

THE DISCURSIVE ATTITUDE OF EMISSION ASPECT VS. AIR-FUEL MIXTURE IGNITION DELAY IN DIESEL ENGINE

Anna Janicka, Wojciech Walkowiak

Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny

Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn

Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

e-mail: anna.janicka@pwr.wroc.pl, wojciech.walkowiak@pwr.wroc.pl

tel./ fax: +48 71 3477918

Abstract

The ignition delay is significant factor of diesel engine work cycle in operation and ecological aspects. A lot of variable, complicate and unknown physicochemical processes have an influence on time of duration of ignition initial process. In spite of complex literature data deficiency, based on existence empirical dates, influence of many elements on reduction of delay time was concluded. The authors suggested that modification of inert combustion space of engine by using catalytic layer might reduce delay time and improve engine work parameters. The authors have started research work concentrated on effect of that modification on diesel engine emission. On the basis of literature studies it is possible to make out that the modification of the space combustion of the engine consisting in introduction active (catalyzer) agent can, with great probability, cause reduction of the chemical delay of the ignition through the decrease of the activation energy of the pre-ignition-reactions. Research started by authors of the paper purpose the complex explanation of the problem of influence of the modification of the internal space of the combustion of the engine with compression ignition on the ignition delay, and consequently on the emission of toxic components of combustion gases for the atmosphere.

Keywords: diesel engine, combustion processes, emission aspect, air-fuel mixture

DYSKURSYWNE UJĘCIE OKRESU OPÓŹNIENIA ZAPŁONU MIESZANKI PALIWOWO-POWIETRZNEJ W ASPEKTCIE JEGO WPŁYWU NA PRODUKTY SPALANIA W SILNIKU O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

Streszczenie

Okres opóźnienia zwłoki zapłonu jest niezwykle istotnym fragmentem cyklu pracy silnika o zapłonie samoczynnym z eksploatacyjnego i ekologicznego punktu widzenia. Czas trwania procesu inicjacji zapłonu warunkują liczne procesy fizykochemiczne. Pomimo braku kompleksowych badań, na podstawie istniejących danych empirycznych, można wnioskować o wpływie wielu czynników na skrócenie zwłoki zapłonu. Autorzy sugerują, że modyfikacja wewnętrznej przestrzeni spalania silnika w postaci wprowadzenia czynnika aktywnego może spowodować skrócenie zwłoki zapłonu a tym samym poprawę parametrów pracy silnika. W Zakładzie Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych Politechniki Wrocławskiej rozpoczyna się obecnie praca badawcza ukierunkowana na ocenę wpływu zastosowania takiej modyfikacji na czas trwania okresu opóźnienia zapłonu w aspekcie emisji zanieczyszczeń do środowiska. Na podstawie studiów literaturowych można wnioskować, że modyfikacja przestrzeni spalania polegająca na wprowadzeniu czynnika aktywnego (katalizatora) może, z dużym prawdopodobieństwem, powodować skrócenie chemicznej zwłoki zapłonu poprzez obniżenie energii aktywacji reakcji przed-zapłonowych. Badania rozpoczęte przez autorów artykułu mają na celu kompleksowe wyjaśnienie zagadnienia wpływu modyfikacji wewnętrznej przestrzeni spalania silnika z zapłonem samoczynnym na okres opóźnienia zapłonu, a tym samym na emisję toksycznych składników spalin do atmosfery.

Słowa kluczowe: silnik z zapłonem samoczynnym, procesy spalania, produkt spalania, mieszanka paliwowo-powietrzna

1. Wstęp

Zwłoka zapłonu jest fragmentem cyklu pracy silnika o zapłonie samoczynnym, trwającym zaledwie kilka milisekund. Niemniej jednak to właśnie ona w znacznej mierze warunkuje efektywność oraz ekologiczne skutki pracy silnika [1]. Jeśli okres opóźnienia samozapłonu jest zbyt długi, spalanie przebiega gwałtownie (głośnie praca silnika) oraz mniej efektywnie (zwiększona emisja toksycznych składników spalin i zwiększone zużycie paliwa). Ogólnie znana jest wprost proporcjonalna korelacja pomiędzy czasem trwania okresu zwłoki zapłonu a pogorszeniem się jakości spalin, zwłaszcza stężeniem niedopalonych węglowodorów (w tym mutagennych i kancerogennych wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych), w gazach odlotowych silników o zapłonie samoczynnym [2].

