

PIELECHA Ireneusz¹
MASLENNIKOV Dmitrij
CZAJKA Jakub
WISŁOCKI Krzysztof

EKSPERYMENTALNE I NUMERYCZNE BADANIA ROZPYLENIA BENZYNY Z WYKORZYSTANIEM DWÓCH WTRYSKIWACZY WYSOKOCIŚNIENIOWYCH

Praca zawiera omówienie wyników badań dotyczących rozpylenia paliwa z wykorzystaniem wysokociśnieniowego wtrysku benzyny realizowanego przez dwa wtryskiwacze umieszczone w komorze o stałej objętości stałociśnieniowej. Analizie poddano główne wskaźniki strugi paliwa: zasięg, obserwowaną powierzchnię strugi paliwa oraz jej prędkość, zarówno w odniesieniu do pojedynczej strugi paliwa, jak i dwóch strug w układzie przeciwsobnym i kątowym. Dokonano oceny równomierności zasięgu oraz zajmowanej powierzchni obszaru objętego przez obie strugi paliwa. Wykazano wzrost objętości strugi paliwa i skrócenie czasu jej rozprzestrzeniania podczas wtrysku przeciwsobnego przy założeniu jednakowych wielkości podawanych dawek paliwa (jednakowego sumarycznego czasu wtrysku dawkila pojedynczej oraz dwóch przeciwsobnych dawek paliwa).

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATIONS ON THE GASOLINE ATOMIZATION WHEN INJECTED BY TWO HIGH-PRESSURE INJECTORS

The paper discusses The results of experimental and numerical investigations into fuel atomization with the use of two high-pressure injectors fitted in thea constant volume combustion chamber of constant pressure have been discussed in the paper. The analysis mainly relates to the parameters of the fuel spray: spray penetration, observed fuel spray area and its velocity in reference to both a single fuel spray and two opposite fuel sprays. The assessment of the uniformity of the fuel spray penetration for both sprays has been carried out. The authors have shown a growth in the fuel spray volume and a reduction of the time of the fuel spray penetration during the opposite injection at identical fuel doses (identical accumulative injection duration for a single fuel dose and two opposite fuel doses).

¹ wszyscy: Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu,
ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Polska, tel.: 61 665-2240, fax: 61 665-2207,
e-mail: krzysztof.wislocki@put.poznan.pl, ireneusz.pielecha@put.poznan.pl

1. WSTĘP

Wtrysk bezpośredni benzyny realizowany jest obecnie dwoma sposobami: we wczesnej fazie sprężania (duże wyprzedzenie kątowe względem GMP tłoka) lub podczas końcowej fazy sprężania (z niewielkim wyprzedzeniem względem GMP). Powoduje to określone skutki dotyczące rozpylenia paliwa: wczesny wtrysk pozwala na wykorzystanie dłuższego czasu na przygotowanie mieszanki w celu uzyskania jej większej jednorodności. Skrócenie czasu – w drugim przypadku – Natomiast późny wtrysk wymaga podania dawki wtryskiwanego paliwa bezpośrednio w okolicy świecy zapłonowej w celu uzyskania odpowiednich warunków do uzyskania zapalności mieszanki uwarstwionej.

Realizacja wtrysku przeciwbieżnego lub kąтового pozwala na skrócenie czasu przygotowania mieszanki palnej, tak, aby uzyskać kompromis między wielkością wtryskiwanej dawki a jej parametrami rozpylenia. Kilka lat temu podobne badania były podejmowane [3], jednak nie uzyskano zadowalających rezultatów (badania dotyczyły wtrysku benzyny z wykorzystaniem wtryskiwaczy wielootworkowych). Obecnie w literaturze brak jest podobnych badań wykorzystujących wtrysk przeciwsobny w silnikach ZI w celu przygotowania ładunku do spalania, chociaż zastosowanie nowoczesnych wtryskiwaczy piezoelektrycznych tworzy nowe możliwości w tym zakresie.

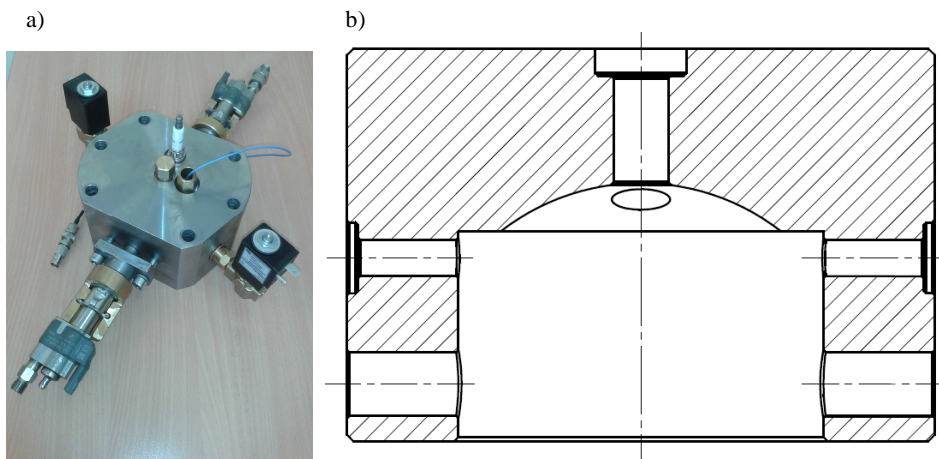
2. OBIEKTY BADAWCZE I ZASTOSOWANA APARATURA

Do rozwiązywania problemu badawczego (określonego poniżej) wykorzystano aparat badawczy w postaci:

