

Hubert KUSZEWSKI
Adam USTRZYCKI
Politechnika Rzeszowska

WPŁYW WYBRANYCH PARAMETRÓW WTRYSKU NA KĄT WIERZCHOŁKOWY STRUGI ROZPYLANEGO PALIWA

W artykule przedstawiono zależności kryterialne, które mogą być wykorzystane do obliczeń kąta wierzchołkowego strugi rozpylanego paliwa. Równania modelowe zostały opracowane dla rozpylacza klasycznego – model Hiroyasu i Arai, oraz dla wtryskiwacza o zmiennych przekrojach otworków wylotowych. W dalszej części wykonano obliczenia wpływu wybranych parametrów związanych z wtryskiem paliwa na kąt wierzchołkowy strugi rozpylanego paliwa.

1. Wstęp

Rozpylanie paliwa jest jednym z najważniejszych procesów zachodzących w silnikach z wewnętrznym tworzeniem mieszaniny palnej. Proces ten determinuje przebieg tworzenia mieszaniny palnej, a więc bezpośrednio oddziałuje na przebieg wywiązywania ciepła w silniku, czyli ma wpływ na jego wskaźniki energetyczne i ekologiczne. Istotną rolę w procesie rozpylania powinna odgrywać odpowiednio ukształtowana struga wtryskiwanego paliwa, cechująca się odpowiednią makro- i mikrostrukturą [1]. Ważne jest przy tym, aby w okresie opóźnienia samozapłonu (w silniku o ZS) względne prędkości ruchu powietrza i paliwa nie były wysokie, natomiast po samozapłonie wzrastały [2, 3]. Osiągnięcie tego celu może być zrealizowane m.in. przez odpowiedni dobór parametrów konstrukcyjnych klasycznych rozpylaczy paliwa, w których iglica wykonuje ruch posuwisto-zwrotny. Pewne możliwości w tym zakresie daje zastosowanie rozpylacza o odmiennej zasadzie działania, gdzie iglica wykonuje ruch obrotowo-zwrotny, a przekroje otworków rozpylających w czasie trwania wtrysku zmieniają swój kształt i przekrój. Jednocześnie należy zwrócić uwagę, że obliczeniowe określenie parametrów makro- i mikrostruktury rozpylania jest niezwykle złożonym zagadnieniem, ponieważ musi być związane z koniecznością uwzględnienia bardzo dużej liczby parametrów, których wartości mogą się zmieniać w bardzo krótkim czasie [4, 5].

Jednym z częściej stosowanych sposobów wyznaczania podstawowych parametrów makrostruktury strugi rozpylanego paliwa jest posługiwanie się bezwymiarowymi postaciami równań modelowych. Równania takie najczęściej są funkcją bezwymiarowych liczb podobieństwa (kryteriów), dlatego uzasadnione jest stosowanie w odniesieniu do nich nazwy zależności kryterialne. Jak wiadomo, ustalanie kryteriów bezwymiarowych jest przedmiotem analizy wymiarowej. Dzięki niej możliwe jest wyznaczenie poprawnej pod względem wymiarowym postaci wzorów fizycznych. Wyznaczenie zależności kryterialnych najczęściej sprowadza się do przyjęcia hipotezy o wpływie pewnych zjawisk fizycznych lub mechanizmów na badany proces. O wynikach analizy wymiarowej decyduje zatem wybór wielkości fizycznych, mających wpływ na rozpatrywane zjawisko.

