

ANALIZA CZYNNIKÓW TECHNICZNO-EKONOMICZNYCH TERMODYNAMICZNEGO MODELU PARAMETRÓW PROCESU SPRĘŻANIA PRZY ROZRUCHU SILNIKA W NISKICH TEMPERATURACH

Streszczenie

W warunkach niskich temperatur zasadniczą rolę odgrywają właściwości rozruchowe silników o zapłonie samoczynnym. Jak dotychczas brak jest modeli termodynamicznych, które ujmowałyby proces rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym, zwłaszcza w obniżonych temperaturach otoczenia na parametry termodynamiczne procesu sprężania.

Niniejszy referat stanowi fragment badań we wspomnianej tematyce. Jego zasadniczym celem było zaprezentowanie próby wyprowadzenia równań na ciśnienie temperatury wykładnika politropy w przypadku ucieczki ładunku.

WSTĘP

Kłopoty związane z uruchomieniem silników z zapłonem samoczynnym, zwłaszcza w niskich temperaturach otoczenia powodują, że problem rozruchów jest wciąż aktualny[6]. Mimo licznych publikacji związanych z rozruchami, zagadnienie dotyczące wielkości strat energii w cylindrze w procesie sprężania, w zależności od warunków rozruchu, nie zostało dotychczas dostatecznie zbadane[2,3,4,7,8]. Rozszerzenie tego problemu jest istotne, gdyż od wielkości tych strat zależy temperatura i ciśnienie czynnika roboczego w końcu suwu sprężania.

Rozruch silników o zapłonie samoczynnym, w niskich temperaturach otoczenia, charakteryzuje się niską prędkością obrotową wału korbowego.[10] Powoduje to wydłużenie czasu sprężania, w wyniku czego, znaczna część zassanego ładunku wychodzi przez nieszczelności w uszczelnieniu pierścieniowym. Wydłuża się również czas przejmowania ciepła przez ścianki.

Autorzy niniejszego artykułu podjęli próbę przeprowadzenia szerszej analizy termo-dynamicznej procesów sprężania a także wyprowadzenia równań na ciśnienie temperatury wykładnika politropy w przypadku ucieczki ładunku.

Celem niniejszego artykułu było zaprezentowanie wyników obliczeń bilansów cieplnych dla silnika typu 359 przy rozruchu w zależności od warunków rozruchu w oparciu o badania doświadczalne.

1. PRZEDMIOT BADAŃ

1.1. Komora niskich temperatur

Poddany badaniom silnik umieszczony był w komorze chłodniczej. Chłodnia wyposażona była w dwa agregaty chłodnicze. Czynnikiem chłodzącym był freon. Elektryczny układ sterowniczy zapewnił automatyczną regulację temperatury i utrzymanie w czasie prób stałej temperatury. Urządzenie rejestracyjne pozwalało rejestrować temperaturę płynu chłodniczego, oleju silnikowego, powietrza, prędkość obrotową itp. Poza tym istniała możliwość bezpośredniej obserwacji wizualnej i akustycznej silnika. Przy pomiarach przedmuchi i ciśnienia w cylindrze badany silnik napędzany był silnikiem elektrycznym.

1.2. Obiekt badań

Badania przeprowadzono dwukrotnie na silniku z zapłonem samoczynnym typu 359. Silniki te były montowane w samochodach ciężarowych STAR (200, 244, 266) produkowanych w FSC Stara-

chowice. Był to silnik o wtrysku bezpośrednim z komorą spalania w denku tłoka.

Dane techniczne silnika 359:

– układ cylindrów	rzędowy, pionowy
– liczba cylindrów	6
– średnica cylindrów	110 mm
– skok tłoka	120 mm
– pojemność skokowa	6,842 dm ³
– stopień sprężania	17
– kolejność zapłonu	1 – 5 – 3 – 6 – 2 – 4,
– moc znamionowa	110 kW przy 46,7 s-1 (150 KM przy 2800 min-1)
– moment obrotowy	440 Nm przy 30-36,87 s-1 (44 kGm przy 1800-2200 min-1)
– obroty biegu jałowego	8,3 s-1 (500 min-1)
– obroty maksymalne	52,5 s-1 (3160 min-1)
– minimalne jednostkowe zużycie paliwa	62 g/MJ (165 g/KMh)
– ciśnienie wtrysku	22-23 MPa (220-230 kG/cm ²)
– statyczny kąt wyprzedzania wtrysku	0,322 ± 0,017 rad (18,5 ± 1°)
– kąt przyspieszenia wtrysku	0,192 rad (11°) ¹
– luz zaworów ssących i wydechowych	0,3 mm

Przed badaniem oraz po każdym cyklu rozruchu sprawdzano luzy zaworowe, kąt wyprzedzenia wtrysku, działanie wtryskiwaczy i przeprowadzano wymaganą obsługę. W czasie badań silnik był wyposażony w alternator i sprężarkę, ale pozbawiony był tłumika wydechu oraz filtra powietrza.

