

OPTIMAL PARAMETERS OF ENGINE SYSTEMS OPERATING DURING ITS HEATING AFTER STARTING AT LOW TEMPERATURE

Józef Pszczółkowski, Kazimierz Koliński

Military Academy of Technology
Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warsaw, Poland
tel.: +48 22 6837146, fax: +48 22 6839765
e-mail: j.pszczolkowski@wme.wat.edu.pl

Abstract

The basic problem of combustion engine heating phase after its starting at low ambient temperature is emission of harmful for the environment exhaust gas components. Environment pollution by diesel engines is determined by exhaust gas smokiness which is measured using light extinction coefficient. Exhaust gas smokiness means outlet engine gas colouring by opaque components, absorbing or dissipating the light. As basic kinds of smoke, especially appearing at engine heating phase we can specify: white, black and blue smoke.

There is made the analysis of methods of limitation the emission of harmful for the environment diesel engine exhaust gas components after its starting with special attention to possibilities of optimisation the operating parameters of some engine systems. There are presented the exhaust gas smokiness characteristics for the AD4.236 diesel engine during its heating as functions of chosen construction, adjustment and exploitation parameters. Before the smokiness measurement there was realised a starting attempt of the engine prepared according to the starting procedures standards. Exhaust gas smokiness was measured using absorption smokiness measuring instrument. There was made the identification of the factors causing engine smokiness under its warming-up: low temperature of fuel, lubricating oil, air, cylinder walls and there was pointed the possibility of harmful for the environment exhaust gas components emission limitation using thermostarts (or other means of engine start-up aiding).

Keywords: combustion engines, start-up at low temperature, smokiness of the exhaust gases

OPTYMALNE PARAMETRY PRACY UKŁADÓW SILNIKA PODCZAS NAGRZEWANIA W NISKIEJ TEMPERATURZE

Streszczenie

Podstawowym problemem fazy nagrzewania silników spalinowych po uruchomieniu w niskiej temperaturze otoczenia jest emisja szkodliwych dla środowiska składników spalin. Zanieczyszczenie środowiska przez silniki o zapłonie samoczynnym jest determinowane przez stopień zadymienia ich spalin, którego miarą jest współczynnik ekstynkcji światła. Zadymienie spalin oznacza zabarwienie gazów wylotowych silnika przez składniki nieprzezroczyste, pochłaniające lub rozpraszające światło. Jako podstawowe rodzaje dymu, występujące szczególnie w fazie nagrzewania silnika, wyróżnia się: dym biały, czarny i niebieski.

Dokonano analizy metod ograniczenia emisji szkodliwych dla środowiska składników spalin silników o zapłonie samoczynnym po uruchomieniu, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości optymalizacji parametrów pracy wybranych układów silnika. Przedstawiono charakterystyki zadymienia spalin silnika typu AD4.236 podczas nagrzewania w funkcji wybranych parametrów konstrukcyjnych, regulacyjnych i eksploatacyjnych. Przed pomiarem dymienia wykonywano próbę rozruchu silnika przygotowanego zgodnie z procedurami badań rozruchowych. Pomiaru dymienia zadymienia spalin dokonywano za pomocą dymomierza absorpcyjnego. Dokonano identyfikacji czynników powodujących dymienie silnika w fazie nagrzewania: niska temperatura paliwa, oleju smarującego, powietrza, ścian cylindrów i wskazano możliwość ograniczenia emisji szkodliwych składników spalin poprzez stosowanie świec płomieniowych (lub innych urządzeń wspomagania rozruchu).

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, rozruch w niskiej temperaturze, zadymienie spalin

1. Wstęp

Do podstawowych problemów eksploatacji silników spalinowych niskiej temperaturze otoczenia należą problemy rozruchu oraz: rozruchowego zużycia i emisji toksycznych, szkodliwych dla środowiska składników spalin. Spaliny silników o zapłonie samoczynnym zawierają [3]: składniki gazowe (składniki powietrza i gazowe produkty spalania), ciekłe (niespalone paliwo i olej silnikowy) i stałe (sadza, ciężkie węglowodory). Do podstawowych składników szkodliwych spalin należą składniki gazowe (NO_x , SO_x , niespalone składniki paliw) oraz cząstki stałe – PM. Gazowe składniki spalin są przezroczyste i na ogół bezbarwne. Dymieniem nazywane jest zjawisko nieprzezroczystości i barwienia spalin przez zawarte w nich składniki. Intensywność dymienia zależy od ilości doprowadzonego do silnika powietrza, ilości, jakości rozpylenia i stopnia odparowania wtryskiwanego paliwa, obciążenia silnika oraz warunków termicznych jego pracy. Dymienie silnika jest wskaźnikiem jakości (nieefektywności) procesu spalania – istnieje zależność między stanem silnika a składem emitowanych spalin i ich toksycznością. Ze względu na zabarwienie wyróżnia się trzy rodzaje dymu:

