

Jan FILIPCZYK
Jacek MAĆKOWSKI
Mieczysław REIMAN
Bronisław SENDYKA

SZYBKOŚĆ PRZEJMOWANIA CIEPŁA PRZEZ CZYNNIK ROBOCZY W FUNKCJI KĄTA OBROTU WAŁU KORBOWEGO JAKO JEDNO Z KRYTERIÓW OCENY PROCESU SPALANIA W SILNIKU O ZAPŁONIE ISKROWYM

Streszczenie. Bezpośrednie, eksperymentalne wyznaczenie wszystkich parametrów przebiegu spalania na pracującym silniku nie jest możliwe.

Przeanalizowano przebieg szybkości przejmowania ciepła przez czynnik roboczy podczas spalania w silniku ZI z uwzględnieniem przydatności takiej analizy do oceny procesu spalania.

1. Wprowadzenie

Głównym problemem przy próbach właściwej organizacji procesu spalania jest osiągnięcie kompromisu pomiędzy ekonomicznością zużycia paliwa, wartością obciążeń mechanicznych, głośnością pracy silnika, a emisją szkodliwych substancji powstających w wyniku procesu spalania.

Uzyskanie zupełnego i całkowitego spalania mieszanki przy możliwie dużym wykorzystaniu tlenu jest uzależnione przede wszystkim od skuteczności zastosowanego systemu organizacji wytwarzania mieszanki samego procesu spalania.

2. Wskaźniki charakteryzujące proces spalania

W literaturze [2], [3], [5], [8], ekonomiczność wykorzystania ciepła w silniku spalinowym uzależniono głównie od trzech czynników:

- długości spalania,
- intensywności wywiązywania się ciepła,
- lokalizacji przebiegu tych funkcji względem ZCP.

Jakość sterowania przebiegiem wywiązywania się ciepła określano najczęściej dwoma wskaźnikami:

- maksymalną prędkością narastania ciśnienia w pierwszej fazie spalania,
- stopniem wzrostu ciśnienia maksymalnego.

Te dwie wielkości określają dynamiczne cechy pojedynczego cyklu pracy silnika i stanowią miarę obciążenia mechanizmu korbowego.

Obie grupy wskaźników dokładnie charakteryzują nam proces spalania w silniku, ujmując najistotniejsze cechy, które mogą służyć do analizy porównawczej procesów w różnych cyklach pracy.

Wielkościami będącymi kompensacją informacji zawartych w wyżej wymienionych wskaźnikach są wartości ciepła przejmowanego przez ścianki komory spalania oraz ciepła przejmowanego przez czynnik roboczy:

Problem ciepła przejmowanego przez ścianki komory spalania został szeroko omówiony między innymi przez Szechovcova [5].

Biorąc pod uwagę organizację procesu spalania istotniejszą wydaje się być analiza przebiegu zmian wartości ciepła przejmowanego przez czynnik roboczy.

3. Określenie przebiegu przejmowania ciepła przez czynnik roboczy

Przejmowanie ciepła przez czynnik roboczy jest procesem złożonym i zmiennym w czasie. Z tego względu pełniejszy obraz przemian zachodzących podczas procesu spalania, stanowią zmiany ciepła przejmowanego przez czynnik roboczy w funkcji kąta obrotów wału korbowego $\frac{dq}{d\alpha}$, obliczone krokowo w całym zakresie wykresu indykatorem obejmującym proces spalania.

Analizę ogranicza się zwykle do okresu, kiedy proces w cylindrze można traktować jako przemianę zamkniętą stosując założenia upraszczające [8]:

- czynnik roboczy traktuje się jako gaz półdoskonały,
- ładunek cylindra jest jednorodny,
- nie uwzględnia się strat ilościowych ładunku,
- pomija się proces odparowania paliwa i endotermiczne reakcje dysocjacji,
- utlenianie się wszystkich reagentów paliwa w ich końcowe produkty spalania odbywa się równocześnie i równomiernie.

