

The analysis of fuel vaporization in a distributorless pneumatic injection system of a two stroke spark ignition engine

The paper presents the results of simulation tests of the process of fuel vaporization inside a gas conduit of a distributorless pneumatic injection system of a two stroke spark ignition engine induced by hot exhaust gas. For the simulation a CFD Phoenix has been used. The fuel delivery has been modeled for the phase when the medium flow is seized. A temporal and spatial analysis of the fuel film and the gaseous phase of the fuel has been presented. The results of the said simulations could constitute a basis for validation of a real engine of the investigated type.

Key words: SI two stroke engine, fuel vaporization, pneumatic injection

Analiza odparowania paliwa w bezrozdzielaczowym układzie wtrysku pneumatycznego dwusuwowego silnika spalinowego o zapłonie iskrowym

W artykule zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych procesu odparowania paliwa wewnątrz przewodu gazowego bezrozdzielaczowego układu wtrysku pneumatycznego za pomocą gorących spalin, w dwusuwowym silniku spalinowym o zapłonie iskrowym. W symulacji użyto programu CFD Phoenix. Dostarczanie paliwa zamodelowano do przewodu gazowego w fazie, gdy ustaje w nim przepływ czynnika. Przedstawiono rozkład (w czasie i w przestrzeni) zarówno filmu paliwowego, jak i fazy gazowej dawki paliwa. Wyniki przytoczonych symulacji mogą być przydatne do weryfikacji konstrukcyjnej modelu funkcjonalnego silnika, będącego przedmiotem badań. Wyniki przytoczonych symulacji mogą być przydatne do weryfikacji konstrukcyjnej modelu funkcjonalnego silnika będącego przedmiotem badań.

Słowa kluczowe: dwusuwowy silnik ZI, odparowanie paliwa, wtrysk pneumatyczny

1. Introduction

The use of two stroke spark ignition engines is currently limited to certain small industrial applications, two wheeled vehicles – particularly those of low capacity – and drivetrains in motor boats. High exhaust losses, containing the fuel mix of high hydrocarbon content contributed to the withdrawal of these engines from car application, which in turn, limited its overall range of application. The fuel injection past the closure of the exhaust windows eliminates the fuel escape during exhaust. A short time for the realization of injection during the compression stroke past the closure of the exhaust windows i.e. approximately 90 CA is much more difficult as compared to four stroke engines where the injection is realized in the suction stroke that lasts for over 200 CA. Some solutions have been developed [1, 2] based on pneumatic fuel injection which are characterized by a very good fuel atomization at a relatively low injection pressure. These solutions are based on delivering fuel along with pressurized air directly to the combustion chamber. The control of the amount of the injected fuel air mixture is difficult and is usually realized through large electromagnetic valves that are exposed to extreme heatstrokes and are massive enough to make it difficult to maintain short reaction time. A new solution of the pneumatic injection system utilizes pressurized air from a standalone compressor. These engines are not multi fuel engines due to the deterioration of fuel atomization along the growth of its density. Taking the above into considera-

1. Wstęp

Zastosowanie silników dwusuwowych o zapłonie iskrowym jako źródła napędu ogranicza się obecnie do niektórych małych silników przemysłowych, jednoślądów, zwłaszcza o małej pojemności silnika i do napędu łodzi motorowych. Strata wylotowa tych silników, zawierająca mieszanke paliwową o dużej zawartości węglowodorów w spalinach, przyczyniła się do wstrzymania produkcji samochodów z tymi silnikami, a co za tym idzie ograniczyła zakres ich zastosowania. Wtrysk paliwa po zamknięciu okien wylotowych eliminuje uchodzenie paliwa podczas wylotu spalin. Krótki czas do realizacji wtrysku w okresie suwu sprężania po zamknięciu okien wylotowych, czyli ok. 90°OWK, stwarza duże trudności w porównaniu z silnikami czterosuwowymi, w których wtrysk odbywa się zazwyczaj w okresie suwu dolutu trwającym ponad 200°OWK. Powstały rozwiązania [1, 2] oparte na pneumatycznym wtrysku paliwa, które charakteryzuje bardzo dobre rozpylenie przy stosunkowo niskim ciśnieniu wtrysku. Rozwiązania te stosują doprowadzenie paliwa ze sprężonym powietrzem bezpośrednio do komory spalania. Sterowanie ilością wdmuchiwaney mieszaniny paliwo-powietrze jest skomplikowane i odbywa się zwykle za pośrednictwem dużych zaworów elektromagnetycznych narażonych na cieplne udary podczas spalania, mających dużą masę i związane z tym trudności uzyskania krótkiego czasu otwarcia. Nowe rozwiązania systemów wtrysku pneumatycznego stosują do rozpylania paliwa sprężone powietrze

tion, Krakow University of Technology has developed and implemented a system of pneumatic fuel injection realized through hot exhaust gases with an electronic control of fuel dose. The above issue was related to the issues of charge exchange processes.

The principle behind a two stroke two cylinder engine with a distributorless pneumatic system and a bidirectional exhaust gas flow (according to the concept of prof. S. Jarnuszkiewicz – schematics in Fig. 1) is that the working areas are connected in such a way that when the piston exposes the inlet of one end of the conduit the exhaust gases in small amount get to the combustion chamber of the other cylinder taking the previously appropriately dosed fuel along. The fuel introduced before the scavenging warms up from the walls of the conduit and evaporates intensely, thus leading to a high level of fuel vaporization and atomization. In order to determine the extent of fuel vaporization many phenomena have been subjected to analysis in the gas conduit. Interesting seems the determining of the amount of fuel delivered to the gas conduit which vaporizes before the exhaust gas starts to flow.

Our consideration of these issues results from the conviction that the advancement in engine technology is possible through perfecting the fuel delivery system based on pneumatic fuel injection directly into the cylinder. Moreover, the application of this system enables charge stratification which allows qualitative control of the engine power. The control of the injection timing and dosage is electronic, which enables a further real time optimization of the said process.

The simulation has been performed for a given point in the work field of an engine. The selection has been made for optimum parameters of charge exchange in terms of exhaust gas losses. The authors focused on obtaining an increase in pressure before the closure of the exhaust window as it is known that this phenomenon arrests the outflow of fresh charge from the cylinder. A backdraft of part of the fresh charge from the exhaust duct to the cylinder is also possible which enhances the cylinder filling even more.

2. Fuel vaporization in the gas conduit

The fuel is delivered to the conduit at a certain time after which comes a pause until the opening is exposed and scavenging takes place.

It is assumed that:

- Engine speed is constant in time and amounts to 2400 rpm,
- The flow speed is miniscule,
- The fuel is evenly distributed over the walls of the gas conduit and creates a fuel film of thickness g ,
- In the range of elementary time span the gases are ideal and the physical parameters are constant,
- The impact of vapor on the gas thermal physical parameters is not considered and the gas is clean air,
- The amount of heat use for the fuel vaporization, heating up of the vapor and the fuel itself does not influence the temperature and the pressure of the gas,
- The gradient of the fuel vapor concentration and the gradient of temperature are the same and occur in the surface layer of thickness δ .

pobierane z osobnej sprężarki. Silniki te nie są silnikami wielopaliwowymi ze względu na pogarszające się warunki rozpylania wzrastające wraz z gęstością paliwa. Uwzględniając omawiane zagadnienia, na Politechnice Krakowskiej opracowano i wdrożono układy wtrysku pneumatycznego paliwa za pomocą gorących gazów spalinowych, z elektroniczną regulacją wielkości dawki paliwa. Problematykę tę powiązano z zagadnieniami kształtowania procesu wymiany ładunku.