Inicjacja procesu spalania mieszanki paliwowo – powietrznej najogólniej zwana jest zapłonem. Samorzutny przebieg procesu spalania w silnikach spalinowych może być zapoczątkowany poprzez doprowadzenie energii z zewnątrz (np. zapłon iskrowy w silnikach benzynowych) lub poprzez wtrysnięcie paliwa w atmosferę sprężonego w komorze spalania powietrza (samozapłon w silnikach o zapłonie samoczynnym) [3].

W teorii zapłonu w silnikach ZS możemy wyróżnić dwie możliwe ścieżki inicjacji procesu: teorię cieplną (teorię wybuchu cieplnego) oraz teorię łańcuchową (teorię samozapłonu łańcuchowo-cieplnego) [3]. Według pierwszej zapłon następuje na skutek odpowiedniej częstości skutecznych zderzeń cząsteczek spowodowanych wysoką temperaturą. Według drugiej teorii skomplikowane egzotermiczne reakcje łańcuchowe powodują zapłon mieszanki paliwowej, a powstała w wyniku ich przebiegu energia cieplna jest zjawiskiem wtórnym. To właśnie teoria łańcuchowa tłumaczy pojawianie się zjawiska zimnych płomieni oraz istnienie tzw. zapłonu nisko i wysoko temperaturowego [2].

Biorąc pod uwagę ogromne znaczenie czasu opóźnienia zapłonu, zaskakujący jest fakt praktycznie braku dostępnych kompleksowych danych na temat optymalizacji czasu zwłoki zapłonu w aspekcie zastosowania zróżnicowanych paliw bądź modyfikacji przestrzeni spalania silnika. W dodatku szczytkowe badania eksperymentalne nad okresem opóźnienia zapłonu opierają się przede wszystkim na symulacjach w reaktorach o stałej pojemności. Oczywiście jest fakt, że w takim przypadku eksperyment, włączając wizualizację procesu zapłonu, staje się bardzo uproszczony nie oddając właściwie skomplikowanych procesów zachodzących w rzeczywistych warunkach cyklu pracy silnika. Patrząc z tej perspektywy wręcz niemożliwe staje się prowadzenie badań nad zwłoką zapłonu z pominięciem silnika [1].

2. Istota chemicznego i fizycznego czasu opóźnienia zapłonu

Opracowana w 1934 roku klasyczna teoria Semenowa mówi, że zjawisko zapłonu jest charakteryzowane przez obecność utajonego okresu inicjacji łańcucha reakcji chemicznych. Podczas tego okresu ciepło (zgodnie z teorią cieplną) i centra aktywne (zgodnie z teorią łańcuchową) kumulują się do wartości powodującej zapłon mieszanki paliwowo-powietrznej. Okres ten nazywany jest *czasem chemicznego opóźnienia zapłonu*, który liczony jest od chwili pojawienia się przedzapłonowych reakcji chemicznych. Jednakże proces spalania zachodzi w fazie gazowej zatem ciekłe paliwo musi być najpierw przeprowadzone w stan pary, a następnie wymieszane z powietrzem w celu utworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej. Szybkość spalania ciekłego paliwa jest definiowana przez szybkość z jaką paliwo przechodzi w stan pary, a następnie tworzy mieszaninę z powietrzem poprzez prędkość zachodzenia odpowiednich procesów fizycznych.

Okres opóźnienia zapłonu jest dłuższy dla silników o zapłonie samoczynnym gdzie czas jest liczony od momentu wtrysku paliwa i gdzie mieszanka palna musi być odpowiednio przygotowywana podczas tego okresu. W przypadku silników benzynowych wytwarzanie mieszanki palnej jest praktycznie zakończone w okresie dolotu. Zapłon zapoczątkowany jest przez

iskrę na świecy zapłonowej, która jest jedynym źródłem zapłonu. Czoło płomienia rozchodzi się w całej objętości przestrzeni spalania. W tym przypadku płomień propagacji jest łagodniejszy niż w przypadku silnika o zapłonie samoczynnym, gdzie w objętości mieszanki powietrzno-paliwowej, przygotowanej podczas czasu zwłoki zapłonu, powstaje zróżnicowana liczba różnie umiejscowionych centrów spalania, a płomienie pokrywają całą objętość prawie powodując bardzo wiele mikro eksplozji termicznych. W rezultacie szybkość wzrostu ciśnienia $dp/d\phi$, tak samo jak maksymalne ciśnienie cyklu p_z , w silnikach o zapłonie samoczynnym przyjmuje wyższe wartości niż w silnikach o zapłonie samoczynnym. Z tego powodu poziom hałasu w silnikach o zapłonie samoczynnym jest znacznie wyższy niż w silnikach iskrowych. Jednym ze sposobów wyłagodzenia gwałtownych przemian prowadzących do wybuchów, a co za tym idzie redukcji poziomu hałasu, jest skrócenie zwłoki zapłonu.