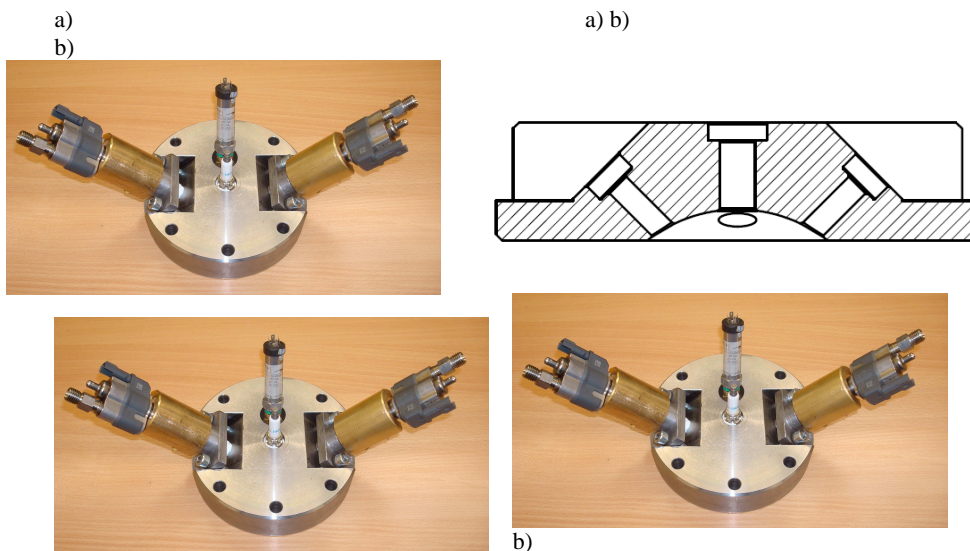
- a) komory o stałej objętości i regulowanym ciśnieniuociśnieniowej (o zmiennych parametrach panujących ciśnieniach) do badania wtrysku i rozpylenia paliwa ciekłego, dow której był realizowany wtrysk przeciwsobny dwoma wtryskiwaczami do komory badawczej (w celu określenia parametrów geometrycznych strugi paliwa),
- b) maszyny pojedynczego cyklu, w której realizowano:
 - wtrysk przeciwsobny realizowany dwoma wtryskiwaczami w maszynie pojedynczego cyklu (odpowiednio zaprojektowana głowica, rys. 1, umożliwiła realizację takiego postawionego zadania badawczego),
 - wtrysk za pomocą wtryskiwaczy umieszczonych kątowo w komorze spalania maszyny pojedynczego cyklu (brak możliwości realizacji wtrysku w komorze badawczej wymusił przekonstruowanie głowicy z pojedynczym, centralnie umieszczonym wtryskiwaczem, tak aby umożliwić wtrysk realizowany pod kątem 45° przez dwa wtryskiwacze benzyny; centralnie umieszczono świecę zapłonową, rys. 2),
- b) kamery do zdjęć szybkich i programu do ich obróbki DaVis firmy LaVision [2],
- c) symulacyjnej weryfikacji rozpylenia paliwa z wykorzystaniem oprogramowania FIRE 2010.1 firmy AVL [1].

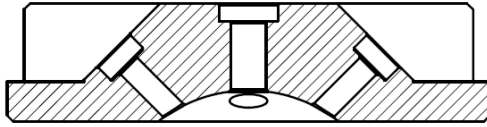
Badania miały na celu określenie zmian parametrów rozpylenia paliwa wywołanych różnym usytuowaniem wtryskiwaczy (opis wcześniejsze badańwce prace autorów dotyczące wtrysku przeciwsobnego zawarto w pracy [4]) i realizujących proces wtrysku symultanicznie. Badania eksperymentalne dotyczące wtrysku przeciwsobnego poparto badaniami symulacyjnymi. Ze względu na brak możliwości dokonania ilościowej oceny parametrów rozpylenia z wykorzystaniem kątowego umieszczenia wtryskiwaczy,

przedstawiono materiał jakościowy (poglądowy) wyniki badań optycznych, natomiast wykonano wstępne badania symulacyjne wykonano w celu pozwalające na wyciągnięcie odpowiednich wniosków ilościowych dotyczących rozpylenia paliwa. Badania optyczne wykonano z wykorzystaniem kamery do szybkiego filmowania HSS 5 z szybkością 10 kHz o rozdzielczości filmowania 512 x 512 pikseli.



