

ZWIĘKSZENIE EFEKTYWNOŚCI ROZPYLANIA PALIWA RZEPAKOWEGO PRZEZ MODYFIKACJĘ UKŁADU ZASILANIA SILNIKA ZS

Hubert Kuszewski, Kazimierz Lejda

Zakład Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, Politechnika Rzeszowska

Streszczenie. Celem niniejszej pracy była ocena możliwości zastosowania wtryskiwacza z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy do rozpylania paliw o zwiększonej lepkości. Przeprowadzono również badanie typowego wtryskiwacza, co nadało badaniom charakter porównawczy. Olej napędowy, olej rzepakowy oraz mieszanka obu tych paliw zostały użyte w procesie rozpylania. Przeanalizowano następujące parametry makrostruktury rozpylanej strugi: zasięg czoła, kąt wierzchołkowy oraz powierzchnię.

Słowa kluczowe: silnik diesel, olej rzepakowy, wtryskiwacz, zasięg czoła strugi, rozpylanie

WSTĘP

Współczesne samochody osobowe oraz lekkie pojazdy użytkowe są coraz częściej wyposażane w wysokoprężne silniki z bezpośrednim wtryskiem paliwa. Wypierają one mniej ekonomiczne silniki benzynowe i wysokoprężne z dzielonymi komorami spalania.

W nowoczesnych silnikach wysokoprężnych z bezpośrednim wtryskiem limity emisji tlenku węgla (CO) i niespalonych węglowodorów (HC) nie stanowią istotnego problemu. Emisja ze spalinami tych składników toksycznych, zanieczyszczających powietrze i stanowiących zagrożenie dla środowiska, jest zwykle mniejsza od stwierdzanej w silnikach benzynowych, powszechnie wyposażanych w trójfunkcyjny konwerter katalityczny oczyszczający spaliny. Natomiast uzyskanie emisji tlenków azotu (NO_x) oraz cząstek stałych (PM) w granicach przewidzianych stosownymi normami jest obecnie największym problemem dla konstruktorów. Jest to zadanie o tyle trudne, gdyż zwykle występuje przeciwna zależność w zakresie formowania się tych składników w komorze spalania ze względu na fizykochemiczne podstawy ich powstawania.

Rozwój silników spalinowych związany jest nie tylko z poszukiwaniem coraz bardziej zaawansowanych rozwiązań technicznych poprawiających proces spalania, a tym samym umożliwiających spełnienie aktualnych wymagań ochrony środowiska naturalnego. Konieczne jest również poszukiwanie alternatywnych paliw, których spalanie wiąże się z ograniczeniem emisji toksycznych składników spalin. Poszukiwanie nowych

rodzajów paliw związane jest ponadto ze wzrostem zapotrzebowania na paliwa (niekoniecznie płynne) bardzo dobrej jakości, przy ograniczonych zasobach i zwiększonych kosztach wydobycia ropy naftowej.

Zaostrzające się na przestrzeni ostatnich lat wymagania odnośnie ograniczenia emisji składników toksycznych spalin (tab. 1) wymuszają poszukiwania efektywnych metod ich zmniejszania. Prace naukowo-badawcze koncentrują się na rozwoju systemu wtrysku, który powinien umożliwiać efektywną modyfikację procesu spalania, skutkującą obniżeniem emisji toksyn.

Biorąc pod uwagę możliwości zasilania silników wysokoprężnych paliwami alternatywnymi (takimi jak np. olej rzepakowy), należy zwrócić uwagę, że stosunkowo skutecznym sposobem polepszenia przebiegu procesu spalania przy zasilaniu silnika paliwem o zwiększonej lepkości (olej rzepakowy, mieszanina oleju rzepakowego i oleju napędowego) może być poprawa parametrów makrostruktury rozpylanego paliwa.

Przedstawione wyniki badań wizualizacyjnych wskazują, że cel ten może być częściowo osiągnięty przez zastosowanie nowej konstrukcji wtryskiwacza, w którym iglica wykonuje ruch obrotowo-zwrotny, a nie posuwisto-zwrotny, jak w rozwiązaniach klasycznych. Konstrukcję i zasadę działania tego typu wtryskiwacza opisano m.in. w pracach Sowa i in. [2001, 2001a], Kuszewski [2003].