W myśl pierwszej zasady termodynamiki szybkość przejmowania ciepła przez czynnik roboczy można wyrazić wzorem:

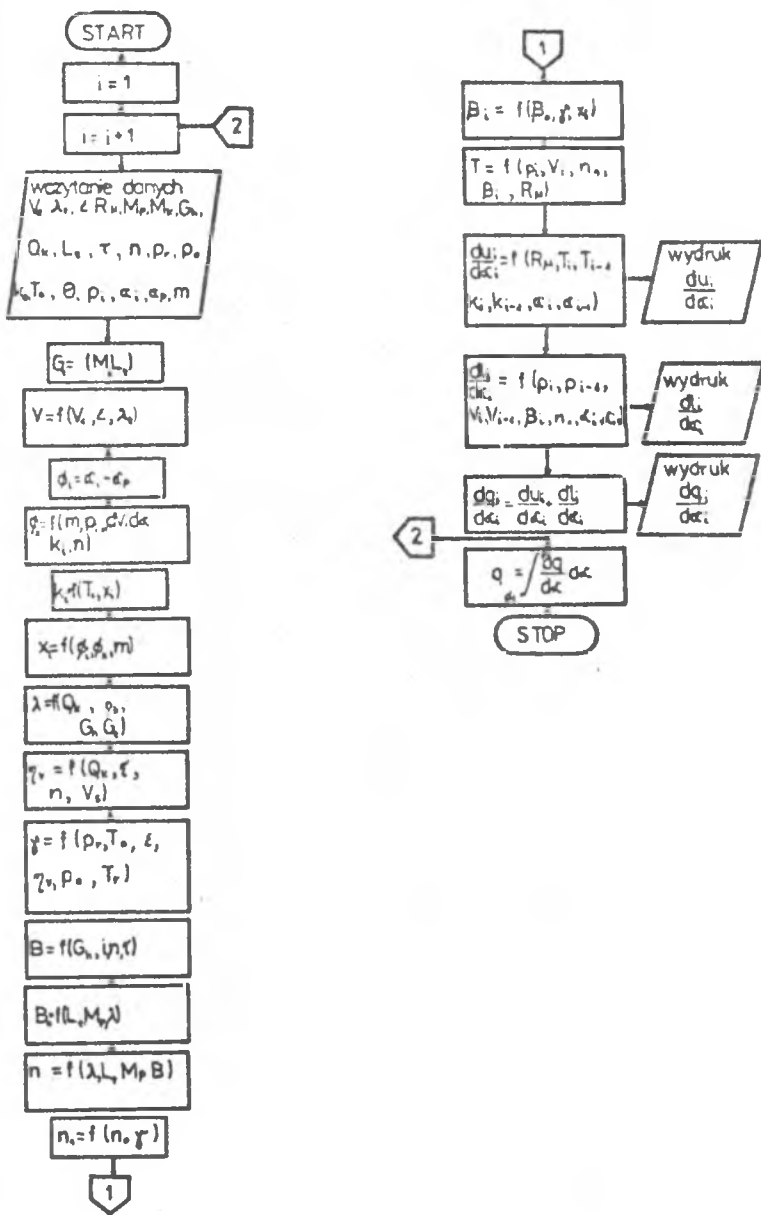
$$\left(\frac{dq}{d\alpha}\right)_1 = \left(\frac{dq}{d\alpha}\right)_1 + \left(\frac{dI}{d\alpha}\right)_1, \quad (1)$$

gdzie:

$\left(\frac{dq}{d\alpha}\right)_1$ - chwilowa szybkość przejmowania ciepła przez czynnik roboczy,

$\left(\frac{dI}{d\alpha}\right)_1$ - chwilowa szybkość przyrostu energii wewnętrznej czynnika roboczego,

$\left(\frac{dI}{d\alpha}\right)_1$ - chwilowa szybkość przyrostu pracy.



Rys. 1. Algorytm obliczeniowy przebiegu szybkości przejmowania ciepła przez czynnik roboczy

4. Obliczanie chwilowego przyrostu energii wewnętrznej

Energia wewnętrzna gazu roboczego jest funkcją temperatury, którą obliczamy na podstawie zdjętego przebiegu ciśnienia w postaci wykresu indykatorowego, za pośrednictwem równania stanu gazu oraz składu elementarnego paliwa.

Szerzej problem obliczania temperatur procesu spalania został zbadany przez Schwarzbauera i Grudena w laboratoriach Uniwersytetu Technicznego w Wiedniu [4].

Chwilowa szybkość przyrostu energii wewnętrznej czynnika roboczego można ująć w formie zależności:

$$\left(\frac{du}{d\alpha}\right)_1 \approx \left(\frac{\Delta u}{\Delta \alpha}\right)_1 = \frac{R_{\mu} (T_1 - T_{1-1})}{\alpha_1 - \alpha_{1-1}} \frac{\frac{1}{k_1 - 1} + \frac{1}{k_{1-1} - 1}}{2} \quad (2)$$

gdzie:

R_{μ} - uniwersalna stała gazowa,

T_1 - chwilowa temperatura czynnika roboczego,

α_1 - bieżący kąt obrotu wału korbowego,

k_1 - chwilowa wartość współczynnika stosowanego w termodynamice, a będącego stosunkiem ciepł właściwych $\frac{c_p}{c_v}$.