Rys. 1. Komora spalania z wykorzystaniem wtrysku przeciwsobnego: a) głowica wyposażona we wtryskiwacze i zawory sterujące, b) przekrój poprzeczny głowicy



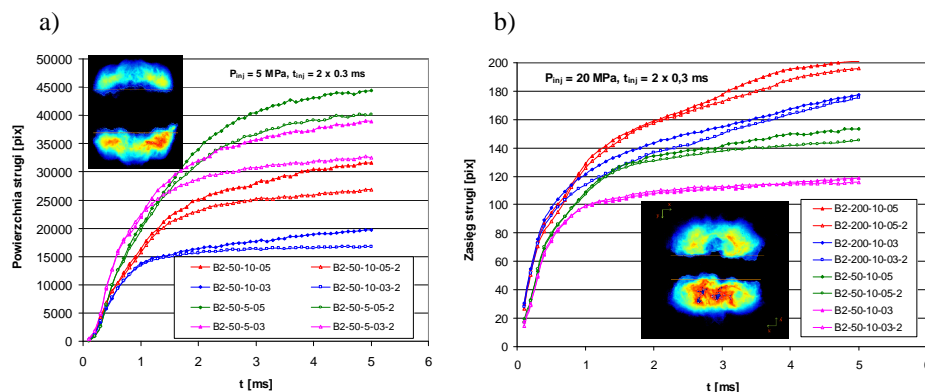


Rys. 2. Komora spalania maszyny pojedynczego cyklu z wtryskiwaczami umieszczonymi kątowo: a) widok głowicy, b) przekrój poprzeczny komory spalania

3. BADANIA PRZECIWSOBNEGO WTRYSKU PALIWA

W badaniach określono zmiany parametrów rozpylenia paliwa wywołanych usytuowaniem wtryskiwaczy na przeciwko sobie i realizujących proces wtrysku symultanicznie. Ze względu celów porównawczych wykonano badania przebiegu wtrysku, jego równomierności, prędkości rozprzestrzeniania się strug paliwa oraz objętego nimi obszaru w odniesieniu do wtrysku wtryskiwaczem pojedynczym oraz dwoma wtryskiwaczami umieszczonymi na przeciwko sobie. Badania przeprowadzono dla dwóch wartości ciśnienia wtrysku (5 i 20 MPa) oraz jednakowej dawki podawanego paliwa: w przypadku wtryskiwacza pojedynczego czas wtrysku ustalono na 0,6 ms, a przy zastosowaniu dwóch wtryskiwaczy – jednocześnie ich otwarcie w czasie 0,3 ms.

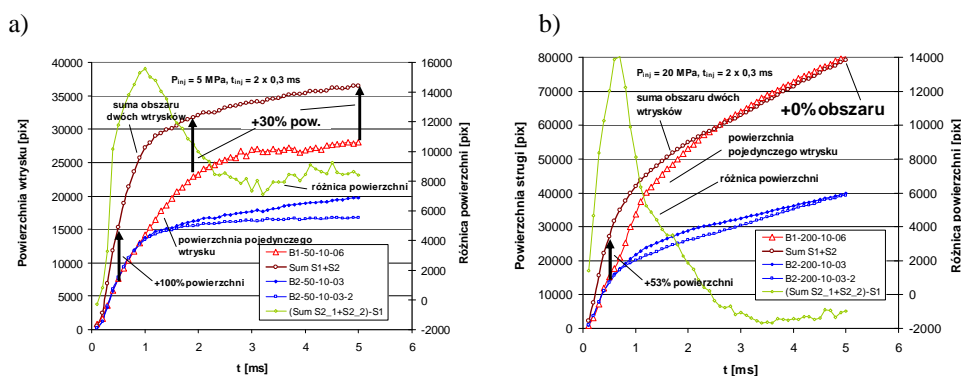
Wtrysk przeciwsobnych dawek paliwa przy małych wartościach ciśnienia wtrysku ($P_{wtr} = 5$ MPa) skutkuje większymi rozrzutami wartości zasięgu strug paliwa niż w przypadku ciśnienia większego ($P_{wtr} = 20$ MPa), – rys. 3. Początkowy okres wtrysku przebiega jednakowo dla obu dawek (dotyczy to zarówno zasięgu, jak i obszaru zajmowanego przez strugę paliwa) przy różnych ciśnieniach paliwa. Końcowa faza rozpylenia (czas od 2 do 5 ms po rozpoczęciu wtrysku) wykazuje znaczne rozrzuty obszaru zajmowanego przez strugę.



Rys. 3. Niepowtarzalność zasięgu podczas wtrysku przeciwsobnego dla dwóch wtryskiwaczy: a) przy ciśnieniu wtrysku $P_{wtr} = 5$ MPa; b) $P_{wtr} = 20$ MPa

Analiza wtrysku z wykorzystaniem jednego i dwóch wtryskiwaczy umieszczonych przeciwobnie pozwala na sformułowanie kilku wniosków. Mniejsze ciśnienie wtrysku ($P_{wtr} = 5 \text{ MPa}$) powoduje, że suma obszarów objętych paliwem z dwóch strug jest znacznie większa niż obszar pojedynczej strugi (o zwiększonym czasie wtrysku), – rys. 4.