Istota działania dwucylindrowego dwusuwowego silnika z bezrozdzielaczowym układem wtrysku pneumatycznego i dwukierunkowym przepływem spalin (wg koncepcji prof. S. Jarnuszkiewicza – schemat na rys. 1) polega na tym, że przestrzenie robocze są połączone tak, aby po odsłonięciu przez tłok otworu wlotowego jednego końca przewodu, gazy spalinowe mogły w niewielkiej ilości przedostawać się do komory spalania drugiego cylindra, zabierając po drodze wcześniej dozowane w odpowiedniej ilości paliwo. Wprowadzone przed przedmuchem spalin paliwo ogrzewa się od ścianek przewodu i intensywnie paruje, dzięki czemu uzyskuje się wysoki stopień odparowania i rozpylenia paliwa. W celu określenia stopnia odparowania paliwa analizie poddano wiele zjawisk w przewodzie gazowym. Interesujące jest wyznaczenie, jaka część dostarczonego paliwa do przewodu gazowego odparowuje w czasie, w którym nie występuje jeszcze przepływ spalin.

Rozpatrywanie tych zagadnień wynika z przekonania, że postęp w silnikach spalinowych jest możliwy dzięki doskonaleniu systemu zasilania bazującego na pneumatycznym wtrysku paliwa bezpośrednio do cylindra. Ponadto przy zastosowaniu tego systemu możliwe jest uwarstwienie ładunku, co w konsekwencji umożliwia jakościową regulację mocy silnika. Sterowanie momentem wtrysku oraz dawką wtryskiwanej mieszaniny dokonywane jest w sposób elektroniczny, co pozwala dodatkowo optymalizować ten proces w czasie rzeczywistym.

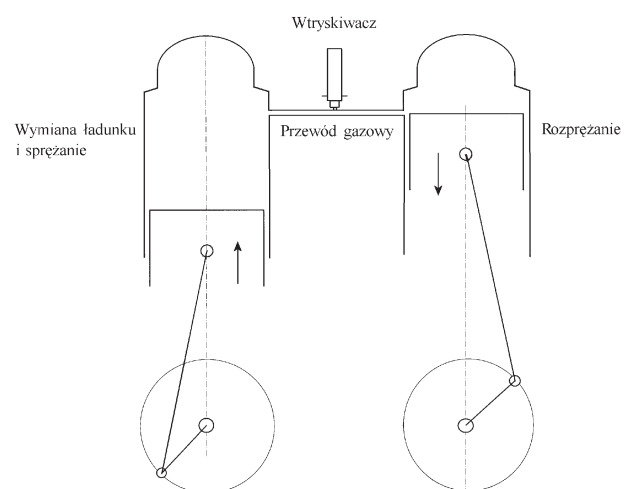


Fig. 1. Schematics of a distributorless pneumatic system with a bidirectional exhaust gas flow

Rys. 1. Schemat bezrozdzielaczowego systemu wtrysku pneumatycznego z dwukierunkowym przepływem spalin

The basis for the analysis is Stephen's formula [3]:

$$\dot{m} = - \frac{D_c}{R_p \cdot T} \cdot \frac{P}{P - P_p} \cdot \frac{dP_p}{dn} \quad (1)$$

where: \dot{m} – stream of the mass of the vaporizing droplet, D_c – vapor diffusion coefficient in the gas referred to the gradient of concentration, P – pressure of the center ośrodk, T – temperature center ośrodk, R_p – gas constant of the fuel vapor, P_p – partial pressure of the fuel vapor in a given distance from the surface of the liquid, dP_p/dn – fuel vapor partial pressure gradient in the normal direction to the surface.

Assuming that the fuel vapor concentration gradient occurs only in the surface layer of thickness δ , we will obtain the boundary conditions:

$$\begin{aligned} \text{for } n = 0 & \quad P_p = P_s \\ \text{for } n = \delta & \quad P_p = P_{\text{par}} \end{aligned}$$

where: P_s – partial pressure of the saturated vapor on the surface of the droplet, P_{par} – mean partial pressure of the vapor outside the zone of concentration gradient occurrence.

The notation of the Stephen's formula can thus be:

$$\dot{m} \int_0^\delta dn = - \frac{D_c \cdot P}{R_p \cdot T} \int_{P_s}^{P_{\text{par}}} \frac{dP_p}{(P - P_p)} \quad (2)$$

after conversions and integration

$$\dot{m} n / \delta = - \frac{D_c \cdot P}{R_p \cdot T} \ln(P - P_p) / P_s^{P_{\text{par}}} \quad (3)$$

$$\dot{m} \delta = - \frac{D_c \cdot P}{R_p \cdot T} [\ln(P - P_{\text{par}}) - \ln(P - P_s)] \quad (4)$$

we obtain:

$$\dot{m} = \frac{D_c \cdot P}{\delta \cdot R_p \cdot T} \ln \frac{P - P_s}{P - P_{\text{par}}} \quad (5)$$

For low speeds the Nusselt's number can be determined from the dependence:

$$Nu = 2 + 0,16 \cdot Re^{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

If, for the conditions in the gas conduit, the Reynolds' number $Re \rightarrow 0$, we can assume that the Nusselt's number $Nu = 2$.

For the exchange of mass two formulas apply. According to the Fick's law:

$$\dot{m} \approx D_p \frac{P_s - P_{\text{par}}}{\delta} \quad (7)$$

and

$$\dot{m} = \beta_p (P_s - P_{\text{par}}) \quad (8)$$

where: β_p – mass exchange coefficient compared to the pressure gradient, D_p – diffusion coefficient compared to the pressure gradient.

β_p coefficient can be expressed by a diffusion Nusselt's number for the mass exchange:

Symulacje przeprowadzono dla wybranego punktu w polu pracy silnika. Doboru dokonano dla optymalnych, z punktu widzenia ograniczenia straty wylotowej, parametrów procesu wymiany ładunku. Skoncentrowano się na uzyskaniu, pod koniec tego procesu, wzrostu ciśnienia przed zamknięciem okna wylotowego. Wiadomo bowiem, że zjawisko to utrudnia odpływ świeżego ładunku z cylindra. Możliwe jest również cofnięcie części świeżego ładunku z przewodu wylotowego do cylindra, co jeszcze bardziej polepsza napełnienie.

2. Odparowanie paliwa w przewodzie gazowym

Paliwo dostarczane jest do przewodu w pewnym czasie, po którym następuje przerwa aż do otwarcia otworu przewodu i przedmuchu spalin.

Zakłada się, że:

- prędkość obrotowa wału korbowego silnika jest stała i niezmienna w czasie i wynosi 2400 1/min,
- prędkości przepływu są bardzo małe,
- paliwo jest równomiernie rozłożone na ścianie przewodu gazowego i tworzy na niej film paliwowy o grubości g ,
- w zakresie elementarnego przedziału czasu gazy są doskonałe, a parametry fizyczne stałe,
- nie uwzględnia się wpływu par na parametry termofizyczne gazu, a gaz jest czystym powietrzem,
- ilość ciepła zużytego na odparowanie paliwa, ogrzanie par i samego paliwa nie wpływa na temperaturę i ciśnienie gazu,
- gradient koncentracji par paliwa i gradient temperatury pokrywają się i występują w warstwie powierzchniowej o grubości δ .

