

PIELECHA Ireneusz, BOROWSKI Przemysław

## WIELOCZĘŚCIOWY WTRYSK I ROZPYLENIE PALIWA PRZEZ DWA KĄTOWO UMIESZCZONE WTRYSKIWACZE W UKŁADZIE BEZPOŚREDNIEGO WTRYSKU BENZYNY

### *Streszczenie*

*W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących zastosowania dwóch wtryskiwaczy benzyny umieszczonych bezpośrednio w komorze spalania. Zastosowanie takiego układu wtrysku paliwa pozwala na skrócenie czasu rozpylenia paliwa, zwiększając jednocześnie obszar zajmowany przez strugi wtryskiwanego paliwa. Przedstawiono wtrysk jednoczesny oraz wtrysk sekwencyjny realizowany przez dwa wtryskiwacze. Określono korzyści wynikające z takiego rozwiązania przedstawiając wskaźniki geometryczne strug wtryskiwanego paliwa.*

### WSTĘP

Wtrysk i rozpylenie paliwa jest zasadniczym procesem wpływającym na sposób jego spalania i tworzenia szkodliwych składników spalin. Dotychczasowe rozwiązania bezpośredniego wtrysku benzyny bazują na jednym wtryskiwaczu umieszczonym w komorze spalania. W zależności od jego umieszczenia można wyróżnić (rys. 1):

- tworzenie mieszanki z wykorzystaniem ruchu powietrza (*air-guided*),
- tworzenie mieszanki przez odpowiednie ukształtowanie tłoka (*wall-guided*),
- tworzenie mieszanki przez strugę paliwa (*spray-guided*) [4].

Ostatnie rozwiązanie niesie ze sobą wiele korzyści, w postaci np. możliwości spalania mieszanek ubogich, a jednocześnie pozwala na zwiększanie ciśnienia wtryskiwanego paliwa. Kolejnym proponowanym rozszerzeniem tych układów jest zastosowanie wtrysku z dwoma wtryskiwaczami umieszczonymi bezpośrednio w komorze spalania.

Realizacja wtrysku kąтового (dwoma wtryskiwaczami) pozwala na skrócenie czasu przygotowania mieszanki palnej, przy jednoczesnej dużej jego penetracji do wnętrza komory spalania. Uzyskuje się kompromis między wielkością wtryskiwanej dawki a jej parametrami rozpylenia. Kilka lat temu były podejmowane badania dotyczące wtrysku przeciwsobnego [2], jednak nie uzyskano zadowalających rezultatów. Przynajmniej badania dotyczyły wtrysku benzyny z wykorzystaniem wtryskiwaczy wielootworkowych. Autorzy niniejszego referatu również podejmowali próby wtrysku przeciwsobnego uzyskując dużą zgodność badań eksperymentalnych z badaniami symulacyjnymi [3]. Jednak badania takie nie prowadziły do uzyskania zmian rozpylenia paliwa w okolicy świecy zapłonowej. Obecnie w literaturze jest brak podobnych badań wykorzystujących wtrysk przeciwsobny lub kątowy w silnikach o zapłonie iskrowym. Nowe możliwości rozwiązań stosowane w systemach firmy VW i Lexus

(dwa wtryskiwacze z których jeden umieszczony w kanale dolotowym, a drugi bezpośrednio w cylindrze) wskazują na ogromny potencjał stosowania różnych systemów spalania [4].



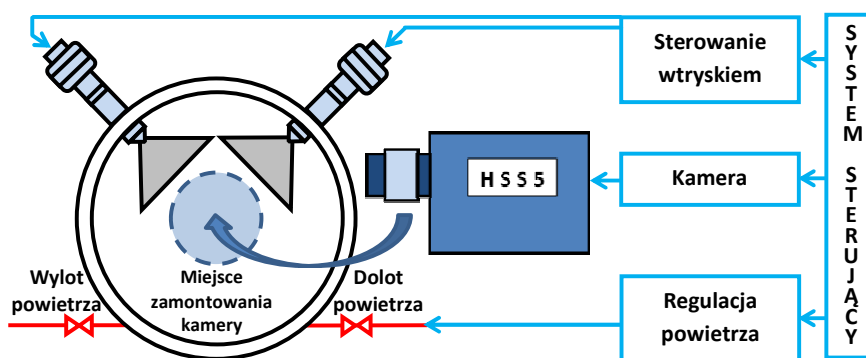
**Rys. 1.** Dotychczasowe rozwiązania układów bezpośredniego wtrysku benzyny  
Źródło: [4]