W początkowej fazie wtrysku (po czasie $t = 0,5 \text{ ms}$ od rozpoczęcia wtrysku paliwa) zwiększenie obszaru dla dwóch strug osiąga wartość 100% w stosunku do pojedynczej strugi, a następnie różnica ta zmniejsza się do 30%. Przy ciśnieniu wtrysku 20 MPa suma obszarów jest większa o ponad 50% w stosunku do obszaru zamowanego przez jedną dawkę (w czasie $t = 0,6 \text{ ms}$ od rozpoczęcia wtrysku). W końcowej fazie rozpylenia obszary objęte paliwem są jednakowe (dla czasu $t = 5 \text{ ms}$). Na podstawie analitycznych obliczeń stwierdzono, że zmiana pola przekroju poprzecznego strugi paliwa (filmowanego) jest proporcjonalna do zmiany pola powierzchni bocznej tworzącej stożka strugi. Wynika z tego, że niskie ciśnienia wtrysku ($P_{wtr} = 5 \text{ MPa}$) pozwalają na uzyskanie dwukrotnie większej powierzchni odparowania paliwa niż w przypadku wtrysku konwencjonalnego jednym wtryskiwaczem (przy uwzględnieniu jednakowej sumarycznej dawki wtryskiwanego paliwa).

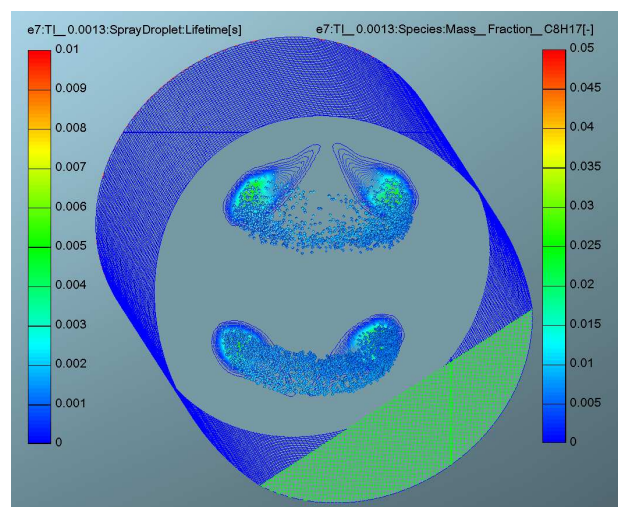


Rys. 4. Zmiany zasięgu i pola powierzchni strugi w przypadku wykorzystania przeciwobnego wtrysku paliwa w porównaniu do wtrysku pojedynczej dawki (przy zachowaniu jednakowego sumarycznego czasu wtrysku): a) przy $P_{wtr} = 5 \text{ MPa}$; b) przy $P_{wtr} = 20 \text{ MPa}$

W początkowej fazie wtrysku (po czasie $t = 0,5 \text{ ms}$ od rozpoczęcia wtrysku paliwa) zwiększenie obszaru dla dwóch strug osiąga wartość 100% w stosunku do pojedynczej strugi, a następnie różnica ta zmniejsza się do 30%. Przy ciśnieniu wtrysku 20 MPa suma obszarów jest większa o ponad 50% w stosunku do obszaru zajmowanego przez jedną dawkę (w czasie $t = 0,6 \text{ ms}$ od rozpoczęcia wtrysku). W końcowej fazie rozpylenia obszary objęte paliwem są jednakowe (dla czasu $t = 5 \text{ ms}$). Na podstawie analitycznych obliczeń stwierdzono, że zmiana pola przekroju poprzecznego strugi paliwa (filmowanego) jest proporcjonalna do zmiany pola powierzchni bocznej tworzącej stożka strugi. Wynika z tego, że małe ciśnienie wtrysku ($P_{wtr} = 5 \text{ MPa}$) pozwala na uzyskanie dwukrotnie większej powierzchni odparowania paliwa niż w przypadku wtrysku konwencjonalnego jednym