Podstawą przeprowadzenia analizy jest wzór Stefana [3] (1),

gdzie: \dot{m} – strumień masy parującej kropli, D_c – współczynnik dyfuzji par w gazie odniesiony do gradientu koncentracji, P – ciśnienie ośrodk, T – temperatura ośrodk, R_p – stała gazowa par paliwa, P_p – ciśnienie cząstkowe par paliwa w bieżącej odległości od powierzchni cieczy, dP_p/dn – gradient ciśnienia cząstkowego par w kierunku normalnym do powierzchni.

Przy założeniu, że gradient koncentracji par występuje tylko w warstwie powierzchniowej o grubości δ , otrzymamy warunki brzegowe:

$$\begin{aligned} \text{dla } n = 0 & \quad P_p = P_s \\ \text{dla } n = \delta & \quad P_p = P_{\text{par}} \end{aligned}$$

gdzie: P_s – ciśnienie cząstkowe pary nasyconej na powierzchni kropli, P_{par} – uśrednione ciśnienie cząstkowe pary poza strefą występowania gradientu koncentracji.

Można więc wzór Stefana zapisać w postaci (2).

Po scałkowaniu i przekształceniach (3) i (4) otrzymuje się (5).

Dla małych prędkości liczba Nusselta może być wyznaczona z zależności (6).

Jeżeli dla warunków panujących w przewodzie gazowym liczba Reynoldsa $Re \rightarrow 0$, to można przyjąć, że liczba Nusselta $Nu = 2$.

$$\text{Nu}_D = \frac{\beta_p l}{D_p} \quad (9)$$

where: l – characteristic dimension.

After simplification:

$$\frac{D_p}{\delta} = \beta_p \quad (10)$$

and conversion we obtain:

$$\delta \approx \frac{l}{\text{Nu}_D} \quad (11)$$

Because, according to the adopted assumptions, the temperature and vapor concentration gradients are the same, mass and heat exchange processes are similar, we can assume:

$$\text{Nu} \approx \text{Nu}_D$$

Hence, after considering the condition (6):

$$\delta = \frac{l}{2} \quad (12)$$

where the characteristic dimension l is equal to the thickness of the fuel film. After introducing this dependence into the converted Stephen's formula we obtain:

$$\dot{m} = \frac{D_c \cdot 2}{g} \cdot \frac{P}{R_p \cdot T} \cdot \ln \frac{P - P_s}{P - P_{\text{par}}} \quad (13)$$

where g – fuel film thickness.

Denoting the vaporization area by F and introducing increments instead of a differential, the amount of vaporized fuel in time $\Delta\tau$ we can calculate from the formula:

$$\Delta m = \frac{2 \cdot D_c \cdot P \cdot F}{g \cdot R_p \cdot T} \Delta\tau \cdot \ln \frac{P - P_s}{P - P_{\text{par}}} \quad (14)$$

The volume of fuel in the gas conduit amounts to:

$$V_{\text{pal}} = \frac{B_o - \sum \Delta m}{\rho_{\text{pal}}} \quad (15)$$

where: B_o – fuel dose per cycle, $\sum \Delta m$ – amount of fuel already vaporized, ρ_{pal} – fuel density.

Assuming that the cross section of the conduit is round and the fuel forms an even film on the walls we analyze fuel in the shape of a cylinder of length equal to the length of the conduit, external diameter equal to the internal diameter of the conduit and a variable internal diameter depending on how much fuel remains in the liquid and how much in the gaseous form.

Current film thickness amounts to:

$$g = r_{\text{prz}} - r_1 = r_{\text{prz}} - \sqrt{r_{\text{prz}}^2 - \frac{B_o - \sum \Delta m}{l_{\text{prz}} \pi \rho_{\text{pal}}}} \quad (16)$$

where: r_{prz} – radius of the gas conduit, l_{prz} – length of the gas conduit, r_1 – radius of the cylinder that is formed by the gas in the conduit.

Dla wymiany masy obowiązują dwa równania. Zgodnie z prawem Ficka (7) oraz (8),

gdzie: β_p – współczynnik wymiany masy odniesiony do gradientu ciśnienia, D_p – współczynnik dyfuzji odniesiony do gradientu ciśnienia.

Współczynnik β_p może być wyrażony za pomocą dyfuzyjnej liczby Nusselta dla wymiany masy (9), gdzie: l – wymiar charakterystyczny.

Po uproszczeniu (10) i przekształceniu otrzymamy (11).

Ponieważ zgodnie z przyjętymi założeniami gradienty temperatury i koncentracji par paliwa pokrywają się, więc wobec podobieństwa procesów wymiany ciepła i masy można przyjąć:

$$\text{Nu} \approx \text{Nu}_D$$

Zatem po uwzględnieniu warunku (6) otrzymano (12), gdzie wymiar charakterystyczny l w naszym przypadku jest równy grubości filmu paliwowego. Po wstawieniu zależności do przekształconego wzoru Stefana otrzymujemy (13), gdzie g – grubość filmu paliwowego.

Oznaczając powierzchnię parowania przez F i wprowadzając przyrosty zamiast różniczek, ilość i paliwa odparowanego w określonym czasie $\Delta\tau$ obliczamy ze wzoru (14).

Objętość paliwa występująca w przewodzie gazowym wynosi (15),

gdzie: B_o – dawka paliwa na cykl, $\sum \Delta m$ – ilość paliwa już odparowana, ρ_{pal} – gęstość paliwa.

Przy założeniu, że przekrój przewodu jest okrągły i paliwo tworzy równomierny film na ściankach analizowane jest paliwo w kształcie walca o długości równej długości przewodu, średnicy zewnętrznej równej średnicy wewnętrznej przewodu gazowego i średnicy wewnętrznej zmiennej w zależności od tego, ile paliwa pozostaje w postaci ciekłej, a ile w postaci gazowej.

Bieżąca grubość filmu paliwowego wynosi (16), gdzie: r_{prz} – promień przewodu gazowego, l_{prz} – długość przewodu gazowego, r_1 – promień walca, jaki tworzy gaz znajdujący się w przewodzie.

Powierzchnia styku paliwa z gazem wynosi (17).