Tabela 1. Normy emisji UE dla samochodów osobowych i użytkowych do 3,5 tony (LDV)
[Lejda 2005]

Table 1. UE emission standards for automobiles and utility cars below 3.5 ton

Samochody osobowe i użytkowe do 3,5 tony	PM, mg/km		NO _x g/km		HC, g/km		HC + NO _x g/km	
	ZS	ZI	ZS	ZI	ZS	ZI	ZS	ZI
Euro 1 (1992-93)	140	-	-	-	-	-	0,97	0,97
Euro 2 (1996)	80/10 ¹	-	-	-	-	-	0,7/0,9 ¹	0,5
Euro 3 (2000)	50	-	0,50	0,15	-	0,20	0,56	-
Euro 4 (2005)	25	-	0,25	0,08	-	0,10	0,30	-
Euro 5 propozycja (2008)	2,5	2,5	0,08	0,08	0,05	0,05	-	-

¹Odpowiednio wtrysk pośredni lub wtrysk bezpośredni

METODYKA BADAŃ WIZUALIZACYJNYCH

Podstawą badań wizualizacyjnych była rejestracja obrazu strugi, która odbywała się z prędkością 5000 klatek/s. W związku z tym, kolejne obrazy rozwijającej się strugi paliwa były rejestrowane co 0,0002 s. Taśma filmowa o szerokości 16 mm była następnie poddawana skanowaniu, a zapisane cyfrowo obrazy podlegały analizie za pomocą komputera. Dzięki specjalnemu oprogramowaniu możliwe było, po odpowiednim prze-

skalowaniu obrazu, wyznaczenie wartości analizowanych parametrów strugi rozpylanego paliwa.

W przypadku obu wtryskiwaczy (klasyczny i z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy) określano zasięg czoła strugi L_c rozpylanego paliwa, kąt wierzchołkowy strugi Θ_s oraz powierzchnię strugi A_s . Wielkości te określano każdorazowo od punktu leżącego na osi rozpylacza. Kryterium oceny makrostruktury strugi A_s zostało wprowadzone ze względu na nieregularny kształt strugi generowanej przez wtryskiwacz z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy.

Przy określaniu kąta wierzchołkowego strugi Θ_s i jej powierzchni A_s nie uwzględniano pochylenia strug wynikających z kąta, jaki tworzą osie otworków rozpylających. Natomiast kąt ten uwzględniano przy wyznaczaniu zasięgu czoła strugi. W rzeczywistości bowiem mierzono długość rzutu strugi L_z na powierzchnię prostopadłą do osi rozpylacza. Dla badanych rozpylaczy kąt między osiami otworków rozpylacza wynosił 140° .

Przy określaniu zasięgu czoła strugi brano pod uwagę zasięg średni, tj. średnią arytmetyczną zasięgów strug wypływających ze wszystkich otworków rozpylających. Podobnie postępowano przy wyznaczaniu wartości kąta wierzchołkowego strugi i jej powierzchni. Liczba poddawanych analizie obrazów strugi determinowana była uderzeniem strugi o ściankę komory wizualizacyjnej, której średnica wynosiła 120 mm.

Do badań makrostruktury rozpylanego paliwa wybrano wtryskiwacz z klasycznym rozpylaczem wielootworkowym (D1LMK 140/M2) oraz wtryskiwacz specjalnej, nowo opracowanej konstrukcji z rozpylaczem, w którym iglica wykonuje ruch obrotowo-zwrotny. Rozpylacz ten oznaczono literą „B”. Charakterystyczną cechą wtryskiwacza nowego typu jest zmienność przekrojów otworków wylotowych w czasie trwania wtrysku [Szymański i Zabłocki 1992, Kuszewski i in. 2002, Sowa i in. 2001, 2002 i 2002a, Kuszewski 2003].

