ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1988

Seria: TRANSPORT z. 6 Nr kol. 908

Jacek MAĆKOWSKI

WPŁYW DODATKU METANU NA SPRAWNOŚĆ SILNIKA SPALINOWEGO

Streszczenie. Mimo że praktyczna przydatność obliczeń cieplnych jest ograniczona, a dokładność wyników zależy w bardzo dużym stopniu od prawidłowości doboru licznych współczynników empirycznych, to jednak na całym świecie występują tendencje do ich rozwijania i udoskonalania.

W pracy teoretycznie określono wpływ dodatku metanu na sprawność silnika przy zmniejszających się współczynnikach zapotrzebowania powietrza. Obliczenia podano w formie przykładu, w ten sposób bardzo ułatwiając zrozumienie toku postępowania. Ponieważ ilość niewiadomych w obliczeniach jest większa od ilości równań wiążących je między sobą, występujące problemy można było rozwiązywać tylko na drodze iteracji przy zastosowaniu maszyn liczących. W tym celu, opierając się na algorytmie opisanym w pracy [1], otrzymano wyniki potwierdzające przydatność obliczeń teoretycznych oraz słuszność poczynionych założeń, przyczyniając się w ten sposób do skracania kosztownych badań stanowiskowych.

1. Wprowadzenie

Mimo że obecnie prowadzone na całym świecie teoretyczne metody badania zachowania się paliw alternatywnych w czasie spalania tylko w niewielkim stopniu przyczyniają się do rozwiązania zagadnień praktycznych, to jednak złożoność problemów optymalizacji (niejednokrotnie wzajemnie się wykluczających) stwarza potrzebę ciągłego ich udoskonalania.

Ponieważ gaz ziemny, jak przypuszcza się, będzie stanowił pomost między epoką ropy naftowej a drugą generacją elektrowni atomowych, która zdaniem E. Schmita zacznie się za 30 - 40 lat, obecnie wiele ośrodków naukowych na całym świecie zastanawia się nad możliwościami jego wykorzystania. Wydaje się, że prostym sposobem złagodzenia energetycznych problemów będzie wykorzystanie gazu ziemnego jako paliwa silnikowego.

Dlatego jednym z problemów, który obecnie usiłuje się rozwiązać teoretycznie, jest właściwy dobór stosunku gazu do paliwa ciekłego i mimo że obliczenia te są prowadzone z dużym przybliżeniem spowodowanym przyjętymi założeniami i bardzo uproszczonym tokiem obliczeniowym, to jednak wyciąga się z nich wnioski, które mogą znaleźć uzasadnienie w praktyce przyczyniając się w ten sposób do skracania badań.

Poza tym obliczenia cieplne silnika mają jednak pewną wartość dydaktyczną i mogą być niejednokrotnie przydatne do analizy niektórych zagadnień teoretycznych, dlatego też podano dalej jeden ze schematów obliczeniowych umożliwiający określenie stosunku paliwa alternatywnego, jakim jest metan, do paliwa ciekłego w celu wyznaczenia wpływu nastawów regulacyjnych na sprawność cieplną silnika. Ilość niewiadomych w obliczeniach tych jest większa od ilości równań wiążących je między sobą, przy czym niejednokrotnie szereg danych znajdowanych na samym końcu obliczeń jest potrzebnych na ich wstępie. Dlatego też konieczne jest stosowanie tu metody kolejnych przybliżeń.

2. Założenia

Przed rozpoczęciem obliczeń cieplnych należy określić przypuszczalną rozpiętość takich parametrów charakterystycznych silnika, jak: stosunek omawianych paliw, współczynnik nadmiaru powietrza, współczynnik resztek spalin itd. Niektóre z tych parametrów posłużą jako dane wyjściowe (np. stopień sprężania), inne pozwolą na ocenę otrzymanych wyników.

