

PIELECHA Ireneusz¹
MASLENNIKOV Dmitrij
CZAJKA Jakub
WISŁOCKI Krzysztof

NUMERYCZNA SYMULACJA WPLYWU PODZIAŁU DAWKI PALIWA NA JEGO ROZPYLENIE W UKŁADZIE WYSOKOCIŚNIENIOWEGO WTRYSKU BENZYNY

Artykuł dotyczy badań wtrysku benzyny w aspekcie wpływu czasu przerwy między kolejnymi dawkami paliwa na ich interakcje. Przeprowadzono badania zasięgu strugi paliwa z wtryskiem dwuczęściowym w różnych odstępach czasu, takich aby wtrysk kolejnej porcji paliwa swoim zasięgiem obejmował porcję pierwszą. W tym celu określono zasięg oraz powierzchnię zajmowaną przez strugi paliwa. Przeprowadzono analizę koncentracji paliwa w przekrojach strugi: pojedynczej oraz tzw. kumulowanej, wynikającej z wtrysku dodatkowej porcji paliwa. Badania przeprowadzono dla zróżnicowanych wartości: wielkości dawki paliwa, ciśnienia paliwa oraz odstępów czasowych między kolejnymi porcjami paliwa. Wykorzystanie metod optycznych pozwoliło na określenie mechanizmów działających w strudze paliwa podczas wtrysku wieloczęściowego.

NUMERICAL SIMULATION OF THE EFFECT OF SPLIT INJECTION ON THE FUEL ATOMIZATION IN A SI ENGINES WITH HIGH PRESSURE DIRECT INJECTION

The experimental and numerical investigations of a multiple gasoline injection in the aspect of the influence of the injection dwell time on the interactions between the fuel doses have been discussed in the paper. The fuel spray penetration has been analyzed at a two-stage injection of different dwell times ensuring that the injection of the second fuel dose covered the area already occupied by the first one. To this end, the fuel spray penetration and area occupied by the spray were determined. The analysis of the fuel concentration in the fuel spray cross section has been performed (single and cumulative fuel spray the latter resulting from the overlapping injection of an additional fuel portion). The utilization of optical methods in the investigations allowed determining of the mechanisms governing inside the fuel spray during a multiple injection.

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

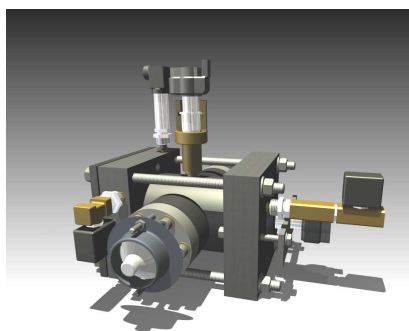
Wtrysk bezpośredni benzyny (realizowany w pobliżu GMP, podobnie jak wtrysk oleju napędowego) wymaga podziału wtryskiwanej dawki paliwa. Autorskie prace [3] prowadzone nad racjonalizacją systemu spalania wykorzystującego wtrysk wieloczęściowy wymagały rozpoznania ilościowych i jakościowych zależności między wtryskiwanymi porcjami paliwa. Problem zasięgu strugi w układach bezpośredniego wtrysku (osiągnięcia przez nią ścianek komory spalania i denka tłoka) dotyczy głównie wtryskiwaczy wielootworowych.

Badania dotyczące wczesnych systemów wtrysku bezpośredniego paliwa przedstawione przez Zhao [5] świadczą o znacznym problemie dotyczącym tego zjawiska. Postulował on, aby do minimum skrócić czas od zakończenia wtrysku do zainicjowania wyładowania na świecy, co przy wykorzystaniu systemu kształtowania mieszanki palnej przez tłok (*wall-guide*) nie mogło zostać zrealizowane. Badania Iiyamy omówione w [5] dotyczące wtrysku bezpośredniego w silniku GDI firmy Nissan wykazały, że podczas wtrysku paliwa 90° przed GMP łączna suma paliwa docierającego do ścianek wynosiła około 23% (z czego 5% docierało do głowicy, 13% do powierzchni cylindra oraz 5% do denka tłoka). Wtrysk rozpoczynający się 10° przed GMP powodował, że wartości te ulegały znacznemu zwiększeniu, co ma związek z brakiem podziału dawki paliwa oraz zastosowaniem typowych wtryskiwaczy otworowych (brak paliwa na głowicy, 5% na ściankach cylindra oraz aż 41% paliwa dociera do powierzchni denka tłoka).