W niniejszej pracy przedstawiono zależność kryterialną dla kąta wierzchołkowego strugi generowanej przez wtryskiwacz z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy, w którym w czasie wtrysku zmieniają się przekroje otworków wylotowych rozpylacza. Budowa takiego wtryskiwacza została przedstawiona między innymi w pracach [6, 7]. W dalszej części, na podstawie przeprowadzonych obliczeń, porównano wpływ wybranych parametrów związanych z wtryskiem paliwa na kąt wierzchołkowy strugi generowanej przez wtryskiwacz klasyczny i z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy. Uwzględniono wpływ gęstości paliwa, będący m.in. wynikiem mieszania oleju napędowego i oleju rzepakowego, wpływ przeciwności (gęstości) powietrza, do którego odbywa się wtrysk paliwa, oraz wpływ średnicy otworka rozpylającego. W obliczeniach wykorzystano model własny (dla rozpylacza nowego typu – oznaczenie A) i model opracowany przez Hiroyasu i Arai [8, 9] (dla rozpylacza klasycznego – oznaczenie B).

2. Charakterystyka modeli rozpylania wykorzystanych do obliczeń

Na podstawie danych literaturowych [8, 10, 11] i obserwacji własnych [6] przyjęto, że kąt wierzchołkowy strugi Θ generowanej przez wtryskiwacz z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy jest funkcją następujących wielkości:

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

gdzie: F – ogólna postać operatora funkcyjnego,

Θ – kąt wierzchołkowy strugi, rad,

ρ_p – gęstość paliwa, kg/m^3 ,

ρ_g – gęstość ośrodka gazowego, do którego odbywa się wtrysk paliwa, kg/m^3 ,

η_p – lepkość dynamiczna paliwa, Pa·s,

η_g – lepkość dynamiczna ośrodka gazowego, do którego odbywa się wtrysk paliwa, Pa·s,

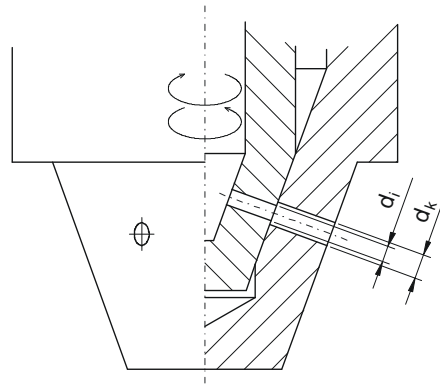
σ_p – napięcie powierzchniowe paliwa, kg/s²,

w – początkowa prędkość względna paliwa i otaczającego gazu, m/s,

d_i – średnica otworka wylotowego w iglicy, m,

d_k – średnica otworka wylotowego w korpusie rozpylacza, m.

Podana 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 (rys. 1.). 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 średnica otworka w korpusie rozpylacza oraz jego długość.



Rys. 1. Fragment rozpylacza z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy (d_i – średnica otworka w iglicy, d_k – średnica otworka w korpusie rozpylacza), [7]

Ostateczna postać równania modelowego (zależności kryterialnej) umożliwiającego obliczenie przybliżonej wartości kąta wierzchołkowego strugi Θ generowanej przez wtryskiwacz z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy jest następująca:

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

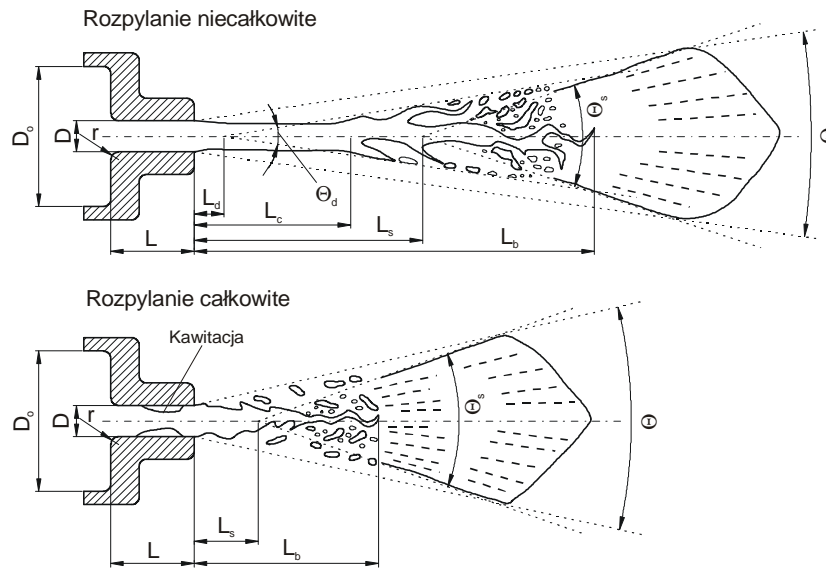
przy czym:

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

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

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

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



Rys. 2. Wewnętrzna struktura rozpylania niecałkowitego i całkowitego w modelu Hiroyasu i Arai [8]: D – średnica otworka rozpylacza, D_0 – średnica komory rozpylacza, L – długość otworka rozpylacza, L_b – odległość rozpadu, L_c – długość gładkiej kolumny paliwa, L_d – położenie wierzchołka stożka zaburzeń, L_s – położenie wierzchołka stożka strugi, Θ – kąt wierzchołkowy strugi, Θ_d – kąt stożka zaburzeń powierzchniowych, Θ_s – kąt stożka rozpylania

W modelu Hiroyasu i Arai [8] wartość kąta wierzchołkowego wyznaczonego z zależności (7) jest determinowana parametrami konstrukcyjnymi rozpylacza oraz gęstością ośrodka, do którego odbywa się wtrysk paliwa, i gęstością paliwa. Schemat tego modelu przedstawiono na rys. 2.

$$\Theta = 83,5 \cdot \left(\frac{L}{D}\right)^{-0,22} \cdot \left(\frac{D}{D_0}\right)^{0,15} \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_p}\right)^{0,26} \quad (7)$$

gdzie: Θ – kąt wierzchołkowy strugi, deg,
 L – długość otworka rozpylacza, m,
 D – średnica otworka w korpusie rozpylacza, m,
 D_0 – średnica komory rozpylacza, m,
 ρ_g – gęstość ośrodka gazowego, do którego odbywa się wtrysk paliwa, kg/m³,
 ρ_p – gęstość paliwa, kg/m³.

3. Obliczenia kąta wierzchołkowego strugi rozpylanego paliwa

Korzystając z równań modelowych zaprezentowanych w poprzednim punkcie, wykonano obliczenia mające na celu określenie wpływu gęstości ośrodka, do którego odbywa się wtrysk paliwa ρ_g , gęstości paliwa ρ_p oraz średnicy otworka rozpylającego D w modelu z rys. 2. i d_i w modelu z rys. 1. (d_i – dla rozpylacza nowego typu) na kąt wierzchołkowy strugi Θ . Wartości parametrów, dla których przeprowadzono obliczenia, zaprezentowano w tabeli 1. W tabeli pogrubieniem wyróżniono te wartości, które były przyjmowane jako stałe dla etapów obliczeń odnoszących się do oddziaływania wybranych parametrów na kąt wierzchołkowy strugi. Obliczenia przeprowadzono przy założeniu, że wtrysk paliwa odbywa się do powietrza o temperaturze 650°C (923 K). Na tej podstawie, uwzględniając przyjęte wartości ciśnienia powietrza, z równania stanu gazu obliczono wartości gęstości powietrza ρ_g . Niezbędną do obliczeń początkową wartość prędkości względnej paliwa i otaczającego gazu obliczono z zależności:

$$w = \mu \sqrt{2 \frac{p_{wtr} - p_g}{\rho_p}} \quad (8)$$

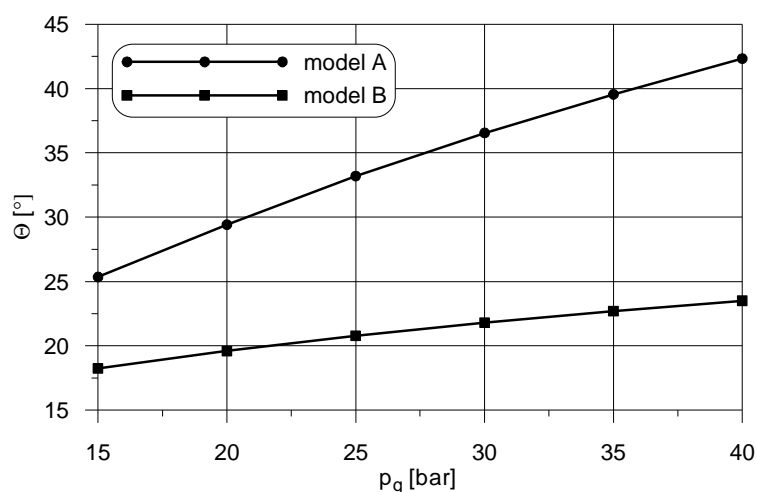
gdzie: w – początkowa prędkość względna paliwa i otaczającego gazu, m/s,
 μ – współczynnik przepływu (0,7),
 p_{wtr} – ciśnienie paliwa przed otworkiem rozpylającym, Pa,
 p_g – ciśnienie ośrodka gazowego, do którego odbywa się wtrysk paliwa, Pa,
 ρ_p – gęstość paliwa, kg/m³.

Tabela 1. Wartości parametrów związanych z wtryskiem paliwa przyjęte w obliczeniach

Nazwa	Oznaczenie	Jednostka	Wartości		Uwagi
			model własny wzór (7)	model Hiroyasu i Arai wzór (2)	
Gęstość paliwa	ρ_p	kg/m ³	799; 828 ; 857; 886 [*] ; 915 ^{**} ; 944	799; 828 ; 857; 886 [*] ; 915 ^{**} ; 944	-
Gęstość ośrodka gazowego, do którego odbywa się wtrysk paliwa	ρ_g	kg/m ³	5,7; 7,5; 9,4; 11,3; 13,2 ; 15,1	5,7; 7,5; 9,4; 11,3; 13,2 ; 15,1	obliczone na podstawie p_g , T_g dla $R = 287$ [J/kg K]
Ciśnienie ośrodka gazowego, do którego odbywa się wtrysk paliwa	p_g	Bar	15; 20; 25; 30; 35 ; 40	15; 20; 25; 30; 35 ; 40	-
Temperatura ośrodka gazowego, do którego odbywa się wtrysk paliwa	T_g	K	923	923	-
Ciśnienie wtrysku paliwa	p_{wtr}	Bar	500	-	-
Lepkość dynamiczna paliwa	η_p	Pa·s 10 ³	3,0; 5,0 ; 15,0; 25,7 ^{***} ; 66,3 ^{****} ; 70,0	-	-
Napięcie powierzchniowe paliwa	σ_p	kg/s ² 10 ³	29	-	-
Początkowa prędkość względna paliwa i otaczającego gazu	w	m/s	244; 238; 233; 228; 223; 219	-	obliczone z zależności (8)
Średnica otworka wylotowego w iglicy	d_i	m 10 ³	0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40	-	-
Średnica otworka wylotowego w korpusie rozpylacza (rozpylacz nowego typu)	d_k	m 10 ³	0,22; 0,30; 0,37; 0,45; 0,52; 0,60	-	obliczone na podstawie d_i , przy zachowaniu stałego stosunku $d_i/d_k = 0,67$

Tabela 1. (cd.)

