

BADANIE WŁAŚCIWOŚCI SAMOZAPŁONOWYCH PALIW ZASTĘPCZYCH NA PODSTAWIE SPALANIA W KOMORZE O STAŁEJ OBJĘTOŚCI

Dr inż. Hubert KUSZEWSKI, Mgr inż. Mirosław JAKUBOWSKI

W artykule scharakteryzowano aktualnie wykorzystywane metody oznaczania właściwości samozapłonowych paliw. Zwrócono uwagę na uregulowania normatywne w zakresie oznaczania liczby cetanowej. Szczególną uwagę zwrócono na metodę oznaczania pochodnej liczby cetanowej przez spalanie w komorze o stałej objętości oraz przedstawiono wyniki badań ON i jego mieszanin z paliwem syntetycznym.

1. WPROWADZENIE

Przebieg procesu spalania w silniku wysokoprężnym determinowany jest zjawiskami zachodzącymi w pierwszym okresie spalania – w okresie opóźnienia samozapłonu (zapłonu). Zjawiska te oddziałują na parametry energetyczne i ekologiczne silnika. Okresem opóźnienia samozapłonu nazywa się okres, jaki upływa od chwili ukazania się pierwszych kropeł paliwa na wylocie z rozpylacza do chwili pojawienia się pierwszych ognisk samozapłonu. W warunkach badań silnikowych, zwykle początek okresu opóźnienia samozapłonu jest identyfikowany na podstawie przebiegu wzniosu iglicy, natomiast za koniec przyjmuje się początek gwałtownego przyrostu ciśnienia w komorze spalania w stosunku do określonej krzywej czystego sprężania.

Długi okres opóźnienia samozapłonu jest niekorzystny, ponieważ wówczas w okresie tym, przed samozapłonem, gromadzi się w komorze spalania duża ilość paliwa, a to z kolei powoduje wzrost szczytowych ciśnień spalania. Praca silnika staje się hałaśliwa, wzrasta obciążenie elementów układu korbowo-tłokowego, przyspieszając zużycie silnika oraz wzrasta emisja tlenków azotu. Należy zatem dążyć do skrócenia okresu opóźnienia samozapłonu.

Na długość okresu opóźnienia samozapłonu najistotniejszy wpływ wywierają takie czynniki jak: zdolność paliwa do samozapłonu, parametry mikro- i makrostruktury strugi rozpylanego paliwa oraz temperatura powietrza w chwili początku wtrysku paliwa.

Okres opóźnienia samozapłonu jest tym krótszy, im mniejsza jest odporność składników paliwa na utlenianie. Najmniejszą odporność na utlenianie, a zatem najlepsze właściwości samozapłonowe wykazują węglowodory o łańcuchach prostych nasyconych, czyli węglowodory parafinowe. Rozgałęzienie łańcuchów oraz wzrost liczby atomów węgla w bocznych łańcuchach, przyczynia się do wydłużenia okresu opóźnienia samozapłonu. Okres opóźnienia samozapłonu węglowodorów parafinowych, naftenowych i olefinowych maleje wraz ze wzrostem liczby atomów węgla w cząsteczce. Należy także zwrócić uwagę, że korzystny wpływ na okres opóźnienia samozapłonu ma wyższa temperatura wrzenia paliwa. Jednak jej wzrost powyżej pewnej granicy, może powodować wydłużenie okresu opóźnienia samozapłonu wskutek zmniejszenia się lotności paliwa.

Skłonność paliwa do samozapłonu określa się na podstawie wartości liczby cetanowej (LC). Większa wartość LC oznacza skrócenie okresu opóźnienia samozapłonu. Silniki o mniejszym stopniu sprężania wymagają większej wartości LC. Również wzrost prędkości obrotowej silnika wymusza konieczność stosowania paliwa o wyższej LC. Według normy PN-EN 590+A1:2011 pt. „Paliwa do pojazdów samochodowych. Oleje napędowe. Wymagania i metody badań” LC minimalna wartość LC wynosi 51, maksymalna wartość nie jest ustalona [3]. Dla paliw kategorii 1, 2, 3 i 4 według Światowej Karty Paliw dla olejów napędowych, minimalne wartości LC wynoszą odpowiednio: 48, 53, 55, 55 [1].