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

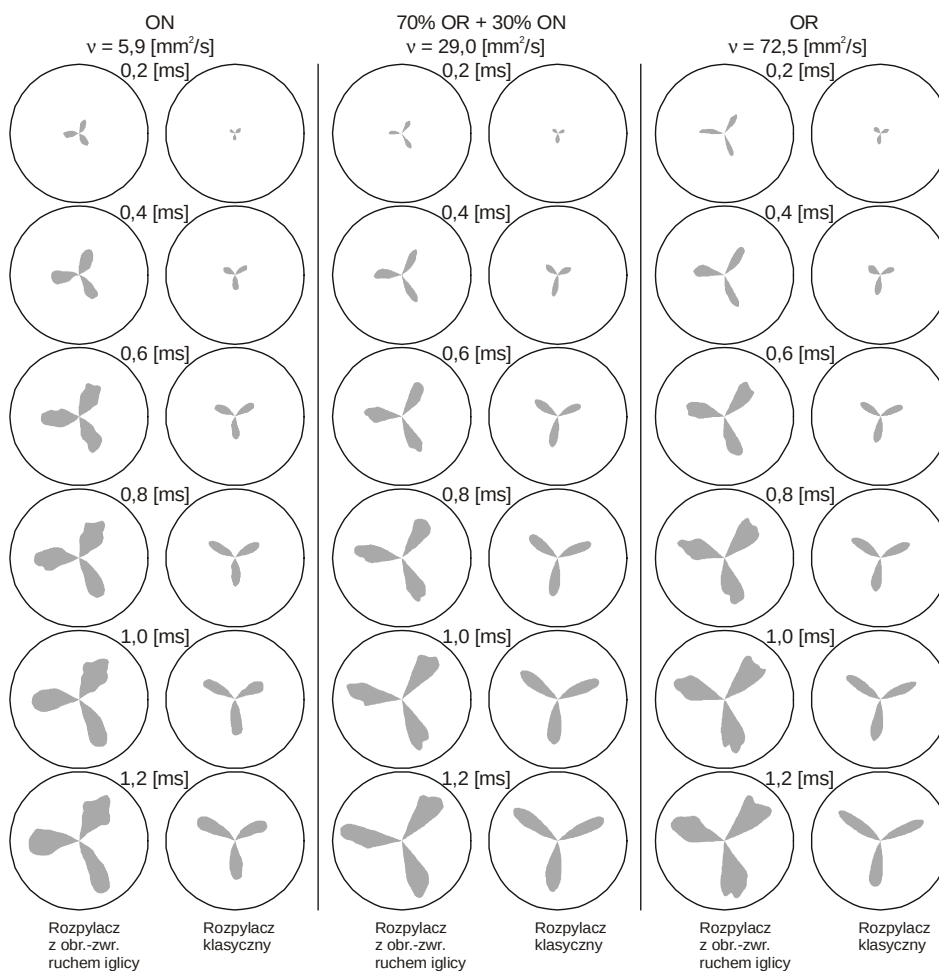
Badania wizualizacyjne prowadzono dla paliw o różnej lepkości (ON, OR oraz mieszanina: 70% OR i 30% ON).

Podstawą przeprowadzenia analizy ilościowej procesu rozpylania, były obrazy rozwoju strug paliwa uzyskane w badaniach wizualizacyjnych (rys.1). Rysunki sporządzono dla rozpylaczy, którymi w tych samych warunkach wtryskiwano do komory wizualizacyjnej olej napędowy, olej rzepakowy oraz mieszaninę tych paliw. Z zamieszczonych rysunków wyraźnie widać, że struga paliwa wytwarzana przez rozpylacz z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy rozwija się odmiennie w stosunku do strugi formowanej przez rozpylacz klasyczny. Powoduje to oczywiście istotne różnice w wartościach parametrów oceny makrostruktury strugi. Ponieważ struga generowana przez rozpylacz z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy ma nieregularny kształt, a jej powierzchnia (w rzucie na płaszczyznę prostopadłą do osi rozpylacza), kąt wierzchołkowy i zasięg czoła są przeważnie większe w porównaniu z rozpylaczem klasycznym, dlatego należy się spodziewać, że zastosowanie nowego typu rozpylacza może wpływać korzystnie na rozprowadzenie paliwa we wnętrzu komory spalania.