2. OBIEKT BADAWCZY I ZASTOSOWANA APARATURA

Do rozwiązywania problemu badawczego wykorzystano aparat badawczy w postaci:

- a) komory o stałej objętości (o zmiennych wartościach ciśnienia w komorze) do badania wtrysku i rozpylenia paliwa ciekłego (rys. 1), w której były realizowane:
 - wtrysk pojedynczej dawki paliwa (w celu określenia parametrów geometrycznych strugi paliwa),
 - wtrysk wielofazowy (określenie interakcji dawek wtryskiwanego paliwa),
- b) kamery do zdjęć szybkich i programu do ich obróbki DaVis firmy LaVision [2],



a)

b)

Rys. 1. Komora o stałej objętości do badań rozpylenia paliwa (a) oraz kamera do zdjęć szybkich HSS5 firmy LaVision (b)

- c) symulacyjnej weryfikacji rozpylenia paliwa z wykorzystaniem oprogramowania FIRE 2010.1 firmy AVL [1].

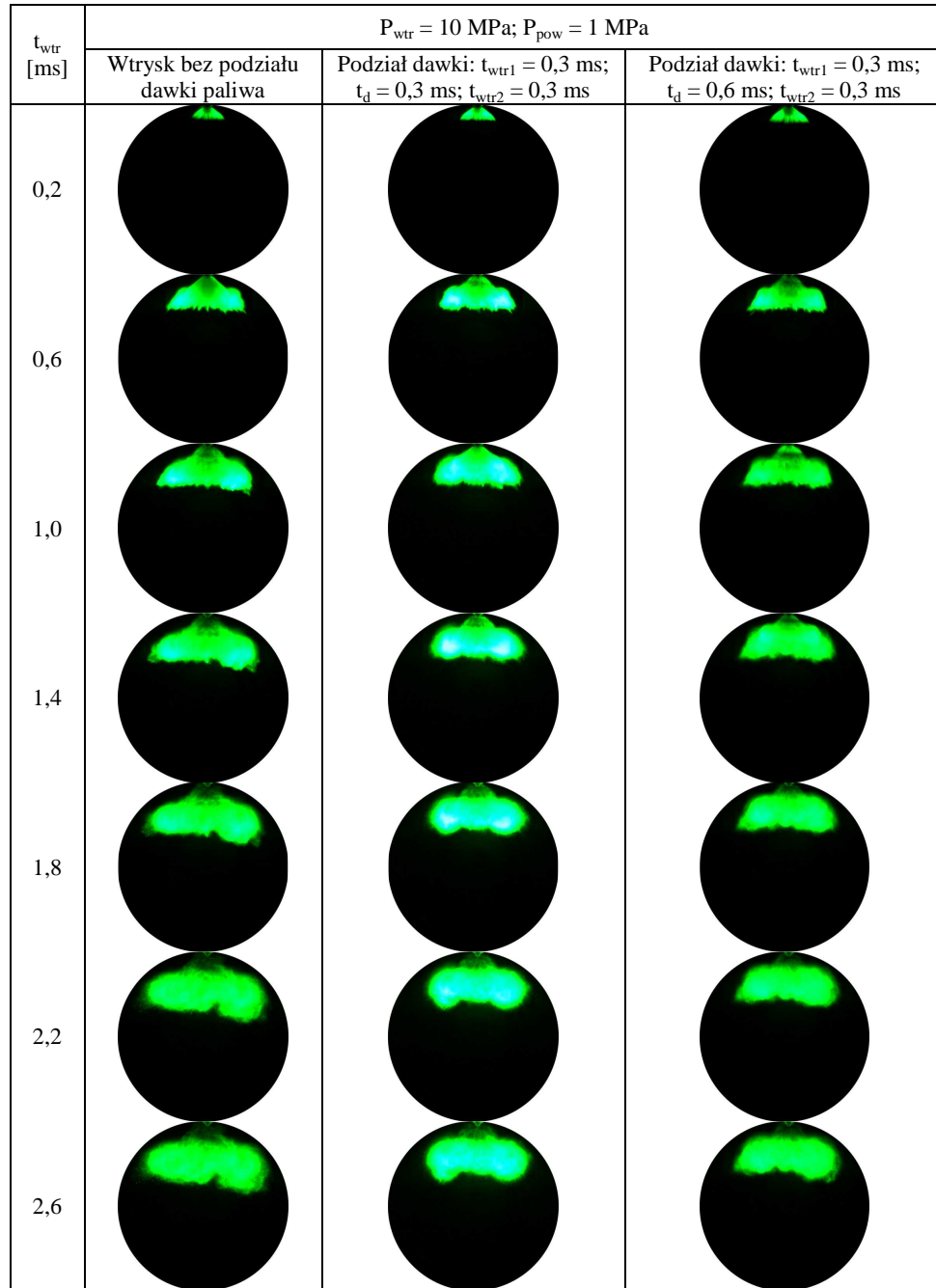
Badania realizowane w komorze o stałej objętości pozwalają na odwzorowanie wtrysku i rozpylenia paliwa w silniku (lub maszynie pojedynczego cyklu, MPC) przy założeniu niezmienności temperatury panującej wewnątrz takiego układu. To ograniczenie wynika z realizacji dostarczania ciśnienia do układu i powoduje, że maksymalna temperatura ośrodka wynosi około 350 K (80°C). Badania takie są pomocne w ocenie rozpylenia paliwa ze względu na możliwość obserwacji w dowolnej płaszczyźnie wtrysku paliwa (co nie jest możliwe w silniku), a jednocześnie pozwalają zweryfikować możliwość stosowania symulacji (wyboru modelu) w celu określenia jakościowych parametrów wtrysku paliwa.