Oznaczanie liczby cetanowej ma kluczowe znaczenie dla określenia zdolności paliwa do samozapłonu. W tym zakresie, na szczególną uwagę zasługuje normatywna metoda oznaczania pochodnej liczby cetanowej (DCN), która determinowana jest przebiegiem spalania w komorze o stałej objętości.

Do oznaczenia wartości LC można wykorzystać jedną z trzech metod pomiaru. Są to:

- analiza widmowa w średniej podczerwieni,

- metoda polegająca na porównaniu właściwości zapłonowych z analogicznymi właściwościami mieszanek paliw wzorcowych o znanych LC; badania prowadzi się w znormalizowanych warunkach z użyciem silnika badawczego,
- metoda polegająca na obliczeniu pochodnej liczby cetanowej na podstawie średniej wartości opóźnienia zapłonu, które mierzone jest w oparciu o przebieg spalania w komorze o stałej objętości.

Analiza widmowa w średniej podczerwieni umożliwia rozróżnianie i określanie ilości poszczególnych składników w próbce paliwa. Każdy składnik paliwa cechuje się właściwym sobie widmem pochłaniania. Ilość absorbowanej energii w pojawiających się charakterystycznych „pikach” absorpcji, określana jest na podstawie specjalnie dobranego zestawu optycznych filtrów pasmowych. Ilość pochłoniętego światła jest proporcjonalna do stężenia danego składnika w próbce paliwa [7].

W metodzie silnikowej określony jest sposób oceny oleju napędowego w odniesieniu do przyjętej skali liczb cetanowych z wykorzystaniem znormalizowanego, jednocylindrowego silnika czterosuwowego o zapłonie samoczynnym. W silniku zastosowany jest pośredni wtrysk paliwa do komory wstępnej. W metodzie silnikowej można określać LC w pełnym zakresie – tj. od LC = 0 do LC = 100. Oznaczenie może obejmować paliwa niekonwencjonalne.

Metoda oznaczania LC paliwa na stanowisku silnikowym polega na porównaniu jego właściwości samozapłonowych z analogicznymi właściwościami mieszanek paliw wzorcowych o znanych wartościach LC. Poprzez właściwości samozapłonowe rozumie się miarę opóźnienia zapłonu paliwa. W opisywanej metodzie, jako paliwa wzorcowe pierwotne przyjęto heksadekan (cetan), heptametylononan (HMN) oraz mieszanki tych składników w proporcjach objętościowych. Paliwa te są wykorzystywane do definiowania skali liczb cetanowych, zgodnie z zależnością [4]:

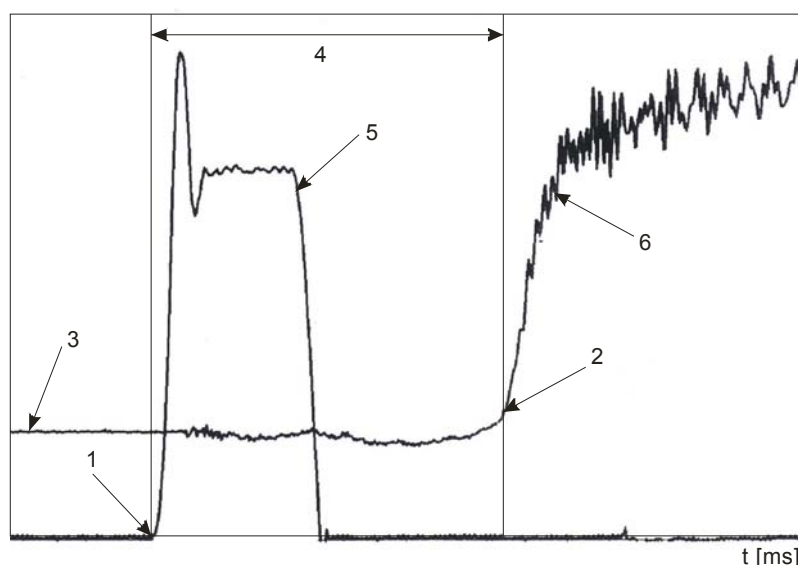
$$LC = \% \text{ cetanu} + 0,15 \cdot (\% \text{ HMN})$$