W każdym z przypadków, procesy fizyczne pojawiające się w cylindrze po rozpoczęciu wtrysku paliwa, są niezbędne do przygotowania mieszaniny powietrzno-paliwowej i inicjacji przedzapłonowych reakcji chemicznych. Odstęp czasu pomiędzy momentem wtrysku paliwa a rozpoczęciem inicjacji łańcucha reakcji chemicznych powodujących samozapłon nazwany jest *czasem fizycznej zwłoki zapłonu*.

Do kompleksowych procesów fizycznych pojawiających się w silnikach o zapłonie samoczynnym podczas czasu fizycznej zwłoki zapłonu należą przede wszystkim:

- rozpad strumienia paliwa w pojedyncze krople,
- ogrzewanie i waporyzacja pojedynczych kropli,
- dyfuzja zachodząca na granicy par paliwa i powietrza (formowanie się palnej gazowej mieszanki).

Na czas trwania chemicznej i fizycznej zwłoki zapłonu wpływ mają również wszelkie modyfikacje paliwa zasilającego silnik [3]. Huang, Ren, Jiang i inni [4] badali czas trwania okresu inicjacji zapłonu w silniku ZS zasilanym mieszankami paliwowymi typu diesel-DMM (ang. Diesel-dimethoxy methane). Badania te wskazują na wpływ składu mieszanki powietrzno-paliwowej na czas zwłoki zapłonu, zwłaszcza na etapie przebiegu procesów dyfuzyjnych [4].

Wobec przedstawionych powyżej faktów, czas zwłoki zapłonu w silnikach wtryskowych jest warunkowany przez sumę czasów fizycznej i chemicznej zwłoki zapłonu [1]. Nie wydaje się możliwym postawienie jasnej granicy pomiędzy zakończeniem fizycznej zwłoki zapłonu a rozpoczęciem chemicznej zwłoki zapłonu. Dlatego właśnie należy traktować opóźnienie zapłonu jako wypadkową ujednoczonych procesów fizyko-chemicznych w przypadku których wszystkie transformacje – zarówno fizyczne jak i chemiczne pojawiają się równocześnie. Zatem okres opóźnienia samozapłonu jest sumą fizycznej i chemicznej zwłoki zapłonu [3]:

$$\tau_i = \tau_f + \tau_{ch} \quad (1)$$

Na okres opóźnienia zapłonu mają zatem wpływ różne czynniki które związane są ściśle przede wszystkim z chemicznymi własnościami paliwa oraz składem mieszanki palnej [3].

3. Empiryczne wyznaczanie okresu opóźnienia zapłonu

Na podstawie danych empirycznych oraz analizy licznych zależności kinetycznych Semenow wyprowadził wzór na okres opóźnienia zapłonu, który dla paliw pochodzenia naftowego przyjmuje postać:

$$\tau_i = \text{const} \left(\frac{T}{P} \right)^{0,5} e^{\frac{E_a}{RT}}, \quad (2)$$

gdzie: p – ciśnienie mieszanki, T – temperatura mieszanki, E_a – energia aktywacji, R – uniwersalna stała gazowa.

Po logarytmowaniu wzoru widać, że ze wzrostem ciśnienia i temperatury (funkcja wykładnicza) okres opóźnienia samozapłonu maleje [3].

Kavaradze, Zeilinger i Zitzler [1] przeprowadzili badania silnikowe ukierunkowane na pomiar czasu zapłonu w zależności od rodzaju zastosowanego paliwa, wyprowadzając po raz pierwszy wzory na opóźnienie zapłonu dla paliwa naturalnego oraz dla kilku wariantów paliw syntetycznych.

Dzięki zastosowanej metodyce badawczej w wyniku realizacji tych badań zasugerowano słuszność łańcuchowej teorii zapłonu. Według autorów badań wyprowadzone empirycznie wzory nadają się do symulacji procesu pracy silnika zasilanego danym paliwem i przewidywania jej ekologicznych skutków.

Dla silnika o zapłonie z bezpośrednim wtryskiem paliwa, pracującego z zastosowaniem klasycznego oleju napędowego, zaproponowano wzór [1]:

$$\tau_i = 0,55 p^{-1,3} \exp\left(\frac{4400}{T}\right), \quad (3)$$

gdzie: p i T to ciśnienie i temperatura w cylindrze w momencie iniekcji paliwa.