Silnik, którego obieg przedstawiono na rys. 1, jest zasilany, jak zaznaczono wcześniej, paliwem gazowym CH_4 i paliwem ciekłym $C_{12}H_{12}$. Do obliczeń przyjęto następujące założenia:

$P_o = 0,1$ MPa - ciśnienie otoczenia,

$T_o = 3000$ K - temperatura otoczenia,

$\Delta T = 10$ K - przyrost temperatury mieszanki,

$\gamma = 0,05$ - współczynnik resztek spalin,

$T_{4\ pocz} = 1100$ K - temperatura końca rozprężania,

$\eta = 0,6$ - sprawność napełniania,

$X = 0,5$ - stosunek omawianych paliw,

$\lambda = 1,2$ - współczynnik nadmiaru powietrza,

$R_m = 8314$ J/Kmol.deg - uniwersalna stała gazowa,

$\varepsilon = 7,5$ - stopień sprężania,

$V_s = 0,000292\ m^3 = 2,92^{-4} m^3$ - objętość skokowa,

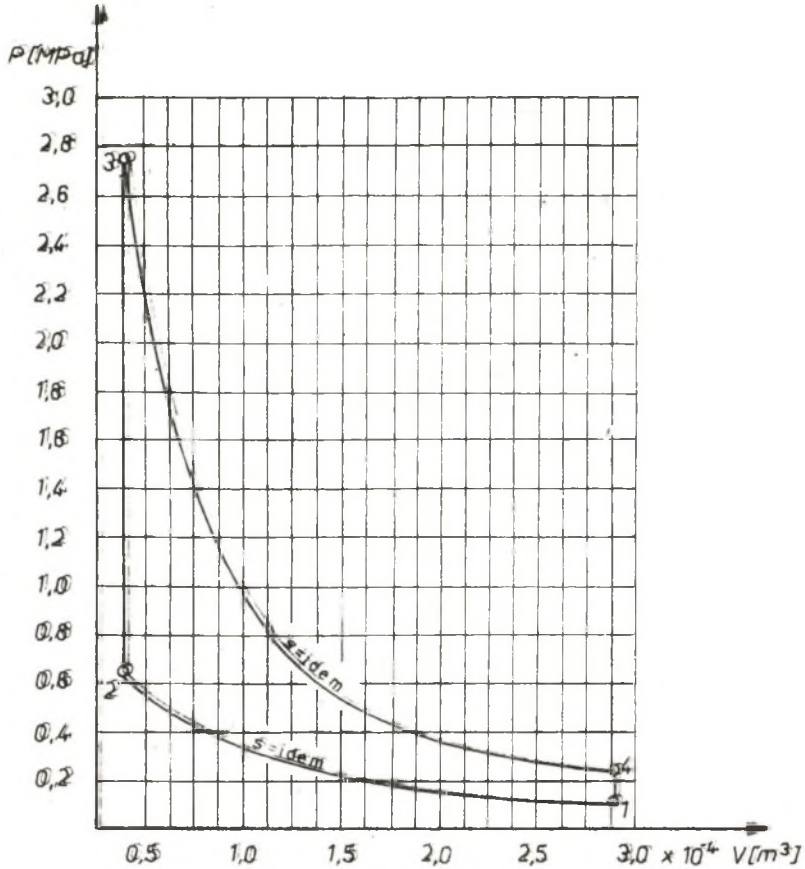
$Wu_{CH_4} = 50150$ kJ/kg - wartość opałowa gazu,

$Wu_{C_{12}H_{22}} = 46265$ kJ/kg - wartość opałowa paliwa ciekłego,

$R_{powietrza} = 287,1$ J/kg.deg - stała gazowa powietrza,

Zastosowana dokładność obliczeń przy iteracji - 0,5%.

Gazy biorące udział w przemianach termodynamicznych traktujemy jako gazy półdoskonałe.



Rys. 1. Analizowany obieg
Fig. 1. The analized cycle

3. Określenie parametrów końca sprężania

Ponieważ sprężanie gazu zakładamy według przemiany izentropowej, porównując entropię w punkcie 1 i 2 (rys. 1)

$$S_1\ (T_1) = S_2\ (T_2) \tag{1}$$

otrzymujemy równanie umożliwiające na drodze iteracji wyznaczenie T_2. W tym celu równanie (1) zapisujemy w postaci:

$$\Sigma n_{i1}\left[Ms_i(T_1)-Rm.\ln\frac{p_{i_1}}{p_o}\right] = \Sigma n_{i2}\left[Ms_i(T_2)-Rm.\ln\frac{p_{i_2}}{p_o}\right] \tag{2}$$