Przedział czasu, w którym analizowany jest proces parowania określony jest przez sposób dawkowania paliwa. Doprowadzanie paliwa do przewodu gazowego trwa określony czas $\Delta\tau_1$, po którym następuje przerwa $\Delta\tau_2$ aż do fazy przedmuchu spalin przez przewód gazowy. Stopień odparowania paliwa mierzony jest w czasie:

$$\Delta\tau = \Delta\tau_1 + \Delta\tau_2$$

Mając wszystkie wielkości i korzystając z przekształconego wzoru Stefana, można wyliczyć, która część paliwa dostarczonego do przewodu gazowego odparowała w określonym czasie $\Delta\tau$. W symulacji użyto programu CFD Phoenics i po wprowadzeniu danych uzyskano szereg wyników, przedstawionych kolejno w postaci wydruków. Poniższe rysunki i wykresy obrazują wyniki badań modelowych w tym zakresie. Dostarczanie paliwa zamodelowano do przewodu gazowego (zgodnie z wcześniejszymi założeniami)

The contact area of the fuel with gas is:

$$F = 2\pi r_1 l_{prz} = 2\pi l_{prz} \sqrt{r_{prz}^2 - \frac{Bo - \Sigma \Delta m}{l_{prz} \pi \rho_{pal}}} \quad (17)$$

The time range in which the vaporization process is analyzed is determined by the manner of fuel dosage. Delivering the fuel to the gas conduit takes a specified period of time $\Delta\tau_1$, after which a break occurs $\Delta\tau_2$ until the phase of gas conduit scavenging. The extent of fuel vaporization is measured in time:

$$\Delta\tau = \Delta\tau_1 + \Delta\tau_2$$

Having all the quantities and using the converted Stephen's formula we can calculate what portion of fuel delivered to the gas conduit evaporated in a given time $\Delta\tau$. In the simulation the software program CFD Phoenics was used and after entering the data a series of results were obtained shown in the form of printouts. The images and graphs below show the results of the model tests in this respect. The fuel delivery was modeled (according to previous assumptions) in the phase when the flow of the medium seizes. A case was analyzed when the onset of the fuel dosage was set at 45 CA i.e. in the beginning of this phase. The fuel dose was released for 23.5 CA.

3. Fuel film distribution

The fuel film distribution inside the gas conduit 40 CA before TDC is shown in Fig. 2. It shows the projection view of the fuel film distribution in the axial plane of this conduit and the axis of the nozzle. Characteristic is the representation of the first phase of the fuel film formation on the lower wall of the gas conduit while the fuel dosage is executed from the upper wall of the conduit, hence symmetrically from the opposite side. Inside this projection there is an area of the greatest fuel film thickness. Its value decreases symmetrically, gradually in all directions on the internal surface of the conduit. The maximum diameter of this area in this phase of the process of fuel dosage and vaporization is the diameter of the gas conduit.

The fuel film distribution inside the conduit 31 CA before TDC, i.e. 9 CA later than in the previous case has been shown in Fig. 3. We can observe here an increase in the fuel film thickness by 15 times as compared to the previous case at similar distribution alongside the axis of the conduit. This increase is related to the still continuing process of fuel dosage.

After the fuel dosage ceases we can observe the fuel film decrease in the given area. This particular moment – 5.5 CA after fuel dosage to the conduit ceases – has been shown in Fig. 4. The maximum thickness of the fuel film decreased by 34% in comparison to the previous case.

The fuel film further decrease, after the fuel dosage ceases, is accompanied by the process of its circumferential penetration on the internal surface of the gas conduit in the fuel dosage zone. The onset of this phase has been shown in Fig. 5.

w fazie, gdy ustaje w nim przepływ czynnika. Rozpatrzono przypadek, gdy początek dawkowania paliwa ustalony był na 45°OWK przed GZP, a zatem na początku tej fazy. Dawka paliwa wyzwalana była przez 23,5°OWK.

3. Rozkład filmu paliwowego

Rozkład filmu paliwowego wewnątrz przewodu gazowego 40°OWK przed GZP pokazano na rys. 2. Przedstawia on rzut rozkładu filmu paliwowego w płaszczyźnie osi tego przewodu i osi otworu dawkowania paliwa. Charakterystyczne jest ukazanie pierwszej fazy tworzenia się filmu paliwowego, na dolnej ściance przewodu gazowego, przy dawkowaniu od górnej ścianki przewodu, a zatem symetrycznie z przeciwnej strony. W środku tego rzutu znajduje się obszar o największej grubości filmu paliwowego. Jego wartość zmniejsza się symetrycznie, stopniowo we wszystkich kierunkach na powierzchni wewnętrznej przewodu gazowego. Maksymalna średnica obszaru w tej fazie procesu dawkowania i odparowania paliwa jest rzędu średnicy przewodu gazowego.

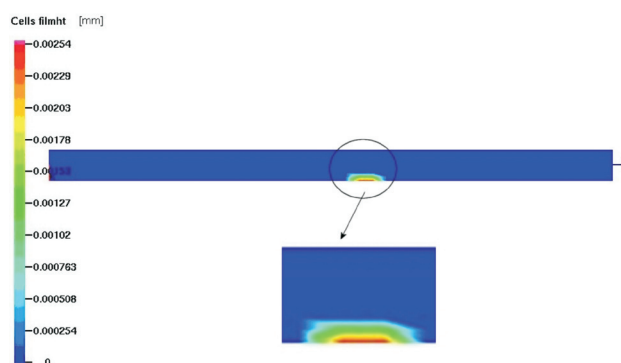


Fig. 2. Fuel film distribution inside the gas conduit 40 CA before TDC

Rys. 2. Rozkład filmu paliwowego wewnątrz przewodu gazowego 40°OWK przed GZP

Natomiast rozkład filmu paliwowego wewnątrz przewodu gazowego 31°OWK przed GZP, a zatem 9°OWK później niż w przypadku poprzednim przedstawiono na rys. 3. Można tutaj zaobserwować 15-krotne zwiększenie wartości grubości filmu paliwowego w stosunku do przypadku poprzedniego, przy podobnym jego rozkładzie wzdłuż osi przewodu. To zwiększenie wartości grubości filmu paliwowego związane jest z trwającym jeszcze dawkowaniem paliwa.

Po zakończeniu dawkowania można zaobserwować zjawisko zmniejszenia wartości grubości filmu paliwowego w podanym obszarze. Właśnie taki moment, 5,5°OWK po zaprzestaniu dostarczania paliwa do przewodu gazowego, pokazano na rys. 4. Maksymalna wartość grubości filmu paliwowego zmniejszyła się o 34% w stosunku do przypadku poprzedniego.

Zjawisku dalszego ubytku grubości filmu paliwowego, po zaprzestaniu dostarczania paliwa, towarzyszy proces jego obwodowej penetracji po wewnętrznej powierzchni przewodu gazowego w strefie dawkowania. Początek tej fazy przedstawiono na rys. 5.

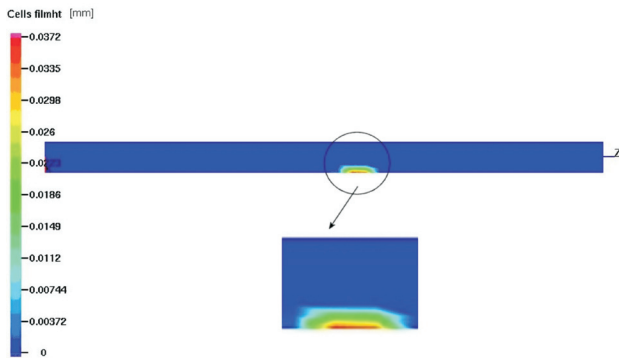


Fig. 3. Fuel film distribution inside the gas conduit 31 CA before TDC
Rys. 3. Rozkład filmu paliwowego wewnątrz przewodu gazowego 31°OWK przed GZP