2. METODYKA PRZEPROWADZONYCH BADAŃ

Badania mikrometryczne obejmowały swoim zakresem następujące pomiary:

- gładzi cylindrowych,
- tłoków,
- pierścieni tłokowych.

Poza tym przeprowadzono ważenie pierścieni tłokowych celem sprawdzenia ubytku ich masy w wyniku zużycia. Pomiary gładzi cylindrowych wykonano średnicówką czujnikową z działką 0,001 mm. Średnicówkę skalowano za pomocą płytek wzorcowych. Usta-

lono osiem zakresów pomiarów odległych od górnej krawędzi cylindra:

L_1 – 10 mm - odpowiadał połowie odległości pierwszego pierścienia uszczelniającego od górnej krawędzi w ZG,

L_2 – 20 mm - odpowiadał położeniu pierwszego pierścienia uszczelniającego w ZG,

L_3 – 35 mm - odpowiadał położeniu drugiego pierścienia uszczelniającego w ZG,

L_4 – 40 mm - odpowiadał położeniu trzeciego pierścienia uszczelniającego w ZG,

L_5 – 80 mm - odpowiadał połowie drogi pierwszego pierścienia uszczelniającego między punktami zwrotnymi,

L_6 – 140 mm - odpowiadał położeniu pierwszego pierścienia uszczelniającego w ZK,

L_7 – 235 mm - odpowiadał położeniu drugiego pierścienia uszczelniającego w ZK,

L_8 – 245 mm - przekrój oddalony od dolnej krawędzi tulei cylindrowej o 5 mm.

Przeprowadzono pomiary średnic części prowadzących tłoków w płaszczyźnie prostopadłej do osi sworzni tłokowego i płaszczyźnie osi sworzni. Pomiary wykonano przy pomocy mikrometru.

W pierścieniach tłokowych zmierzono następujące wielkości:

- wysokość pierścieni,
- szerokość pierścieni,
- luz zamków po włożeniu pierścieni do cylindrów,
- sprężystość,
- luz zamków w stanie swobodnym.

Wysokość pierścieni mierzono passametrem z działką do 0,002 mm w pięciu miejscach na obwodzie. Szerokość pierścieni mierzono przy pomocy czujnika z działką do 0,001 mm w pięciu miejscach na obwodzie. Luz zamka w stanie naprężenia mierzono szczelnomiernikiem, wkładając pierścień do odpowiednich cylindrów w miejscu ich górnego zwrotu. Pomiar sprężystości przeprowadzono przy zastosowaniu przyrządu działającego na zasadzie opasania pierścienia taśmą. Wielkość sił stycznych określano przez ściskanie pierścieni, aż do chwili, gdy luzy na zamkach osiągnęły wartości równe prześwitom pierścieni włożonych do cylindrów. Luzy zamków w stanie swobodnym mierzono suwmiarką.

Oprócz pomiarów mikrometrycznych, przeprowadzono ważenie pierścieni tłokowych. Pierścienie przed ważeniem oczyszczono z osadów.

Do pomiaru temperatury oleju, cieczy chłodzącej silnika i powietrza zastosowano termopary platynorod-platyna i dwunastostopniowy rejestrator temperatury.

W skład aparatury do pomiaru i rejestracji ciśnień szybkozmiennych wchodził:

- zestaw indykatora piezoelektrycznego typu RFR PM-11 składający się z:
 - czujnika piezoelektrycznego,
 - wzmacniacza sygnału ze stopniem elektromagnetycznym,
 - oscyloskopu dwustrumieniowego,
- oscylografu pętlicowego,
- zasilacza.

Rejestracji przebiegu ciśnień szybkozmiennych dokonano oscylografem pętlicowym na taśmie światłoczułej firmy Agfa. Prędkość przesuwu taśmy ustalono na 250 m/s, pionowy znacznik czasu na 0,02 s. Blokowy schemat układu pomiarowo-rejestrującego PM-1 przedstawiono na rys. 1.