W metodzie silnikowej podstawą określenia LC jest precyzyjny pomiar kąta opóźnienia zapłonu. W tym celu wykorzystuje się miernik cetanowy (miernik opóźnienia zapłonu), czujnik wtryskiwacza oraz czujnik spalania. Miernik cetanowy to przyrząd elektroniczny wyświetlający kąt wyprzedzenia wtrysku oraz kąt opóźnienia zapłonu. Czujnik wtryskiwacza to przetwornik do rejestracji ruchu iglicy wtryskiwacza. Na tej podstawie określa się precyzyjnie początek wtrysku paliwa. Czujnik ciśnienia spalania wskazuje gwałtowny przyrost ciśnienia, co odpowiada początkowi spalania.

Metoda silnikowa oznaczania LC jest metodą normatywną. Sposób oznaczania LC precyzuje norma PN-EN ISO 5165:2003 pt.: „Przetwory naftowe. Oznaczanie właściwości zapłonowych olejów napędowych. Metoda silnikowa oznaczania liczby cetanowej”. Do oznaczenia LC dla celów określenia wymagań jakie muszą spełniać oleje napędowe wg normy PN-EN 590+A1:2011, może być zastosowana norma PN-EN ISO 5165:2003.

2. OZNACZANIE OKRESU OPÓŹNIENIA SAMOZAPŁONU PALIWA NA PODSTAWIE SPALANIA W KOMORZE O STAŁEJ OBJĘTOŚCI

Do oznaczania LC, norma PN-EN 590+A1:2011 dopuszcza również stosowanie normy PN-EN 15195:2009 pt.: „Ciekle przetwory naftowe. Oznaczanie opóźnienia zapłonu i pochodnej liczby cetanowej (DCN) paliw ze średnich destylatów przez ich spalanie w komorze o stałej objętości”. Metoda opisuje sposób określenia ilościowego opóźnienia zapłonu przy pomocy komory spalania o stałej objętości, która została opracowana przy założeniu zapłonu samoczynnego z zastosowaniem bezpośredniego wtrysku paliwa do sprężonego powietrza. Metoda może być zastosowana do paliw pochodzących z przeróbki ropy naftowej, łącznie z tymi, które zawierają FAME. Metodę można stosować również do średnich destylatów ropy naftowej i paliw, które nie pochodzą z przeróbki ropy naftowej.