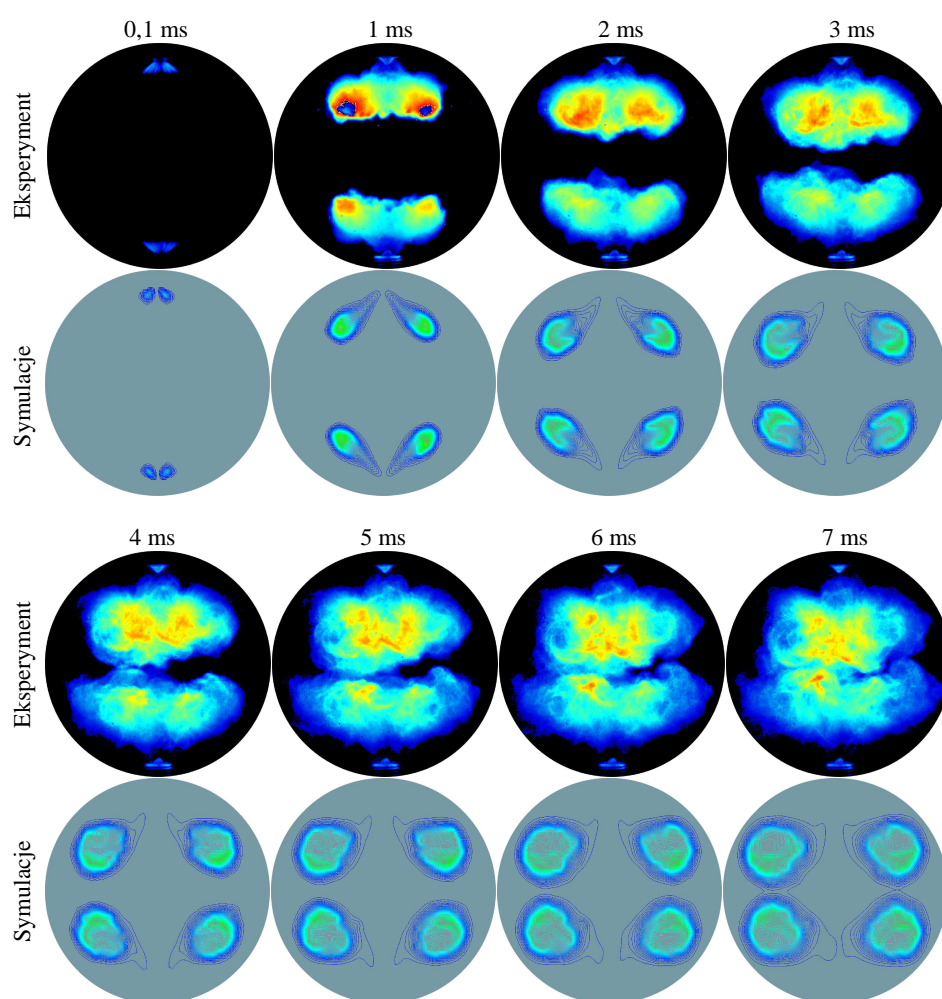
wtryskiwaczem (przy uwzględnieniu jednakowej sumarycznej dawki wtryskiwanego paliwa).

Badania w komorze stałociśnieniowej o stałej objętości poparto badaniami symulacyjnymi z wykorzystaniem oprogramowania FIRE 2010.1 firmy AVL. Badania te wykonano na układzie siatki obliczeniowej zbudowanej z 544 000 komórek, stanowiącej odwzorowanie komory badawczej. Sposób umieszczenia wtryskiwaczy odpowiadał badaniom rzeczywistym (rys. 5). Badania symulacyjne pozwalają na jednoczesną ocenę zarówno rozkładu kropeł paliwa, ale również na ocenę rozkładu masy paliwa we wtryskiwanych strugach paliwa.



Rys. 5. Sposób symulacji wtrysku przeciwsobnego z wykorzystaniem wysokociśnieniowego wtrysku benzyny

Usytuowanie wtryskiwaczy wpływa w znaczący sposób na rozwój strugi paliwa. Badania rzeczywiste eksperymentalne wskazują na zmniejszenie zasięgu jednej ze strug paliwa (rys. 6). Podobnych rezultatów nie obserwowano dla układu poddanego symulacji (istnieje możliwość zadania kierunku i zwrotu siły przyciągania ziemskiego, jednak z takich opcji nie skorzystano). Powoduje to, że rozkład przekroju strug paliwa jest symetryczny. Przedstawione obrazy symulacji (wykonane jako przekroje strugi paliwa) wskazują na istnienie stref i obszarów o zróżnicowanym transporcie masy wewnątrz strugi paliwa.

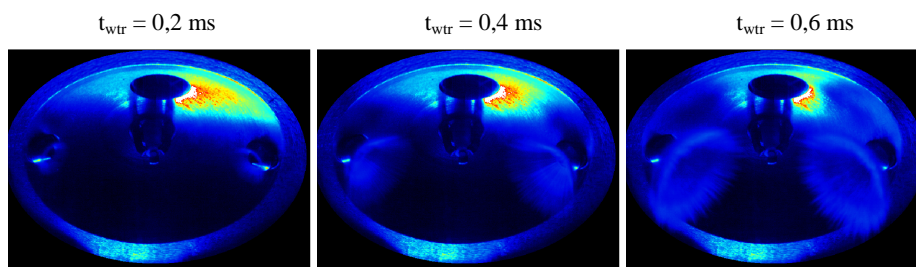


Rys. 6. Wyniki badań eksperymentalnych i symulacje dotyczące rozpylenia paliwa podczas wtrysku przeciwsobnego: warunki badań: $P_{wtr} = 20 \text{ MPa}$; $P_{pow} = 1 \text{ MPa}$; $t_{wtr} = 2 \times 0,5 \text{ ms}$; $q_o = 2 \times 34,5 \text{ mg}$; $T_{pal} = 330 \text{ K}$; $T_{pow} = 350 \text{ K}$; warunki symulacji: model rozpadu kropeł: KH-RT,