- biały – występujący bezpośrednio po uruchomieniu silnika w niskiej temperaturze. Spaliny są zanieczyszczone cząstkami nie w pełni odparowanego, niespalonego paliwa oraz gazowymi produktami niecałkowitego i niezupełnego spalania, jak również skraplającą się parą wodną,
- niebieski – obserwowany, gdy część paliwa nie bierze udziału w procesie spalania, może występować tuż po rozruchu silnika oraz wskutek niezupełnego spalania oleju silnikowego,
- czarny – powstający, gdy część paliwa podlega niecałkowitemu spalaniu wskutek niedoboru tlenu – spalanie może rozpocząć się w okresie, gdy pewna część paliwa nie uległa jeszcze w pełni przemianom fizycznym.

Procedury badawcze emisji spalin stanowią przedmiot regulacji prawnych [4]. Podstawowym kryterium oceny spalin silników o zapłonie samoczynnym, ze względu na prostotę pomiarów i przyrządów jest stopień ich zadymienia – nieprzezroczystość. Emisję zanieczyszczeń widzialnych określa się wykorzystując metody optyczne, najczęściej absorpcyjne. Absorpcyjna metoda optyczna polega na określeniu przezroczystości spalin – współczynnika ekstynkcji światła, tj. osłabienia wiązki światła przechodzącego przez ośrodek w wyniku pochłaniania i rozpraszania. W układzie dymomierza współczynnik ekstynkcji światła k obliczany jest z zależności:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-kL}, \quad (1)$$

gdzie:

L – długość drogi światła w badanych spalinach,

Φ_0 – strumień świetlny wysyłany przez źródło światła dymomierza,

Φ – strumień świetlny dochodzący do komórki fotoelektrycznej po przejściu przez spaliny.

Zagrożenie skażenia środowiska zwiększa się wraz z rozwojem przemysłu, a jednym z jego aspektów jest rozwój motoryzacji. Zainteresowanie problemami ekologii wyraża się zarówno w ustanawianiu coraz bardziej restrykcyjnych przepisów dopuszczających silniki spalinowe do eksploatacji [1], opracowywaniu systemów spalania silników przyczyniających się do ograniczenia emisji niepożądanych składników spalin, jak też stosowaniu urządzeń (katalizatorów) [6] powodujących przemiany tych składników spalin poza komorami spalania silników.

W przypadku silników o zapłonie samoczynnym głównym problemem, zwłaszcza wobec wymagań przepisów EURO IV (i kolejnych ograniczeń poziomu emisji) jest emisja NO_x oraz cząstek stałych (PM). W okresie rozruchu zimnego silnika i jego nagrzewania, z powodu pogorszenia warunków tworzenia i spalania mieszanki paliwowo-powietrznej oraz nieefektywnego działania katalizatorów występuje zwiększona emisja węglowodorów (HC), CO i cząstek stałych. Problemy te stały się przedmiotem wielu badań i działań mających na celu skuteczne ograniczenie wielkości emisji. Podjęto również badania wielkości emisji w warunkach rozruchu i nagrzewania silnika po tzw. zimnym rozruchu [2, 3, 5, 6]. Zmniejszeniu emisji

szkodliwych składników spalin w okresie rozruchu i nagrzewania silników służą specjalne rozwiązania katalizatorów: nagrzewanych elektrycznie lub gazowo, montowanych blisko kolektorów wydechowych (katalizator wstępny) oraz absorberów węglowodorów.

