

Aleksander Mazanek

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Ocena parametrów użytkowych wtryskiwaczy piezoelektrycznych na podstawie badań wizualizacyjnych procesu rozpylania paliwa

W artykule zamieszczono informacje dotyczące oceny parametrów użytkowych wtryskiwaczy piezoelektrycznych na podstawie badań wizualizacyjnych związanych z kształtowaniem i oceną wtrysku oraz z rozpyleniem paliwa. Stosując optyczne metody analizy, określono wskaźniki geometryczne powstającej strugi wtryskiwanego paliwa, takie jak: zasięg strugi, jej obszar i prędkość. Badania wykonano, wykorzystując ośmiotworkowe wtryskiwacze piezoelektryczne Delphi: nowe – o przebiegu eksploatacyjnym zerowym i wtryskiwacze używane – przebieg eksploatacyjny 80 tys. km. Przedmiotowe wtryskiwacze piezoelektryczne w okresie eksploatacji zasilane były dwoma paliwami: A i B.

Słowa kluczowe: wtryskiwacz, paliwo, silnik.

The evaluation of operating parameters of piezoelectric injectors on the basis of fuel atomization process visualization

The article contains information on the evaluation of operating parameters of piezoelectric injectors, on the basis of fuel atomization process visualization. The issues related to the evolution and evaluation of fuel injection and atomization were discussed. Implementing optical methods of analysis, geometric ratios of the resulting fuel stream injected, such as range, area and speed, were determined. The studies were accomplished with the use of Delphi's piezoelectric injectors: new – with zero operating mileage and used injectors – with operating mileage of 80 thousand km. These piezoelectric injectors were fed with two fuels A and B.

Key words: injector, fuel, engine.

Wprowadzenie

Współczesne normy dotyczące homologacji pojazdów ukierunkowane są na zwiększenie bezpieczeństwa oraz zmniejszenie emisji szkodliwych składników spalin. Istotnym czynnikiem związanym z ekologicznością oraz energooszczędnością są warunki pracy silnika.

Wprowadzenie do seryjnej produkcji systemów zasilania typu *common rail* wymagało opanowania zaawansowanej technologii wytwarzania wtryskiwaczy, rozwoju elektroniki sterującej ich pracą oraz harmonizacji jakości paliw silnikowych [3].

Jednym z istotnych parametrów jakościowych ściśle związanych ze składem strukturalno-grupowym paliw przeznac-

zonych do zasilania silników ZS jest skłonność do tworzenia się osadów w układzie paliwowym. Niektóre właściwości paliwa, takie jak duża lepkość, mała lotność, zawartość olefin, związków aromatycznych, biokomponentów (FAME), ułatwiają tworzenie się na końcówce wtryskiwaczy osadów koksowych. Postęp w dziedzinie technologii dodatków uszlachetniających detergentowo-dyspergujących i ich odpowiedni poziom dozowania pozwalają rozwiązać wiele problemów [11].

Aby osiągnąć optymalne parametry pracy wtryskiwacza, należy precyzyjnie sterować wielkością dawki paliwa oraz czasem wtrysku paliwa. W tym celu wymagana jest dokładna

analiza procesu wtrysku [5, 10], umożliwiającą określenie jego parametrów oraz sposobu tworzenia mieszanki [9] i spalania [6, 7]. Współczesne silniki spalinowe mają rozwinięte algorytmy podziału dawki paliwa [6] oraz rozbudowane układy wtryskowe [1, 7], utrudniające oszacowanie dawki paliwa przypadającej w całym cyklu. Wynika to ze złożoności procesu zasilania silnika.