3. BADANIA WTRYSKU PALIWA

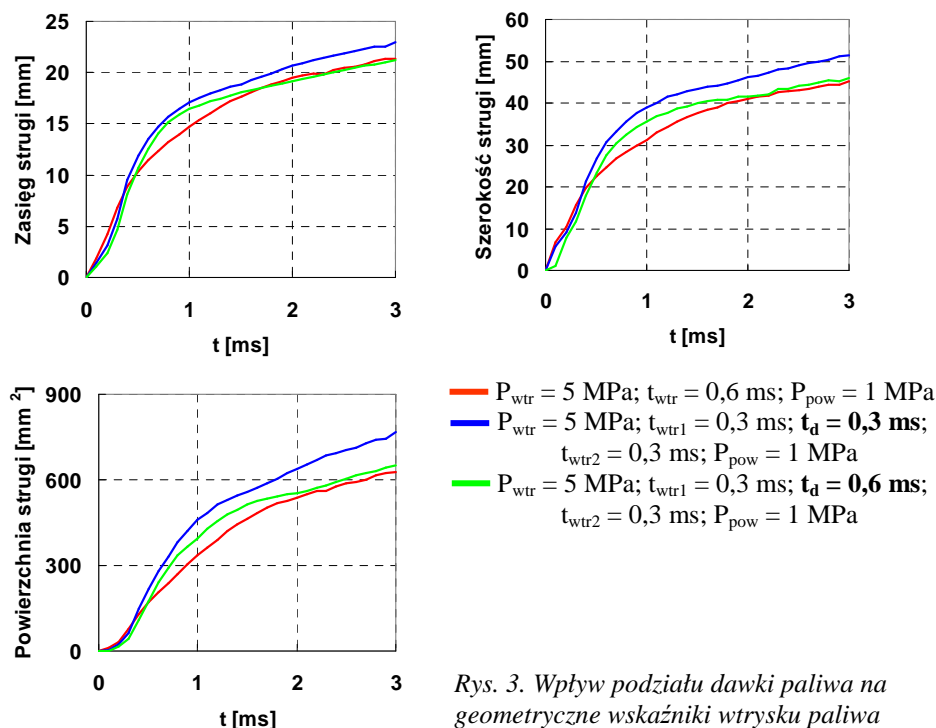
Wtrysk realizowany z wykorzystaniem wtryskiwaczy typu *outward opening* w radykalny sposób zmniejsza zasięg strugi (poprawiając rozpylenie paliwa przy jednakowym ciśnieniu wtrysku z wtryskiwaczami wielootworkowymi). Badania prowadzone z wykorzystaniem MPC wskazują na istnienie problemu dotyczącego wpływu czasu rozpoczęcia wtrysku paliwa na dotarcie czoła strugi do denka tłoka. Problem ten nie pojawia się, gdy nie stosuje się podziału dawki na części a osiągnięcie przez początkowy obszar strugi miejsca umieszczenia elektrod świecy zapłonowej wykorzystuje się do zainicjowania początku spalania.

Badania optyczne geometrii strugi paliwa (rys. 2) pozwoliły na ilościową ocenę jej zmian. Wtrysk wieloczęściowy pozwala nie tylko na ograniczenie zasięgu strugi, ale również prowadzi do zmiany szerokości strugi paliwa i zajmowanego przez nią obszaru (rys. 3). Badania wykonane przy zmiennych ciśnieniach wtrysku paliwa odpowiadające łącznemu czasowi wtrysku $t_{\text{wtr}} = 600$ us (przy różnych odstępach czasowych) wskazują na możliwość kształtowania rozpylenia paliwa i jego przygotowania w komorze spalania.