We wstępnym okresie nagrzewania zimnego silnika po uruchomieniu następuje znacznie zwiększona emisja CO, HC i PM. W miarę nagrzewania silnika zmniejsza się wielkość emisji wymienionych składników spalin, a zwiększa się emisja tlenków azotu (NO_x). W warunkach zimnego rozruchu wielkość emisji HC i PM jest wielokrotnie większa, a emisji CO około dwukrotnie większa w stosunku do emisji w warunkach gorącego rozruchu [2]. Różnice są bardziej wyraźne we wstępnym okresie nagrzewania silnika, zwłaszcza około 30 s pracy. Należy jednak podkreślić, że określenie „zimnego rozruchu” jest na ogół związane z istnieniem równowagi termicznej między silnikiem a otoczeniem, zaś badania emisji szkodliwych składników spalin po tzw. zimnym rozruchu silnika są realizowane w warunkach laboratoryjnych wykonywania testów normatywnych, gdy temperatura silnika i otoczenia jest równa około 20°C.

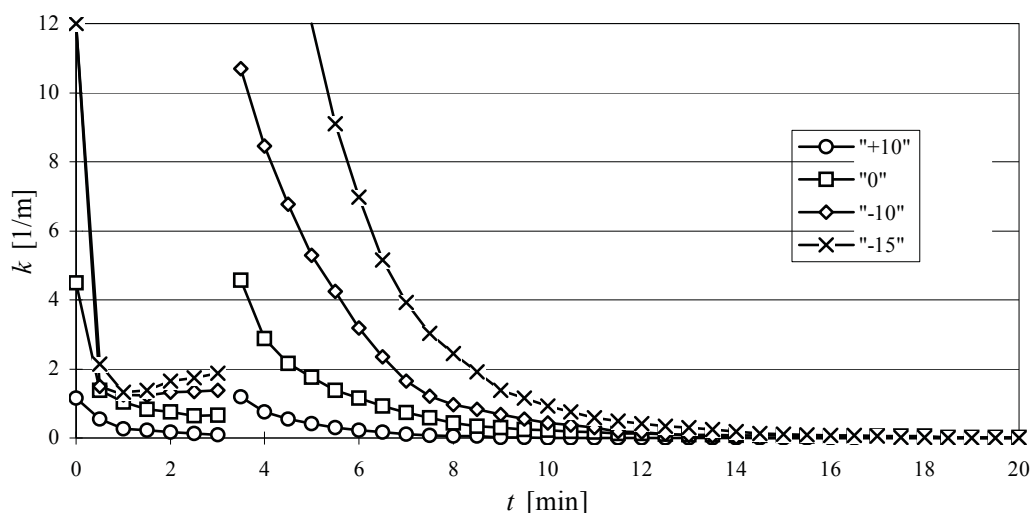
Brak jest więc w dostępnej literaturze zarówno wyników badań jak też i ocen czynników determinujących intensywność zadymienia spalin podczas nagrzewania silników po uruchomieniu w rzeczywiście niskiej temperaturze otoczenia, tzn. ujemnej według skali Celsjusza. Dlatego zrealizowano badania zadymienia spalin silnika o zapłonie samoczynnym podczas jego wygrzewania po uruchomieniu w niskiej temperaturze otoczenia. Celem badań było określenie czynników powodujących emisję nieprzeźroczystych składników spalin oraz wyznaczenie zależności zadymienia spalin od czynników o najistotniejszym wpływie na jego wielkość [5]. Prezentowane charakterystyki zadymienia spalin silnika AD4.236 uzyskano podczas jego badań w komorze niskich temperatur. Silnik zasilano olejem napędowym IZ-40. Pompa wtryskowa silnika nie była wyposażona w automatyczny przestawiacz kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, którego wartość statyczną ustalono równą 24° przed GMP. Przy tej wartości kąta uzyskiwano względnie wysokie wartości stopnia zadymienia spalin umożliwiające określenie jego zmian w zależności od różnych czynników. Pozostałe parametry regulacyjne układów silnika miały wartości zgodne z ustawieniami standardowymi silnika. Podczas nagrzewania silnik pracował bez obciążenia z prędkością obrotową około 800 obr/min przez okres 3 minut, po czym zwiększano jego prędkość do wartości 1800 obr/min.

W związku z realizacją projektu badawczego KBN nr 4T12D01929 pt. „Opracowanie metod ograniczenia emisji toksycznych składników podczas pracy silnika w niskiej temperaturze otoczenia” wyniki tych badań mogą wskazywać także możliwe sposoby skutecznego ograniczenia emisji szkodliwych składników spalin w okresie nagrzewania silnika po uruchomieniu w niskiej temperaturze otoczenia.