Badania optyczne [9, 10] umożliwiają określenie podstawowych parametrów wtrysku, takich jak zasięg strugi, obszar wypełnienia przez rozpylone paliwo, a także prędkość strugi w zależności od ciśnienia, czasu wtrysku i przeciwcisnienia ośrodka, do którego ten wtrysk następuje. Badania

takie pozwalają na ocenę jakości rozpylania paliwa oraz na jednoczesną diagnostykę rozpylaczy wtryskiwaczy. Możliwa jest więc ilościowa i jakościowa ocena sposobu rozpylania paliwa zależna od typu paliwa oraz od stopnia zużycia eksploatacyjnego wtryskiwaczy [4].

Proces wtrysku paliwa powinien być rozpatrywany m.in. w aspekcie wskaźników geometrycznych strugi oraz interakcji strugi i ścianki tłoka. Wskaźniki geometryczne strugi najczęściej ustala się podczas wtrysku paliwa do otoczenia lub do komory wypełnionej powietrzem lub azotem, w której panują warunki przeciwcisnienia odpowiadające tym w rzeczywistej komorze spalania.

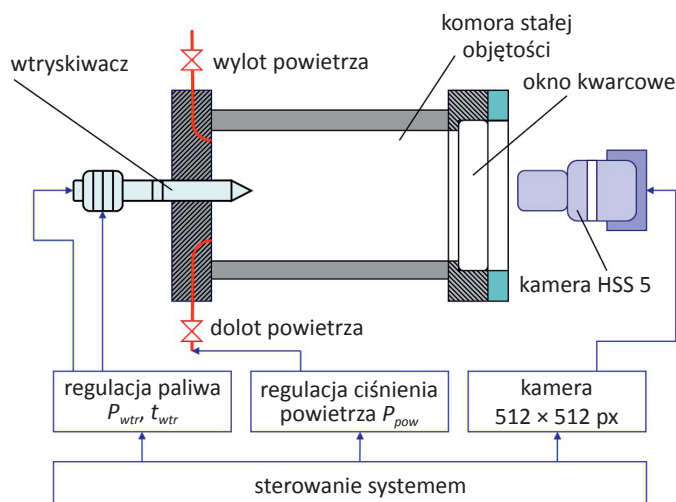
Metodyka i plan badań

Problematyka zagadnień dotyczących rozpylania paliwa i określenia procesu wtrysku paliwa wymagała wykorzystania następującej aparatury badawczej i kontrolno-pomiarowej:

- komory stałej objętości – pozwalającej na odwzorowanie statycznych warunków panujących w cylindrze podczas wtrysku paliwa, czyli przeciwcisnienia ośrodka, do którego następuje wtrysk paliwa,
- układu wtrysku paliwa typu *common rail* z możliwością zadawania czasu wtrysku oraz ciśnienia paliwa wystawiającego wtryskiwacze piezoelektryczne,
- kamery do zdjęć szybkich umożliwiającej rejestrację rozpylenia paliwa (obróbka tych zdjęć posłużyła do analizy ilościowej tego procesu: zasięgu strugi paliwa, jej obszaru i szybkości wypływu paliwa z wtryskiwacza).

Komora stałego ciśnienia

Do symulacji warunków panujących w cylindrze podczas badań wtrysku i rozpylenia paliwa wykorzystano komorę stałej objętości wyposażoną w dostęp optyczny do



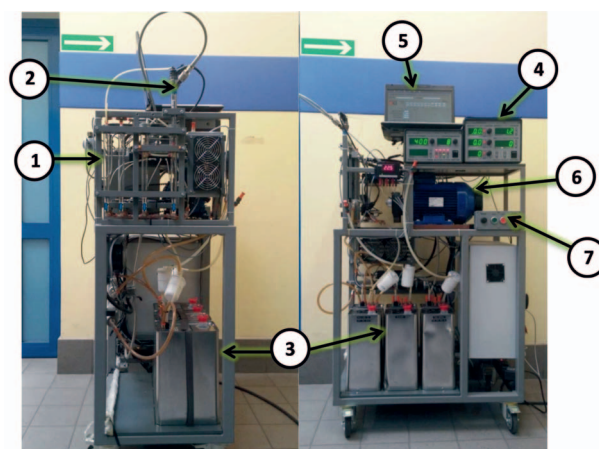
Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego do określania rozpylenia oleju napędowego [1]

obserwacji wypływu paliwa z wtryskiwacza. Zastosowana komora badawcza pozwalała na uzyskanie wartości przeciwcisnienia ośrodka, do którego odbywał się wtrysk paliwa (określony przez precyzyjny układ wtrysku typu *common rail*), zbliżonych do tych panujących w trakcyjnych silnikach spalinowych.