Podział dawki paliwa powoduje zwiększenie zasięgu w przedziale czasu około 0,5 ms po rozpoczęciu wtrysku. Spowodowane jest to zwiększeniem energii kinetycznej, którą niesie ze sobą druga dawka paliwa. Dodatkowy wtrysk kolejnej dawki paliwa, która jest wtryskiwana w krótkim czasie (0,3 ms) po zakończeniu wtrysku pierwszej dawki powoduje, że całkowity zasięg strugi jest większy (o około 10%) niż w przypadku wtrysku drugiej dawki po dłuższym czasie przerwy (w badaniach wykorzystano czas 0,6 ms). Podział dawki wpływa na zmianę szerokości strugi, przy czym podczas początkowej fazy wtrysku obserwuje się zmniejszenie szerokości o około 15-25% (0-0,5 ms), natomiast w drugiej fazie rozpylenia (0,5-1,0 ms) szerokość strugi ulega zwiększeniu o około 20%. Niewielkie odległości czasowe skutkują również zwiększoną powierzchnią strugi, co w przypadku wtrysku z czasem przerwy 0,6 ms powoduje wzrost powierzchni maksymalnie o około 40%. Charakterystycznym zjawiskiem jest to, że po czasie około 2 ms od rozpoczęcia wtrysku zmiany zasięgu, szerokości i powierzchni dotyczą tylko wtrysku, w którym zastosowano niewielkie odstępów czasowe między dawkami (0,3 ms). Zwiększenie odstępów czasowych powoduje, że w początkowej fazie (około 1 ms) obserwuje się zwiększenie wskaźników geometrycznych średnio o około 15%, natomiast po czasie 2 ms wartości te są jednakowe z wartościami dla dawki bez podziału wtryskiwanego paliwa.



Rys. 2. Zmiany geometrii strugi paliwa bez i przy zastosowaniu podziału dawki wtryskiwanego paliwa zarejestrowane podczas wtrysku paliwa do komory badawczej



Rys. 3. Wpływ podziału dawki paliwa na geometryczne wskaźniki wtrysku paliwa

4. ANALIZA INTERAKCJI DAWEK WTRYSKIWANEGO PALIWA

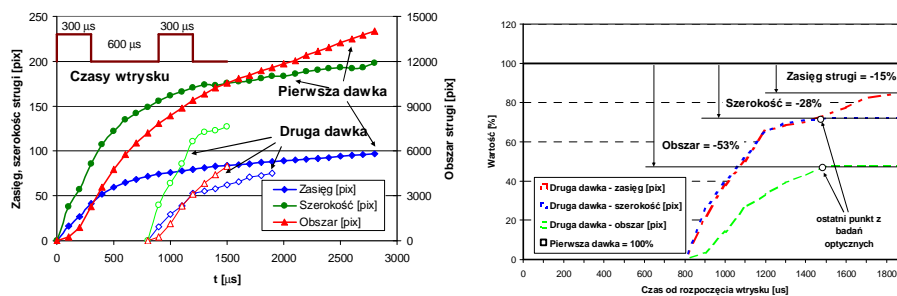
Wtrysk wieloczęściowy (analizie poddano jedynie podział na dwie porcje paliwa) wywołuje określone skutki dotyczące zasięgu strugi (jej skrócenie oraz zmianę stężenia paliwa, co przedstawiono powyżej) oraz wynikające z tego interakcje zachodzące w strudze. Sytuacja taka wywołuje nakładanie się na siebie wtryskiwanych strug paliwa podczas wzrostu zasięgu porcji drugiej (przy znacznym zahamowaniu penetracji porcji pierwszej). Badania pozwoliły nie tylko na jakościową ocenę rozpylenia paliwa, ale również na określenie czasu całkowitego lub częściowego ujednorodnienia składu mieszanki. Analiza uzyskanych wyników pozwala na określanie zakresu penetracji drugiej porcji wtryskiwanego paliwa w głąb dawki pierwszej wtrysniętej z niewielkim wyprzedzeniem czasowym.

Parametry rozpylenia pierwszej strugi wtryskiwanego paliwa wyznaczono na podstawie zarejestrowanej luminancji światła odbitego od kropli paliwa w stanie płynnym; przy walidacji materiałów zdjęciowych wykorzystywano podprogramy systemu DaVis firmy LaVision. Parametry drugiej porcji paliwa wyznaczano na podstawie różnic zarejestrowanych obrazów: od bieżącego obrazu z wtryskiem dwufazowym odjęto ostatni obraz reprezentujący wtrysk pojedynczy.

Wyznaczenie zasięgu drugiej porcji jest możliwe na podstawie zmiany intensywności świecenia strugi paliwa. Rozróżnialne wartości luminancji pozwalają na określenie zasięgu strugi drugiej porcji paliwa do czasu $t = 1,9 \text{ ms}$. Jednakże znacznie wcześniej kończy się

możliwość określenia szerokości i obszaru drugiej porcji paliwa. Mała wrażliwość kamery na zmiany luminancji nie pozwoliła na wyznaczenie tych parametrów w dalszej części przebiegu wtrysku.