2. Przyczyny zadymienia spalin silnika podczas nagrzewania

Podstawowym problemem badań zadymienia spalin silnika o zapłonie samoczynnym po jego uruchomieniu jest określenie wpływu temperatury oraz jego zmian w czasie nagrzewania silnika. Do badań zadymienia spalin silnik był przygotowywany zgodnie z procedurami badań rozruchowych, co w szczególności oznacza zapewnienie równowagi termicznej między silnikiem – obiektem badań i otoczeniem. Na rys. 1 przedstawiono zależność zadymienia spalin silnika AD4.236 od czasu jego nagrzewania w różnej temperaturze otoczenia (równej początkowej wartości temperatury silnika).

Obniżenie temperatury początkowej silnika i jego otoczenia powoduje znaczny wzrost zadymienia spalin. W temperaturze otoczenia równej i wyższej od 0°C przezroczystość spalin wzrasta w sposób monotoniczny w miarę nagrzewania silnika. Dym właściwie nie jest czarny, lecz od początku pracy silnika jest dymem niebieskim, którego powstawanie świadczy o niepełnym spalaniu paliwa. Stopień zaczernienia spalin zwiększa się skokowo po nagłym zwiększeniu prędkości obrotowej wału korbowego do 1800 obr/min. Jednak w krótkim czasie dym ponownie staje się niebieski, a jego przezroczystość wzrasta w miarę nagrzewania silnika.



Rys. 1. Zależność zadymienia spalin silnika AD4.236 podczas nagrzewania od czasu dla różnych wartości temperatury
 Fig. 1. The dependence of Ad4.236 engine exhaust gases smokiness on its warm-up time at different temperature

Nieco odmienny jest przebieg zmian wartości współczynnika ekstynkcji światła silnika wychłodzonego do temperatury -10°C i niższej w początkowym okresie pracy z prędkością obrotową 800 obr/min. Bezpośrednio po uruchomieniu silnika dym jest dymem białym silnie absorbującym i rozpraszającym światło. Spaliny zawierają bardzo dużą ilość nie w pełni odparowanych kropelek paliwa. W miarę nagrzewania silnika warunki tworzenia mieszanki palnej i jej spalania poprawiają się, zmniejsza się zawartość kropelek paliwa i wartość współczynnika ekstynkcji światła intensywnie zmniejsza się. Jednak po czasie pracy 1 - 1,5 minuty wartość współczynnika ponownie wzrasta, przy czym zabarwienie spalin zmienia się z mlecznobiałego na szare, co świadczy o zwiększeniu w nich zawartości sadzy – stają się one coraz bardziej czarne. Po zwiększeniu wartości prędkości obrotowej silnika, w miarę jego nagrzewania przezroczystość spalin staje się większa, co oznacza, że zawartość niespalonych cząstek stałych zmniejsza się.

Na poziom zadymienia spalin silnika wpływ mają czynniki determinujące odmiennosc warunków przebiegu procesów tworzenia i spalania mieszaniny paliwa i powietrza w stosunku do normalnej, eksploatacyjnej jego pracy. Zatem dla warunków nagrzewania silnika po uruchomieniu w niskiej temperaturze można wskazać następujące przyczyny zwiększonego dymienia:

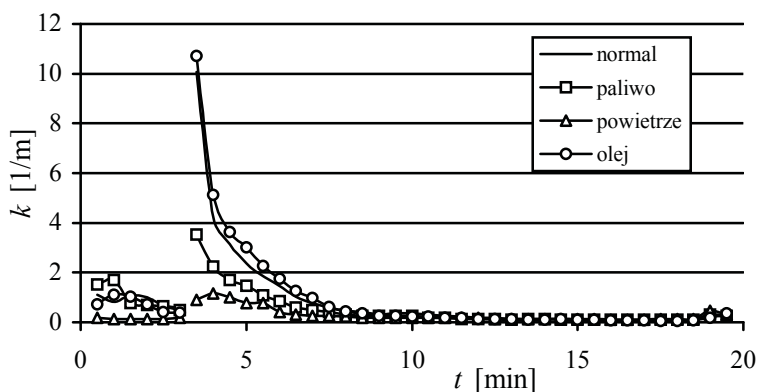
- niska temperatura ścianek komory sprężania w cylindrach,
- niska temperatura paliwa wtryskiwanego do cylindrów silnika,
- niska temperatura powietrza zasysanego do cylindrów,
- niska temperatura oleju smarującego silnika, wzrost jego lepkości, a w efekcie wzrost momentu oporów wewnętrznych silnika, dla którego zrównoważenia niezbędne jest spalanie zwiększonej ilości paliwa.