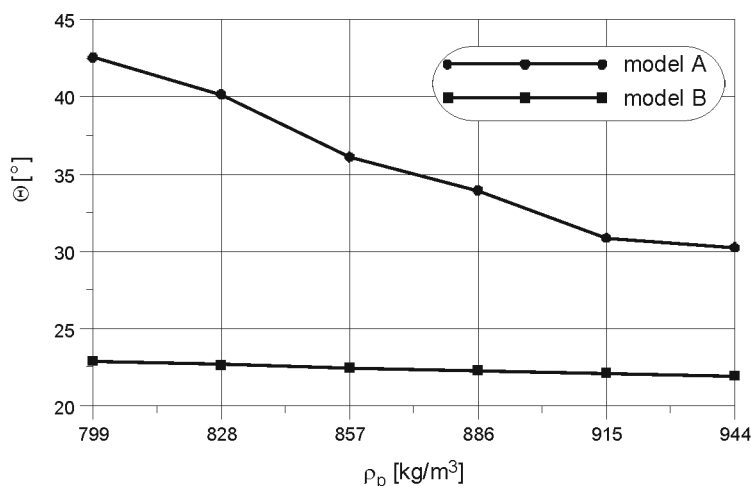
Nazwa	Oznaczenie	Jednostka	Wartości		Uwagi
			model własny wzór (7)	model Hiroyasu i Arai wzór (2)	
Średnica otworka w korpusie rozpylacza	D	m 10^3	-	0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40	-
Średnica komory rozpylacza	D_0	m 10^3	-	1,0	-
Długość otworka rozpylacza	L	m 10^3	-	0,23; 0,30; 0,38; 0,45; 0,53; 0,60	obliczone na podstawie D, przy zachowaniu stałego stosunku $L/D = 1,5$
* – zmierzona wartość dla 30% oleju napędowego i 70% oleju rzepakowego (objętościowo) w temperaturze 20°C ** – zmierzona wartość dla oleju rzepakowego w temperaturze 20°C *** – zmierzona wartość dla 30% oleju napędowego i 70% oleju rzepakowego (objętościowo) w temperaturze 20°C **** – zmierzona wartość dla oleju rzepakowego w temperaturze 20°C					



Rys. 3. Wpływ ciśnienia ośrodka gazowego, do którego odbywa się wtrysk paliwa p_g , na kąt wierzchołkowy strugi Θ rozpylanego paliwa dla rozpylacza klasycznego (model B) i o zmiennych przekrojach otworków wylotowych (model A)

Z przeprowadzonych obliczeń i zgodnie z prezentowanymi w literaturze wynikami badań [11, 12-14] wynika, że zarówno w przypadku modelu rozpylania przedstawionego przez Hiroyasu i Arai, jak i modelu opracowanego dla wtryskiwacza nowego typu – ze zmiennymi przekrojami otworków wylotowych, zwiększanie gęstości ośrodka gazowego p_g , do którego odbywa się wtrysk paliwa, powoduje, że kąt wierzchołkowy strugi Θ ulega zwiększaniu (rys. 3.). W przypadku rozpylacza nowego typu przyrost kąta wierzchołkowego strugi w funkcji przeciwności jest jednak znacznie silniejszy, co powinno sprzyjać lepszemu rozprowadzaniu paliwa w komorze spalania silnika wysokoprężnego z bezpośrednim wtryskiem paliwa.