W celu określenia temperatury T_2 z równania (2) niezbędne jest określenie ilości kmol n_1 poszczególnych składników gazu oraz entropii właściwej $Ms_i(T)$.
Temperaturę T_1 przy podstawieniu wartości założonych obliczamy ze wzoru:

$$T_1 = \frac{T_o + \Delta T + \gamma \cdot T_4}{1 + \gamma} = 347{,}62 \text{ K} .$$

Ponieważ gaz biorący udział w przemianie traktujemy jako gaz półdoskonały, możemy stosować równanie stanu do określenia ilości kilomoli w punkcie 1.

$$n_1 = \frac{p_1 \cdot V_1 \cdot \eta_V}{Rm \cdot T_1}$$

$$n_1 = \frac{100\,000 \cdot 0{,}292 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}6}{8314 \cdot 347{,}62} = 0{,}606 \cdot 10^{-5} \text{ kmol}$$

Ilość kmoli danego składnika gazu określamy na podstawie równania:

$$n_i = n_1 \cdot z_i ,$$

gdzie:

z_i - udziały molowe składników powietrza.

Ilość kmoli tlenu i azotu w punkcie 1 wynoszą odpowiednio:

$$n_{1_{O_2}} = 0{,}21 \cdot n_1 = 0{,}127 \cdot 10^{-5} \text{ kmoli}$$

$$N_{1_{N_2}} = 0{,}78 \cdot n_1 = 0{,}473 \cdot 10^{-5} \text{ kmoli},$$

Natomiast ciśnienia cząstkowe tlenu i azotu w pkt. 1

$$p_{1_{O_2}} = 0{,}21 \cdot p_1 = 0{,}21 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 ,$$

$$p_{1_{N_2}} = 0{,}78 \cdot p_1 = 0{,}78 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 .$$

Obliczanie entropii właściwej

Ponieważ w tablicy 1 nie zawsze są podane wartości entropii właściwej dla temperatur nas interesujących, zakładamy, że entropia właściwa jest zależna liniowo w zakresie temperatur sąsiadujących z daną temperaturą, np. T = 400 K (czyli w zakresie 373,15 - 473,15 K) (rys. 2). Znając wartość dla temperatury 373,15 K oraz dla temperatury 473,15 K z tablicy, określamy entropię właściwą dla temperatury 400 K w następujący sposób:

$$\frac{Ms\ (TK) - Ms\ (TP)}{TK - TP} = \frac{x}{T - TP}$$

$$Ms\ (T) = Ms\ (TP) + x$$

$$Ms\ (T) = Ms\ (TP) + \frac{T - TP}{TK - TP} \cdot [Ms\ (TK) - Ms\ (TP)]\ ,$$

tak więc

$$Ms(400\ K) = Ms(373,15) + \frac{400 - 373,15}{473,15-373,15} \cdot [Ms(473,15)-Ms(373,15)]$$

Dla tlenu entropia właściwa w temperaturze 400 K wynosi więc:

$$Ms(400\ K) = 9,048 + \frac{26,85}{100}\ (16,262 - 9,048) = 9,048 + 1,92 =$$

$$= 10,968\ \frac{kJ}{kmol \cdot deg}\ .$$

W temperaturze T_1 entropia właściwa dla tlenu i azotu wynosi odpowiednio:

$$Ms_{O_2}\ (T_1) = 6,738\ \frac{kJ}{kmol \cdot deg}\ ,$$

$$Ms_{N_2}\ (T_1) = 6,769\ \frac{kJ}{kmol \cdot deg}\ .$$

Możemy przystąpić teraz do wyznaczania entropii S_1 w pkt. 1 na podstawie wzoru (2), który rozpisujemy dla tlenu i azotu:

$$S_1 = n_{1_{O_2}} \cdot \left[Ms_{O_2}(T_1)-Rm.\ln \frac{p_{1_{O_2}}}{p_o}\right] + n_{1N_2} \cdot \left[Ms_{N_2}(T_1)-Rm.\ln \frac{p_{1_{N_2}}}{p_o}\right]$$

$$S_1 = 0,127 \cdot 10^{-5}\ (6,738 - 8,314 \cdot \ln \frac{0,21 \cdot 10^5}{100\ 000}) + 0,473\ .$$

$$\cdot\ 10^{-5}\ \cdot\ (6{,}769 - 8{,}314\ \ln \frac{0{,}781\ \cdot\ 10^{5}}{100\ 000}) =$$

$$= 0{,}6687287\ \cdot\ 10^{-4}\ \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}\ \cdot\ \text{deg}}\ .$$