Identyfikacji istotności wpływu poszczególnych czynników na wartość współczynnika ekstynkcji światła w spalinach silnika AD4.236 po jego uruchomieniu dokonano poprzez ograniczenie ich indywidualnego negatywnego oddziaływania na funkcjonowanie silnika w okresie nagrzewania. Eliminację wpływu poszczególnych czynników przeprowadzono w następujący sposób (te badania zrealizowano w temperaturze otoczenia -10°C):

- temperatura paliwa – nagrzewano strumieniem ciepłego powietrza pompę wtryskową silnika oraz napełniono zbiornik zasilający silnik paliwem o podwyższonej do około 40°C temperaturze bezpośrednio przed jego uruchomieniem,
- temperatura powietrza – bezpośrednio połączono kolektor dolotowy silnika z otoczeniem komory, w którym temperatura powietrza była równa $+24^{\circ}\text{C}$,
- temperatura oleju – napełniono miskę olejową silnika przed uruchomieniem olejem smarującym o temperaturze około $+50^{\circ}\text{C}$.

Wyniki badań wpływu elementarnych czynników na zadymienie spalin przedstawiono na rys. 2, gdzie poszczególne symbole legendy wykresu oznaczają (na rys. nr 2, 3):

- *normal* – nagrzewanie silnika po standardowym przygotowaniu do próby badawczej;
- *paliwo* – nagrzewanie silnika zasilanego paliwem o podwyższonej temperaturze;
- *powietrze* – silnik zasilany powietrzem z otoczenia komory niskich temperatur;
- *olej* – próba badawcza, w której zastosowano olej o podwyższonej temperaturze;
- *świeca* – badanie dymienia silnika z zastosowaniem świecy płomieniowej.



Rys. 2. Zmiany współczynnika ekstynkcji światła w spalinach nagrzewanego silnika AD4.236 podczas prób badawczych zadymienia spalin

Fig. 2. The light extinction coefficient changes in warmed-up AD4.236 engine exhaust gases during its smokiness research

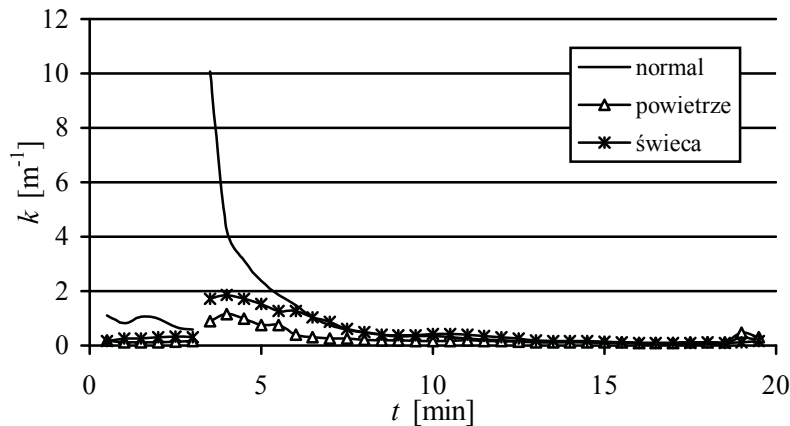
Charakterystycznym jest praktycznie niezauważalny wpływ na poziom dymienia silnika temperatury oleju smarującego, a więc jego lepkości i momentu oporu silnika – przebieg zmian współczynnika jest zbliżony do zarejestrowanego podczas próby normalnej, a nawet jest on nieznacznie większy. Bardzo istotny jest natomiast wpływ temperatury powietrza jak i paliwa zasilającego silnik. Szczególny, a nawet zaskakująco duży wpływ na poziom zadymienia spalin ma temperatura zasysanego do cylindrów silnika powietrza. Analiza wpływu wymienionych czynników pozwala także na stwierdzenie, że obniżona temperatura ścianek cylindra nie jest czynnikiem o istotnym znaczeniu dla emisji nieprzeźroczystych składników spalin. Wskazuje na to m.in. rezultat badania zadymienia w temperaturze otoczenia $+10^{\circ}\text{C}$ (rys. 1) w odniesieniu do wyniku uzyskanego przy zasilaniu silnika ciepłym powietrzem (rys. 2 – „powietrze”).