Zastosowanie paliw o znacznie większej lepkości kinematycznej wpłynęło w przypadku obu typów wtryskiwaczy na bardzo znaczące zwiększenie osiąganych ciśnień [Kuszewski 2003, Szlachta i Kuszewski 2003]. Przyczyną wzrostu ciśnień wtrysku dla

paliw o zwiększonej lepkości jest zmniejszenie wartości współczynnika wypływu paliwa z otworków rozpylacza.

Wzrost różnicy między ciśnieniem panującym przed wtryskiwaczem i w wizualizacyjnej komorze ciśnieniowej Δp wiązał się oczywiście ze zwiększeniem początkowej prędkości paliwa na wylocie z rozpylacza V_0 . Zmiany te były główną przyczyną wzrostu zasięgu czoła strugi dla paliw o zwiększonej lepkości kinematycznej (OR – $\nu = 72,5 \text{ mm}^2/\text{s}$, 70% OR + 30% ON – $\nu = 29,0 \text{ mm}^2/\text{s}$) w stosunku do oleju napędowego (ON – $\nu = 5,9 \text{ mm}^2/\text{s}$) – rys. 2 i 3.

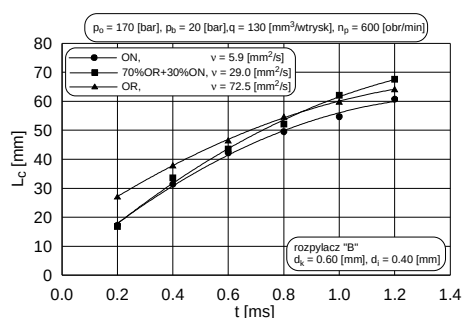


Rys. 1. Obrazy rozwoju strug rozpylanego paliwa uzyskane przy zastosowaniu trzyotworkowego rozpylacza z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy i klasycznego ($p_o = 170 \text{ bar}$, $p_b = 20 \text{ bar}$, $q = 130 \text{ mm}^3/\text{wtrysk}$, $n_p = 600 \text{ obr/min}$, paliwo: ON, 70% OR + 30% ON, OR)

Fig. 1. Imaging of development of fuel sprays obtained using a three-hole injector with a rotary-swinging needle and a classic one ($p_o = 170 \text{ bar}$, $p_b = 20 \text{ bar}$, $q = 130 \text{ mm}^3/\text{injection}$, $n_p = 600 \text{ rpm}$, fuel: ON, 70% OR + 30% ON, OR)

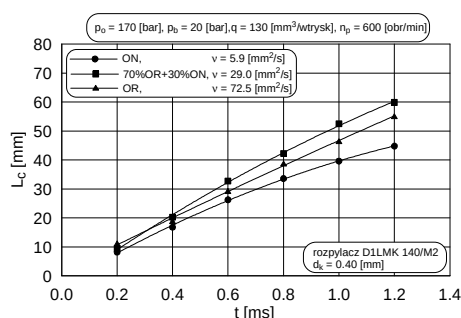
Dodatkową przyczyną wzrostu zasięgu czoła strugi wskutek zwiększenia lepkości paliwa, dla obu typów wtryskiwaczy, było zwiększenie rozmiarów kropeł wskutek pogorszonych warunków do ich rozpadu.

Z porównania rys. 2 i 3 wynika, że zasięg czoła strugi badanych paliw był większy dla wtryskiwacza z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy w całym rozpatrywanym czasie rozwoju strugi. Jedną z głównych przyczyn tego jest występowanie dla tego rozpylacza znacznie wyższych wartości prędkości V_0 .