Synchronizację kamery i wtryskiwacza zapewniał układ sekwencera (o rozdzielczości 2 ns), który wykorzystując sygnały TTL (5 V), umożliwiał wymuszenie rejestracji zdjęć przez kamerę oraz rozpoczęcie wtrysku paliwa o zadanym czasie. Widok stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 1.

Układ wtrysku paliwa

Generowanie wtrysku paliwa realizowane było przez mobilne stanowisko systemu *common rail*, którego budowę przedstawiono na rysunku 2. Układ ma trzy niezależne zbiorniki na paliwo, umożliwiające zmianę paliwa pomiarowego w krótkim czasie. Dzięki możliwości ustawienia temperatury w zakresie



Rys. 2. Stanowisko systemu *common rail*: 1 – menzurki pomiarowe, 2 – wtryskiwacz, 3 – zbiorniki paliwa, 4 – sterowniki ręczne stanowiska, 5 – przenośny komputer sterujący stanowiskiem, 6 – silnik elektryczny napędzający pompę, 7 – wyłącznik awaryjny [8]

20–60°C paliwo podgrzewane jest za pomocą grzałki o mocy 900 W lub chłodzone z wykorzystaniem wbudowanej w stanowisko chłodnicy doposażonej w wentylatory. Paliwo dostarczane za pomocą pompy niskiego ciśnienia doprowadzane jest do pompy wysokiego ciśnienia – Bosch CP4, stosowanej w układach zasilania silników pojazdów samochodowych. Jej użycie umożliwia przeprowadzenie testów w warunkach panujących w układach *common rail* III generacji, w których ciśnienie wtrysku paliwa przekracza 180 MPa. Paliwo przekazywane jest przez przewody wysokiego ciśnienia do wtryskiwacza umieszczonego w komorze stałej objętości.

Kamera do zdjęć szybkich

Obserwacje optyczne prowadzono z wykorzystaniem kamery do zdjęć szybkich, pozwalającej na filmowanie sekwencji obrazów z szybkością 10 kHz ($\Delta t = 100 \mu s$), 10 000 zdjęć na sekundę, przy zachowaniu rozdzielczości 512×512 pikseli.

W przestrzeni obserwacji nie występował żaden dający się zaobserwować ruch powietrza. Tak więc na rejestrowaną poziomą strugę oddziaływała 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 w zróżnicowanych warunkach pra-

cy wtryskiwaczy oraz z wykorzystaniem dwóch rodzajów paliwa: oleju napędowego typowego (oznaczonego jako handlowy – ON-H) oraz paliwa – oleju napędowego o ulepszonych właściwościach detergentowych (oznaczonego jako ON-INIG). Wybrane punkty badawcze warunków pracy wtryskiwacza uwzględniały warunki panujące w komorze spalania silnika. Przy wyborze tych punktów kierowano się zależnością, że duże wartości ciśnienia wtryskiwanego paliwa powinny występować podczas dużego obciążenia silnika, i dlatego zastosowano zróżnicowane wartości czasu i ciśnienia wtrysku oleju napędowego. Dla każdego punktu badawczego określono P_{wtr} oraz P_{pow} . Dokonano badań w kilku punktach, zmieniając czas oraz ciśnienie wtrysku paliwa. W tabelicy 1 przedstawiono plan badań z uwzględnieniem rodzaju paliwa, jego ciśnienia, czasu wtrysku, przeciwcisnienia w komorze i użytego do badań wtryskiwacza.