Wobec tak istotnego obniżenia stopnia zadymienia spalin przez podgrzane powietrze przeprowadzono badania dymienia silnika z użyciem świecy płomieniowej w okresie jego nagrzewania (rys. 3). Zadaniem świecy płomieniowej jest właśnie podgrzanie powietrza zasysanego do cylindrów silnika w okresie jego uruchamiania – działanie wspomagające rozruch. Świeca może być użyta także w okresie pracy – nagrzewania silnika i wówczas jej zadaniem może być poprawa efektywności spalania paliwa, a przez to istotne zmniejszenie emisji cząstek stałych.

Silnik AD4.236 jest wyposażony w świecę płomieniową SINTEROM 12 V. Dla zapewnienia prawidłowego działania dokonano odpowiednich modyfikacji jej usytuowania i regulacji [2]. Dzięki temu świeca powodowała prawidłowo zapłon i spalanie paliwa podczas rozruchu i przy prędkości obrotowej 800 obr/min, zaś przy prędkości 1800 obr/min płomień był zdmuchiwany przez strumień powietrza o dużej prędkości zasysanego do cylindrów silnika.

Wynik badania wskazuje, że skuteczność działania świecy w zakresie ograniczenia zadymienia spalin nagrzewanego silnika jest duża. Podkreślenia wymaga fakt, że przy zastosowaniu świecy płomieniowej podczas rozruchu i nagrzewania silnika (była ona używana do uruchomienia silnika w każdej próbie badawczej) nie występuje okres białego dymu, a więc silnik nie emituje do atmosfery niespalonych, a nawet nie w pełni odparowanych kropelek paliwa. Stąd świece płomieniowe powinny znaleźć powszechne zastosowanie i być używane podczas uruchamiania

silników o zapłonie samoczynnym już przy wartościach temperatury obniżonych do około 0°C, a nie tylko najniższych temperaturach otoczenia, w których eksploatowane są silniki.



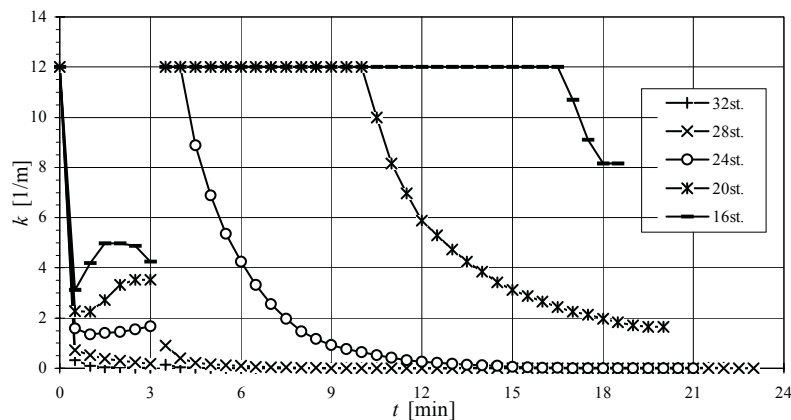
Rys. 3. Zmiany współczynnika ekstynkcji światła w spalinach podczas nagrzewania silnika AD4.236 z użyciem świecy płomieniowej

Fig. 3. The light extinction coefficient changes in AD4.236 engine exhaust gases warmed-up using thermostart

Po zwiększeniu prędkości obrotowej wału korbowego silnika, jak zaznaczono wyżej, spalanie paliwa przez świecę nie następowało. Utrzymywanie stanu zasilania elektrycznego uzwojeń świecy powodowało, że emitowała ona do kolektora dolotowego silnika strumień odparowanego paliwa, które wraz z powietrzem było zasysane do cylindrów. W tym okresie wartość współczynnika ekstynkcji światła była około dwukrotnie większa niż w próbie zasilania ciepłym powietrzem, ale ponad pięciokrotnie mniejsza niż podczas próby normalnej. Świadczy to o istotnym wpływie zasysanego strumienia par paliwa na proces zapłonu i spalania paliwa wtryskiwanego do cylindrów silnika. W tym przypadku pary paliwa działają więc analogicznie jak płyny wspomagające rozruch na bazie eteru.

3. Wybrane charakterystyki zadymienia spalin silnika podczas nagrzewania silnika

Badania charakterystyk regulacyjnych zadymienia spalin silnika AD4.236 realizowano w temperaturze -12 °C, w ustalonym cyklu zmian prędkości obrotowej. Na rys. 4 przedstawiono przebiegi zmian współczynnika ekstynkcji światła w funkcji czasu dla różnych wartości kąta wyprzedzenia wtrysku.