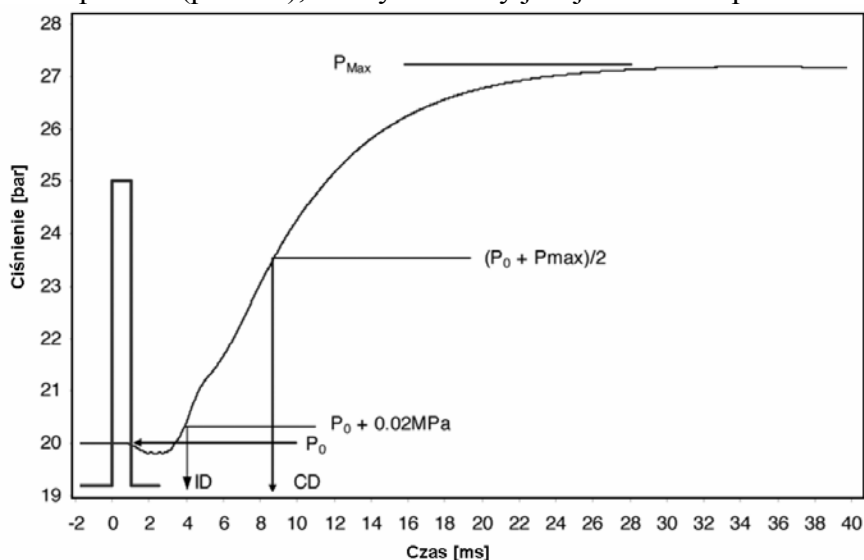


Rys. 1. Przykładowy przebieg zmian ciśnienia w komorze spalania i wzniosu iglicy [5], 1-początek wtrysku paliwa, 2-początek spalania, 3-ciśnienie początkowe w komorze spalania, 4-okres opóźnienia zapłonu, 5-przebieg wzniosu iglicy wtryskiwacza, 6-przebieg ciśnienia w komorze spalania

W przedmiotowej metodzie, próbka analityczna paliwa, która poddawana jest testowi, wtryskiwana jest do ładunku sprężonego powietrza w komorze spalania o stałej objętości. Odpowiednie czujniki identyfikują początek wtrysku paliwa oraz początek spalania dla każdego cyklu z pojedynczym wtryskiem. Sekwencja testowa składa się z 15 wstępnych cykli spalania i następnie realizowane są kolejne 32 dalsze cykle testowe w celu określenia czasu opóźnienia zapłonu. Określona na podstawie 32 cykli średnia wartość opóźnienia zapłonu ID stanowi podstawę obliczenia pochodnej liczby cetanowej DCN (Derived Cetane Number) według zależności [5]:

$$DCN = 4,460 + 186,6 / ID$$

Tak obliczona pochodna liczba cetanowa jest przybliżeniem LC oznaczonej według EN ISO 5165 z wykorzystaniem silnika testowego. Na rys. 1 przedstawiono przykładowy przebieg sygnału z czujnika ruchu iglicy oraz czujnika ciśnienia w komorze spalania. Czas jaki upływa od chwili punktu początku wzniosu iglicy (punkt 1) do punktu, w którym gwałtownie zaczyna narastać ciśnienie w komorze spalania (punkt 2), identyfikowany jest jako okres opóźnienia zapłonu.



Rys. 2. Parametry służące określeniu pochodnej liczby cetanowej DCN [6]: ID - czas jaki upłynął od pojawienia się sygnału sterującego wtryskiwaczem (złoczone narastające impulsu) do momentu gdy ciśnienie w komorze wzrosło o 0,02 MPa powyżej ciśnienia początkowego P_0 , CD – czas jaki upłynął od pojawienia się sygnału sterującego wtryskiwaczem (złoczone narastające impulsu) do momentu gdy ciśnienie w komorze uzyskało wartość równą połowie sumy ciśnienia początkowego P_0 w komorze i ciśnienia maksymalnego p_{max} w cyklu

Oznaczanie okresu opóźnienia na podstawie spalania w komorze o stałej objętości precyzuje również amerykańska norma ASTM D7668 – 10 „Standard Test Method for Determination of Derived Cetane Number (DCN) of Diesel Fuel Oils - Ignition Delay and Combustion Delay Using a Constant Volume Combustion Chamber Method”. Metoda bazuje na spalaniu paliwa w komorze o stałej objętości z bezpośrednim wtryskiem paliwa do sprężonego, podgrzewanego powietrza syntetycznego. Sekwencja testowa składa się z 5 wstępnych cykli spalania. Ich celem jest m.in. oczyszczenie układu z paliwa wcześniej badanego. Następnie kolejno realizowanych jest 15 cykli testowych w celu określenia czasu opóźnienia zapłonu. Określona na podstawie 15 cykli średnia wartość opóźnienia zapłonu ID oraz czas przyrostu ciśnienia do wartości równej połowie przyrostu ciśnienia do wartości maksymalnej CD (rys. 2) w komorze stanowi podstawę obliczenia pochodnej liczby cetanowej DCN według zależności:

$$DCN = 11,162234 + 7, \frac{654674}{ID} + 171, \frac{880479}{CD} + \frac{-799,518995}{CD^2} + 2835, \frac{510270}{CD^3} + 15,147363 \cdot \frac{ID}{CD}$$