Wzorcowania przetwornika dokonano przy pomocy przyrządu PDW-1. Urządzenie to umożliwiło wzorcowanie zbliżone do dynamicznego. Pomiary ciśnień szybkozmiennych przeprowadzono na szóstym cylindrze, wykorzystując do tego celu specjalnie wykonany

kanał, który umożliwił umieszczenie piezoelektrycznego przetwornika ciśnienia w komorze spalania.

Silnik smarowany był olejem Selektol Special Super Plus, a chłodzony płynem Borygo. Przy pomiarach naładowanie akumulatorów rozruchowych wynosiło zawsze 75% pojemności znamionowej.

Pomiary przedmuchów i ciśnienia w cylindrze prowadzono w temperaturach otoczenia: 253, 258, 263, 273 i 293 K dla prędkości obrotowej wału korbowego: 0.83; 1.66; 2.50; 3.33; 4.16 i 5.00 s⁻¹ przy trzech stanach technicznych silnika, którym odpowiadała maksymalne sumaryczne zużycie gładzi cylindrowych: 0.000 (silnik nowy), 0.105, 0.210 mm.

W celu obliczenia teoretycznego bilansu cieplnego konieczna była znajomość teoretycznego przebiegu ciśnienia i temperatury czynnika roboczego w cylindrze podczas rozruchu. Wzory na obliczenie $p = f(\alpha)$ i $T = f(\alpha)$ zostały przedstawione w dalszej części pracy.

W celu rozwiązania cytowanych równań różniczkowych sporządzono program komputerowy.

Podstawę obliczeń stanowiły:

- wartość współczynnika zachowania ładunku μ dla silnika typu 359 (sposób wyznaczania tej wielkości opisano w dalszej części pracy). Program umożliwiał aproksymację $\mu = f(\alpha)$ wielomianem,
- dane konstrukcyjne silnika typu 359:
 - V_s - objętość skokowa cylindra, m³,
 - V_k - całkowita objętość komory spalania, m³,

ε_M - współczynnik równy $1 - \frac{V_m}{V}$ (gdzie: V_m - objętość komory spalania w denku tłoka),

D - średnica cylindra, s - skok tłoka, S_t - powierzchnia denka tłoka m², λ - stosunek promienia wykorbienia do długości korbowodu, α_2 - kąt otwarcia zaworu wylotowego,

- dane termodynamiczne powietrza \bar{c}_v , \bar{c}_p (odpowiednio średnie ciepło właściwe powietrza przy stałej objętości i przy stałym ciśnieniu w zakresie temperatur 273-773 K), R - stała gazowa powietrza.

Obliczenia dokonano przy założeniu:

$T_{śc} = T_0$; ciśnienie w momencie zamknięcia zaworu ssącego przyjęto jako równe 101325 N/m².

Obliczenia przeprowadzono dla temperatur: 253 K; 273 K; 283 K; 293 K i prędkości obrotowych wału korbowego $n = 0,833$ s⁻¹ (50 min⁻¹); 1,66 s⁻¹ (100 min⁻¹); 2,50 s⁻¹ (150 min⁻¹); 3,33 s⁻¹ (200 min⁻¹); 4,16 s⁻¹ (250 min⁻¹); 5,00 s⁻¹ (300 min⁻¹). Obliczone przebiegi $p=f(\alpha)$ zestawione w tabelarycznej postaci stanowiły podstawę do obliczeń bilansu cieplnego.

W celu obliczenia przebiegu ciek:

L - pracy absolutnej, Δu - zmiany energii wewnętrznej, Q_u - ciepła odprowadzonego z uciekającym ładunkiem, $Q_{śc}$ - ciepła przejmowanego przez ścianki, też ułożono program na komputer.

3. ANALIZA CZYNNIKÓW TECHNICZNYCH TERMODYNAMICZNEGO MODELU PARAMETRÓW PROCESU SPRĘŻANIA PRZY ROZRUCHACH SILNIKA

Jak już wielokrotnie wspomniano w procesie sprężania podczas rozruchu silnika ma miejsce znaczna ucieczka czynnika roboczego, która praktycznie nie występuje przy pracy nagrzanego silnika. Z badań Kuperšmidta [5] i Gincburga [1] wynika, że straty ładunku mogą przekraczać 40% (rys.1). Zależą one od prędkości

obrotowej wału korbowego. Tak więc, rozpatrując proces sprężania przy rozruchu, należy uwzględnić ucieczkę ładunku.