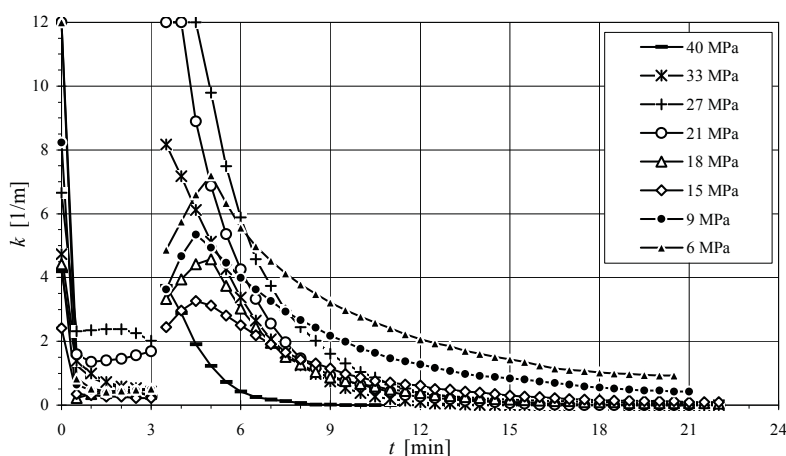
Rys. 4. Zmiany współczynnika ekstynkcji światła w spalinach nieobciążonego silnika AD4.236 w czasie jego nagrzewania dla wybranych wartości kąta wyprzedzenia wtrysku

Fig. 4. The light extinction coefficient changes in warmed-up AD4.236 engine exhaust gases for chosen angles of fuel injection timing

W miarę upływu czasu pracy silnika i wzrostu jego temperatury wartość współczynnika ekstynkcji światła maleje – przezroczystość spalin wzrasta. Przebieg krzywych jako funkcji czasu można więc wyjaśnić analogicznie jak przedstawiano wyżej. Najbardziej istotnym wynikiem badania jest, że dla dużych wartości kątów wyprzedzenia wtrysku podczas nagrzewania silnika AD4.236 stopień zadymienia spalin ulega znaczącemu zmniejszeniu. Przy dużej wartości kąta wyprzedzenia wtrysku (w zakresie stosowanych jego zmian) procesy samozapłonu i spalania zachodzą w małej objętości komory spalania, jeszcze przed przejściem tłoka poza GMP, w odpowiednio wysokiej temperaturze sprężonego powietrza. Przy spalaniu dawki paliwa w otoczeniu GMP sprawność spalania paliwa jak również ciśnienie efektywne obiegu jest odpowiednio wysokie. Dzięki temu do silnika dostarczana jest niewielka dawka paliwa, a spaliny zawierają dużą ilość produktów zupełnego spalania

Na rys. 5 przedstawiono przebieg zmian współczynnika ekstynkcji światła w funkcji czasu dla różnych wartości ciśnienia otwarcia wtryskiwacza. Przebieg krzywych wskazuje na skomplikowaną zależność współczynnika ekstynkcji w zależności od wartości ciśnienia jak też od czasu dla różnych wartości ciśnienia otwarcia wtryskiwaczy.

Dla zakresu wysokich wartości ciśnienia otwarcia wtryskiwacza (od 21 do 40 MPa) zależność współczynnika ekstynkcji światła w spalinach od czasu nagrzewania silnika ma przebieg charakteryzujący się stałym, monotonicznym zmniejszaniem się jego wartości wraz z upływem czasu, a więc wzrostem temperatury silnika. Przy tym maksymalne wartości współczynnika ekstynkcji występują dla wartości ciśnienia 27 MPa. Dla najwyższych wartości ciśnienia spaliny silnika mają od początku okresu nagrzewania barwę szarą i czarną, co świadczy o niewielkiej zawartości w nich kropeł nie w pełni odparowanego paliwa. Przyczynia się do tego dobra jakość rozpylenia paliwa, a skutkiem tego jest względnie duża sprawność spalania paliwa. Przy obniżaniu wartości ciśnienia poniżej 27 MPa zwiększa się wyraźnie udział nieodparowanych w pełni kropeł paliwa a zmniejsza udział sadzy, co powoduje, że spaliny stają się (w danej chwili czasu) bardziej przezroczyste przy mniejszych wartościach ciśnienia wtryskiwania paliwa.