Uwzględniając założenia upraszczające można do czynnika roboczego zastosować równanie stanu gazu.

Uwzględniając odpowiednią liczbę moli ładunku, temperaturę czynnika możemy wyrazić wzorem:

$$T_1 = \frac{p_1 \cdot V_1}{n_1 / \beta_1 R} \quad (3)$$

szeroko stosowany przez wielu autorów [4], [6]

gdzie:

n_1 - ilość moli czynnika roboczego w chwili rozpoczęcia sprężania,

α_1 - chwilowy współczynnik przemiany molekularnej.

Całkowity ładunek na początku sprężania wyrażony w ilościach moli, a odniesiony zgodnie z założeniami do obliczeń wynosi:

$$n_1 = n_0 (1 + f), \quad (4)$$

gdzie:

- n_0 - ilość moli świeżego ładunku zassanego do cylindra w jednym cyklu pracy obliczona na podstawie wielkości mierzonych,
 δ - współczynnik resztek spalin.

Wartość chwilowego współczynnika przemiany molekularnej β_1 można obliczyć wykorzystując formułę, którą podał Lange i Wochni a szerzej omówioną w literaturze [1], [7], [8].

Problem wyznaczenia chwilowej wartości $\frac{c_p}{c_v}$ został opracowany między innymi przez Głogojewa [1].

5. Obliczania chwilowej szybkości przyrostu pracy

Przy obliczaniu chwilowej szybkości przejmowania ciepła przez czynnik roboczy, drugi składnik tej wielkości jakim jest chwilowa szybkość przyrostu pracy, wyraża się zależnością:

$$\left(\frac{dW}{d\alpha_1}\right) \approx \left(\frac{\Delta W}{\Delta \alpha_1}\right) = \frac{(p_1 + p_{1-1})(V_1 - V_{1-1})}{2 n_1 \beta_1 (\alpha_1 - \alpha_{1-1})} \quad (5)$$

gdzie:

- p_1 - chwilowe ciśnienie indykowane,
 V_1 - chwilowa objętość komory spalania,
 α_1 - chwilowy kąt obrotu wału korbowego,
 n_1 - ilość moli czynnika roboczego w chwili rozpoczęcia sprężania,
 β_1 - chwilowy współczynnik przemiany molekularnej.

Wartości chwilowe szybkości przyrostu pracy w początkowej fazie spalania są ujemne wskutek (rys. 2) pobierania pracy z zewnątrz podczas sprężania.

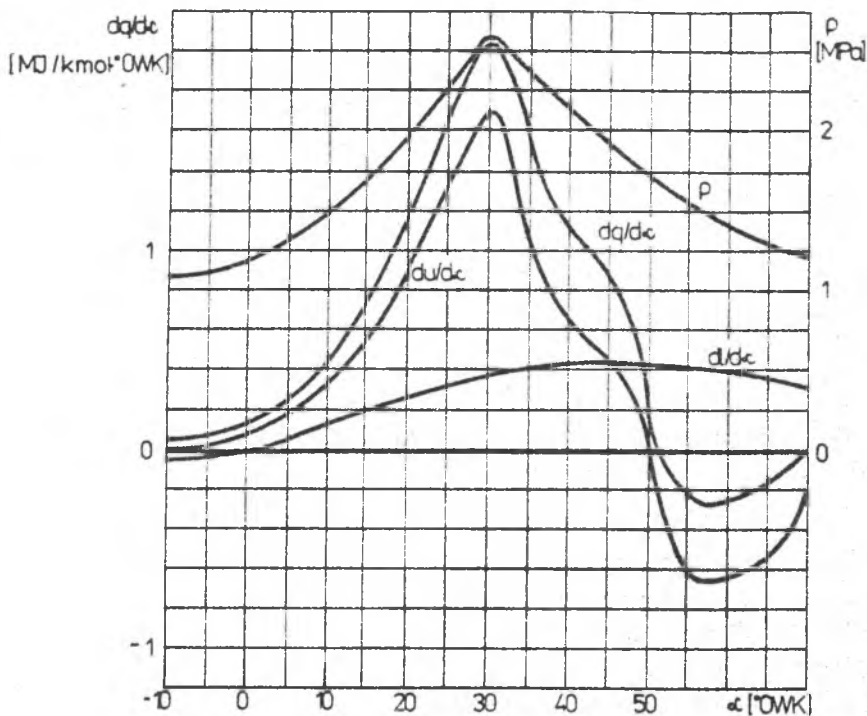
6. Metodyka badań oraz algorytm obliczeń przebiegu przejmowania ciepła przez czynnik roboczy