Podjęte w artykule badania wtrysku i rozpylenia paliwa miały na celu określenie przydatności takiego rozwiązania przez ocenę wskaźników geometrycznych strugi wtryskiwanego paliwa, a także obszaru przez nią zajmowanego. Prowadzone badania miały również wskazać zalety i ewentualne wady określonego umieszczenia wtryskiwaczy w komorze spalania.

## 1. APARATURA I METODYKA BADAWCZA

Do rozwiązywania problemu wykorzystano aparat badawczy w postaci:

- komory o stałej objętości (o zmiennych parametrach panujących ciśnieniach) do badania wtrysku i rozpylenia paliwa ciekłego, w której był realizowany wtrysk kątowy dwoma wtryskiwaczami (w celu określenia parametrów geometrycznych strugi paliwa) – rys. 2,
- kamery do zdjęć szybkich i programu do ich obróbki DaVis firmy LaVision.



**Rys. 2.** Komora stałej objętości z zamontowanym układem do kąтового wtrysku paliwa

W badaniach wykorzystano wartość ciśnienia paliwa  $P_{wtr} = 15$  oraz  $20$  MPa. Przyjęte wartości ciśnienia wynikają z analizy publikacji w zakresie wtrysku i rozpylenia paliwa z wykorzystaniem wtryskiwaczy typu *outward-opening* (o zewnętrznym otwarciu iglicy wtryskiwacza). Badania rozpylenia wykonano w komorze stałej objętości realizując różne wartości ciśnienia powietrza, odpowiednie przy sprężaniu ładunku w rzeczywistym silniku. Temperatura powietrza w komorze wynosiła  $20^{\circ}\text{C}$ . Badania optyczne wykonano z wykorzystaniem kamery do szybkiego filmowania HSS 5 z szybkością  $10$  kHz o rozdzielczości filmowania  $512 \times 512$  pikseli.

W badaniach z dwoma wtryskiwaczami zapewniono: a) jednakowy początek wtrysku paliwa, b) wtrysk sekwencyjny dwoma wtryskiwaczami z trzema wtryskiwanymi dawkami. Badania te zestawiono z wtryskiem paliwa realizowanym przez jeden wtryskiwacz w celu uzyskania danych odniesienia. Parametry wtrysku zostały przedstawione w tablicy 1. Przykładową sekwencję rozpylenia paliwa z wykorzystaniem różnych strategii wtrysku przedstawiono w tablicy 2.

**Tab. 1.** Warunki prowadzenia badań w komorze stałej objętości

No.	$P_{wtr}$ [MPa]	$t_{wtr}$ [ms]	$\Delta t$ [ms]	$P_{pow}$ [MPa]
Wtrysk jednoczęściowy				
1	20	0,8	–	1,5
Wtrysk dwuczęściowy				
2	15	2 x 0,3	–	1,0
3	15	2 x 0,3	–	1,5
4	15	2 x 0,6	–	1,0
5	15	2 x 0,6	–	1,5
6	20	2 x 0,4	–	1,5
Wtrysk wieloczęściowy sekwencyjny				
7	20	0,3 + 0,3 + 0,3	0,5	1,5

**Tab. 2.** Rozkład strugi paliwa przy różnych konfiguracjach wtrysku

t	1 wtryskiwacz $t_{wtr} = 0,8$ ms	2 wtryskiwacze jednocześnie $t_{wtr} = 2 \times 0,4$ ms	2 wtryskiwacz sekwencyjnie $t_{wtr} = 0,3 + 0,3 + 0,3$ ms
0,0 ms			
0,4 ms			
0,8 ms			
1,2 ms			
1,6 ms			
2,0 ms			