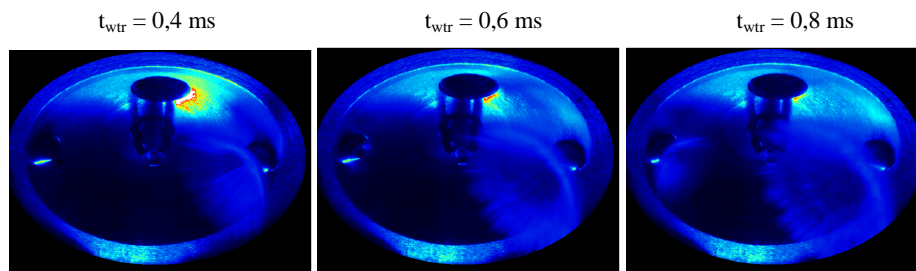
model parowania kropeł: model Dukowicza, model turbulencji: k-zeta-f, siatka – 544 000 komórek

4. WTRYSK KĄTOWY REALIZOWANY RZEZ DWA WTRYSKIWACZE

Realizacja wtrysku dwoma wtryskiwaczami możliwa jest również z kątowym ustawieniem wtryskiwaczy w komorze spalania. Sposób ten jest tym skuteczniejszy, że nie wymaga, tak jak w poprzednim przypadku, znaczących przeróbek w układzie komory spalania; (ze względu na przeciwsobne usytuowanie wtryskiwaczy konieczne jest było zwiększenie komory spalania, a tym samym obniżenie stopnia sprężania. W obecnym przypadku stopień sprężania może zostać zachowany (w stosunku do konwencjonalnego układu z jednym wtryskiwaczem), a możliwe jest szerokie kształtowanie procesu wtrysku symultanicznego (rys. 7) lub wtrysku z przesunięciem czasowym między wtryskiwanymi dawkami (rys. 8).



Rys. 7. Poglądowy widok rozpylenia paliwa z wykorzystaniem dwóch kątowo umieszczonych wtryskiwaczy ($P_{wtr} = 5 \text{ MPa}$; $P_{pow} = 1 \text{ MPa}$; $t_{wtr} = 0,3 \text{ ms}$)

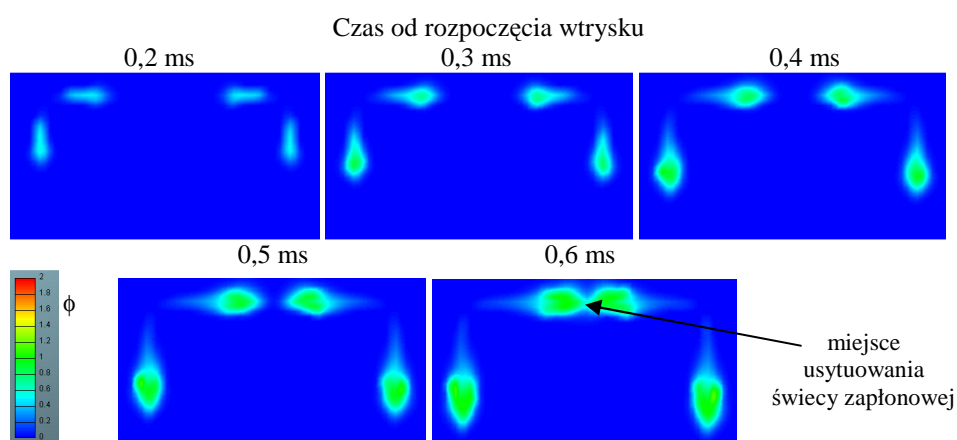


Rys. 8. Poglądowy widok rozpylenia paliwa z wykorzystaniem dwóch kątowo umieszczonych wtryskiwaczy z przesuniętymi w czasie dawkami wtrysku ($P_{wtr} = 5 \text{ MPa}$; $P_{pow} = 0,5 \text{ MPa}$; $t_{wtr} = 0,3 \text{ ms}$)