Na podstawie analizy zasięgu strugi stwierdzono, że poprzedzająca porcja paliwa (pierwsza) w niewielkim stopniu wpływa na uzyskiwany zasięg przez drugą dawkę wtryskiwanego paliwa. Do czasu $t = 1$ ms (po rozpoczęciu wtrysku pierwszej i drugiej porcji), nie stwierdzono wpływu „historii” rozpylenia pierwszej porcji na parametry drugiej. Różnice zasięgu wynoszą maksymalnie $\pm 10\%$ (zasięg drugiej porcji ulega początkowo zwiększeniu, następnie zmniejszeniu o 10% w stosunku do zasięgu pierwszej porcji). Szerokość strugi początkowo ulega zmniejszeniu (do około 10% dla $t = 0,4$ ms po rozpoczęciu wtrysku), a następnie zwiększa się o około 8% w stosunku do szerokości, jaką miała pierwsza struga w tym samym czasie od początku wtrysku (dla $t = 0,7$ ms po rozpoczęciu wtrysku). Obszar zajmowany przez drugą strugę początkowo jest mniejszy (o około 10-20% dla $t = 0,3$ ms po rozpoczęciu wtrysku), a następnie ulega zwiększeniu do 25% (dla $t = 0,7$ ms po rozpoczęciu wtrysku), rys. 4. Ocenę rozkładu paliwa wzdłuż tworzącej stożka strugi przeprowadzono na podstawie intensywności luminancji obserwowanej strugi paliwa, rys. 5.



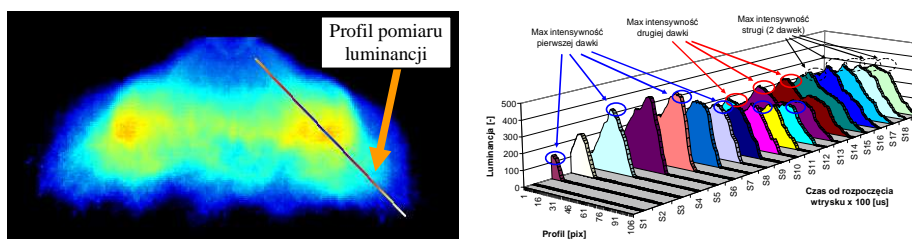
Rys. 4. Analiza wtrysku wieloczęściowego: a) zmiany zasięgu, pola powierzchni i szerokości strug paliwa (dwie dawki paliwa o czasach wtrysku t_1 oraz $t_2 = 300$ us oraz czasie przerwy $t_d = 600$ us; $P_{wtr} = 5$ MPa, $P_{pow} = 1$ MPa); b) zmiany wielkości geometrycznych drugiej strugi wtryskiwanego paliwa w stosunku do pierwszej (wartości zasięgu, szerokości i obszaru dla pierwszej strugi przyjęto równe 100%)

Sformułowano następujące wnioski z analizy interakcji kolejnych porcji paliwa przy wtrysku wieloczęściowym:

1. W zakresie, w którym możliwa jest analiza strug paliwa stwierdzono, że w czasie około 1,5 ms po rozpoczęciu wtrysku pierwszej porcji wtrysk drugiej porcji paliwa osiąga około 85% zasięgu porcji pierwszej. Dalsza obserwacja nie pozwala na prawidłową identyfikację drugiej porcji paliwa – struga paliwa uzyskuje częściową jednorodność.

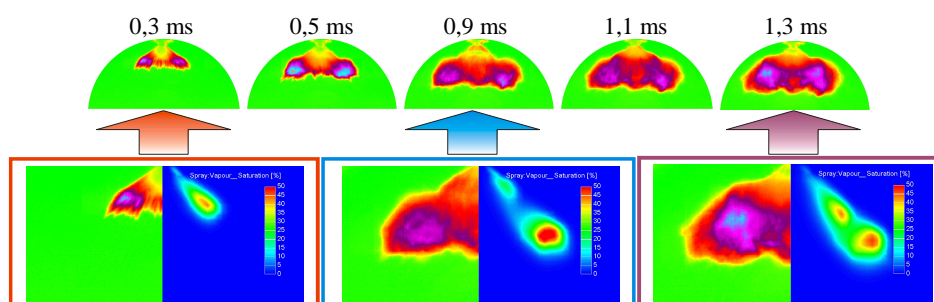
2. Ze względu na istnienie kropeł paliwa z pierwszej porcji, druga porcja wtrysku uzyskuje około 70% szerokości strugi w stosunku do pierwszej. Oznacza to, że pierwsza porcja stanowi istotną barierę w uzyskaniu odpowiedniego rozpylenia paliwa, co potwierdza również obszar zajmowany przez strugę paliwa. Zmniejszenie obszaru o około 50% stanowi informację o konieczności zwiększania odległości czasowych między

wtryskiwanymi porcjami zarówno ze względu na konieczność zmniejszenia koncentracji paliwa w strudze jak i szybkość jej odparowania.