## 2. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ ROZPYLENIA PALIWA

### 2.1. Wtrysk jednoczesny

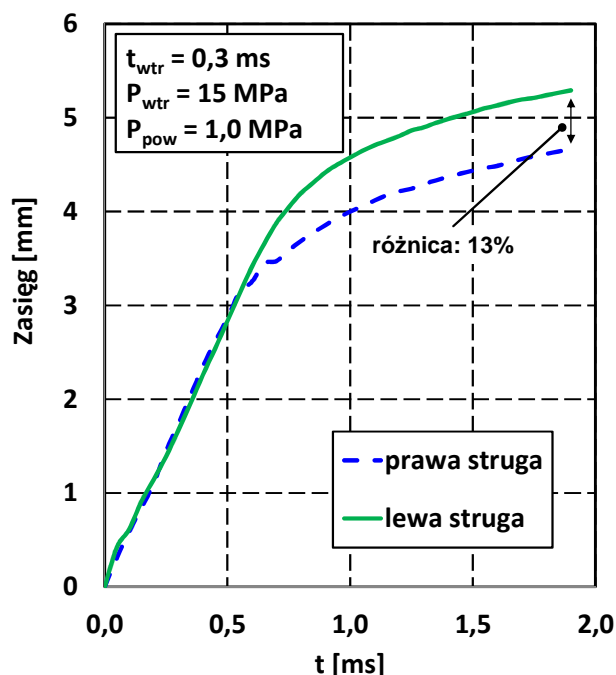
Kątowy sposób usytuowania wtryskiwaczy nie wymaga znaczących przeróbek w układzie komory spalania. Stopień sprężania może zostać zachowany (w stosunku do konwencjonalnego układu z jednym wtryskiwaczem), a możliwe jest szerokie kształtowanie procesu wtrysku symultanicznego lub wtrysku z przesunięciem czasowym między wtryskiwanymi dawkami.

Geometria usytuowania wtryskiwaczy podczas realizacji kąowego wtrysku paliwa została tak zaprojektowana, aby uzyskać tworzącą stożka rozpylanego paliwa równoległą do górnej płaszczyzny głowicy i jednocześnie równoległą do ścianek cylindra. Pozwala to na takie tworzenie strugi paliwa, które osiągnie świecę zapłonową (elektrodę świecy) w sposób pozwalający na przewidywanie rozpylenia paliwa w określonej przestrzeni komory spalania.

Badania rozpylenia paliwa przez dwa wtryskiwacze prowadzono w celu określenia:

- zasięgów strug do chwili ich połączenia (badania optyczne nie pozwalają na wyodrębnienie poszczególnych dawek paliwa),
- równomierności pól powierzchni wtryskiwanych dawek paliwa z dwóch wtryskiwaczy,
- zmian powierzchni przy zróżnicowanych przeciwnościach powietrza.