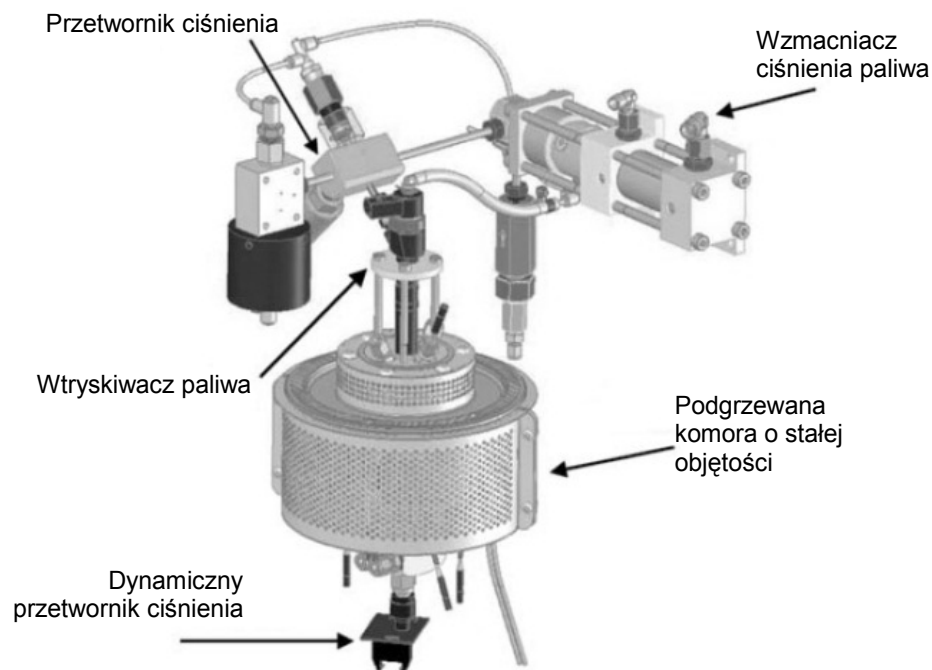
gdzie:

- ID – czas jaki upłynął od pojawienia się sygnału sterującego wtryskiwaczem (zobcz narastające impulsu) do momentu gdy ciśnienie w komorze wzrosło o 0,02 MPa powyżej ciśnienia początkowego p_0 (rys. 2),
- CD – czas jaki upłynął od pojawienia się sygnału sterującego wtryskiwaczem (zobcz narastające impulsu) do momentu gdy ciśnienie w komorze uzyskało wartość równą połowie sumy ciśnienia początkowego p_0 w komorze i ciśnienia maksymalnego p_{max} w cyklu (rys. 2).

Przykładem aparatu, który umożliwia oznaczenie pochodnej liczby cetanowej według normy ASTM D7668 – 10, jest aparat CID 510 firmy Walter Herzog (rys. 3). W urządzeniu zastosowano system wtryskowy typu Common Rail. Elektronicznie sterowany wtryskiwacz CR z rozpylaczem wielootworkowym, może wtryskiwać do komory spalania paliwo pod ciśnieniem do 1500 bar. Na rys. 4 i 5 przedstawiono odpowiednio schemat układu wtryskowego aparatu CID 510 oraz widok jego komory spalania.