Rys. 5. Analiza występowania maksimum intensywności luminancji strugi jako kryterium istnienia maksymalnej koncentracji na powierzchni bocznej stożka paliwa: a) sposób i miejsce wyznaczenia profilu, b) wartości intensywności pozwalające ocenić (w sposób pośredni i przybliżony) miejsce występowania największej koncentracji paliwa ($P_{wtr} = 5$ MPa; $P_{pow} = 1$ MPa, sekwencja czasu wtrysku: $t_1 + t_d + t_2 = 300$ us + 600 us + 300 us)

Eksperymentalne zasięgi strugi paliwa zestawiono z badaniami symulacyjnymi (rys. 6). Eksperyment zawierał następujące elementy: model rozpadu kropel: KH-RT, model parowania kropel wg Dukowicza, model turbulencji k-zeta-f; siatka obejmowała 544 000 komórek. Brak odwzorowania obu przypadków (eksperymentu i symulacji) wynika z odmiennych technik uzyskania obu obrazów: badania eksperymentalne stanowią widok będący płaską ekspozycją rozpylanego paliwa, symulacja stanowi przekrój przez strugę paliwa, a obserwowane jest nasycenie par paliwa (*vapour saturation*) w strudze i ich zmiany podczas wtrysku drugiej dawki paliwa. Badania symulacyjne pozwalają w tym przypadku na identyfikację dodatkowych obszarów strugi paliwa, w których nasycenie par paliwa, a więc i jego koncentracja, ulega zwiększeniu.



Rys. 6. Rozwój zasięgu strugi i jej interakcje podczas wtrysku wielofazowego: badania eksperymentalne (z lewej) oraz symulacje (z prawej); parametry wtrysku: $P_{wtr} = 20$ MPa; $t_1 = 0,3$ ms; $t_d = 0,6$ ms; $t_2 = 0,3$ ms; $P_{pow} = 1$ MPa; $q_o = 2 \times 19,5$ mg

Symulacja interakcji zachodzących w strugach paliwa pozwala na uzyskanie informacji o zasięgach poszczególnych strug paliwa i szybkości ich odparowania. Analiza wyników

symulacji potwierdza uzyskane w badaniach doświadczalnych zależności dotyczące zasięgu uzyskanego w wyniku nałożenia strug paliwa.

Wtrysk poszczególnych dawek paliwa w krótkich odstępach czasowych powoduje, że istotną rolę zaczynają odgrywać turbulencje przepływu, które zakłócając uporządkowany przepływ cieczy oddziałują w pozytywny sposób na tworzenie mieszaniny palnej. Przepływ turbulentny charakteryzuje jej prędkość chwilowa \bar{u} zapisana w postaci sumy składników:

$$\bar{u} = \bar{U} + \bar{u}' \quad (1)$$

czyli sumy prędkości średniej \bar{U} oraz fluktuacji turbulentnej \bar{u}' . Energia kinetyczna turbulencji wyraża się zależnością:

$$k = \frac{1}{2} \left[(\bar{u}'_x)^2 + (\bar{u}'_y)^2 + (\bar{u}'_z)^2 \right] \quad (2)$$

Miarą intensywności turbulencji jest stopień intensywności turbulencji ε :

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\frac{1}{2} \left[(\bar{u}'_x)^2 + (\bar{u}'_y)^2 + (\bar{u}'_z)^2 \right]}}{|\bar{U}|} \quad (3)$$

Efektom transportu kinetycznej energii turbulencji cieczy podczas wtrysku do komory spalania jest jej dyssypacja w ośrodku, zachodząca w wyniku oddziaływania naprężeń ścinających i naprężeń lepkościowych.