Poniżej, w oparciu o termodynamiczne zależności, wyprowadzono wzory na ciśnienie p i temperaturę T czynnika w procesie sprężania w funkcji kąta obrotu wału korbowego α .

Zależność $T = f(\alpha)$

Zgodnie z pierwszą zasadą termodynamiki dla procesu sprężania istnieje zależność:

$$dQ = du + ApdV \quad \text{kJ} \quad (1)$$

gdzie:

dQ – elementarne ciepło, odprowadzane z układu (ma znak ujemny), kJ,

du – elementarny przyrost energii wewnętrznej czynnika, kJ,

p – chwilowe absolutne ciśnienie czynnika, N/m²,

dV – elementarna zmiana objętości czynnika, m³,

A – mechaniczny równoważnik ciepła, równy 10⁻³, kJ/Nm.

Odnośząc równanie (5.1) do elementarnego przyrostu kąta obrotu wału korbowego $d\alpha$ otrzymuje się:

$$\frac{dQ}{d\alpha} = \frac{du}{d\alpha} + Ap \frac{dV}{d\alpha} \quad \frac{\text{kJ}}{\text{rad}} \quad (2)$$

Elementarny przyrost energii wewnętrznej czynnika przy zmiennej jego ilości wyraża wzór:

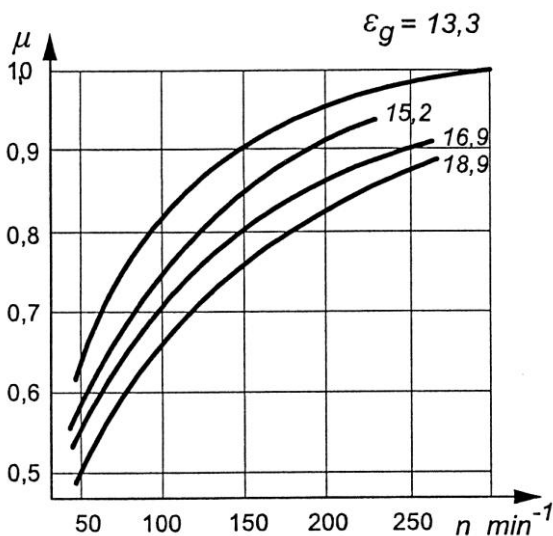
$$du = UdG + GdU \quad \text{kJ} \quad (3)$$

$$U = c_v T \quad (4)$$

gdzie:

c_v – ciepło właściwe czynnika w stałej objętości, kJ/kgK,

G – masa czynnika w danej chwili przemiany, kg,



Rys. 1. Zależność współczynnika zachowania ładunku μ od prędkości obrotowej wału korbowego n dla silnika D37M w temperaturze 273 K przy różnych geometrycznych stopniach sprężania ε_g

Jeżeli przez G_a oznaczono masę czynnika w momencie zamknięcia zaworu ssącego, a przez μ - chwilowy współczynnik zachowania ładunku, to masa ładunku w dowolnej chwili przemiany wynosiła:

$$G = G_a \mu \quad (5)$$

Podstawiając (5.4) i (5.5) do (5.3) otrzymuje się:

$$du = c_v T G_a d\mu + c_v G_a \mu dT \quad \text{kJ} \quad (6)$$

Ciepło odprowadzane z układu (ma znak ujemny) równe jest sumie ciepła przejmowanego przez ścianki cylindra Q_{sc} i ciepła Q_u ,

odprowadzanego z ładunkiem uciekającym przez nieszczelności złozenia tłok-pierścienie-cylinder.

Elementarne ciepło odprowadzane z uciekającym ładunkiem wynosi:

$$dQ_u = c_p T G_a d\mu \quad \text{kJ} \quad (7)$$

gdzie:

c_p – ciepło właściwe czynnika przy stałym ciśnieniu, kJ/kgK,

Ponieważ $d\mu$ jest ujemne, to po prawej stronie równania (8) jest znak dodatni. Elementarne ciepło przekazywane ściankom liczy się ze wzoru Newtona:

$$dQ_{sc} = -\alpha_g s(T - T_{sc}) dt \quad \text{kJ} \quad (8)$$

gdzie:

α_g – współczynnik przejmowania ciepła przez ścianki, kJ/m²Ks,

s – powierzchnia przejmowania ciepła, m²,

T_{sc} – temperatura ścianki, K,

t – czas trwania procesu, s,

T – temperatura czynnika w procesie sprężania.