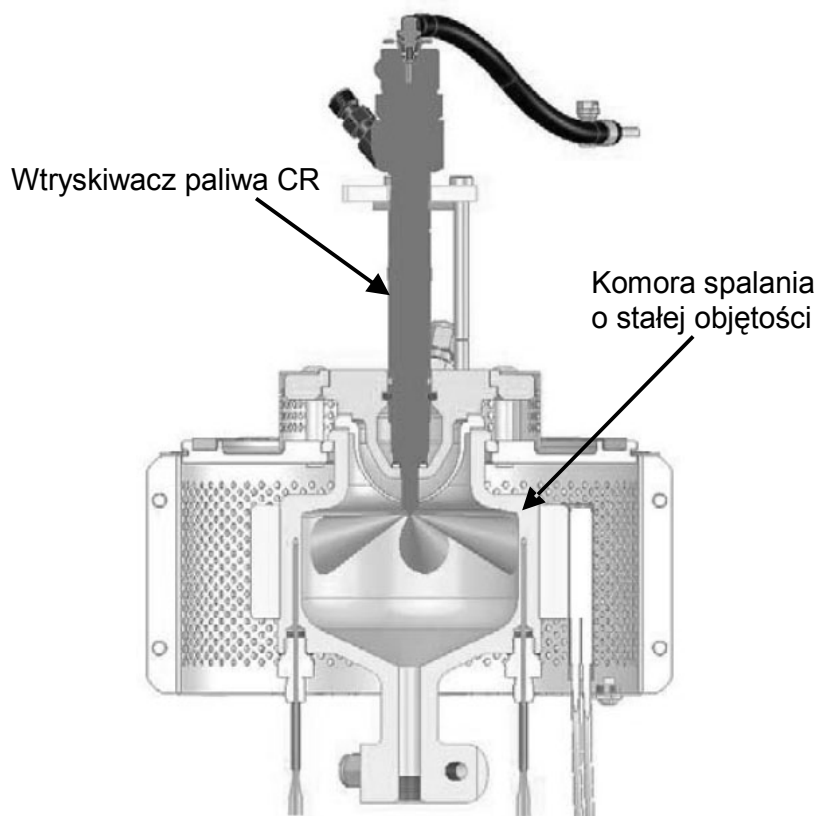


Rys. 3. Aparat do oznaczania pochodnej liczby cetanowej CID 510 firmy Walter Herzog [8]

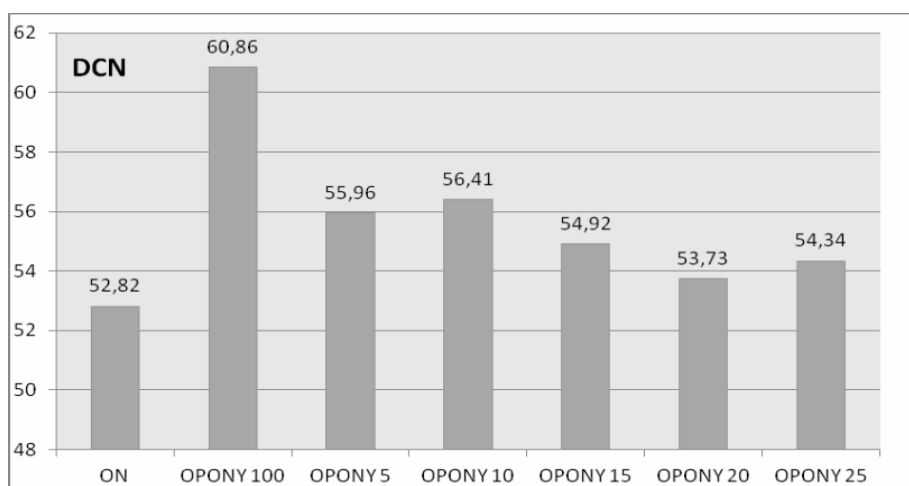


Rys. 4. Schemat układu wtryskowego aparatu CID 510 [2,9]