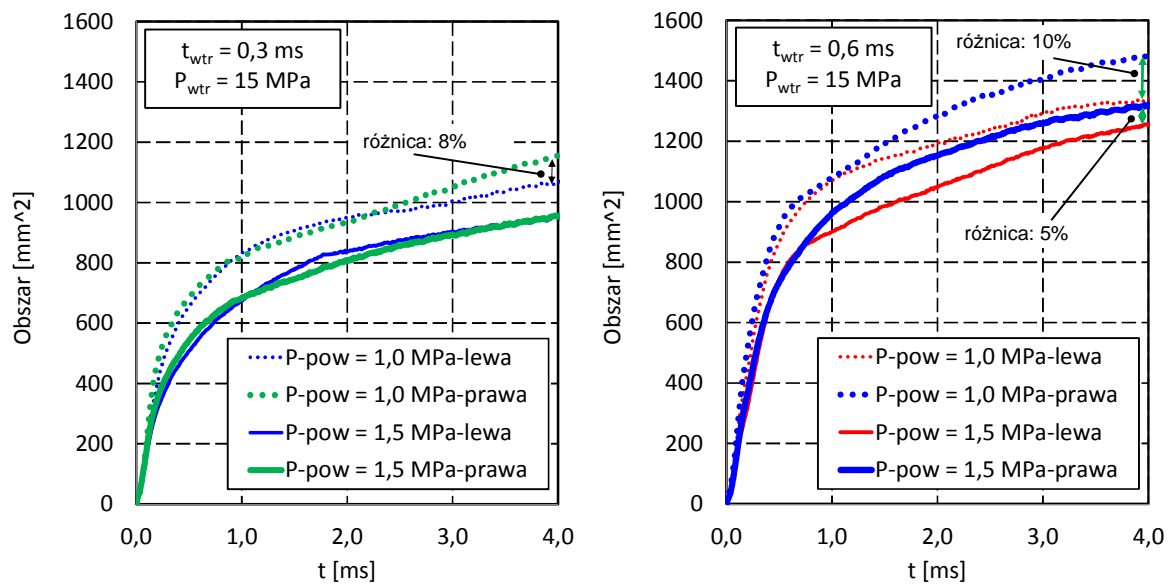
Wartości zasięgu wyznaczano dla każdej ze strug paliwa wtryskiwanych jednocześnie przez dwa wtryskiwacze (rys. 3). Analiza wyników wskazuje na istnienie 13% różnic w liniowym zasięgu tych strug. Nierównomierność zasięgu może być związana ze sposobem wykonania konkretnych wtryskiwaczy. Większe wartości przeciwności będą skutkowały mniejszym zasięgiem i ewentualnie mniejszymi różnicami uzyskiwanymi przez oba wtryskiwacze.



Rys. 3. Wartości zasięgu dawek paliwa przy wtrysku dwoma wtryskiwaczami

Analiza obszarów strug paliwa wskazuje, że podczas wtrysku dawek o czasie  $t = 0,3 \text{ ms}$  maksymalne różnice powierzchni występują po czasie 3,0 ms i wynoszą około 8% przy przeciwności 1,0 MPa (rys. 4). Zwiększenie przeciwności nie powoduje różnic w obszarach zajmowanych przez obie dawki paliwa. Zwiększenie czasu wtrysku wskazuje na istnienie większych różnic powierzchni strug. Po czasie 1,0 ms od rozpoczęcia wtrysku

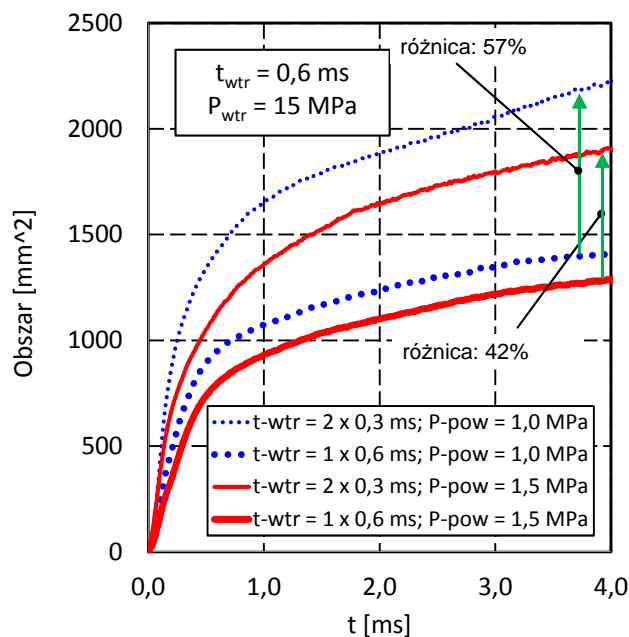
różnice powierzchni osiągają 10% (przy mniejszych przeciwcisnieniach). Większe przeciwcisnienie powietrza w komorze zmniejsza te różnice do około 5%.