Z kolei:

$$s = s_g + s_t + s_b \quad \text{m}^2 \quad (9)$$

gdzie:

s_g – powierzchnia głowicy cylindra, m²,

s_t – powierzchnia denka tłoka, m²,

s_b – powierzchnia boczna cylindra, wynosząca:

$$s_b = \pi D \frac{S}{2} \left(1 + \cos \alpha + \frac{\lambda}{2} \sin^2 \alpha \right) \quad \text{m}^2 \quad (10)$$

gdzie:

D – średnica cylindra, m,

s – skok tłoka, m,

λ – stosunek promienia korby do długości korbowodu.

korzystając z zależności:

$$d\alpha = 2\pi n dt \quad (11)$$

po podstawieniu wzorów (7), (8) i (9) do wzoru (2) otrzymuje się:

$$-\frac{\alpha_g s(T - T_{sc})}{2\pi n} + c_p T G_a \frac{d\mu}{d\alpha} = c_v T G_a \frac{d\mu}{d\alpha} + c_v G_a \mu \frac{dT}{d\alpha} + A_p \frac{dV}{d\alpha} \quad \frac{\text{kJ}}{\text{rad}} \quad (12)$$

Podstawiając w równaniu (5.12) za p wyrażenie z równania stanu:

$$p = \frac{G_a \mu RT}{V} \quad \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (13)$$

gdzie:

R – stała gazowa, Nm/kgK,

a następnie dzieląc przez $G_a c_v$ i podstawiając:

$$\frac{AR}{c_v} = k - 1 \quad (14)$$

gdzie:

$k = c_p/c_v$

otrzymuje się:

$$-\frac{\alpha_g s(T - T_{sc})}{2\pi n G_a c_v} + k T \frac{d\mu}{d\alpha} = T \frac{d\mu}{d\alpha} + T \frac{dT}{d\alpha} + \frac{k-1}{V} \mu T \frac{dV}{d\alpha} \quad \frac{\text{K}}{\text{rad}} \quad (15)$$

W literaturze istnieje szereg wzorów na współczynnik przyjmowania ciepła przez ścianki. W niniejszej pracy wyprowadzono wzór

$T = f(\alpha)$ przy zastosowaniu wzorów Woschni i Nusselta. Wzory te zaczerpnięto z pracy [5].

Według Woschni[11] wzór na współczynnik przejmowania ciepła ma postać:

$$\alpha_g = 110D^{-0,2}T^{-0,53}p^{0,8}(2,28c_{sr})^{0,8} \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2\text{Kh}} \quad (16)$$

gdzie:

D – średnica cylindra, m,

T – chwilowa temperatura czynnika, K,

p – chwilowe ciśnienie czynnika, $\frac{\text{kG}}{\text{cm}^2}$,

c_{sr} – średnia prędkość tłoka równa: $c_{sr} = 2sn$,

s – skok tłoka, m,

n – częstotliwość obrotów silnika, s^{-1} .

Po przejściu na układ SI otrzymuje się:

$$\alpha_g = \frac{4,186 \cdot 110D^{-0,2}T^{-0,53}p^{0,8}(2,28c_{sr})^{0,8}}{3600 \cdot 98066^{0,8}} \quad (17)$$

gdzie:

p – chwilowe ciśnienie czynnika, $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

Podstawiając za p wyrażenie z równania stanu (13) i podstawiając równanie (17) do równania (15), po prostych przekształceniach otrzymuje się:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{d\alpha} = & \left(\frac{k-1}{\mu} \frac{d\mu}{d\alpha} - \frac{k-1}{V} \frac{dV}{d\alpha} \right) T + \\ & + \frac{-4,186 \cdot 110D^{0,2}(2,28c_{sr})^{0,8} s \left(\frac{G_a \mu R}{V} \right)^{0,8}}{3600 \cdot 98066^{0,8} \cdot 2\pi n G_1 c_v \mu} T^{1,27} + \\ & + \frac{4,186 \cdot 110D^{-0,2}(2,28c_{sr})^{0,8} s \left(\frac{G_a \mu R}{V} \right)^{0,8}}{3600 \cdot 98066^{0,8} 2\pi n G_a c_v \mu} T_{sc} T^{0,27} \frac{\text{K}}{\text{rad}} \end{aligned} \quad (18)$$

Oznaczając czynnik stojący przy T jako B , przy $T^{1,27}$ jako E , przy $T^{0,27}$ jak C – otrzymuje się następujące równanie różniczkowe:

$$\frac{dT}{d\alpha} = ET^{1,27} + BT + CT^{0,27} \frac{\text{K}}{\text{rad}} \quad (19)$$

Równanie to można rozwiązać przez numeryczne całkowanie.