Tablica 1

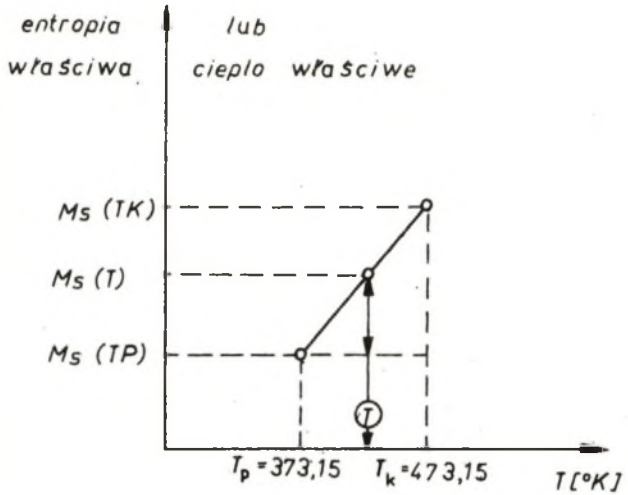
Entropia właściwa (Ms) gazów $\frac{\text{kJ}}{\text{kmol.deg}}$

T K	N_2	O_2	CO_2	H_2O
273,15	0,000	0,000	0,000	0,000
373,15	9,090	9,048	11,853	10,387
473,15	16,048	16,262	21,813	18,615
573,15	21,742	22,265	30,363	25,397
673,15	26,607	27,465	38,129	31,280
773,15	30,886	32,054	45,033	36,509
873,15	34,725	36,174	51,313	41,257
973,15	38,221	39,917	57,074	45,632
1073,15	41,433	43,333	62,396	49,697
1173,15	44,405	46,486	67,340	53,511
1273,15	47,168	49,413	71,950	57,116
1373,15	49,760	52,138	76,271	60,537
1473,15	52,193	54,692	80,332	63,794
1573,15	54,483	67,100	84,163	66,905
1673,15	56,652	59,373	87,789	69,878
1773,15	58,707	61,525	91,226	72,725
1873,15	60,663	63,577	94,492	75,448
1973,15	62,530	65,532	97,607	78,126
2073,15	64,309	67,399	100,592	80,680
2173,15	66,013	69,195	103,427	83,150
2273,15	67,646	70,920	106,152	85,536
2373,15	69,212	72,578	108,765	87,797
2473,15	70,723	74,173	111,277	90,016
2573,15	72,176	75,718	113,693	92,151
2673,15	73,575	77,213	116,020	94,245
2773,15	74,927	78,662	118,265	96,255
2873,15		80,060		98,180
2973,15		81,125		100,023
3273,15	80,554	87,044	128,786	104,586

Przy założonym sposobie dostarczania paliwa ciekłego w postaci wtrysku w czasie sprężania występuje tylko powietrze, w którym pozostałe składniki, jak argon, z wystarczającą dokładnością możemy pominąć. Natomiast przy dostarczaniu drugiego paliwa (w naszym przypadku metanu) musimy uwzględnić wcześniej jego wpływ.

Objętość w punkcie 2 wyznaczamy ze wzoru:

$$V_2 = V_s \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1} = 0{,}449\ \cdot\ 10^{-4}\ m^3.$$



Rys. 2. Schemat postępowania przy wyznaczaniu z tablic entropii właściwej i ciepła właściwego

Fig. 2. Block diagram of assignment of proper entropy and specific heat coefficient from tables