**Rys. 4.** Porównanie obszarów strug paliwa przy jednoczesnym wtrysku dwoma wtryskiwaczami przy zróżnicowanym czasie wtrysku paliwa i przeciwcisnieniu powietrza

Analiza wtrysku jedno i dwuczęściowego została przedstawiona poniżej. Zastosowanie podziału na dwie dawki w porównaniu do jednej dawki powoduje, że przy mniejszych wartościach przeciwcisnienia ( $P_{pow} = 1,0$  MPa) zwiększenie obszaru strugi paliwa wynosi 57% (zwiększenie przeciwcisnienia powietrza w komorze do 1,5 MPa zmniejsza różnice powierzchni do 42% między wtryskiem jedno i dwuczęściowym).

Analiza obszarów uzyskanych przy wtrysku podwójnym ( $2 \times t = 0,3$  ms) oraz pojedynczym ( $t = 0,6$  ms) wskazuje na uzyskiwanie większych obszarów strugi przy wtrysku dwoma wtryskiwaczami (rys. 5).

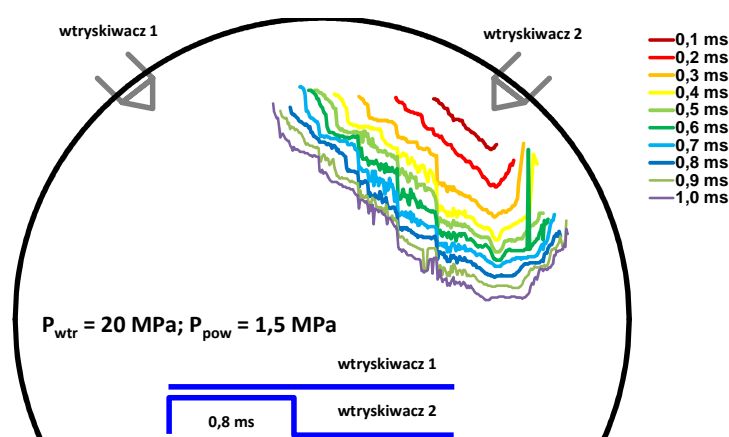


**Rys. 5.** Porównanie zmian obszarów podczas wtrysku jednym i dwoma wtryskiwaczami przy jednakowym sumarycznym czasie wtrysku ( $t_{1a} = 0,3$  ms;  $t_{1b} = 0,3$  ms;  $t_2 = 0,6$  ms;  $P_{wtr} = 15$  MPa;  $P_{pow} = 1,0$  oraz 1,5 MPa)

## 2.2. Wtrysk sekwencyjny dwoma wtryskiwaczami

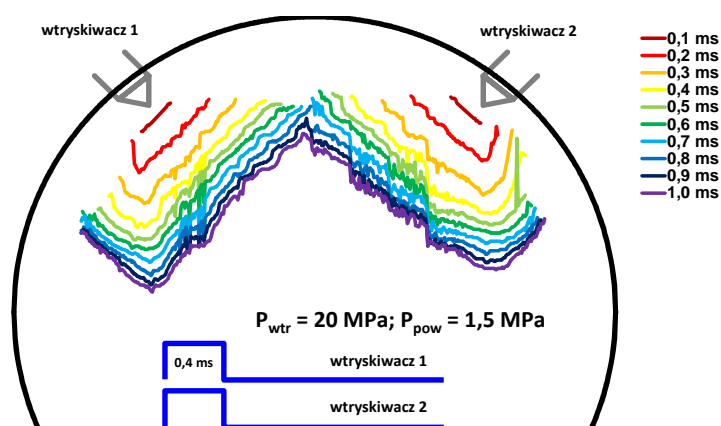
Badania wtrysku paliwa charakteryzują się nieliniowością zmiany zasięgu strugi paliwa. Usytuowanie wtryskiwaczy w komorze odzwierciedla ich pozycję w głowicy silnika. Rysunki 6 i 7 przedstawiają zasięg strug paliwa w funkcji czasu. Wartości współrzędnych zasięgów strug zostały naniesione na rysunek komory stałej objętości odwzorowując parametry pomiarów. W warunkach rzeczywistych między wtryskiwaczami umieszczona zostanie świeca zapłonowa. Dlatego przedstawione wyniki nadają się do interpretacji zasięgu strug omywających świecę zapłonową.