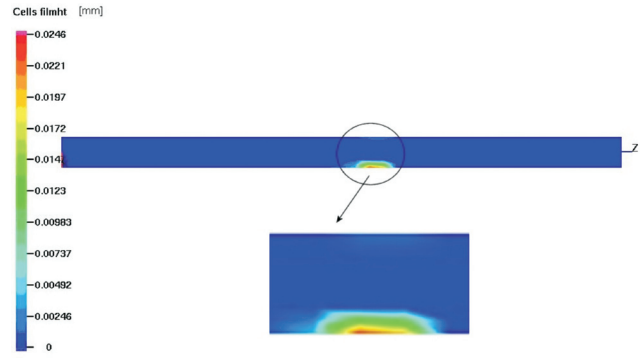


Fig. 4. Fuel film distribution inside the gas conduit 16 CA before TDC
Rys. 4. Rozkład filmu paliwowego wewnątrz przewodu gazowego 16°OWK przed GZP

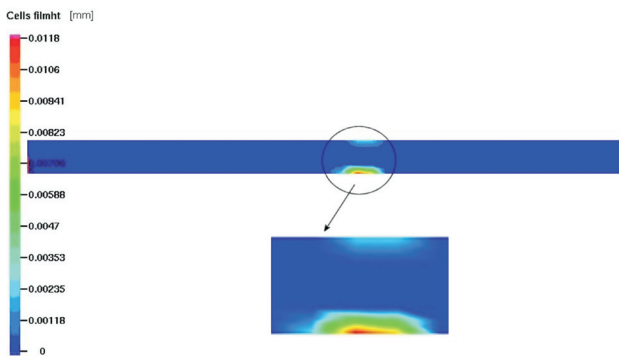


Fig. 5. Fuel film distribution inside the gas conduit 13 CA after TDC
Rys. 5. Rozkład filmu paliwowego wewnątrz przewodu gazowego 13°OWK po GZP

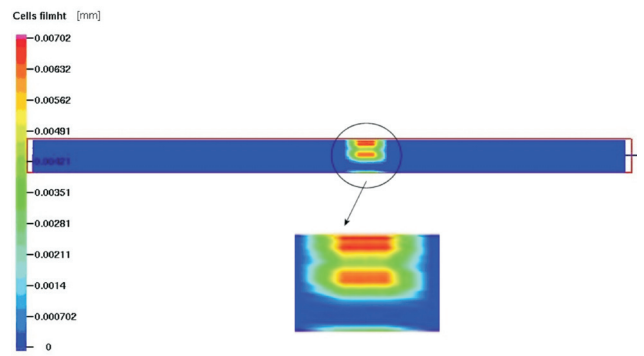


Fig. 6. Fuel film distribution inside the gas conduit 49 CA after TDC
Rys. 6. Rozkład filmu paliwowego wewnątrz przewodu gazowego 49°OWK po GZP

This phenomenon is clearly depicted by Fig. 6 showing the fuel film distribution inside the gas conduit 49 CA after TDC just before the onset of the injection phase. The greatest fuel film thickness occurs in the opposite area when the fuel dosage was in progress and the maximum thickness of the fuel film was 18% of the thickness shown in Fig. 3.

This can be clearer if we look at the cross section of the gas conduit in the fuel dosage zone.

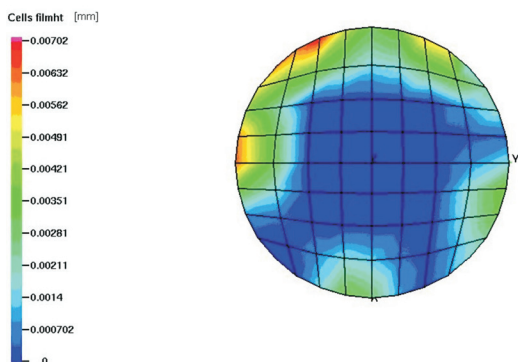


Fig. 7. Fuel film distribution inside the gas conduit 49 CA after TDC in the cross section perpendicular to the conduit axis

Rys. 7. Rozkład filmu paliwowego wewnątrz przewodu gazowego 49°OWK po GZP w przekroju prostopadłym do osi przewodu

Wyraźnie zjawisko to przedstawia rys. 6, ukazując rozkład filmu paliwowego wewnątrz przewodu gazowego 49° OWK po GZP tuż przed początkiem fazy wtrysku. Strefa o największej wartości grubości filmu paliwowego objęła obszar przeciwny w stosunku do obszaru, gdy dawkowane było paliwo, a wartość grubości maksymalnej filmu wyniosła 18% wartości zobrazowanej na rys. 3.

Czytelniej można przedstawić to, posługując się przekrojem poprzecznym przewodu gazowego w strefie dawkowania.

Właśnie tak zorientowany rozkład filmu paliwowego w strefie dawkowania ukazano na rys. 7. Wyraźnie można tutaj zaobserwować pola koncentracji paliwa, tuż przed początkiem fazy wtrysku do cylindra.

4. Rozkład par paliwa

Kolejne symulacje dotyczyły rozkładu fazy gazowej dawki paliwa. Podobnie jak dla rozkładu filmu paliwowego, w początkowym okresie dawkowania paliwa zwiększona koncentracja jego par występuje na dolnej ścianie przewodu gazowego przy dawkowaniu z przeciwnej strony. Również wymiar liczony wzdłuż osi przewodu gazowego rzutu przestrzni dawkowania, objętej parami paliwa, jest w tej fazie porównywalny z jego średnicą, co pokazuje rys. 8.

W strefie koncentracji filmu paliwowego można zaobserwować wstępne rozszerzenie przestrzeni objętej parami paliwa.

In such a way the presented fuel film distribution in the fuel dosage zone has been shown in Fig. 7. We can clearly see the field of fuel concentration just before the onset of the injection phase.

4. Fuel vapor distribution

Further simulations considered the distribution of the gaseous phase of the fuel dose. Similarly to the fuel film distribution, in the initial phase of the fuel dosage an increased concentration of the vapor occurs in the lower wall of the gas conduit while the fuel is dosed from the opposite side. The size of the cross section of the fuel dosage area covered with fuel vapor calculated alongside the conduit axis is in this phase comparable with its diameter which is shown in Fig. 8.

In the fuel film concentration zone we can observe a preliminary extension of the volume covered with fuel vapor.

The distribution of mass share of fuel vapor inside the gas conduit, 31 CA before TDC, has been shown in Fig. 9. We can observe that supplying further portions of fuel expands the volume covered with fuel vapor, limited to the same volume as shown in Fig. 8.

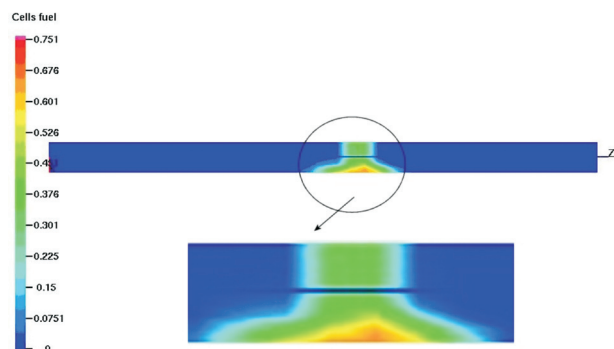


Fig. 9. Distribution of mass share of fuel vapor inside the gas conduit 31 CA before TDC

Rys. 9. Rozkład udziału masowego par paliwa wewnątrz przewodu gazowego 31°OWK przed GZP

After the fuel dosage seizes the volume covered with fuel vapor increases over three times as compared to the initial state. This moment, 5.5 CA after the fuel dosage seizes has been shown in Fig. 10.