Następnie na podstawie równania stanu wyliczamy ciśnienie p_2

$$p_2 = \frac{n_2 \cdot Rm \cdot T_2}{V_2} .$$

W tym celu przyjmujemy, że temperatura końca sprężania wynosi T_2 = 600 K. Ponieważ zakładamy, że w czasie sprężania skład gazu nie ulega zmianie i że brak przedmuchów, przyjmujemy, że

$$\Sigma n_{11} = \Sigma n_{12} = n_1 ,$$

a ciśnienie w punkcie 2 odpowiadające założonej T_2 wynosi wtedy:

$$p_2 = \frac{0,606 \cdot 10^{-5} \cdot 8314 \cdot 600}{0,449 \cdot 10^{-4}} = 673150,5 \ N/m^2 ,$$

odpowiednio ciśnienie cząstkowe azotu i tlenu w pkt. 2 wynosi wtedy:

$$p_{2_{N_2}} = 0{,}78 \cdot p_2 = 525528{,}5 \ N/m^2$$

$$p_{2_{O_2}} = 0{,}21 \cdot p_2 = 141361{,}6 \ N/m^2 .$$

Postępując podobnie jak przy wyznaczaniu entropii w pkt. 1, entropia w punkcie 2 wynosi:

$$S_2 = 0{,}127 \cdot 10^{-5} \left[23{,}661 - 8{,}314 \ln \frac{141361{,}6}{100\ 000}\right] + 0{,}473 \cdot 10^{-5}$$

$$\left[23{,}048 - 8{,}314 \ln \frac{5255285}{100\ 000}\right] = 0{,}707508 \cdot 10^{-4} \ \frac{kJ}{kmol \cdot deg} .$$

Zgodnie z założeniem przyjęliśmy dokładność obliczeń 0,5%, a zatem powinno być spełnione następujące wyrażenie:

$$\frac{S_2 - S_1}{S_1} \cdot 100\% \leqslant 0{,}5\% .$$

W naszym przypadku błąd wyniósł 5,051%.
Wynika z tego, że nałożyliśmy za wysokie temperatury T_2. Zakładamy je mniejsze o 5 K i powtarzamy obliczenia S_2 aż do chwili, gdy wyrażenie będzie mniejsze niż przyjęty błąd.

Jeżeli entropia w punkcie 2 jest większa od entropii w punkcie 1, temperatury T_2 do ponownych obliczeń trzeba przyjąć mniejsze od założonej i odwrotnie, gdy S_2 jest mniejsze od S_1, to T_2 należy zwiększyć, w naszym przypadku T_2 należy zmniejszyć. Nasz dopuszczalny błąd 0,29% osiągnięto dopiero przy T_2 = 585 K. Ostatecznie wyznaczone ciśnienie w pkt. 2 wynosi wtedy p_2 = 656321,7 N/m^2 i to ciśnienie przyjęto do dalszych obliczeń.

4. Określenie parametrów końca spalania

Mając dane wzory chemiczne węglowodorów o wzorze ogólnym C_mH_n możemy określić udziały wagowe węgla i wodoru w danym paliwie:

$$c = \frac{12\ m}{M_p} , \qquad h = \frac{n}{M_p} ,$$

gdzie masa drobinowa Mp liczona jest ze wzoru:

$$Mp = 12\ m + n$$

i tak dla dwucykloheksanu i metanu masa drobinowa wynosi odpowiednio:

$$Mp_{C_{12}H_{22}} = 12 \cdot 12 + 22 = 166\ kg/mol,$$

$$Mp_{CH_4} = 12 \cdot 1 + 4 = 16\ kg/kmol.$$

Udział gramowy węgla i wodoru w dwucykloheksanie wynosi:

$$c_{C_{12}H_{22}} = \frac{12 \cdot 12}{166} = 0{,}8675\ ,$$

$$h_{C_{12}H_{22}} = \frac{22}{166} = 0{,}1325\ ,$$

natomiast udziały węgla i wodoru w metanie wynoszą:

$$c_{CH_4} = \frac{12}{16} = 0{,}75\ , \qquad h_{CH_4} = \frac{4}{16} = 0{,}25\ .$$