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

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

Tablica 1. Zestawienie wykorzystanych wtryskiwaczy i paliw oraz warunków pracy wtryskiwaczy podczas prowadzenia badań

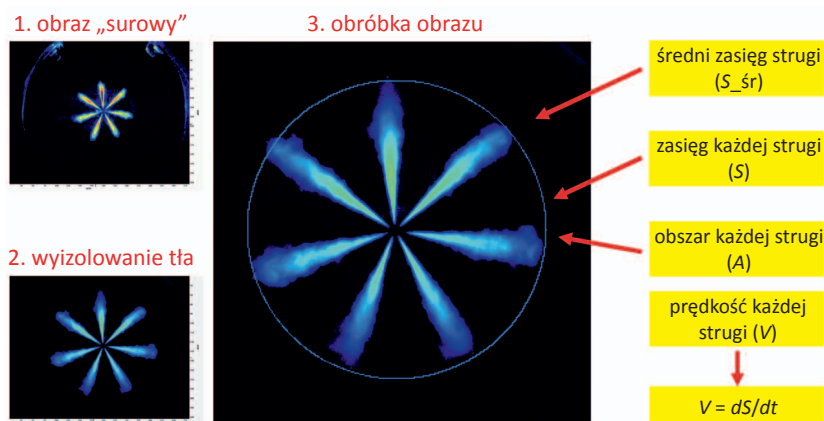
Wtryskiwacz/pojazd	Paliwo	Ciśnienie paliwa [MPa]	Czas wtrysku [ms]	Przeciwcisnienie w komorze [MPa]	Uwagi
N01-02	ON-H	35; 100	0,3; 0,5	2	wtryskiwacze nowe
N01-02	ON-INIG	35; 100	0,3; 0,5	2	wtryskiwacze nowe
U01-02	ON-H	35; 100	0,3; 0,5	2	wtryskiwacze z pojazdu nr 1
U03-04	ON-INIG	35; 100	0,3; 0,5	2	wtryskiwacze z pojazdu nr 2
U05-06	ON-INIG	35; 100	0,3; 0,5	2	wtryskiwacze z pojazdu nr 3

Łączna liczba pomiarów: 16 pomiarów \times 5 kombinacji = 80 pomiarów.

Analiza geometrii strugi paliwa

Analiza wskaźników geometrycznych strugi dotyczy wyznaczenia: zasięgu każdej strugi (S) lub średniego zasięgu ($S_{\text{śr}}$), pola powierzchni strugi (A) oraz prędkości strugi (V). Wskaźniki te określono na podstawie zarejestrowanej płaskiej ekspozycji obiektu przestrzennego. Sposób wyznaczenia tych wielkości przedstawiono na rysunku 3.

W celu określenia zasięgu czoła strugi w pierwszym etapie obliczeń odejmowano tło od każdego zdjęcia, na którym występuje struga wtryskiwanego paliwa. Następnie w sposób zautomatyzowany poszukiwano od strony prawej



Rys. 3. Metodyka obróbki obrazów i wyznaczania wskaźników geometrycznych strugi rozpylanego paliwa [8]

do lewej pikseli o luminancji większej niż 20 jednostek w celu odnalezienia końca strugi. Znając współrzędne ustawienia wtryskiwacza oraz współrzędne końca strugi, określano zasięg strugi wtryskiwanego paliwa. W programie zastosowano dodatkowo procedurę, która w czasie obliczeń służyła do graficznej prezentacji obliczonych wartości.

Znajomość zasięgu czoła strugi umożliwiła obliczenie prędkości czoła strugi przez wyznaczenie wartości parametru dS/dt .