Celem badań, przeprowadzonych w Instytucie Transportu Samochodowego Politechniki Śląskiej w Katowicach, było sprawdzenie możliwości wyznaczenia przebiegu przejmowania ciepła przez czynnik roboczy na podstawie analizy wykresu indykatorowego.

Podczas badań zarejestrowano wykres indykatorowy oraz parametry charakteryzujące pracę silnika, przy ustalonej prędkości obrotowej, takie jak:

- godzinowe zużycie paliwa,
- godzinowe zużycie powietrza,
- temperatura spalin mierzona za zaworem wydechowym.

Obiektem badań był silnik 126 A.076.



Rys. 2. Przykład przebiegu szybkości przejmowania ciepła przez czynnik roboczy $n = 1200$ obr/min

Z wykresu indykatorowego odczytano wartości ciśnień indykowanych dla kolejnych kątów obrotu wału korbowego. Dla dokładniejszego odczytania wartości ciśnień wykres indykatorowy powiększono 50 razy.

W celu obliczenia kolejnych wartości szybkości przejmowania ciepła przez czynnik roboczy niezbędne jest obliczenie kilku wartości charakterystycznych, takich jak:

- chwilowa objętość czynnika roboczego V_1 ,
- chwilowy współczynnik przemiany molekularnej β_1 ,
- chwilowa temperatura czynnika roboczego T_1 .

Przy obliczaniu chwilowych wartości szybkości przejmowania ciepła przez czynnik roboczy korzystano z algorytmu (rys. 1) opartego na wzorach (1, 2, 5).

Jako dane początkowe oprócz wartości mierzonych,

- prędkość obrotowa n ,
- ciśnienie resztek spalin p_r ,
- temperatura resztek spalin T_r ,
- godzinowe zużycie paliwa G_h ,
- godzinowe zużycie powietrza Q_k ,
- ciśnienie otoczenia p_o ,
- temperatura otoczenia T_o ,
- chwilowe ciśnienie indykowane p_i ,

niezbędne są współczynniki charakteryzujące badany silnik,

- objętość komory spalania V_c ,
- liczba cylindrów i ,
- współczynnik ilości suwów silnika ζ ,
- współczynnik konstrukcji układu korbowego λ_t ,
- stopień sprężania ϵ .

Niezbędne są takie wielkości charakteryzujące mieszankę paliwową;

- masa molowa paliwa M_p ,
- masa molowa powietrza M_k ,
- stała stochiometryczna L_t ,

przy danej temperaturze otoczenia.

Pośrednimi wielkościami przy obliczaniu chwilowej szybkości wzrostu energii wewnętrznej czynnika roboczego $(\frac{du}{d\alpha})_1$ oraz szybkości przyrostu $(\frac{dl}{d\alpha})_1$ niezbędne jest obliczenie lub przyjęcie szacunkowe dodatkowych wielkości pośrednich:

- uniwersalna stała gazowa R_u ,
- ilość moli czynnika roboczego w chwili rozpoczęcia sprężania n_1 ,
- ilość moli świeżego ładunku zassanego do cylindra w jednym cyklu pracy n_o ,
- współczynnik resztek spalin f ,
- współczynnik nadmiaru powietrza λ ,
- teoretyczne zapotrzebowanie powietrza G_t ,
- dawka paliwa przypadająca na 1 cykl B ,
- chwilowa bezwymiarowa ilość ciepła wydzielonego x_1 ,
- współczynnik charakteru spalania m ,
- chwilowy stosunek ciepła właściwych c_p/c_v k_1 ,
- teoretyczny współczynnik przemiany molekularnej β_o .

- kąt trwania spalania φ_z ,
- kąt wyprzedzenia zapłonu θ .

7. Cechy charakterystyczne funkcji szybkości przejmowania ciepła przez czynnik roboczy

Wszelkie dane do obliczeń przebiegu przejmowania ciepła przez czynnik roboczy jest:

- temperatury czynnika,
- pochodne $dp/d\alpha$,
- zmiany chwilowego współczynnika przemiany molekularnej,

możliwe są do uzyskania tylko za pomocą bardzo precyzyjnej analizy rozpatrywanego wykresu indykatorowego, przy jednoczesnej znajomości parametrów procesu spalania.