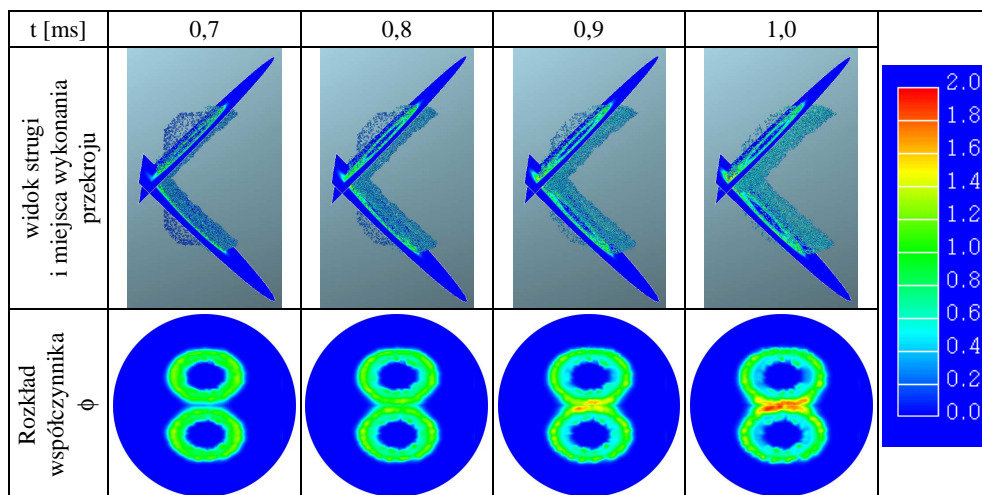
Geometria usytuowania wtryskiwaczy podczas realizacji kąтового wtrysku paliwa dwoma wtryskiwaczami została tak zaprojektowana, aby uzyskać tworzącą stożka rozpylanego paliwa równoległą do górnej płaszczyzny głowicy. Pozwala to na takie tworzenie strugi paliwa, które osiągnie świecę zapłonową (elektrodę świecy) w sposób pozwalający na przewidywanie jakościowego rozpylenia paliwa w określonej przestrzeni

komory spalania (rys. 9). Wykonane badania symulacyjne symultanicznego wtrysku i rozpylenia paliwa wskazują na istnienie w okolicy świecy zapłonowej wystarczających warunków do zapalności mieszanki.

Badania symulacyjne pozwalają również na przewidywanie dalszego rozwoju strugi paliwa w przypadku gdyby realizowany był wtrysk wielofazowy, przy czym dawką zapalającą byłaby ostatnia dawka wtryskiwanego paliwa. Analiza rozwoju strugi paliwa wskazuje na występowanie obszarów o współczynniku nadmiaru powietrza zbliżonym do jedności w znacznie większej objętości komory spalania niż w przypadku wtrysku realizowanego pojedynczym wtryskiwaczem (rys. 10).



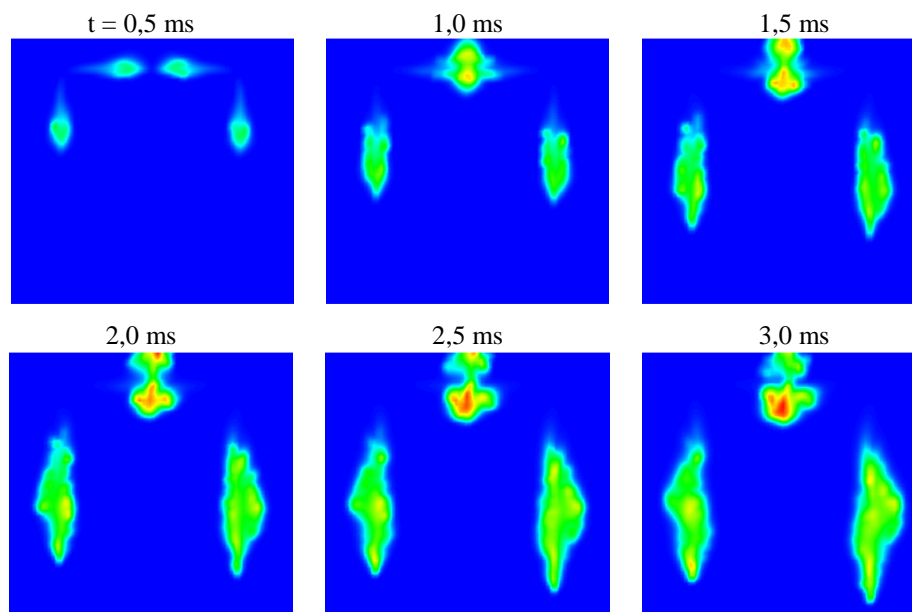
Rys. 9. Zmiany stopnia równoważności ϕ (odwrotność współczynnika nadmiaru powietrza) w czasie od rozpoczęcia wtrysku do osiągnięcia przez strugę okolic świecy zapłonowej podczas wtrysku kątownego dwoma wtryskiwaczami – badania symulacyjne (parametry wtrysku: $P_{wtr} = 20 \text{ MPa}$; $2 \times t_1 = 0.5 \text{ ms}$; $P_{pow} = 1 \text{ MPa}$; $t_{pow} = 550 \text{ K}$)



Rys. 10. Wpływ wtrysku kąтового dwoma wtryskiwaczami na rozwój strugi i na zmiany energii kinetycznej turbulencji – badania symulacyjne (parametry wtrysku: $P_{wtr} = 20 \text{ MPa}$; $2 \times t_1 = 0.5 \text{ ms}$; $P_{pow} = 1 \text{ MPa}$; $t_{pow} = 550 \text{ K}$)