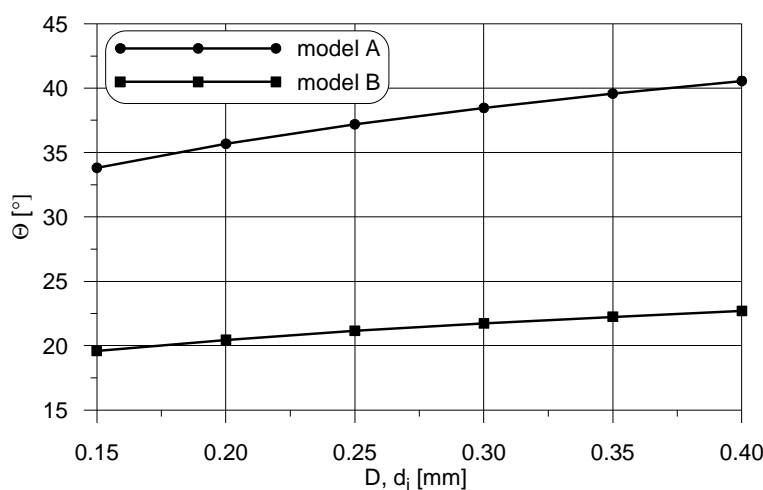
Zwiększanie gęstości paliwa ρ_p , w przypadku obu typów wtryskiwaczy, powoduje zmniejszanie kąta wierzchołkowego strugi (rys. 4.). W przypadku modelu opracowanego dla wtryskiwacza klasycznego widać jednak tylko bardzo nieznaczny spadek tego kąta przy wzroście gęstości paliwa. Ogólnie, potwierdzone eksperymentalnie wyniki obliczeń wskazują, że rozpylacz nowego typu zapewnia korzystniejsze warunki tworzenia mieszaniny palnej przy rozpylaniu paliw o zwiększonej gęstości. Zwiększoną gęstość w stosunku do typowego oleju napędowego posiadają np. mieszaniny oleju napędowego i oleju rzepakowego.



Rys. 4. Wpływ gęstości paliwa ρ_p na kąt wierzchołkowy strugi Θ rozpylanego paliwa dla rozpylacza klasycznego (model B) i o zmiennych przekrojach otworków wylotowych (model A)

Na rys. 5. przedstawiono dodatkowo wpływ średnicy otworka w korpusie rozpylacza D (rozpylacz klasyczny) i średnicy otworka w iglicy d_i (rozpylacz o zmiennych przekrojach otworków wylotowych) na kąt wierzchołkowy stru-

gi Θ . W obu przypadkach zwiększanie średnic tych otworków powoduje zwiększanie kąta wierzchołkowego strugi, co także znajduje potwierdzenie w prezentowanych w literaturze wynikach badań [8, 11, 14]. Należy jednak zwrócić uwagę, że dla rozpylacza nowego typu, jedynie w fazie pełnego otwarcia rozpylacza, wypływ paliwa odbywa się przez kołowy przekrój otworka wylotowego [6, 7]. W fazie częściowego otwarcia rozpylacza paliwo wypływa przez przekrój soczewkowy [6]. Biorąc to pod uwagę, przyjęto w obliczeniach, że średnica otworka w iglicy jest równa średnicy otworka w korpusie rozpylacza klasycznego. Dla każdej z przyjętych wartości tych średnic i przy założeniu jednakowych pozostałych warunków związanych z wtryskiem paliwa, kąt wierzchołkowy uzyskiwany dla rozpylacza nowego typu ma blisko dwukrotnie większą wartość niż dla rozpylacza klasycznego.



Rys. 5. Wpływ średnicy otworka w korpusie rozpylacza D (rozpylacz klasyczny) i średnicy otworka w iglicy d_i (rozpylacz o zmiennych przekrojach otworków wylotowych) na kąt wierzchołkowy strugi Θ rozpylanego paliwa dla rozpylacza klasycznego (model B) i o zmiennych przekrojach otworków wylotowych (model A)

4. Podsumowanie

Proces rozpylania paliwa zależy od wielu czynników związanych z parametrami wtrysku paliwa, warunkami otoczenia i konstrukcją samego rozpylacza. Czynniki te, poza oczywiście konstrukcją rozpylacza, ulegają zmianom w czasie bardzo krótkiego okresu. Spośród wielu parametrów konstrukcyjnych klasycznych rozpylaczy wpływających na proces rozpylania, najczęściej analizowany jest wpływ stosunku długości do średnicy otworka rozpylającego oraz średnicy

otworka rozpylającego. Należy zwrócić uwagę, że o ile we wtryskiwaczu klasycznym stosunek ten nie ulega zmianie w czasie trwania wtrysku, to w rozpylaczu z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy jest on uzależniony od fazy wtrysku paliwa, co jest skutkiem zmiany przekrojów otworków wylotowych.

