} = 600 \mu\text{s}$) for the piezoelectric 7-hole injector (A) and electromagnetic 6-hole injector (B)

Rys. 14. Obliczone i empiryczne zasięgi czoła strugi przy ciśnieniu 90 MPa ($t_{\text{otw}} = 600 \mu\text{s}$) dla wtryskiwaczy: piezoelektrycznego 7-otworkowego (A) oraz elektromagnetycznego 6-otworkowego (B)

Porównując wyniki obliczeń z wynikami badań można stwierdzić, że wartości zasięgu strugi są zbliżone od początku wtrysku do ok. 200 μ s, czyli ok. 1/3 czasu trwania wtrysku w przypadku ciśnienia wtrysku 50 MPa, oraz do ok. 300 μ s (ok. $\frac{1}{2}$ czasu trwania) w przypadku ciśnienia 90 MPa. Pod koniec trwania wtrysku wyniki badań wskazują na większy zasięg strugi niż wartości uzyskane z obliczeń zarówno w

5. Conclusions

Based on the conducted investigations it has been observed that:

1. The here presented Hiroyasu and Dent models are fit for larger diameters of the injector holes (above 0,2 mm in diameter); this is also confirmed in other investigations [2, 3, 4]. As far as the fuel spray penetration is concerned the models show smaller penetration values than it results from the experiments.
2. The speed of propagation of the fuel spray front is higher for the piezoelectric injector; its maximum value reaches approximately 200 m/s for the injection pressure of 50 MPa and approximately 250 m/s for the injection pressure of 90 MPa; in both cases the values are lower than those obtained in the calculations.
3. Including the backpressure in the test stand investigations leads to a better convergence of the empirical models and the experimental values.
4. Conducting the calculations and the analysis at the injection pressure above 70 MPa and the injection time 600 μ s was not possible on the available test stand during the investigations because the fuel spray leaves the visible area during the injection due to a lack of the possibility of measurement under conditions of elevated backpressure; investigations in this matter shall be continued and updated in the future.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

CR	common rail/system wtrysku zasobnikowego
HSS	High Speed Star/kamera do szybkich zdjęć firmy LaVision
P_{wtr}	fuel injection pressure/ciśnienie wtrysku paliwa
P_{ot}	ambient pressure/ciśnienie otoczenia
S	spray penetration/zasięg strugi
t_{wtr}	injection timing/czas wtrysku paliwa

Mr. Krzysztof Wisłocki, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Machines and Transportation at Poznan University of Technology.

Dr hab. inż. Krzysztof Wisłocki – profesor na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

e-mail: krzysztof.wislocki@put.poznan.pl



Mr. Ireneusz Pielecha, DEng. – doctor in the Faculty of Machines and Transportation at Poznan University of Technology.

Dr inż. Ireneusz Pielecha – adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

e-mail: ireneusz.pielecha@put.poznan.pl



oparciu o model Hiroyasu, jak i Denta. Model Denta daje jednak większe wartości zasięgu strugi niż model Hiroyasu, a pod koniec wtrysku występuje mniejsza różnica w stosunku do wyników badań. Warto zauważyć, że do ok. połowy trwania wtrysku model Denta dostarcza wartości większe od wartości eksperymentalnych, później – odwrotnie. Oba modele wykazują przy tym mniejszą wrażliwość na ciśnienie wtrysku niż wynikałoby to z badań eksperymentalnych.

4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

1. Przedstawiane w artykule modele Hiroyasu i Denta są dostosowane do większych średnic otworków wtryskiwacza (powyżej 0,2 mm średnicy); wynika to również z innych badań [2, 3, 4]. W odniesieniu do przeprowadzonych badań zasięgu strugi paliwa modele te wykazują mniejszy zasięg strugi niż wynika on z badań eksperymentalnych.
2. Prędkość rozprzestrzeniania się czoła strugi wtryskiwanego paliwa jest większa dla wtryskiwacza piezoelektrycznego; jej maksymalna wartość osiąga ok. 200 m/s w przypadku ciśnienia wtrysku 50 MPa oraz ok. 250 m/s w przypadku ciśnienia wtrysku 90 MPa; w obu przypadkach wartości te są mniejsze od uzyskanych z obliczeń.
3. Uwzględnienie przeciwcisnienia w badaniach stanowiskowych prowadzi do lepszej zbieżności modeli empirycznych i wartości eksperymentalnych.
4. Prowadzenie obliczeń oraz analizy przy ciśnieniu wtrysku powyżej 70 MPa i czasie wtrysku powyżej 600 μ s nie było możliwe na posiadanym stanowisku badawczym, gdyż struga w czasie trwania wtrysku wychodzi poza obszar obserwacji ze względu na brak możliwości pomiarów w warunkach zwiększonego przeciwcisnienia; badania w tym zakresie będą uzupełnione w przyszłości.

Paper reviewed

Bibliography/Literatura

- [1] DaVis 7.2 Software Manual, LaVision, Göttingen 2009.
- [2] Dent J.C.: A basic-comparisons of various experimental method for studying spray penetration. SAE Technical Paper 710571.
- [3] Heywood J.B.: Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Book Co. 1988
- [4] Hiroyasu, H., Arai, M.: Structures of fuel spray in diesel engines, SAE Technical Paper 900475.
- [5] Karta charakterystyki substancji niebezpiecznej – olej Kalibrol Lux, www.ornoil.pl
- [6] www.lavision.de

Mr. Jakub Czajka, MSc, MEng. – postgraduate in the Faculty of Machines and Transportation at Poznan University of Technology.

Mgr inż. Jakub Czajka – doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

e-mail: jakubczajka@o2.pl