Na rysunku 6 został przedstawiony zasięg w formie graficznej w zależności rozpoczęcia pojedynczego wtrysku. W takiej konfiguracji zastosowano czas wtrysku wynoszący  $t = 0,8$  ms. Przedstawiona zależność obrazuje dużą prędkość strugi na początku wtrysku oraz zmniejszenie prędkości zajmowania obszaru pod koniec oraz po wtrysku. Struga paliwa dociera do obszaru między wtryskiwaczami po 0,4–0,5 ms.



Rys. 6. Zasięg strugi uzyskany podczas wtrysku przez jeden wtryskiwacz

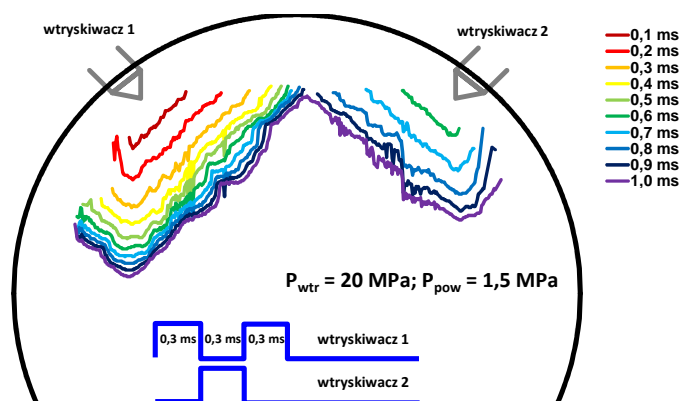
Przebieg procesu wtrysku za pomocą dwóch wtryskiwaczy umożliwia zastosowanie równoczesnego wtrysku mniejszych dawek (rys. 7). Dzięki takiej konfiguracji uzyskano mniejszy zasięg strug każdego z wtryskiwaczy i jednocześnie większy obszar strugi. Zauważalne jest połączenie się strug po 0,7 ms od początku wtrysku. Uzyskuje się dzięki temu wzbogacenie mieszanki między wtryskiwaczami – w okolicach świecy zapłonowej.



Rys. 7. Zasięgi strug paliwa i ich interakcje podczas jednoczesnego wtrysku benzyny przez dwa wtryskiwacze

### 2.3. Wtrysk wieloczęściowy dwoma wtryskiwaczami

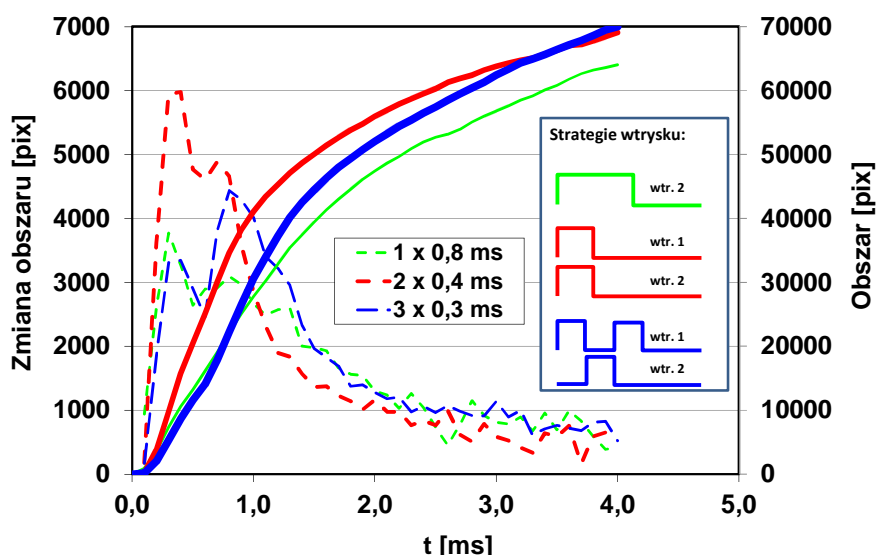
Zastosowanie wtrysku naprzemiennego powoduje dostarczenie paliwa w dłuższym okresie czasu. Na rysunku 8 przedstawiono rozprzestrzenianie się sekwencyjnie wtryskiwanych strug paliwa. Zaobserwowano połączenie się strug paliwa po upływie 1,0 ms, a nie po 0,7 ms jak miało to miejsce podczas wtrysku jednoczesnego. Zastosowanie strategii wtrysku sekwencyjnego wymaga dłuższego czasu dotarcia paliwa w okolice świecy. Jednakże strategia taka pozwala na dowolne kształtowanie uwarstwienia ładunku w okolicy świecy zapłonowej.