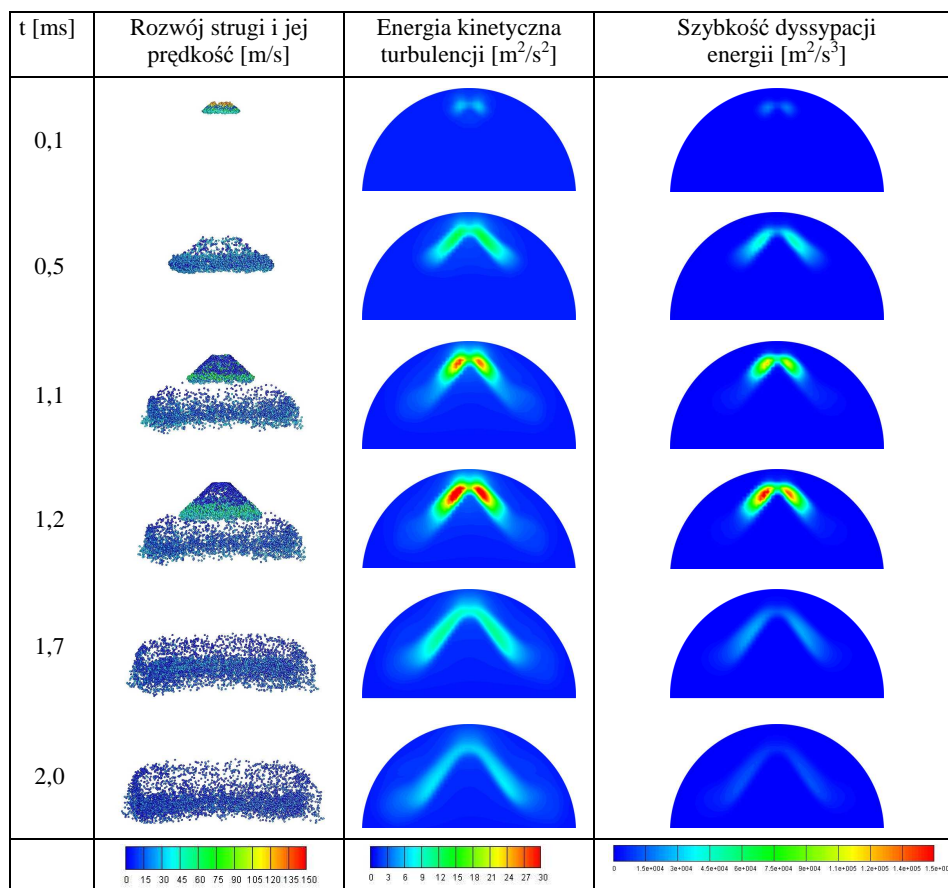
Dyssypację określa się korzystając z zależności wiążącej intensywność turbulencji ε lub energię kinetyczną turbulencji k ze skalą turbulencji L :

$$\varepsilon_{\text{dys}} \propto \frac{\varepsilon^3}{L} \quad \text{lub} \quad \varepsilon \propto \frac{k^{\frac{3}{2}}}{L} \quad (4)$$

Dla strefy o w pełni rozwiniętej turbulencji przepływu, naprężenia lepkie są zdecydowanie mniejsze od naprężeń turbulentnych, natomiast w strefie przyściennej – w wyniku tłumienia składowych fluktuacyjnych przez ścianę – dominują naprężenia lepkie. Efektom dodatkowego wtrysku określonej dawki paliwa jest więc wywołanie fluktuacji powodujących zwiększenie intensywności mieszania wtryskiwanej porcji paliwa, co przyczynia się do jej mieszania z powietrzem i w dalszej konsekwencji – odparowania. Jest to więc pozytywny efekt stosowania podziału dawki paliwa i może przyczyniać się do zwiększenia „jakościowych wskaźników” spalania podzielonej dawki paliwa.

Zwiększenie energii kinetycznej turbulencji w okresie wtrysku drugiej dawki paliwa stwarza możliwości zwiększenia zawirowania ładunku w miejscu wtrysku, a tym samym poprawia (szczególnie w warunkach braku zewnętrznego wymuszenia ruchu ładunku lub powietrza) proces mieszania i odparowania paliwa. Energia ta jest znacznie większa w

przypadku skrócenia czasu między wtryskiem poszczególnych dawek paliwa. W przypadku