W wyrażeniach E , B , C funkcjami kąta obrotu wału korbowego są:

s – powierzchnia przejmowania ciepła – wzór (9),

V – chwilowa objętość czynnika.

$$V = V_k + \frac{V_s}{2} \left(1 + \cos \alpha + \frac{\lambda}{2} \sin^2 \alpha \right) \text{ m}^3 \quad (20)$$

gdzie:

V_k – objętość komory sprężania, m^3 ,

V_s – objętość skokowa cylindra, m^3 ,

λ – jak we wzorze (5.10),

μ – chwilowy współczynnik zachowania ładunku.

zależność $\mu = f(\alpha)$ można wyznaczyć przez pomiar ciśnienia w przestrzeniach między-pierścieniowych czujnikami umieszczonymi w ścianie cylindra na normalnie pracującym silniku [109]. Chwilowy współczynnik zachowania ładunku można również obliczyć wykorzystując wykresy $p = f(\alpha)$ i $t = f(\alpha)$.

obliczenia prowadzi się z równania stanu:

$$\mu = \frac{T_1 p V}{T p_1 V_1} \quad (21)$$

gdzie:

T_1, p_1, V_1 – odpowiednio: temperatura, ciśnienie i objętość czynnika w momencie zamknięcia zaworu ssącego,

T – chwilowa temperatura,

p – ciśnienie,

V – objętość czynnika.

Masę ładunku w momencie zamknięcia zaworu ssącego liczy się ze wzoru:

$$G_a = \frac{p_1 V_1}{RT_1} \quad (22)$$

Według Nusselta wzór na współczynnik przejmowania ciepła ma postać:

$$\alpha_g = 0,99(1 + 1,24c_{sr}) \sqrt[3]{p^2 T} \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\text{Kh}} \quad (23)$$

gdzie:

c_{sr}, p, T – jak we wzorze (5.16).

Przechodząc na układ SI otrzymamy

$$\alpha_g = \frac{4,186 \cdot 0,99(1 + 1,24c_{sr}) \sqrt[3]{p^2 T}}{3600 \sqrt[3]{98066^2}} \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2\text{Ks}} \quad (24)$$

gdzie:

p – chwilowe ciśnienie czynnika, N/m^2 ,

Podstawiając za p wyrażenie z równania stanu (13) i podstawiając (24) do (15), po prostych przekształceniach otrzymuje się:

$$\frac{dT}{d\alpha} + \Phi T + FT^2 = 0 \frac{\text{K}}{\text{rad}} \quad (25)$$

przy czym:

$$\begin{aligned} \Phi = & \frac{k-1}{V} \frac{dV}{d\alpha} + \frac{1-k}{\mu} \frac{d\mu}{d\alpha} - \\ & - \frac{4,186 \cdot 0,99(1 + 1,24c_{sr}) s \sqrt[3]{\frac{R^2}{G_a \mu V^2} T_{sc}}}{3600 \sqrt[3]{98066^2} 2\pi n c_v} \end{aligned} \quad (26)$$

$$F = \frac{4,186 \cdot 0,99(1 + 1,24c_{sr}) s \sqrt[3]{\frac{R^2}{G_a \mu V^2}}}{3600 \sqrt[3]{98066^2} 2\pi n c_v} \quad (27)$$

Równanie (5.25) ma następujące rozwiązanie:

$$T = \frac{T_1}{e^{\int_{\alpha_1}^{\alpha} \Phi d\alpha} (1 + T_1) \int_{\alpha_1}^{\alpha} F e^{-\int_{\alpha_1}^{\alpha} \Phi d\alpha} d\alpha} \quad (28)$$