Starannie sporządzone krzywe przejmowania ciepła przez czynnik roboczy zawierają bardzo wiele informacji o przebiegu procesu spalania oraz wydajności zastosowanego w silniku systemu spalania.

Zazwyczaj przebieg przejmowania ciepła dla danego systemu spalania stanowi z reguły kompromis pomiędzy sprawnością cieplną i dynamicznymi wskaźnikami spalania.

W organizacji przebiegu spalania dąży się do tego, aby największe ilości ciepła wywiązywały się w początkowej jego fazie (bliżej zwrotu zewnętrznego).

Istnieje jednak wtedy niebezpieczeństwo nadmiernego wzrostu dynamicznych wskaźników spalania.

Ustalenie ilości ciepła rzeczywistego wywiązywanego w cylindrze wymaga określenia wielkości strat wynikających z pochłaniania ciepła przez ścianki komory spalania.

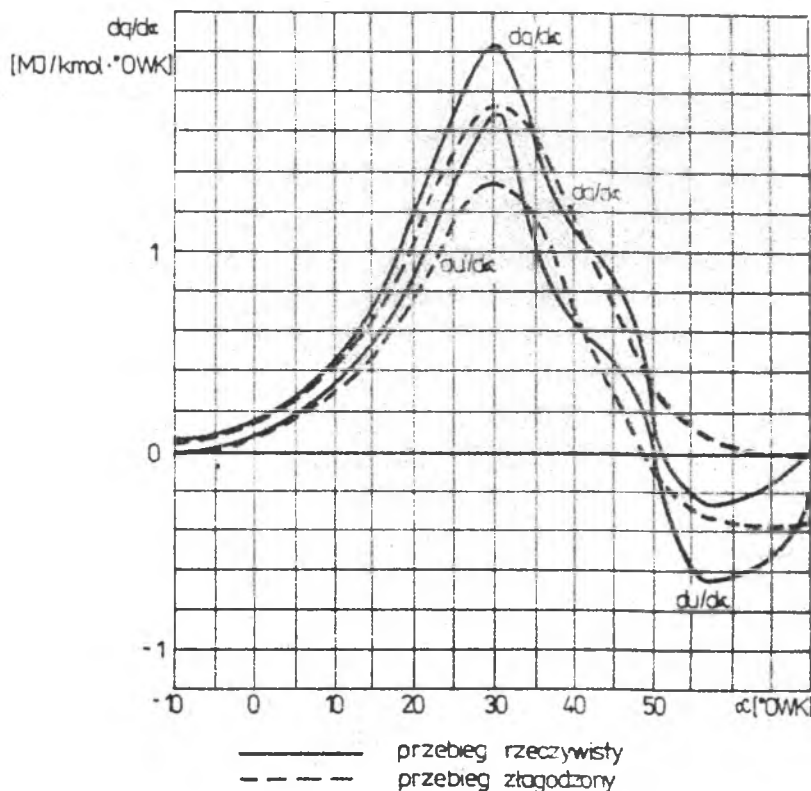
Ze względu na trudności i niepewność oceny tych strat, wygodniej jest przyjąć, jako podstawę analizy procesu spalania, ciepło przejmowania przez czynnik roboczy.

Człon $\frac{du}{d\alpha}$ równania (1), który możemy nazwać "składnikiem temperaturowym" niesie nam całość informacji o wskaźnikach sprawności cieplnej.

Człon $\frac{dl}{d\alpha}$ jako "składnik pracy" sumuje najważniejsze wskaźniki dynamiczne.

Suma obu składników daje nam nie tylko informacje o całości procesu przejmowania ciepła przez czynnik roboczy, ale także pośrednio o dynamice obciążeń cieplnych występujących podczas procesu spalania.

Przy organizacji procesu spalania należy dążyć do tego, aby przebieg funkcji $\frac{dq}{d\alpha}(\alpha)$ był możliwie uporządkowany bez gwałtownych wahań i dużych gradientów szybkości przejmowania ciepła.



Rys. 3. Przykład możliwości złagodzenia przebiegu funkcji $\frac{dq}{d\alpha}(\alpha)$

Można to osiągnąć przez "złagodzenie" przebiegu składnika temperaturowego (rys. 3).