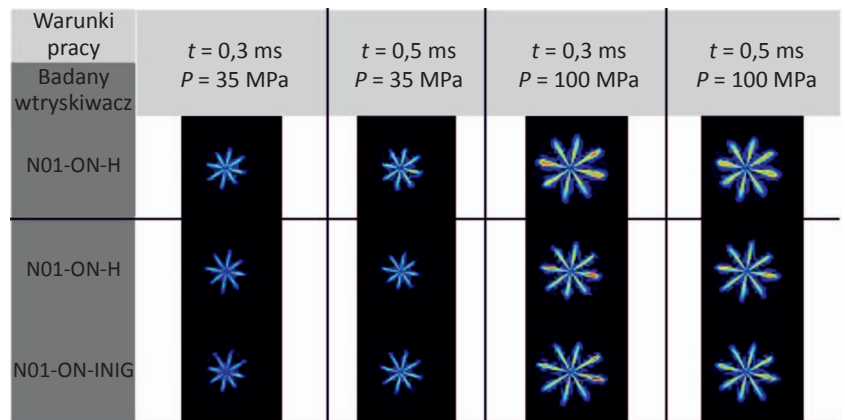
Prędkość filmowania 10 kHz pozwala na zastosowanie maksymalnej rozdzielczości rejestrowanego obrazu wynoszącej 512×512 pikseli. Ogniskowa kamery umożliwiła w takim przypadku zarejestrowanie strugi o maksymalnej długości < 40 mm. Taka długość pozwala w niektórych punktach pomiarowych na zarejestrowanie części rozwoju strugi paliwa (struga wtryskiwanego paliwa kierowana jest na ścianki komory stałej objętości).

Analiza i ocena procesu wtrysku i rozpylania paliwa

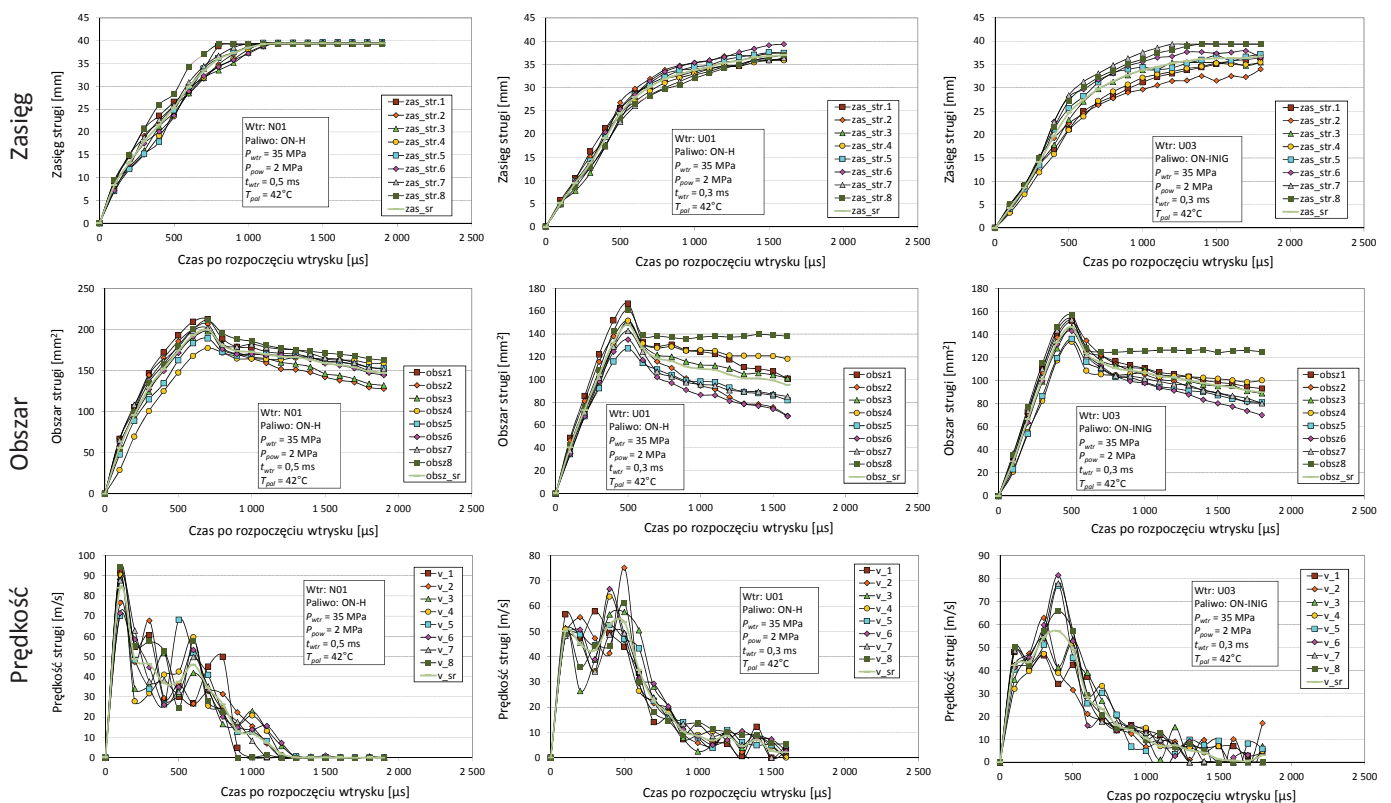
Badania rozwoju strugi paliwa prowadzono zgodnie z planem badań, a przykładowe wyniki rozpylania paliwa w czasie wtrysku 50 ms zaprezentowano na rysunku 4.