The distribution of mass share of fuel vapor inside the gas conduit 13 CA after TDC has been shown in Fig. 11. The shift of the zone of increased concentration of fuel vapor to the area opposite to the initial state results from the process of circumferential penetration of the fuel film in the dosage area.

The distribution of the mass share of the fuel vapor inside the gas conduit 49 CA after TDC just before the onset of the injection phase has been shown in Fig. 12. The zone with the highest fuel concentration is located centrally but is not homogenous. This lack of homogeneity is related to the distribution of the fuel film thickness.

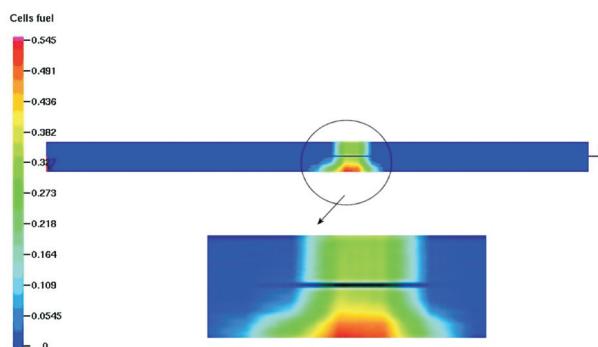


Fig. 8. Distribution of mass share of fuel vapor inside the gas conduit 40 CA before TDC

Rys. 8. Rozkład udziału masowego par paliwa wewnątrz przewodu gazowego 40°OWK przed GZP

Natomiast rozkład udziału masowego par paliwa wewnątrz przewodu gazowego, 31°OWK przed GZP, przedstawiono na rys. 9. Można zaobserwować, że dostarczanie kolejnych porcji paliwa intensyfikuje zjawisko rozszerzania przestrzeni objętej parami, ograniczone do tego samego obszaru, co pokazano na rys. 8.

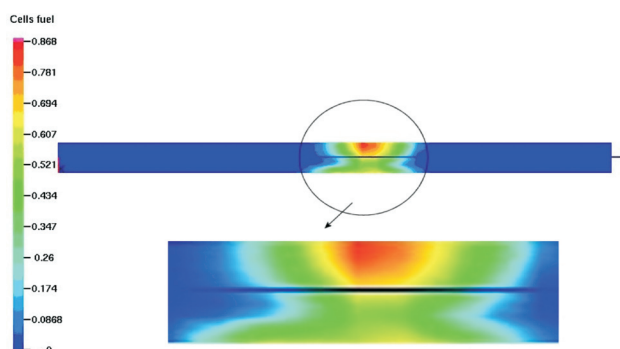


Fig. 10. Distribution of mass share of fuel vapor inside the gas conduit 16 CA before TDC

Rys. 10. Rozkład udziału masowego par paliwa wewnątrz przewodu gazowego 16°OWK przed GZP

Po zakończeniu dawkowania paliwa przestrzeń objęta parami paliwa zwiększyła swoją objętość ponad trzykrotnie w stosunku do stanu wyjściowego. Właśnie taki moment, 5,5°OWK po zaprzestaniu dostarczania paliwa do przewodu gazowego pokazano na rys. 10.

Z kolei rozkład udziału masowego par paliwa wewnątrz przewodu gazowego 13°OWK po GZP przedstawiono na rys. 11. Przemieszczenie strefy zwiększonej koncentracji par paliwa do obszaru przeciwnego w stosunku do stanu wyjściowego wynika z procesu obwodowej penetracji filmu paliwowego w przestrzeni dawkowania.

Rozkład udziału masowego par paliwa wewnątrz przewodu gazowego 49°OWK po GZP, tuż przed początkiem fazy wtrysku przedstawiono na rys. 12. Strefa o największej koncentracji par paliwa umiejscowiona jest centralnie, lecz ma niejednorodny charakter. Ta niejednorodność związana jest z uformowaniem rozkładu grubości filmu paliwowego.



Fig. 11. Distribution of mass share of fuel vapor inside the gas conduit 13 CA after TDC

Rys. 11. Rozkład udziału masowego par paliwa wewnątrz przewodu gazowego 13°OWK po GZP

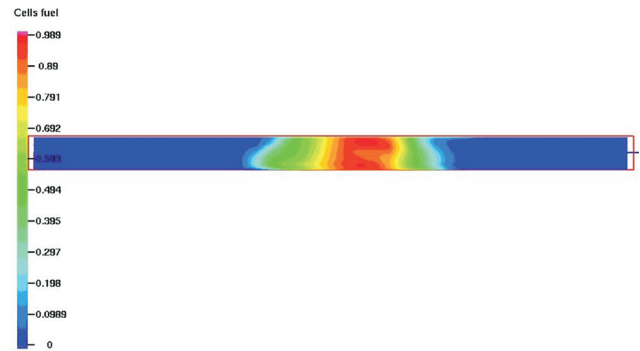


Fig. 12. Distribution of mass share of fuel vapor inside the gas conduit 49 CA after TDC

Rys. 12. Rozkład udziału masowego par paliwa wewnątrz przewodu gazowego 49°OWK po GZP

5. Summary

Fuel dosage to the gas conduit is performed twice in a single crankshaft revolution approximately 45 CA before TDC and the dosage lasts for 23.5 CA. From the assumed geometrical parameters of the pneumatic fuel injection system results that the time of the liquid fuel presence in the gas conduit is very short – approximately 100 CA. Nevertheless the extent of the fuel vaporization for given values of pressure and temperature in the gas conduit is high. Hence, the fuel is supplied to the cylinder in a gaseous and liquid state. Yet, due to a bi-directional nature of the scavenging of the conduit and the symmetrical distribution of the mass share of the fuel vapor inside the conduit at the moment of pneumatic injection, the presented fuel delivery system enables an even filling of both cylinders with a fuel exhaust mixture.

The results of the above simulations are synthetically presented in the graphs below. Figure 13 shows the point (PW) 50 CA after TDC when the injection phase begins (exhaust scavenging). We can, thus, state that the fuel present in the dosage area just before the onset of the injection has vaporized in 65% of the fuel dose per cycle.

The change of mass of the vaporized fuel per cycle as a function in time has been shown in Fig. 14. Due to the injection timing, the time for the fuel vaporization is limited to 95 CA which corresponds to 0.0066 s. According to previous estimates after this time 0.0015 g of fuel is still left to vaporize which constitutes approximately 35% of the fuel dose per cycle.

The speed of fuel vaporization related to the total mass of the fuel dose inside the gas conduit as a function in time has been shown in Fig. 15. The maximum value of the said speed is reached after 0.0047 s from the beginning of the fuel dosage, thus in accordance with the injection timing – 0.0019 s before the onset of the injection.