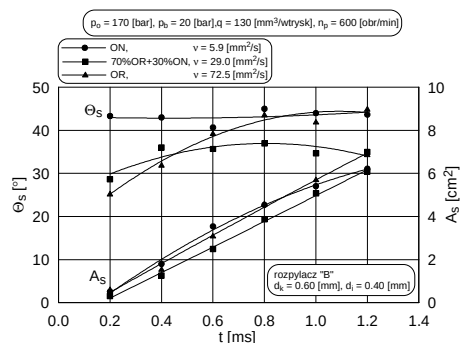
Rys. 2. Zasięg czoła strugi wytwarzanej przez trzyotworowy rozpylacz z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy przy zastosowaniu paliw o różnych lepkościach kinematycznych

Fig. 2. Range of spray tip from a three-hole injector with a rotary-swinging needle using fuels with different kinematic viscosity



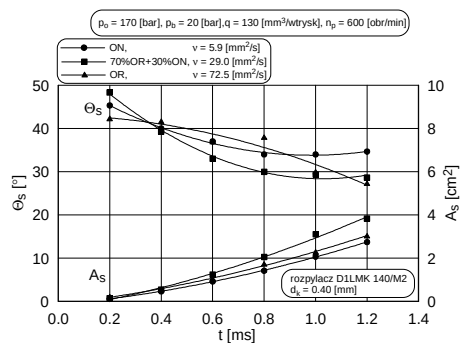
Rys. 3. Zasięg czoła strugi wytwarzanej przez trzyotworowy rozpylacz klasyczny przy zastosowaniu paliw o różnych lepkościach kinematycznych

Fig. 3. Range of spray tip from a three-hole classic injector using fuels with different kinematic viscosity



Rys. 4. Kąt wierzchołkowy i powierzchnia strugi wytwarzanej przez trzyotworowy rozpylacz z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy przy rozpylaniu paliw o różnych lepkościach

Fig. 4. Tip angle and surface of spray from a three-hole injector with a rotary-swinging needle using fuels with different kinematic viscosity



Rys. 5. Kąt wierzchołkowy i powierzchnia strugi wytwarzanej przez trzyotworowy rozpylacz klasyczny przy rozpylaniu paliw o różnych lepkościach

Fig. 5. Tip angle and surface of spray from a classic three-hole injector using fuels with different kinematic viscosity

Dla obu wtryskiwaczy nastawiono identyczne parametry związane z wtryskiem paliwa: statyczne ciśnienie otwarcia wtryskiwacza $p_o = 170$ bar, przeciwcisnienie ośrodka gazowego $p_b = 20$ bar, dawka paliwa $q = 130$ mm³/wtrysk, prędkość obrotowa wałka krzywkowego pompy wtryskowej $n_p = 600$ obr/min.

Z rys. 4 i 5 widać, że zastosowanie paliw o zwiększonej lepkości kinematycznej miało niewielki wpływ na powierzchnię strugi A_s . Jednocześnie można zauważyć, że osiągane wartości A_s są znacznie większe dla rozpylacza z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy. Porównując natomiast przebieg krzywych obrazujących zmiany kąta wierchołkowego strugi Θ_s widać, że kąt strugi generowanej przez rozpylacz klasyczny malał z upływem czasu rozwoju strugi, a na jego wartość praktycznie nie miał wpływu rodzaj paliwa.

W przypadku rozpylacza z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy, kąt wierchołkowy strugi zależał nie tylko od czasu rozwoju strugi, ale również od rodzaju paliwa. Największa wartość Θ_s wystąpiła dla paliwa o najmniejszej lepkości kinematycznej i najmniejszym napięciu powierzchniowym (ON). Prawdopodobnie mniejsze krople były wówczas silniej odchylane na zewnątrz strugi, niż to miało miejsce w przypadku paliwa o większej lepkości (70% OR + 30% ON), kiedy warunki do wtórnego rozpadu kropli były pogorszone. Zarówno dla ON, jak i mieszaniny ON z OR, kąt wierchołkowy strugi, choć różnił się co do wartości, to jednak pozostawał prawie niezmienny wraz z upływem czasu. Inaczej było natomiast w przypadku zastosowania OR, który charakteryzował się największą lepkością. Wówczas kąt wierchołkowy strugi ulegał ciągłemu wzrostowi i dla czasu $t = 1,2$ ms (co odpowiadało końcowi analizowanego czasu wtrysku paliwa) był już większy niż w przypadku zastosowania ON. Niewątpliwie w tym przypadku kąt wierchołkowy strugi był wynikiem dodatkowego czynnika zwiększającego burzliwość wypływu z rozpylacza, powodowanego zmiennością przekrojów otworków rozpylających i związanej z tym ciągłej zmiany stosunku długości do przekroju otworka wylotowego.