Rys. 5. Zmiany współczynnika ekstynkcji światła w spalinach silnika AD4.236 w czasie jego nagrzewania dla wybranych wartości ciśnienia otwarcia wtryskiwaczy

Fig. 5. The light extinction coefficient changes in warmed-up AD4.236 engine exhaust gases for chosen fuel injectors' nozzle opening pressure

Zmniejszanie wartości ciśnienia poniżej 21 MPa (ciśnienie nominalne silnika) powoduje, że uzyskiwane przebiegi mają maksimum wartości współczynnika ekstynkcji w okresie czasu powyżej 3 min nagrzewania, w którym silnik pracował z prędkością obrotową ok. 1800 obr/min. W zakresie niskich ciśnień otwarcia wtryskiwacza istnieje minimum wartości współczynnika ekstynkcji dla wartości ciśnienia 15 MPa. Ponowny wzrost jego wartości w tym przedziale wartości ciśnienia wynika ze znacznego pogorszenia jakości rozpylenia paliwa, zwiększenia

zawartości kropeł nieodparowanego i niespalonego paliwa w spalinach w stosunku do liczby cząstek sadzy (wystąpienie gęstego białego dymu o małej przezroczystości). Zwiększenie ilości kropeł paliwa powoduje tutaj również wzrost współczynnika ekstynkcji światła. Dla bardzo małych ciśnień otwarcia wtryskiwaczy, przy złym rozpylaniu paliwa, dla silnika rozgrzanego do temperatur eksploatacyjnych, końcowe wartości współczynnika ekstynkcji światła stabilizowały się na dość wysokim poziomie – około 1 m^{-1} dla ciśnienia 6 MPa.

Stwierdzono ponadto, że czynnikami mającymi także (nieco mniejszy) wpływ na wielkość zadymienia spalin silnika są:

- sposób nagrzewania silnika po uruchomieniu (długotrwałość okresu pracy z prędkością obrotową biegu jałowego bez obciążenia);
- rodzaj oleju stosowanego w układzie smarowania silnika;
- średnica otworków rozpylaczy i średnica tłoczków pompy wtryskowej.

4. Podsumowanie

Poznanie czynników determinujących emisję spalin silnika o zapłonie samoczynnym podczas nagrzewania może pozwolić na ograniczenie jej wielkości poprzez odpowiednie sterowanie procesem spalania w wyniku dostosowania parametrów pracy silnika lub użycie w początkowym okresie nagrzewania środków wspomagających rozruch, np. świec płomieniowych. Na przezroczystość spalin zimnego silnika o zapłonie samoczynnym ma wpływ wiele parametrów konstrukcyjnych, regulacyjnych i eksploatacyjnych. Analiza wyników badań dymienia silnika AD4.236 wskazuje, że podstawowe znaczenie dla wielkości emisji nieprzezroczystych składników spalin ma kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa oraz ciśnienie wtryskiwania paliwa.

Wskaźnik stopnia zadymienia spalin – wartość współczynnika ekstynkcji światła nie daje pełnej informacji o charakterystyce emitowanych spalin. W podobny sposób na jego wartość wpływa zawartość cząstek sadzy w spalinach jak też kropełek nie w pełni odparowanego paliwa. Można je odróżnić w spalinach silnika poprzez obserwację wizualną. Zmieniającą się zawartością obydwu tych składników spalin można wyjaśnić złożoną zależność współczynnika ekstynkcji światła od wartości ciśnienia otwarcia wtryskiwacza.

Literatura

- [1] BN-74/1340-11 Silniki z ZS. Dopuszczalne stopnie zadymienia spalin i ich pomiar metodą absorpcji światła.
- [2] Merkisz, J., Bielaczyc, P., Pielecha, J., *Cold start emissions performance from direct injection diesel engine*. 8th European Automotive Congress, Bratislava, 2001,
- [3] Merkisz, J., *Ekologiczne problemy silników spalinowych*. Tom I, II Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.
- [4] PN-93/S-47405. Pojazdy drogowe. Aparatura do pomiaru zadymienia spalin silników o ZS w warunkach ustalonych.
- [5] Pszczółkowski, J., *Czynniki powodujące dymienie silnika o zapłonie samoczynnym podczas jego nagrzewania po uruchomieniu*, VI Sympozjum nt. Silniki spalinowe w zastosowaniach wojskowych, SILWOJ'2003, Jurata.
- [6] Smedler, G., Ahlstrom, G., *Diesel catalysts for Europe beyond 1996*, Automotive Engineering, No. 10, 1995.

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego własnego KBN nr 4T12D01929.