The course of changes of the average temperature of the charge inside the gas conduit as a function of time has been shown in Fig. 16. The minimum average temperature of the charge in the gas conduit in the dosage area is reached right after the fuel dosage ceases. Then during vaporization of the previously formed fuel film it stabilizes at a minimum

5. Podsumowanie

Dawkowanie paliwa do przewodu gazowego odbywa się dwukrotnie na 1 obrót wału korbowego ok. 45°OWK przed GZP, a okres dawkowania wynosi 23,5°OWK. Z przyjętych parametrów geometrycznych podanego systemu wtrysku pneumatycznego wynika, że czas przebywania ciekłego paliwa w przewodzie gazowym jest bardzo krótki, gdyż wynosi tylko około 100°OWK. Mimo to stopień odparowania paliwa, dla określonych wartości ciśnienia i temperatury w przewodzie gazowym, jest wysoki. Jak z tego zatem wynika, paliwo dostarczane jest do cylindra w formie gazowej i ciekłej. Jednak ze względu na dwukierunkowy charakter przedmuchu przewodu gazowego i symetryczny rozkład udziału masowego par paliwa, wewnątrz tego przewodu w chwili wtrysku pneumatycznego, prezentowany system zasilania umożliwia równomierne napełnienie obydwu cylindrów mieszaniną spalinowo-paliwową.

Wyniki przytoczonych dotychczas symulacji w sposób syntetyczny przedstawiają poniższe wykresy. Na rysunku 13 zaznaczono punkt (PW) 50°OWK po GZP, od którego rozpoczyna się faza wtrysku (przedmuchu spalin). Można zatem stwierdzić, że paliwo znajdujące się w przestrzeni dawkowania tuż przed początkiem wtrysku zostało odparowane w 65% dawki paliwa na cykl.

Zmianę masy odparowanego paliwa na cykl jako funkcji czasu przedstawiono na rys. 14. Dla uwarunkowań czasowych wynikających z geometrii rozrządu układu wtryskowego czas na proces odparowania paliwa ograniczony jest do 95°OWK, co odpowiada 0,0066 s. Zgodnie z wcześniejszymi oszacowaniami, po tym czasie pozostało do odparowania 0,0015 g paliwa, co stanowi ok. 35% dawki paliwa na cykl.

Natomiast szybkość odparowania paliwa w stosunku do całkowitej masy dawki paliwa wewnątrz przewodu gazowego jako funkcji czasu przedstawiono na rys. 15. Maksymalna wartość tej szybkości osiągnięta jest po 0,0047 s od początku dawkowania paliwa, a zatem zgodnie z uwarunkowaniami czasowymi wynikającymi z geometrii rozrządu układu wtryskowego 0,0019 s przed początkiem wtrysku.

average level and during the circumferential penetration of this film, on the internal surface of the gas conduit it gradually increases.

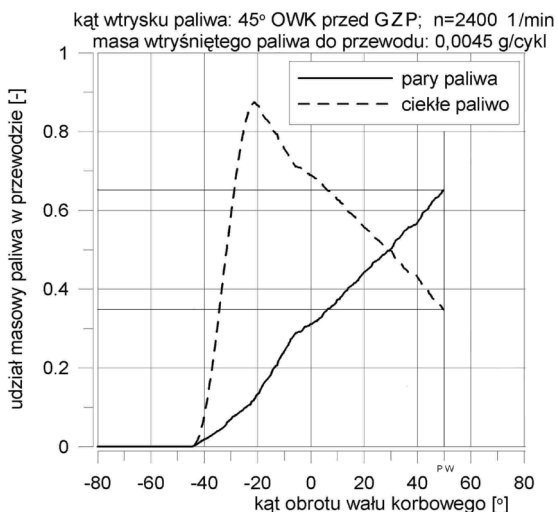


Fig. 13. Mass share of the vaporized fuel and mass share of the liquid fuel compared to the total mass of the fuel dose inside the gas conduit

Rys. 13. Udział masy odparowanego paliwa i udział masy ciekłego paliwa w stosunku do całkowitej masy dawki paliwa wewnątrz przewodu gazowego

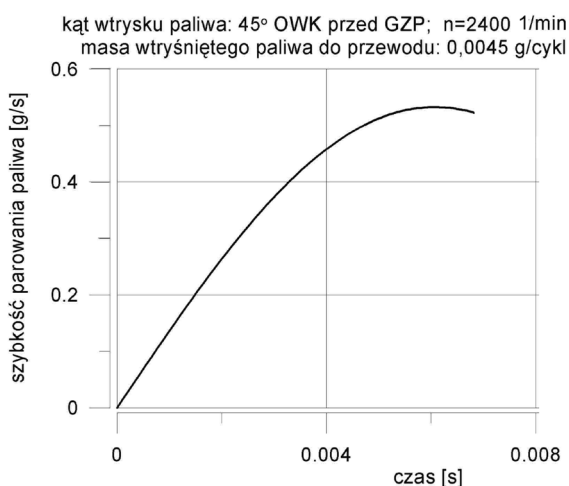


Fig. 15. The speed of fuel vaporization as opposed to the total fuel dose mass inside the gas conduit

Rys. 15. Szybkość odparowania paliwa w stosunku do całkowitej masy dawki paliwa wewnątrz przewodu gazowego

6. Conclusions

The value of the fuel dose in the presented pneumatic injection system depends mainly – for a given point of engine work – on the duration of the fuel dosage and the value of the backpressure in the gas conduit in the moment of dosage. The value of the pressure in the gas conduit depends on its length and diameter as well as the engine crankshaft revolution. During the calculations, the geometrical parameters of the gas conduit were constant, and due to the conduit’s short length the undulating impact (oddziaływanie falowe) of the conduit on the process of fuel vaporization was negligibly

Przebieg zmian średniej temperatury ładunku wewnątrz przewodu gazowego jako funkcji czasu przedstawiono na rys. 16. Minimalna średnia temperatura ładunku w przewodzie gazowym w przestrzeni dawkowania osiągnięta jest bezpośrednio po zakończeniu dostarczania paliwa. Następnie w okresie parowania równowagowego utworzonego już

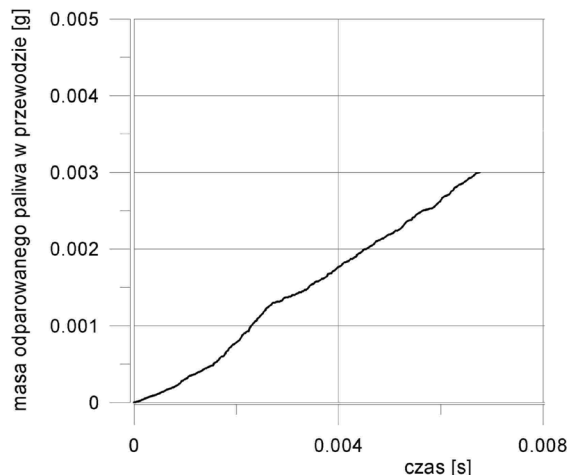


Fig. 14. The course of fuel vaporization inside the gas conduit

Rys. 14. Przebieg odparowania paliwa wewnątrz przewodu gazowego

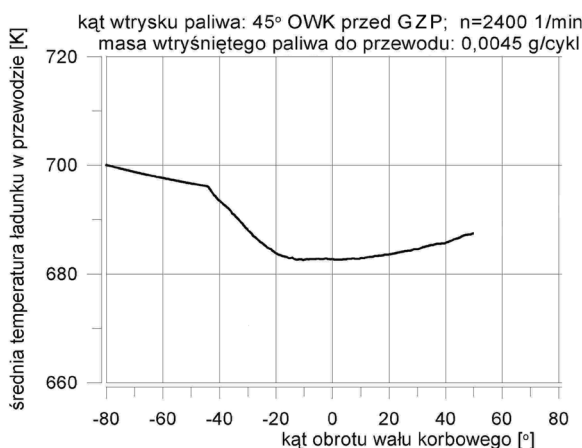


Fig. 16. The course of changes of average temperature of the charge inside the gas conduit

Rys. 16. Przebieg zmian średniej temperatury ładunku wewnątrz przewodu gazowego

filmu paliwowego stabilizuje się ona na minimalnym średnim poziomie, a w okresie obwodowej penetracji tego filmu, po wewnętrznej powierzchni przewodu gazowego w strefie dawkowania, stopniowo zwiększa swoją wartość.