Znajdujący się na wyposażeniu bazy laboratoryjnej Zakładzie Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych Politechniki Rzeszowskiej aparat CID 510 posłużył do wykonania badania mającego na celu określenie DCN handlowego oleju napędowego ON, paliwa syntetycznego uzyskanego z granulatu gumowego (OPONY100) oraz mieszanek tych paliw, przy czym stężenie objętościowe paliwa syntetycznego w mieszaninie wynosiło 5, 10, 15, 20 oraz 25% (odpowiednio paliwa OPONY5, OPONY10, OPONY15, OPONY20, OPONY25). Wyniki tych badań przedstawiono na rys 6.



Rys. 5. Schemat komory spalania aparatu CID 510 [2,9]



Rys. 6. DCN różnych paliw; wyniki uzyskane za pomocą aparatu CID 510 firmy Walter Herzog

Paliwa syntetyczne cechują się dużym potencjałem, jaki istnieje w ich produkcji jak i komponowaniu z paliwami tradycyjnymi w aspekcie ograniczania emisji toksycznych składników spalin. Dane literaturowe wskazują również, iż wprowadzenie paliw syntetycznych do obrotu powinno przynieść skutek w postaci ograniczenia o średnio 15% emisji tlenków azotu NO_x oraz również zmniejszenia jednostkowej emisji cząstek stałych o ponad 30%. W wielu przypadkach stosowania w/w paliw nie ma potrzeby modyfikacji układu paliwowego oraz algorytmów sterujących dawką paliwa oraz kątem wyprzedzenia wtrysku.

Jak wskazują przeprowadzone wyniki badań, paliwo syntetyczne pochodzące z granulatu gumowego cechuje się znacznie lepszymi właściwościami samozapłonowymi w stosunku do typowego oleju napędowego. Dalsze badania takiego paliwa będą miały na celu określenie pozostałych parametrów istotnych z punktu widzenia eksploatacji.

W tabeli 1 przedstawiono uzyskane podczas badania wartości parametru ID w [ms] i CD w [ms] dla paliwa OPONY100 dla 15 kolejnych wtrysków paliwa do komory spalania.

Dodatkowo w tabeli zamieszczono następujące wartości:

- p_0 – ciśnienie początkowe w komorze spalania, bar,
- Δp_k – przyrost ciśnienia w komorze spalania, bar,
- p_{wtr} – ciśnienie wtrysku paliwa, bar,
- t_k – temperatura powietrza w komorze, °C,
- t_{ch} – temperatura chłodzenia wtryskiwacza, °C,
- t_{wtr} – czas wtrysku, μs .

Tabela 2. Parametry pracy aparatu CID 510 przy określaniu DCN dla paliwa OPONY100

Numer wtrysku	ID [ms]	CD [ms]	p_0 [bar]	Δp_k [bar]	p_{wtr} [bar]	t_k [°C]	t_{ch} [°C]	t_{wtr} [°C]
1	2,9919	4,0877	20,3	19,96	995,7	586,95	49,9	2500
2	2,9496	4,0316	20,5	19,95	996,5	586,74	50,0	2500
3	2,9940	4,0867	20,3	19,93	995,5	586,85	50,0	2500
4	2,9995	4,1258	20,3	19,97	997,4	586,80	49,9	2500
5	3,0172	4,0777	20,3	19,79	994,2	586,92	49,8	2500
6	2,9001	4,0036	20,4	19,79	993,4	586,74	50,0	2500
7	2,9201	4,0200	20,5	19,86	994,6	586,81	50,0	2500
8	2,9745	4,0962	20,2	19,85	993,5	586,86	49,8	2500
9	2,9499	4,0829	20,4	19,89	995,4	586,83	49,9	2500
10	2,9484	4,0498	20,4	19,87	993,5	586,84	49,8	2500
11	3,0244	4,1008	20,4	19,92	994,3	586,81	49,8	2500
12	2,9953	4,1003	20,4	19,95	995,6	586,88	49,9	2500
13	2,9395	4,0265	20,5	19,87	995,5	586,82	50,1	2500
14	2,9626	4,0610	20,2	19,91	994,4	586,90	50,0	2500
15	2,9549	4,0609	20,5	19,88	993,7	586,77	49,8	2500