Rys. 8. Zasięgi strug i ich interakcje podczas wieloczęściowego wtrysku benzyny z przesunięciem w czasie otwarciem wtryskiwaczy

### PODSUMOWANIE

Wyniki badań wszystkich konfiguracji wtrysku zestawiono na rysunku 9. Zastosowanie dwóch wtryskiwaczy zarówno przy wtrysku jednoczesnym, jak i sekwencyjnym umożliwia osiągnięcie lepszego rozpylenia paliwa.



Rys. 9. Zestawienie obszaru oraz prędkości zmian obszaru przez strugi paliwa w funkcji czasu w zależności od rodzaju zastosowanej strategii wtrysku

W początkowej fazie wtrysku zauważalny jest taki sam rozwój strugi paliwa dla wtrysku pojedynczego oraz sekwencyjnego. Kolejne wtryskiwane dawki prowadzą do gwałtownego

zwiększenia zajmowanego obszaru. Sytuacja taka trwa do chwili wyrównania z obszarem wtrysku jednoczesnego przez dwa wtryskiwacze. Zastosowanie takiego procesu wtrysku powoduje wystąpienie największej prędkości zmiany obszaru strug paliwa.

Przedstawione badania wskazują na istnienie potencjału wtrysku dwoma wtryskiwaczami. Możliwe jest uzyskanie odmiennych obszarów rozpylenia paliwa, a także zróżnicowanie jego stężenia w okolicy świecy zapłonowej. Powyższe aspekty wskazują na znaczne możliwości kształtowania procesu spalania zarówno mieszanek stechiometrycznych, jak również ubogich. Możliwe staje się również sterowanie procesem spalania przy tworzeniu ładunków stechiometrycznych oraz uwarstwionych.

## BIBLIOGRAFIA

1. Heiduk T., Kuhn M., Stichlmeir M., Unselt F., *The new 1.8 l TFSI Engine from Audi part 2: Mixture Formation, Combustion Method and Turbocharging*. MTZ Worldwide Magazine, no 72(7-8), pp. 58-64, 2011.
2. Jelitto Ch., *Numerische Auslegung eines neuen Brennverfahrens für Benzin-Direkteinspritzung* Dissertation, Der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg Fakultät für Maschinenbau, 2004.
3. Pielecha I., Wisłocki K., Czajka J., Maslennikov D., *Gasoline Atomization with the Use of Two Opposite High-Pressure Injectors*. 24rd European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems – ILASS – Europe 2011, Estoril, Portugal, 2011.
4. Preussner C., Döring C., Fehler S., Kampmann S., *GDI: Interaction Between Mixture Preparation, Combustion System and Injector Performance*. SAE Technical Paper 980498, 1998.

# MULTIPLE FUEL INJECTION AND ATOMIZATION BY TWO ANGULARLY ARRANGED OUTWARD-OPENING INJECTORS IN DIRECT INJECTION SYSTEM

### *Abstract*

*The paper presents the results of research about using of two gasoline injectors positioned directly in combustion chamber. The use of this fuel injection system allows to shorten time of fuel spray and area occupied by two fuel doses. Simultaneous injection and sequential carried out by two injectors injection were presented. The benefits resulting from the application of this system showing geometric indicators are identified.*

### **Autorzy:**

dr hab. inż. **Ireneusz Pielecha** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Ireneusz.Pielecha@put.poznan.pl

mgr inż. **Przemysław Borowski** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Przemyslaw.T.Borowski@doctorate.put.poznan.pl