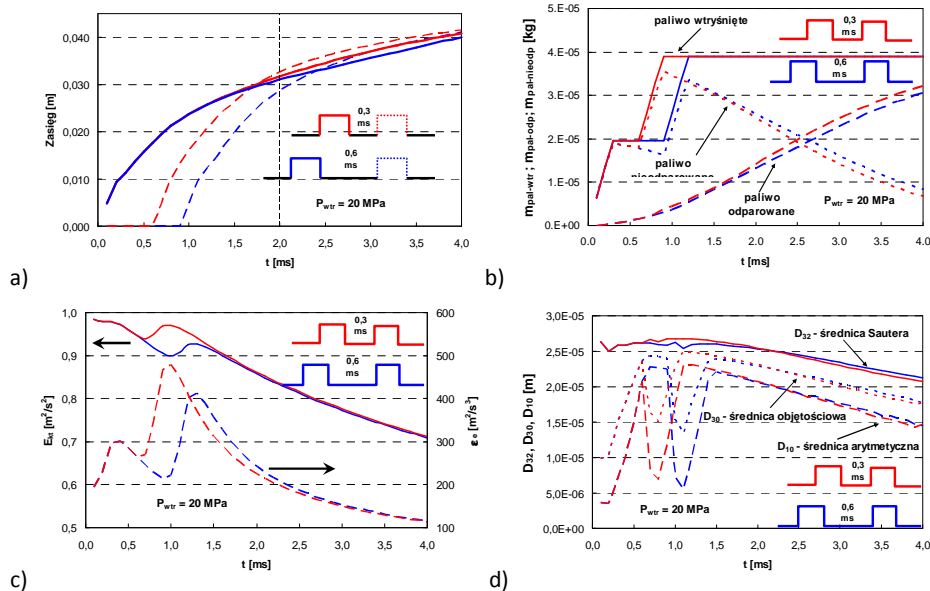


Rys. 7. Wpływ podziału dawki paliwa na zmiany energii kinetycznej turbulencji oraz szybkości jej dyssypacji – badania symulacyjne (parametry wtrysku: $P_{wtr} = 20 \text{ MPa}$; $t_1 = 0,3 \text{ ms}$; $t_d = 0,6 \text{ ms}$; $t_2 = 0,3 \text{ ms}$; $P_{pow} = 1 \text{ MPa}$)

skrócenia odległości czasowych między dawkami paliwa szybkość dyssypacji energii również jest większa, jednak w końcowej fazie procesu wtrysku szybkości te osiągają jednakowe wartości.

Badania symulacyjne (rys. 8) potwierdziły, że druga dawka paliwa, niezależnie od odległości czasowej od pierwszej dawki, uzyskuje zasięg taki jak dawka początkowa. Na podstawie badań eksperymentalnych i symulacyjnych należy stwierdzić brak istotnego zmniejszenia prędkości kolejnych dawek wtryskiwanego paliwa (w odniesieniu do wtrysku wysokociśnieniowego, w którym stosunek ciśnień paliwa i ładunku osiąga znaczne wartości; w badaniach wartość ta wynosiła od 40-80 m/s). Można założyć, że w

prorowadzonych badaniach zasięg strugi wyznacza pierwsza lub druga porcja wtryskiwanego paliwa (błąd wyznaczenia zasięgu wynosiłby około 3%).



Rys. 8. Charakterystyka wpływu interakcji dawek wtryskiwanego paliwa na wybrane wielkości: a) parametry geometryczne strugi, b) rozpylenie paliwa, c) energię kinetyczną turbulencji, d) średnice kropeł paliwa (badania symulacyjne prowadzono dla $t_{pow} = 550 \text{ K}$); parametry wtrysku: $P_{wtr} = 20 \text{ MPa}$; $t_1 = 0,3 \text{ ms}$; $t_d = 0,3/0,6 \text{ ms}$; $t_2 = 0,3 \text{ ms}$; $P_{pow} = 1 \text{ MPa}$

5. WNIOSKI

Istotnym elementem procesu wtrysku wielofazowego jest odpowiedni dobór przerw czasowych między poszczególnymi porcjami paliwa, tak, aby wykorzystać pozytywne oddziaływanie tych wtrysków na kształtowanie strugi paliwa oraz zwiększenie intensywności mieszania paliwa z powietrzem. Potwierdzeniem pozytywnego oddziaływania energii kinetycznej turbulencji na jakościowe tworzenie mieszanki palnej są badania prowadzone przez Storcha i in. [4] wskazujące również na zwiększanie tej energii w wyniku wtrysku drugiej dawki paliwa.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] AVL FIRE ver. 2010, ICE Physics&Chemistry. AVL Graz 2010.
- [2] Davis 7.2. LaVision, Göttingen, Niemcy. www.lavision.de
- [3] Pielecha I., Wisłocki K., Czajka J., Maslennikov D.: *The Qualitative Spray Characteristics of High-Pressure Gasoline Injection System*. 23rd European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems – ILASS – Europe 2010, Brno, 2010.

- [4] Storch A., Kufferath A., Fischer U., Selder M., Schünemann E.: *TVDI fuel efficiency technology for worldwide operation: injector design and combustion system development*. 9th International Symposium on Combustion Diagnostic, Baden-Baden 2010.
- [5] Zhao F., Lai M.-C., Harrington D.L., *Automotive Spark-Ignited Direct-Injection Gasoline Engines*. Wyd. Elsevier, Oxford 1999.