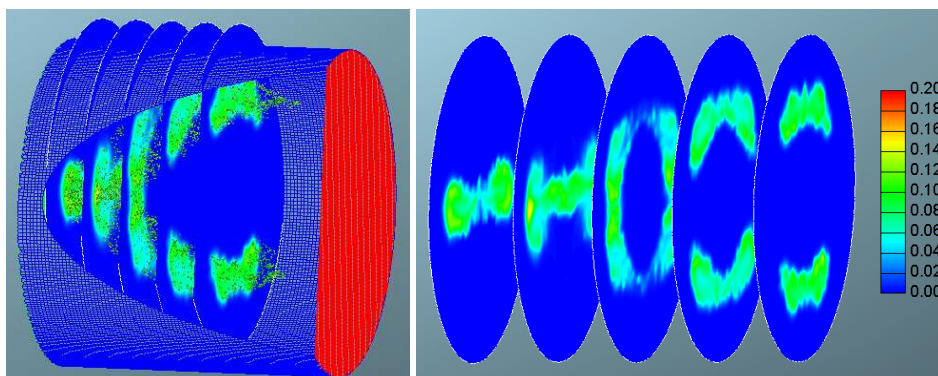
Analiza rozkładu masy rozpylonego paliwa z wykorzystaniem dwóch wtryskiwaczy pozwala na ocenę możliwości jego późniejszego spalania. Niewielka kumulacja masy paliwa wokół świecy zapłonowej podczas inicjowania zapłonu (czas między 0,5 ms i 1,0 ms na rys. 11) pozwala na uzyskanie odpowiedniej zapalności mieszanki, a następnie możliwy jest jej rozwój w głąb komory spalania (obszary o większej intensywności kolorów wskazują na zwiększenie masy w danym obszarze). Dzięki temu możliwe jest przyspieszenie procesu spalania, ze względu na to, że w komorze spalania istnieją obszary, które zawierają palną mieszankę. Wtrysk kątowo umieszczonymi wtryskiwaczami pozwala na wykorzystanie znacznie większego obszaru komory spalania do odpowiedniego rozpylenia paliwa i uzyskania jego atomizacji. Dane pokazane zawarte w sposób jakościowy na rys. 12 wskazują na zmienny sposób ukształtowania ładunku w cylindrze. Takie rozłożenie ładunku nie jest możliwe przy wykorzystaniu tradycyjnego sposobu wtrysku benzyny.

Przedstawiona koncepcja wtrysku paliwa pozwala na realizację spalania ładunku uwarstwionego, które to uwarstwienie nie jest skupione w jednym obszarze komory spalania. Powyższe badania wykonano bez wymuszenia zawirowania ładunku w cylindrze. Zwiększenie turbulencji ładunku w komorze spalania pozwala na uzyskanie ładunku quasi-homogenicznego pomimo wtrysku realizowanego w koncepcji uwarstwionej. Może to stanowić kolejną próbę sterowania procesem wtrysku i spalania w silniku o zapłonie iskrowym.



Rys. 11. Wpływ wtrysku kąтового dwoma wtryskiwaczami na rozkład masy w strugach wtryskiwanego paliwa – badania symulacyjne (parametry wtrysku: $P_{wtr} = 20$ MPa; $2 \times t_1 = 0,5$ ms; $P_{pow} = 1$ MPa; $t_{pow} = 550$ K)

Przedstawiona koncepcja wtrysku paliwa pozwala na realizację spalania ładunku uwarstwionego, które to uwarstwienie nie jest skupione w jednym obszarze komory spalania. Powyższe badania wykonano bez wymuszenia zawirowania ładunku w cylindrze. Zwiększenie turbulencji ładunku w komorze spalania pozwala na uzyskanie ładunku quasi-homogenicznego pomimo wtrysku realizowanego w koncepcji uwarstwionej. Może to stanowić kolejną próbę znalezienia racjonalizacji sterowania procesem wtrysku i spalania w silniku o zapłonie iskrowym.



Rys. 12. Jakościowy rozkład masy w cylindrze w wyniku stosowania wtrysku kąowego (parametry wtrysku: $P_{wtr} = 20 \text{ MPa}$; $2 \times t_1 = 0.5 \text{ ms}$; $P_{pow} = 1 \text{ MPa}$; $t_{pow} = 550 \text{ K}$)

5. WNIOSKI

Realizacja wtrysku paliwa dwoma wtryskiwaczami powoduje znaczne korzyści w kształtowaniu strugi. Możliwe jest uzyskanie prawie dowolnie ukształtowanego rozkładu współczynnika nadmiaru powietrza w komorze spalania, a także jego rozkładu masy paliwa. Zabiegi takie prowadzą do wykorzystania powyższego takiego rozwiązania do sterowania procesem wtrysku paliwa, a także w konsekwencji również sterowaniaem jego spalaniem. Rozwiązania takie powinny przyczynić się do ograniczenia zużycia paliwa przez silniki ZI, a także do obniżenia emisji toksycznych składników spalin.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] AVL FIRE ver. 2010.1, ICE Physics&Chemistry. AVL Graz 2010.
- [2] Davis 7.2. LaVision, Göttingen, Niemcy. www.lavision.de
- [3] Jelitto Ch.: *Numerische Auslegung eines neuen Brennverfahrens für Benzin-Direkteinspritzung*. Dissertation, Der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg Fakultät für Maschinenbau, 2004.
- [4] 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 2011.