W wyniku przeprowadzonych badań wizualizacyjnych, obejmujących paliwa o zróżnicowanej lepkości kinematycznej oraz różne warunki rozpylania, wyprowadzono zależność kryterialną, która umożliwia obliczenie kąta wierchołkowego strugi rozpylanego paliwa.

Na podstawie danych literaturowych i obserwacji własnych [Kuszewski 2003, Szlachta i Kuszewski 2003] przyjęto, że kąt wierchołkowy strugi Θ_s generowanej przez wtryskiwacz z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy jest funkcją następujących wielkości:

$$F\left(\frac{\Theta_s}{2}, \rho_p, \rho_g, \eta_p, \eta_g, \sigma, w, g, d_i, d_k\right) = 0 \quad (1)$$

gdzie:

F – ogólna postać operatora funkcyjnego,

Θ_s – kąt wierchołkowy strugi, rad,

ρ_p – gęstość paliwa, kg/m³,

ρ_g – gęstość ośrodka gazowego, do którego odbywa się wtrysk paliwa, kg/m³,

η_p – lepkość dynamiczna paliwa, kg/s · m,

- η_g – lepkość dynamiczna ośrodka gazowego, do którego odbywa się wtrysk paliwa, $\text{kg/s} \cdot \text{m}$,
 σ – napięcie powierzchniowe paliwa, $\text{kg/s} \cdot \text{m}$,
 w – początkowa prędkość względna paliwa i otaczającego gazu, m/s ,
 g – przyspieszenie ziemskie, m/s^2 ,
 d_i – średnica otworka wylotowego w iglicy, m ,
 d_k – średnica otworka wylotowego w korpusie rozpylacza, m .

Powyższa funkcja charakteryzuje się tym, że występują w niej dwie wielkości konstrukcyjne charakteryzujące rozpylacz – średnica otworka wylotowego w iglicy d_i , oraz średnica otworka wylotowego w korpusie rozpylacza d_k . Jest to podstawowa różnica w stosunku do znanych zależności opisujących zmiany kąta wierzchołkowego strugi generowanej przez klasyczny rozpylacz wielootworkowy, gdzie wymiarem charakteryzującym rozpylacz najczęściej jest jedynie średnica otworka w korpusie rozpylacza.

Wykorzystując narzędzia dostarczone przez analizę wymiarową i po stosownych przekształceniach zestawów uzyskanych kryteriów bezwymiarowych, otrzymano ostateczną postać równania modelowego (zależności kryterialnej) umożliwiającego obliczenie przybliżonej wartości kąta wierzchołkowego strugi Θ_s generowanej przez wtryskiwacz z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy:

$$\operatorname{tg} \frac{\Theta_s}{2} = 1,02 \cdot We^{0,112} \cdot Re^{0,087} \cdot M^{0,48} \cdot Td^{2,2} \quad (2)$$

przy czym:

$$We = \frac{\rho_g \cdot w^2 \cdot d_i}{\sigma} \quad (3)$$

$$Re = \frac{\rho_p \cdot w \cdot d_i}{\eta_p} \quad (4)$$

$$M = \frac{\rho_g}{\rho_p} \quad (5)$$

$$Td = \frac{d_i}{d_k} \quad (6)$$

Przydatność zależności (2) do obliczania kąta wierzchołkowego strugi została potwierdzona w pracach Kuszewskiego [2003, 2005].

WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań wynika, że struga generowana przez wtryskiwacz z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy wykazuje korzystniejsze wartości parametrów makrostruktury w stosunku do strugi wytwarzanej wtryskiwaczem klasycznym przy rozpylaniu tak lepkich paliw, jak olej rzepakowy, czy jego mieszanina z olejem napędowym. Większe wartości kąta wierzchołkowego i powierzchni strugi powinny zapewniać dobre warunki mieszania paliwa z powietrzem i korzystniejszy przebieg procesu spalania. Bardziej efektywne wykorzystanie pozostającego do dyspozycji powietrza w komorze spalania powinno umożliwić spalanie z mniejszymi wartościami współczynnika nadmiaru powietrza i w efekcie prowadzić do uzyskania większych wartości średniego ciśnienia efektywnego.