Zależność $p = f(\alpha)$

Z równania stanu wynika:

$$d(pV) = RG_a d(\mu T) \quad (29)$$

Stąd:

$$Vdp + pdV = RG_a T d\mu + RG_a \mu dT \quad (30)$$

Podstawiając wzór (30) do wzoru (7) na elementarny przyrost energii wewnętrznej otrzymuje się:

$$du = \frac{c_v}{R} (pdV + Vdp) \text{ kJ} \quad (31)$$

Podstawiając zależności (31), (8), (9) i (11) do wzoru (5) otrzymuje się:

$$\begin{aligned} & \frac{-\alpha_g s(T - T_{s\acute{c}})}{2\pi n} + c_p T G_1 \frac{d\mu}{d\alpha} = \\ & = \frac{c_v}{R} \left(p \frac{dV}{d\alpha} + V \frac{dp}{d\alpha} \right) + A p \frac{dV}{d\alpha} \quad \text{kJ} \quad (32) \end{aligned}$$

Podstawiając za T wyrażenie z równania stanu:

$$T = \frac{pV}{G_1 \mu R} \quad (33)$$

i dzieląc następnie przez c_v oraz oznaczając:

$$\begin{aligned} \frac{A}{c_v} &= \frac{k-1}{R} \quad (34) \\ k &= c_p/c_v \end{aligned}$$

otrzymuje się:

$$\begin{aligned} & \frac{-\alpha_g s \left(\frac{pV}{G_1 \mu R} - T_{s\acute{c}} \right)}{2\pi n c_v} + \frac{k \cdot pV}{R\mu} \frac{d\mu}{d\alpha} = \frac{\text{kgK}}{\text{rad}} \quad (35) \\ & = \frac{1}{R} \left(p \frac{dV}{d\alpha} + V \frac{dp}{d\alpha} \right) + \frac{k-1}{R} p \frac{dV}{d\alpha} \end{aligned}$$

Podstawiając do (35) równanie na współczynnik przejmowania ciepła – wzór Woschni (17), w którym zastąpiono T wyrażeniem z równania stanu (33), po prostych przekształceniach otrzymuje się:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{d\alpha} &= \left(\frac{k}{\mu} \frac{d\mu}{d\alpha} - \frac{k}{V} \frac{dV}{d\alpha} \right) p + \frac{N}{m^2 \text{rad}} \\ & + \frac{-4,186 \cdot 110D^{-0.2} (2,28c_{s_r})^{0.8} sR \left(\frac{V}{G_1 \mu R} \right)^{0.47}}{3600 \cdot 98066^{0.8} 2\pi n c_v V} p^{1.27} + \\ & + \frac{4,186 \cdot 110D^{-0.2} (2,28c_{s_r})^{0.8} sR \left(\frac{V}{G_1 \mu R} \right)^{-0.53}}{3600 \cdot 98066^{0.8} 2\pi n c_v V} T_{s\acute{c}} p^{0.27} \quad (36) \end{aligned}$$

Oznaczając czynnik stojący przy p jako B' , przy $p^{1.27}$ jako E' , przy $p^{0.27}$ jako C' , otrzymuje się:

$$\frac{dp}{d\alpha} = E' p^{1.27} + B' p + C' p^{0.27} \quad \frac{\text{N}}{\text{m}^2 \text{rad}} \quad (37)$$

Równanie (37) rozwiązuje się analogicznie jak równanie (19) przez numeryczne całkowanie.

Podstawiając do wzoru (35) wzór na współczynnik przejmowania ciepła według Nusselta (24), w którym T zastąpiono wyrażeniem z równania stanu (33), po prostych przekształceniach otrzymuje się:

$$\frac{dp}{d\alpha} + \Phi p + F' p^2 = 0 \quad (38)$$

przy czym:

$$\begin{aligned} \Phi' &= \frac{k}{V} \frac{dV}{d\alpha} - \frac{k}{\mu} \frac{d\mu}{d\alpha} - \\ & - \frac{4,186 \cdot 0,99(1 + 1,24c_{s_r})s}{3600^3 \sqrt[3]{98066^2 2\pi n c_v}} \sqrt[3]{\frac{R^2}{G_1 \mu V^2} T_{s\acute{c}}} \quad (39) \end{aligned}$$

$$F' = \frac{4,186 \cdot 0,99(1 + 1,24c_{s_r})s}{3600^3 \sqrt[3]{98066^2 2\pi n c_v G_1 \mu}} \sqrt[3]{\frac{V}{G_1 \mu R}} \quad (40)$$

Rozwiązanie równania (38) jest analogiczne jak równania (28). Należy zaznaczyć, że znając $T = f(\alpha)$ można z równania stanu (13) obliczyć $p = f(\alpha)$.