6. Wnioski

Wartość dawki paliwa w prezentowanym systemie wtrysku pneumatycznego uzależniona jest, dla wybranego punktu w polu pracy silnika, głównie od czasu trwania okresu dawkowania i wartości przeciwcisnienia w przewodzie gazowym w chwili podawania paliwa. Wartość ciśnienia w przewodzie gazowym jest z kolei zależna od jego długości i średnicy oraz prędkości obrotowej wału korbowego silnika. W czasie obliczeń parametry geometryczne przewodu gazowego były

small. The research conducted at Krakow University of Technology shows that during the fuel dosage the said pressure has a constant value and does not greatly depend on the engine load. The results of the above presented simulations may turn out useful in constructional validation of the engine model under consideration. We can formulate the following conclusions and remarks:

1. The fuel film distribution inside the gas conduit is not stable.
2. In the initial phase, during and after the dosage, the distribution of the liquid phase of the fuel dose stabilizes on the surface of the gas conduit opposite the injector nozzle.
3. Then, until the moment of pneumatic injection it gradually penetrates (in circles) the fuel dosage area which is advantageous for the injection into the cylinder.
4. Fuel dosage into the gas conduit should initiate in the beginning of the phase when the exhaust flow in the conduit fades.
5. It has been shown that the course of the vaporization process has impact on the unevenness of the distribution of the gaseous phase of the fuel dose inside the gas conduit.
6. Due to a symmetrical distribution of the mass share of the fuel vapor, inside the conduit at the moment of pneumatic injection, the presented fuel supply system enables an even filling of both cylinders with the fuel exhaust mixture.

Abbreviations and nomenclature/Wykaz skrótów i oznaczeń

- d – diameter of the conduit/średnica przewodu [m]
 r – density/gęstość [kg/m³]
 m – mass/masa [kg]
 \dot{m} – unitary intensity of the medium flow/jednostkowe natężenie (zagęszczenie) przepływu czynnika [kg/(m²·s)]
 g – layer thickness/grubość warstwy [m]
 n – engine speed/prędkość obrotowa silnika [rpm/1/min]
 p – absolute pressure/ciśnienie absolutne (bezwzględne) [Pa]
 r – radius/promień [m]
 t, τ – time/czas [s]
 w – speed/prędkość [m/s]
 Bo – fuel dose/dawka paliwa [kg]
 D – gas medium diffusion coefficient/współczynnik dyfuzji czynnika gazowego [m²/s]
 F – face area at a given point of the conduit/pole przekroju w danym miejscu przewodu [m²]
 BDC – bottom dead center/dolny zwrotny punkt ruchu tłoka
 TDC – top dead center/górny zwrotny punkt ruchu tłoka
 (Nu) – Nusselt's number/liczba Nusselta [–]
 CA – crank angle/obrót wału korbowego
 PW – start of injection/początek wtrysku
 R – individual gas constant/indywidualna stała gazowa [J/(kg·K)]
 (Re) – Reynolds' number/liczba Reynoldsa
 β_p – mass exchange coefficient related to the pressure gradient/współczynnik wymiany masy odniesiony do gradientu ciśnień [s/m]
 δ – layer thickness/grubość warstwy [m]

Mr Wojciech Marek, PhD, MEng – doctor in the Faculty of Mechanical Engineering at Cracow University of Technology.

Dr inż. Wojciech Marek – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej.



stałe, a z uwagi na małą jego długość, oddziaływanie falowe przewodu na proces odparowania paliwa pomijalnie małe. Z przeprowadzonych na Politechnice Krakowskiej badań wynika, że w okresie dawkowania paliwa ciśnienie to ma stałą wartość i w niewielkim stopniu zależy od obciążenia silnika. Wyniki przytoczonych wyżej symulacji mogą być przydatne do weryfikacji konstrukcyjnej, będącego przedmiotem badań, modelu funkcjonalnego silnika. Można zatem sformułować następujące wnioski i uwagi:

1. Rozkład filmu paliwowego wewnątrz przewodu gazowego nie jest stabilny.
2. W początkowym okresie, w trakcie i po ustaniu dawkowania, rozkład fazy ciekłej dawki paliwa stabilizuje się na powierzchni przewodu gazowego przeciwległej do wylotu wtryskiwacza paliwa.
3. Następnie, aż do chwili wtrysku pneumatycznego, stopniowo penetruje „pierzścieniowo” przestrzeń dawkowania paliwa, co wpływa korzystnie na proces wtrysku do cylindra.
4. Dawkowanie paliwa do przewodu gazowego powinno być dokonywane na początku fazy zaniku przepływu spalin w tym przewodzie.
5. Ujawniono, że przebieg procesu odparowania wpływa na nierównomierność rozkładu fazy gazowej dawki paliwa wewnątrz przewodu gazowego.
6. Jednak ze względu na symetryczny rozkład udziału masyowego par paliwa, wewnątrz tego przewodu w chwili wtrysku pneumatycznego, prezentowany system zasilania umożliwia równomierne napełnienie obydwu cylindrów mieszaniną spalinowo-paliwową.

Artykuł recenzowany.

Bibliography/Literatura

- [1] Archer M., Bell G.: Advanced Electronic Fuel Injection Systems – An Emissions Solution for both Synerject Systems Integration, Balcatta, Australia, SAE Paper 2001-01-0010.
- [2] Bonnier G., Duret P.: IAPAC compressed air assisted fuel injection for high efficiency low emissions marine outboard two-stroke engines, SAE Paper 911849.
- [3] Kowalewicz A.: Tworzenie mieszanek i spalanie w silnikach o zapłonie iskrowym. WKiŁ. Warszawa 1984.
- [4] Kowalewicz A.: Wybrane zagadnienia samochodowych silników spalinowych. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej. Radom 2002.
- [5] Marek W., Mitaniec W.: Reduction of exhaust gas emission in a two-stroke engine with pneumatic fuel injection, SAE 2002-01-2168, Automotive Transport Technology Congress 2002.
- [6] Merkiś J.: Ekologiczne problemy silników spalinowych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 1998.
- [7] Postrzednik S., Żmudka Z.: Termodynamiczne oraz ekologiczne uwarunkowania eksploatacji tłokowych silników spalinowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2007.
- [8] Stanton D.W., Lippert A.M., Reitz R.D., Rutland C.J.: Influence of spray-wall interaction and fuel films on cold starting in direct injection diesel engines, SAE Paper 982584.
- [9] Stanton D.W., Rutland C.J.: Multi-dimensional modeling of fuel films in direct injection diesel engines, ASME Fall Technical Conference Madison 1997.