Rysunek 4 przedstawia przykładowe zdjęcia w czasie 50 ms trwania wtrysku dla różnych paliw i różnych stanów technicznych wtryskiwaczy. Przy ciśnieniu $P = 35$ MPa i czasie $t = 0,3$ ms zasięg strugi dla badanych paliw i wtryskiwaczy jest porównywalny, a przy ciśnieniu $P = 100$ MPa i czasie $t = 0,3$ ms staje się zróżnicowany.

Na rysunku 5 zaprezentowano przykładowe wyniki analiz rozpylenia paliw ujmujących



Rys. 4. Przykładowy obraz rozprzestrzeniania się paliwa przy założonych czasach otwarcia i zadanych ciśnieniach pracy



Rys. 5. Analiza wskaźników geometrycznych rozpylenia paliwa dla wtryskiwacza nowego i po przebiegu eksploatacyjnym 80 tys. km zasilanego olejem napędowym handlowym (ON-H) i olejem napędowym z dodatkiem INIG (ON-INIG): a) zasięg strugi, b) obszar strugi, c) prędkość strugi paliwa (warunki badań: $P_{wtr} = 35$ MPa; $t_{wtr} = 0,3$ ms; $P_{pow} = 2$ MPa)

zasięg strugi paliwa, jej pole powierzchni oraz prędkość. Każda z analiz zawiera również wielkość średnią, uzyskaną na podstawie wskaźników geometrycznych poszczególnych strug paliwa. Wyniki takie pozwalają (poza oceną ilościową) na ocenę jakości wpływu paliwa z poszczególnych otworków wtryskiwacza.

Analizując zasięg strugi nowego wtryskiwacza, można

stwierdzić, że przewyższa on ten sam parametr wtryskiwaczy używanych. Porównanie obszaru strugi paliwa wskazuje, że dla wtryskiwaczy nowych jest on większy i równomierny, natomiast dla wtryskiwaczy po przebiegu eksploatacyjnym – mniejszy i bardziej zróżnicowany. Przyczyny tego zjawiska upatruje się w osadach powstałych wewnątrz wtryskiwaczy używanych i na końcówkach rozpylaczy.