Dla procesu sprężania w przypadku ucieczki ładunku wykładnik politropy m oblicza się z równań:

$$T_k = T_1 \left(\mu_k \frac{V_1}{V} \right)^{m-1} \quad (41)$$

$$p_k = p_1 \left(\mu_k \frac{V_1}{V} \right)^m \quad (42)$$

gdzie:

T_k, p_k, μ_k – temperatura, ciśnienie i współczynnik zachowania ładunku na końcu procesu sprężania przy wyłączonym wtrysku.

WNIOSKI

- Zaprezentowane analizy i obliczenia pozwoliły, że:
- wyprowadzono równania (41) i (42) na ciśnienie p i temperaturę dla procesu sprężania w przypadku ucieczki ładunku,
 - wyprowadzono równania (41) i (42) umożliwiające obliczenie wykładnika politropy w przypadku ucieczki ładunku
 - obliczając z równań (41) i (42) wykładnik politropy wynika, że maleje on wraz ze wzrostem ucieczki ładunku.

Resumując podjęta przez autorów próba przeprowadzenia szerszej analizy termo-dynamicznej procesów sprężania poprzez wyprowadzenie równań na ciśnienie temperatury wykładnika politropy w przypadku ucieczki ładunku nie wyczerpuje w pełni istoty zagadnienia, a stanowi jedynie próbę zasygnalizowania złożoności badanej problematyki dotyczącej analizy czynników ekonomiczno-technicznych termodynamicznego modelu parametrów procesów sprężania przy rozruchu silnika w niskich temperaturach.

BIBLIOGRAFIA

1. Gincburg J., Minajev N.: Sposob utučenija puskowych kačiestv dizelja. Avtomobilnaja Promyšlennost nr 2/1965
2. Koliński K., Przebieg rozruchu silników o zapłonie samoczynnym w niskiej temperaturze. Auto Technika Motoryzacja nr 4/1991.
3. Koliński K., Pszczółkowski J., Stanowisko do badań właściwości rozruchowych silników o zapłonie samoczynnym. Rozruch silników spalinowych. Materiały Sympozjum KEPS, Politechnika Szczecińska, Szczecin 2000,
4. Krause H.: Reibungsanalyse beim Kaltstart einer Verbrennungskraftmaschine. MTZ 1965 nr 26/10, nr 26/12, 1966 nr 27/5, nr 27/9.
5. Kuperszmidt W. L.: Wlijanije utieček zaráda wozducha na process szatja pri puskie dizelja. Traktory i Sielchozmašiny nr 8/1965.
6. Lewicki J., Zużycie cylindrów silnika o zapłonie samoczynnym typu 359 podczas rozruchu i rozgrzewania w niskich temperaturach otoczenia. Eksploatacja silników spalinowych. Zeszyt nr 10. KEPS, Politechnika Szczecińska, Szczecin 2004.
7. Mysłowski J., Rozruch silników samochodowych z zapłonem samoczynnym. WNT, Warszawa 1996.
8. Tłuszczyński L., Bohuszewicz W., Eksploatacja samochodu w niskich temperaturach. WPT nr 4/1990.

9. Ullrich K., Der Einfluss der Ölviskosität auf das Durchdrehmoment beim Kaltstart eines Dieselmotors. Kraftfahrzeugtechnik nr 5/1973.
10. Velickin L. N., Chomienko J. M., Issledovanie vlijaniya iznosov detalej dizelja D-50 na ego puskovye kačiestva. Traktory i selchomašiny nr 8/1966.
11. Woschni G.: Berechnung der Wandverluste und der thermischen Belastung der Bauteile von Dieselmotoren. MTZ nr 12/1970.

ANALYSIS OF THE FACTORS OF TECHNICAL ECONOMIC PARAMETERS IN THE COMPRESSING PROCESS MODEL THERMODYNAMIC ENGINE STARTING AT LOW TEMPERATURES

Abstract

In conditions of low temperatures starting properties of engines are playing the crucial role about the self-ignition. So far thermodynamic models which would capture the process of the warming up the engine about the self-ignition, are missing especially in lowered environmental temperatures to thermodynamic parameters of the process of the prestressing.

This paper constitutes the fragment of examinations in the recalled subject matter. Presenting the attempt to lead equations to the pressure of the temperature of the exponent was his crucial objective politropy in case of the escape of the cargo

Autorzy:

Wojciech Lewicki - Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Ekonomiczny; 71-210 Szczecin; ul. Żołnierska 47. Tel: + 48 91 449 69 00, Fax: + 48 91 449 69 50, Wojciech.Lewicki@zut.edu.pl

Jan Lewicki