3. PODSUMOWANIE

Oznaczanie właściwości samozapłonowych paliw może być realizowane metodą normatywną i nienormatywną. Do metod nienormatywnych należy oznaczanie LC przy wykorzystaniu analizy widma w bliskiej podczerwieni. Norma PN-EN 590+A1:2011 do określania LC dopuszcza dwie normy. Są to normy PN-EN ISO 5165:2003 pt.: „Przetwory naftowe. Oznaczanie właściwości zapłonowych olejów napędowych. Metoda silnikowa oznaczania liczby cetanowej” oraz PN-EN 15195:2009 pt.: „Ciekłe przetwory naftowe. Oznaczanie opóźnienia zapłonu i pochodnej liczby cetanowej (DCN) paliw ze średnich destylatów przez ich spalanie w komorze o stałej objętości”.

Metoda silnikowa oznaczania LC jest droga i trudna do zastosowania. Wymaga bardzo drogiego w zakupie, eksploatacji i serwisowaniu silnika badawczego.

Tańszym i znacznie mniej skomplikowanym sposobem oznaczania właściwości samozapłonowych paliw jest metoda polegająca na oznaczeniu pochodnej liczby cetanowej DCN poprzez spalanie w komorze o stałej objętości. Ten sposób oznaczenia pochodnej liczby cetanowej, który daje niemal identyczne wyniki jak w przypadku metody silnikowej, jest znacznie łatwiejszy do przeprowadzenia.

Przeprowadzone w Zakładzie Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych badania DCN dla wybranych paliw zastępczych na aparacie CID 510 w pełni potwierdzają jego funkcjonalność.

LITERATURA

- [1] Baczewski K., Kałdoński T.: Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym. WKŁ, Warszawa 2004.
- [2] „Cetane ID 510 Automatyczny aparat do oznaczania pochodnej liczby cetanowej”. Materiały firmowe Inkom Instruments.
- [3] Norma PN-EN 590+A1:2011 „Paliwa do pojazdów samochodowych. Oleje napędowe. Wymagania i metody badań”.
- [4] Norma PN-EN ISO 5165:2003 pt.: „Przetwory naftowe. Oznaczanie właściwości zapłonowych olejów napędowych. Metoda silnikowa oznaczania liczby cetanowej”.
- [5] Norma PN-EN 15195:2009 pt.: „Ciekłe przetwory naftowe. Oznaczanie opóźnienia zapłonu i pochodnej liczby cetanowej (DCN) paliw ze średnich destylatów przez ich spalanie w komorze o stałej objętości”.
- [6] Norma ASTM D7668 – 10 „Standard Test Method for Determination of Derived Cetane Number (DCN) of Diesel Fuel Oils - Ignition Delay and Combustion Delay Using a Constant Volume Combustion Chamber Method”
- [7] TD PPA – Wielofunkcyjny analizator oleju napędowego i paliwa lotniczego. Instrukcja obsługi. Opracowanie: Inkom Instruments.
- [8] <http://www.paclp.com>
- [9] <http://www.inkom.com.pl>

THE INVESTIGATIONS OF SELFIGNITION PROPERTIES OF ALTERNATIVE FUELS BASING ON COMBUSTION IN CONSTANT VOLUME CHAMBER

This paper describes the methods which currently are used for determining the auto ignition properties of fuels. Attention was drawn to the standards for determining the cetane number. Particular attention was paid to the method of determining of derived cetane number (DCN) by combustion using a constant volume combustion chamber. The results of research diesel fuel and its mixtures with synthetic fuel are presented also.