Ponieważ we współczesnych silnikach o zapłonie samoczynnym stosuje się recyrkulację spalin do wzoru (1) dodano empirycznie wyznaczony współczynnik K . Wartość tego współczynnika jest zdeterminowana przez stopień recyrkulacji. Wzór przyjął zatem formułę:

$$\tau_i = 0,55 K p^{-1,3} \exp\left(\frac{4400}{T}\right), \quad (4)$$

gdzie: $K = 0,9z^{0,09}$ dla $z = 5 - 40\%$.

Ze wzoru wynika, iż temperatura panująca w cylindrze w chwili wtrysku paliwa jest odwrotnie proporcjonalna do czasu trwania zwłoki zapłonu. Im wyższa temperatura tym krótszy czas zwłoki zapłonu. Ponieważ zależność ta maleje wykładniczo, zatem nawet nieznaczne podwyższenie temperatury panującej w cylindrze podczas wtrysku powinno spowodować odczuwalne skutki skrócenia zwłoki zapłonu.

4. Wpływ procesów katalitycznych na okres opóźnienia zapłonu

Kataliza jest to zjawisko zmiany szybkości reakcji chemicznych w wyniku oddziaływania na reagenty substancji zwanych katalizatorami. Katalizatory definiuje się jako substancje, które zwiększają szybkość z jaką reakcja chemiczna osiąga stan równowagi, same się jednak nie zużywają, a ich symbol nie występuje w równaniu stechiometrycznym [6]. Wpływ katalizatora na reakcję chemiczną polega głównie na obniżeniu jej energii aktywacji. Zjawisko to tłumaczy się to tworzeniem przejściowych aktywnych kompleksów katalizatora z substratami, po rozpadzie których katalizator ulega regeneracji [7].

Keneth i Schmidt [5], analizując parametry inicjacji zapłonu podczas badań na temat katalitycznego utleniania wyższych alkanów z wykorzystaniem rodu jako czynnika aktywnego zauważyli, iż wprowadzenie już niewielkiej ilości katalizatora w reaktorze symulującym warunki panujące w silniku (z pewnymi ograniczeniami w odniesieniu do rzeczywistych warunków silnikowych, gdyż w przypadku skonstruowanego przez autorów reaktora zachodzą procesy adiabatyczne) powoduje dużą skuteczność w ograniczeniu emisji tych związków. Jedną z sugestii

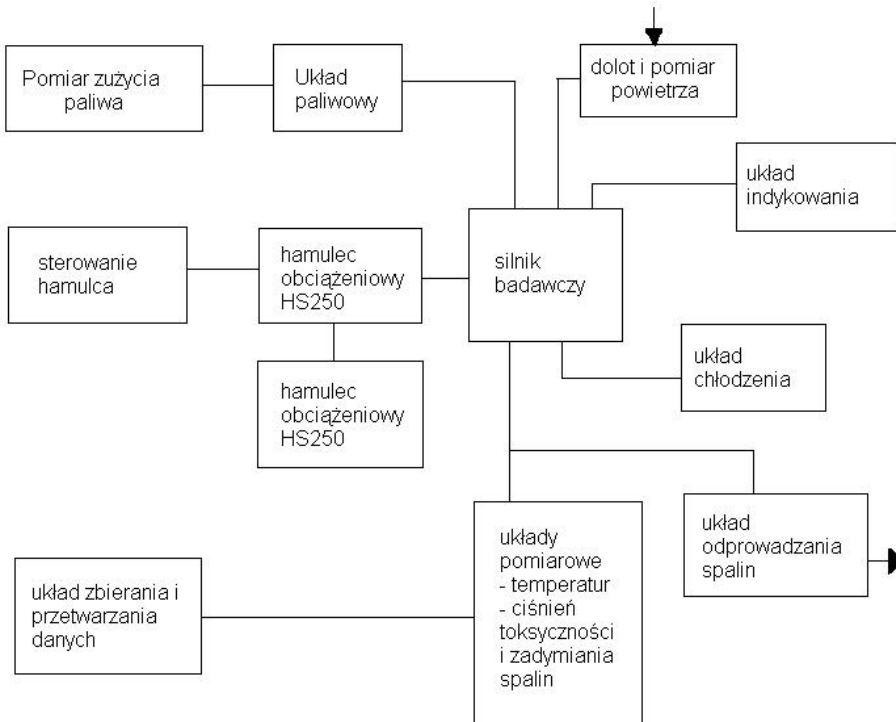
autorów jest teza, że wprowadzony czynnik aktywny w przestrzeń spalania powoduje rozpoczęcie skomplikowanych reakcji łańcuchowych powodując jednocześnie skrócenie czasu chemicznej zwłoki zapłonu a tym samym zminimalizowanie czasu trwania niekorzystnych procesów powstawania toksycznych, organicznych związków węgla.