Organizacja procesu spalania silnika o zapłonie iskrowym umożliwiającą płynne narastanie temperatury podczas spalania sprzyja zwiększeniu płynności przebiegu szybkości przejmowania ciepła.

Nie bez znaczenia jest także położenie punktu osiągnięcia szczytowych temperatur w odniesieniu do przebiegu funkcji "składnika pracy", a pośrednio funkcji zmiany ciśnienia. Wzajemne usytuowanie przebiegów ciśnienia i temperatury wpływa na wielkość amplitudy funkcji $\frac{dq}{d\alpha}(\alpha)$ przy takich samych wartościach T_{\max} i P_{\max} .

8. Podsumowanie

Bezpośrednie, eksperymentalne wyznaczenie wszystkich parametrów przebiegu spalania na pracującym silniku nie jest możliwe. Ocena wykresu indykatorowego pod kątem przebiegu wydzielania się ciepła, przejmowania ciepła przez ścianki cylindra lub przejmowanie ciepła przez czynnik roboczy dostarcza wielu ilościowych i jakościowych informacji dotyczących wewnętrznych przemian i strat energii w cylindrze.

Jednym z podstawowych czynników przy analizie termodynamicznej jest maksymalna temperatura rzeczywista występująca w czasie spalania. Dla każdego silnika istnieje pewne optimum temperaturowe zawarte między spalaniem detonacyjnym, a spalaniem przewlekłym. Rozpatrywanie przemian zachodzących w silniku podczas spalania w funkcji zmieniającego się kąta obrotu wału korbowego może prowadzić do prawidłowej oceny charakteru spalania.

Warto podkreślić, że przy zastosowaniu zmian konstrukcyjnych lub zmian paliwa można uzyskać dla tego samego silnika pracującego w różnych warunkach podobne wykresy indykatorowe. Dopiero analiza termodynamiczna tych wykresów może ujawnić istotne różnice i pozwoli wykryć nieprawidłowości tego procesu.

LITERATURA

- [1] Głagolew N.N.: *Rabocze procesy dwigatelej wnutrennowo zgorania*. Moskwa 1950.
- [2] Mac Z.Z.: *Issledowanie tepłowydelenia w tepłowochnych dwigatelach po indykatornym diagramam*. Moskwa 1962.
- [3] Razlejcew N.F.: *Modelirovanie i optymalizacia processa zgorania w dizelach*. Charkow 1980.
- [4] Schwarzbauer G.: *Brenntemperatur und wärme freisetzung im Verbrennungsmotor*. MTZ 2/71.
- [5] Szechowcow A.: *Matematicheskoe modelirovanie teploperedaczi w bystrochodnym dizelach*. Moskwa 1978.
- [6] Wiśniewski S.: *Obciążenia cieplne silników tłokowych*. Warszawa 1972.
- [7] Wochni G.: *Wpływ przebiegu wywiązywania ciepła na przebieg ciśnienia i obciążenia cieplne w silnikach wysokoprężnych*. Biuletyn informacyjny CBKSS, 9/69.
- [8] Zabłocki M.: *Wtrysk i spalanie paliwa w silnikach wysokoprężnych*. Warszawa 1976.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Czesław Kordziński

Wpłynęło do Redakcji w czerwcu 1984 r.

СКОРОСТЬ ПОГЛАЩЕНИЯ ТЕПЛА РАБОЧИМ ФАКТОРОМ В ФУНКЦИИ
УГЛА СВОРОТА КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА В КАЧЕСТВЕ ОДНОГО ИЗ КРИТЕРИЕВ
ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ В ДВИГАТЕЛЕ С ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИЕМ

Р е з ю м е

Непосредственные, экспериментальные назначения всех параметров процесса сгорания на работающем двигателе является невозможным.

Проведен анализ скорости поглощения тепла рабочим фактором во время сгорания в двигателе с искровым зажиганием с учетом пригодности такого анализа для оценки процесса сгорания.

THE HEAT INTERCEPTION VELOCITY OF THE WORKING MEDIUM IN THE FUNCTION OF
THE CRANKSHAFT ANGLE AS A CRITERION TO ESTIMATE THE COMBUSTION PROCESS
QUALITY IN THE SPARK IGNITION ENGINE

S u m m a r y

It is not possible to determinate all the factors of the combustion course parameters by means of the immediate experiment. So there was analysed the heat interception velocity in the working medium during the combustion course in the spark-ignition engine taking into consideration its usefulness for the combustion processes analysis.