Podsumowanie

Współczesne systemy układu zasilania silników o zapłonie samoczynnym są niezwykle czułe na obecność osadów w systemie układu paliwowego. Mechanizm tworzenia zarówno zewnętrznych osadów w postaci koksu na końcówkach wtryskiwaczy i wewnątrz dysz rozpylających, jak i wewnętrznych IDID (*internal diesel injector deposits*) mimo licznych badań nie został całkowicie wyjaśniony i zależy od wielu czynników.

Badania optyczne dotyczące rozpylenia paliwa wykazały, że przy małych wartościach ciśnienia zasięgi strug są porównywalne dla badanych wtryskiwaczy niezależnie od ich stanu technicznego. W badanych warunkach pracy obszar strugi wskazuje na brak zakoksovania lub zmniejszenia średnicy przepływowej nowych wtryskiwaczy. Wtryskiwacze używane mają zbliżone zasięgi oraz pola powierzchni strug paliwa przy niskiej wartości ciśnienia pracy. Wzrost wartości ciśnienia i czasu wtrysku powoduje, że dla nowych wtryskiwaczy zasięg jest największy i stopniowo zmniejsza się przy badaniach wtryskiwaczy używanych.

Duży wpływ na skłonność olejów napędowych do koksovania rozpylaczy otworowych i tworzenia IDID ma udział procentowy FAME w oleju napędowym [13]. Aby zapewnić czystość i sprawność działania układów wtryskowych, olej napędowy powinien spełniać nie tylko minimalne wymogi dotyczące jakości według normy PN-EN 590:2013-12, lecz również wytyczne producentów układów wtryskowych przedstawione w postaci deklaracji wspólnego stanowiska z 2012 roku odnośnie do wymagań jakościowych oleju napędowego oraz wytyczne Światowej Karty Paliw dla ON kategorii 4, wydanie piąte z września 2013 roku [2, 14]. Skłonność paliw zawierających w swoim składzie estry metylowe kwasów tłuszczowych do tworzenia osadów i ich odkładanie się na powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej wtryskiwaczy pracujących w wysokiej temperaturze wymusiły na producentach paliw konieczność stosowania dodatków detergentowo-dyspergujących. Dodatkami tego rodzaju utrzymującymi w należytej czystości rozpylacze paliwa oraz usuwającymi z ich powierzchni powstałe osady są poliizobutylenobursztynimidy [12].

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2016, nr 4, s. 279–284, DOI: 10.18668/NG.2016.04.07

Artykuł nadesłano do Redakcji 20.11.2015 r. Zatwierdzono do druku 3.02.2016 r.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Ocena parametrów pracy wtryskiwaczy typu Common Rail podczas badań eksploatacyjnych* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 0009/TE/15, nr archiwalny: DK-4100-0009/15.

Literatura

- [1] Borowski P., Pielecha I., Cieślak W., Bueschke W., Skowron M.: *Komputerowo wspomagane stanowisko do wyznaczania parametrów wtrysku paliwa*. Logistyka 2015, nr 3, s. 541–549.
- [2] Diesel Fuel Injection Equipment Manufactures: *Fuel Requirements for Diesel Fuel Injection Systems*. Common Position Statement 2012.
- [3] Jakóbiec J., Mazanek A.: *Czynniki kształtujące ocenę ekologiczną pracy silników samochodowych*. Logistyka 2014, nr 6, s. 4716–4730.
- [4] Mazanek A.: *Tendencje rozwoju silników o zapłonie samoczynnym w ujęciu proekologicznym*. Nafta-Gaz 2014, nr 6, s. 390–394.
- [5] Pielecha I., Borowski P., Cieślak W.: *Investigations into high-pressure diesel spray-wall interaction on reduction of exhaust emission from DI diesel engine*. SAE Technical Paper 2014-01-1250, 2014.
- [6] Pielecha I., Borowski P., Czajka J., Wisłocki K., Kaźmierowski J.: *Combustion process shaping by use of different strategies of multiple fuel injection in a CI model engine*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 2015, vol. 119, no. 1, s. 695–703.
- [7] Pielecha I., Wisłocki K., Borowski P., Cieślak W.: *Thermodynamical evaluation of usefulness of future hydrocarbon fuels for use in compression ignition engines*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 2015, vol. 122, no. 1, s. 473–485, doi: 10.1007/s10973-014-4735-5.
- [8] Pielecha I., Wisłocki K., Cieślak W., Borowski P., Skowron M., Bueschke W.: *Problematyka wyznaczania parametrów geometrycznych strugi paliwa na podstawie badań optycznych*. Combustion Engines 2015, nr 3, s. 307–315.
- [9] Pielecha I., Wisłocki K., Czajka J., Maslennikov D.: *Determination of the self-ignition delay for different types of diesel fuels*.