Na podstawie przesłanek literaturowych [3,5,6,7] można wnioskować, że modyfikacja przestrzeni spalania silnika polegająca na wprowadzeniu czynnika aktywnego (katalizatora) może, z dużym prawdopodobieństwem, powodować skrócenie chemicznej zwłoki zapłonu poprzez obniżenie energii aktywacji reakcji przedzapłonowych.

5. Przygotowanie badań eksperymentalnych

W Zakładzie Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych Politechniki Wrocławskiej rozpoczyna się obecnie praca badawcza ukierunkowana na ocenę wpływu zastosowania wewnętrznej modyfikacji przestrzeni spalania silnika o zapłonie samoczynnym na czas trwania okresu opóźnienia zapłonu w aspekcie emisji zanieczyszczeń do środowiska.

Pomiary prowadzone będą w rzeczywistych warunkach silnikowych, na silniku jednostłokowym, w oparciu o najnowsze wyniki badań, które pośrednio dotyczą analizowanych zagadnień. Modyfikacja przestrzeni spalania silnika będzie polegała na wprowadzeniu do niej czynnika aktywnego na nośniku ceramicznym. Schemat blokowy budowanego stanowiska badawczego przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego
Fig. 1. Lay-out of investigative position

Autorzy badań mają nadzieję, że uzyskane wyniki pracy badawczej przyczynią się do lepszego poznania zjawisk wpływających na czas trwania okresu opóźnienia zapłonu, zwłaszcza pod względem jego wpływu na wielkość emisji z silnika ZS.

6. Wnioski

1. Dotychczasowe badania eksperymentalne nad okresem opóźnienia zapłonu opierają się przede wszystkim na symulacjach w reaktorach o stałej pojemności. W takim przypadku eksperyment staje się bardzo uproszczony nie oddając właściwie skomplikowanych procesów zachodzących w rzeczywistych warunkach cyklu pracy motoru.
2. Okres opóźnienia samozapłonu jest sumą fizycznej i chemicznej zwłoki zapłonu na które wpływ mają liczne, skomplikowane procesy fizyko-chemiczne zależne od ciśnienia i temperatury w momencie wtrysku paliwa oraz własności paliwa i składu mieszanki powietrzno-paliwowej.
3. Na podstawie studiów literaturowych można wnioskować, że modyfikacja przestrzeni spalania silnika polegająca na wprowadzeniu czynnika aktywnego (katalizatora) może, z dużym prawdopodobieństwem, powodować skrócenie chemicznej zwłoki zapłonu poprzez obniżenie energii aktywacji reakcji przed-zapłonowych.
4. Badania rozpoczęte przez autorów niniejszego artykułu mają na celu kompleksowe wyjaśnienie zagadnienia wpływu modyfikacji wewnętrznej przestrzeni spalania silnika ZS na okres opóźnienia zapłonu a tym samym na emisję toksycznych składników spalin do atmosfery.

Literatura

- [1] Kavtaradze, R., Zeilinger, K., Zitzler, G., *Ignition delay in a diesel engine utilizing different fuels*, High Temperature, Vol.43, No.6, pp. 951-960, 2005.
- [2] Baczewski, K., Kałdoński, T., *Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2004.
- [3] Ambrozik, A., *Wybrane zagadnienia procesów cieplnych w tłokowych silnikach spalinowych*; Monografie, studia, rozprawy; Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2003.
- [4] Huang, Z. H., Ren, Y., Jiang, D. M., *Combustion and emission characteristics of compression ignition engine fuelled Diesel-dimethoxy methane blends*, Energy Conversion and Management 47 pp. 1402 - 1415, 2006.
- [5] Williams, K. A., Schmidt, L. D., *Cataytic autoignition of higher alkane partial oxidation on Rh-coated foams*, Applied Catalysis A: General 299 pp. 30-45, 2006.
- [6] Wei Biao, Fu, Chan, Qin, Chang, Le Li, *Experimental study on ignition of pre-mixed gases with steam under catalytic reforming reaction*; Fuel processing technology 7, pp. 2 131-143, 2001.
- [7] Peucheret, S., Feaviour, M., Golunski, S., *Exhaust-gas reforming using precious metal catalysts*; Applied Catalysis B: Environmental 65, pp. 201-206, 2006.