Przedstawione w niniejszym artykule modele pozwalające na obliczenie kąta wierzchołkowego strugi mogą być wykorzystywane jako podmodele tworzenia mieszaniny palnej w silnikach wysokoprężnych z bezpośrednim wtryskiem paliwa przy opracowywaniu złożonych modeli matematycznych cyklu roboczego silnika.

Literatura

1. Kuszewski H., Ustrzycki A.: Wpływ warunków wtrysku na mikrostrukturę strugi rozpylanego paliwa. Науково-технічний збірник, No 16, 2008, Вісник Національного транспортного університету, Київ 2008.
2. Kuszewski H.: Wpływ parametrów rozpylonego paliwa na tworzenie mieszaniny palnej i spalanie w silniku wysokoprężnym. Teka Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji „Konstrukcja, badania, eksploatacja, technologia pojazdów samochodowych i silników spalinowych”, Zeszyt 20, Kraków 2000.
3. Kuszewski H., Szlachta Z.: Ekologiczny aspekt kształtowania własności strugi rozpylanego paliwa w silniku wysokoprężnym. Zeszyty Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji „Problemy Eksploatacji”, Zeszyt 1/2002.
4. Kuszewski H., Ustrzycki A.: Wpływ lepkości kinematycznej paliwa na proces jego wtrysku w systemie Common Rail. Науково-технічний збірник, No 18, 2009, Вісник Національного транспортного університету, Київ 2009.
5. Ustrzycki A.: Wpływ parametrów wtryskiwacza na przebieg wtrysku paliwa w układzie zasilania z rozdzielaczową pompą wtryskową. Mat. Konf. SAKON'05 nt. "Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju pojazdów samochodowych i maszyn roboczych samojezdnych. Zarządzanie i marketing w motoryzacji", Rzeszów-Przeclaw 2005, s. 317-326.
6. Kuszewski H., Lejda K.: Experimental Investigations of a New Type of Fuelling System for Heavy-Duty Diesel Engines. International Journal of Heavy Vehicle Systems, Vol. 16, Issue 1/2, 2009.
7. Sowa K., Szlachta Z., Zabłocki M., Kuszewski H.: Badania nowego proekologicznego systemu spalania dla szybkoobrotowego silnika wysokoprężnego z rozpylaczem o zmiennym przekroju otworów rozpylających paliwo. Sprawozdanie z realizacji Projektu Nadawczego, nr 9 T12 D 016 16, Kraków 2002.
8. Hiroyasu H., Arai M.: Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines. SAE Transactions, 1990.
9. Hiroyasu H., Arai M., Tabata M.: Empirical Equations for the Sauter Mean Diameter of a Diesel Spray. SAE Transactions, 1989.
10. Hiroyasu H., Nishida K.: Fuel Spray Trajectory and Dispersion in a D.I. Diesel Combustion Chamber. SAE Transactions, 1989.
11. Zabłocki M.: Wtrysk i spalanie paliwa w silnikach wysokoprężnych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1976.

12. Tanner F.X.: Liquid Jet Atomization and Droplet Modeling of Non-Evaporating Diesel Fuel Sprays. SAE Transactions, 1997.
13. Varde K.S., Popa D.M.: Diesel Fuel Spray Penetration at High Injection Pressures. SAE Transactions, 1983.
14. Varde K.S., Popa D.M., Varde L.K.: Spray Angle and Atomization in Diesel Sprays. AE Transactions, 1984.

EFFECT OF INJECTION PARAMETERS ON CONE ANGLE OF FUEL SPRAY

S u m m a r y

In the article the criterion relationships which can be used for calculation a spray cone angle were presented. The model equations for classical spray nozzle – Hiroyasu and Arai model and for spray nozzle with variable sections of outlet holes were studied. Next, computations of effect of selected parameters connected with fuel injection on spray cone angle were conducted.

Złożono w redakcji we wrześniu 2010 r.