- W2P014, 34th International Symposium on Combustion, Warsaw 29.07–3.08.2012.
- [10] Skowron M., Pielecha I.: *Analiza porównawcza rozpylenia paliwa przez wybrane typy wtryskiwaczy paliw ciekłych*. Logistyka 2015, nr 3, s. 4439–4448.
- [11] Stanik W., Jakóbiec J., Mazanek A.: *Badania silnikowe dotyczące zanieczyszczenia i koksowania nowoczesnych wielotworowych wtryskiwaczy wysokociśnieniowego układu zasilania paliwem silników ZS*. Logistyka 2015, nr 4, s. 5777–5787.
- [12] Stanik W., Mazanek A., Jakóbiec J.: *Badania oleju napędowego zawierającego 7% (V/V) FAME i dodatek cetanowy w zakresie oceny użytkowej i częstości wtryskiwaczy czopikowych*. Combustion Engines 2015, nr 3, s. 933–943.
- [13] Stępień Z.: *Ewolucja metodyki oceny zanieczyszczenia rozpylaczy silników o zapłonie samoczynnym*. Nafta-Gaz 2014, nr 10, s. 707–716.
- [14] *Worldwide Fuel Charter*. Fifth Edition. September 2013.



Dr inż. Aleksander MAZANEK
 Adiunkt w Zakładzie Oceny Właściwości Eksploatacyjnych.
 Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
 ul. Lubicz 25 A
 31-503 Kraków
 E-mail: mazaneka@inig.pl

OFERTA

ZAKŁAD DODATKÓW I NOWYCH TECHNOLOGII CHEMICZNYCH

Zakres działania:

- opracowywanie i doskonalenie technologii wytwarzania:
 - » dodatków uszlachetniających do płynnych paliw węglowodorowych i biopaliw,
 - » dodatków stosowanych podczas wydobycia, transportu i magazynowania ropy naftowej i gazu ziemnego,
 - » dodatków do paliw stałych, ze szczególnym uwzględnieniem komponentów pochodzących ze źródeł alternatywnych (gliceryna, odpady, itp.),
 - » specjalistycznych środków stosowanych w przemyśle;
- ocena jakości i przydatności do stosowania oraz ekspertyzy i doradztwo w zakresie dodatków i pakietów dodatków uszlachetniających do paliw i biopaliw;
- badania w zakresie nowych technologii chemicznych w przemyśle wydobywczym i rafineryjnym;
- badania niestandardowe i identyfikacyjne na potrzeby ekspertyz;
- badania nad wykorzystaniem nanoproduktów w przemyśle wydobywczym i rafineryjnym, opracowywanie i doskonalenie ich technologii;
- opracowywanie i walidacja nowych metod analiz dodatków uszlachetniających do paliw, biopaliw, ropy naftowej i gazu ziemnego;
- badania właściwości fizykochemicznych dodatków uszlachetniających do paliw i olejów smarowych.



Kierownik: dr Leszek Ziemiański
Adres: ul. Łukasiewicza 1, 31-429 Kraków
Telefon: 12 617-75-27
Faks: 12 617-75-22
E-mail: leszek.ziemiański@inig.pl