Przeprowadzone badania wizualizacyjne rozwoju strugi umożliwiły wyprowadzenie zależności kryterialnej, pozwalającej na obliczenie kąta wierzchołkowego strugi generowanej przez rozpylacz ze zmiennymi przekrojami otworków wylotowych. Uzyskana zależność charakteryzuje się występowaniem simpleksu, wskazującego na stosunek średnicy otworka wylotowego w iglicy do średnicy otworka w korpusie rozpylacza. Przeprowadzenie badań dla paliw o różnych lepkościach zwiększa uniwersalność otrzymanej zależności.

PIŚMIENNICTWO

- Kuszewski H. 2003: Wpływ zmiennych przekrojów wylotowych wtryskiwacza z obrotową iglicą na rozpylanie oleju napędowego. Praca doktorska. Politechnika Krakowska, Kraków.
- Kuszewski H. 2005: Zależność kryterialna dla kąta wierzchołkowego strugi generowanej przez wtryskiwacz ze zmiennymi przekrojami otworków wylotowych. Materiały XVI Konferencji Międzynarodowej nt. „Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju pojazdów samochodowych i maszyn roboczych samojezdnych. Zarządzanie i marketing w motoryzacji”, SAKON’05, Rzeszów.
- Kuszewski H., Sowa K., Szlachta Z., Zabłocki M. 2002: Własności strug paliwa rozpylanego wtryskiwaczem z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy. Scientific Journal of TKMA „Alternative Feeding of Diesel Engines Problems of Maintenance of Power Units” KONSSPAL’02, Wrocław.
- Lejda K. 2005: Limity emisyjne składników toksycznych dla pojazdów samochodowych. Materiały XVI Konferencji Międzynarodowej nt. „Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju pojazdów samochodowych i maszyn roboczych samojezdnych. Zarządzanie i marketing w motoryzacji”, SAKON’05, Rzeszów.
- Sowa K., Zabłocki M., Szymański J. 2001: A multi-hole injector with variable flow area of atomization orifices for diesel engines – preliminary investigation. International Scientific Conference „Development of design of internal combustion engines and quality of fuels to meet future levels”, Cracow.
- Sowa K., Szlachta Z., Zabłocki M., Kuszewski H. 2002a: Badania nowego proekologicznego systemu spalania dla szybkoobrotowego silnika wysokoprężnego z rozpylaczem o zmiennym przekroju otworów rozpylających paliwo. Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego nr 9 T12 D 016 16, Kraków.
- Sowa K., Zabłocki M., Szymański J. 2002b: Niektóre własności nowej konstrukcji wtryskiwacza wielootworowego ze zmiennym przekrojem otworów rozpylających. Międzynarodowa Kon-

- ferencja Motoryzacyjna AUTOPROGRES-KONMOT'02 „Doskonalecie konstrukcji, technologii i eksploatacji pojazdów”, Pasym k.Olsztyna.
- Szlachta Z., Kuszewski H. 2003: Wpływ zmiennych przekrojów wylotowych wtryskiwacza z obrotową iglicą na rozpylanie oleju napędowego. Grant promotorski nr 5 T12D 026 22, Kraków.
- Szymański J., Zabłocki M.: 1992. Wtryskiwacz do silnika spalinowego. Zgłoszenie patentowe nr P-294889 z dnia 11.06.1992.

INCREASING OF RAPE FUEL SPRAYING EFFICIENCY
BY MODIFICATION OF DIESEL ENGINE SUPPLY SYSTEM

Summary: The purpose of the presented investigation was to determine the possibility of application of an injector with a rotary-swinging needle movement for spraying fuels with increased viscosity. An investigation of a typical injector has been performed as well, which made the investigation a comparative one. Diesel fuel, rape oil and mixture of rape oil and diesel fuel were used for the spraying process. The following parameters of macrostructure of the spray have been analyzed: the tip penetration, the cone angle and the area.

Key words: diesel engine, rape oil, injector, tip penetration, spraying

Recenzent: prof. dr hab. Eugeniusz Krasowski