Jak wiadomo, do spalania 1 kg paliwa o kilogramowym składzie c, h zużywa się tlenu

$$O_t = \frac{8}{3}\ c + 8\ h\ \frac{kg\ O_2}{kg\ pal}\ ,$$

zapotrzebowanie powietrza l_t dla badanych paliw wynosi:

dla CH_4 $\quad l_t = \frac{O_t}{0{,}23} = 19{,}04762\ \frac{kg\ pow}{kg\ pal}$,

dla $C_{12}H_{12}$ $\quad l_t = 16{,}06349\ \frac{kg\ pow.}{kg\ pal.}$

Dla mieszaniny palnej

$$l_t = 19{,}0476\ x + 16{,}0635\ (1-x)\ \frac{kg\ pow}{kg\ pal}\ .$$

W naszym przypadku dla założonego x = 0,5 zapotrzebowanie powietrza wynosi:

$$l_t = 17{,}555 \frac{kg\ pow}{kg\ pal} .$$

Ilość ciepła, jaką możemy dostarczyć do cylindra silnika zasilanego gazem, zależy od objętości wartości opałowej mieszanki. Wartość opałową objętościową W_{un} mieszanki wyznaczamy z kilogramowej wartości opałowej paliwa:

$$W_{un} = \frac{W_u}{V\ mieszanki} = \frac{W_u}{V\ par\ paliwa + V\ powietrza} ,$$

gdzie:

$$V_{par\ paliwa} = \frac{T_n}{p_n} \cdot R_p = \frac{273}{103330} \cdot R_p = 0{,}00264 \cdot R_p \frac{n\ m^3}{kg\ pal} .$$

Dla mieszanek ubogich $\lambda > 1$ możemy zapisać:

$$W_{un} = \frac{W_u}{0{,}00264 \cdot Rp + 0{,}775\ l_t \cdot \lambda} . \tag{3}$$

Dla mieszanek bogatych spalanych przy niedoborze powietrza nie wykorzystujemy całego ciepła zawartego w paliwie. Wartość opałową przyjmujemy, że będzie mniejsza o stałą niedopału chemicznego ΔW_u.
W naszym przypadku, przy założonym $\lambda = 1{,}2$, stałej niedopału chemicznego nie wyznacza się.
Wartość opałowa paliwa:

$$Wu = Wu_{CH_4} \cdot x + Wu_{C_{12}H_{22}} \cdot (1-x) = 0{,}5 \cdot 50150 + 0{,}5 \cdot$$

$$46265 = 48202{,}5 \frac{kJ}{kg\ pal} .$$

Indywidualna stała gazowa paliw wynosi odpowiednio dla CH_4 i $C_{12}H_{22}$:

$$R_i = \frac{Rm}{Mp_i} ,$$

$$R_{CH_4} = \frac{8314}{16} = 519{,}625 \frac{J}{kg \cdot deg} ,$$

$$R_{C_{12}H_{22}} = \frac{8314}{166} = 50{,}084 \frac{J}{kg \cdot deg} .$$

Indywidualna stała paliwa wypadkowego:

$$R_p = x \cdot R_{CH_4} + (1-x)\, R_{C_{12}H_{22}} \tag{4}$$

$$R_p = 0{,}5 \cdot 519{,}625 + 0{,}5 \cdot 50{,}084 = 284{,}855 \ \frac{J}{kg \cdot deg} .$$

Wartość opałowa objętościowa odniesiona do 1 nm^3 dla przyjętych założeń zgodnie ze wzorem (3) wynosi:

$$W_{un} = \frac{48202{,}5}{0{,}00264 \cdot 284{,}855 + 0{,}775 \cdot 1{,}2 \cdot 17{,}555} =$$

$$= 2822{,} \ \frac{kJ}{nm^3 \ miesz} .$$

Gdy znamy wartość opałową mieszanki W_{un} odniesioną do 1 nm^3, możemy obliczyć, jaka jest wartość opałowa mieszanki zassanej do cylindra.
Ilość kilogramów mieszanki w punkcie 2 wynosi:

$$G_2 = \frac{p_2 \cdot V_2}{R \cdot T_2} ,$$

gdzie R - stała gazowa mieszanki paliwa z powietrzem:

$$R = q_1 \cdot R_p + q_2 \cdot R_{pow} , \tag{5}$$

natomiast wielkość q_1 i q_2 możemy określić wzorami:

$$q_1 = \frac{m_p}{mp + m_{pow}} \quad \text{i} \quad q_2 = \frac{m_{pow}}{mp + m_{pow}} ,$$

podstawiając

$$\lambda = \frac{m_{pow}}{mp \cdot l_t}$$

otrzymujemy po przekształceniu:

$$q_1 = \frac{1}{1 + \lambda l_t} \quad \text{i} \quad q_2 = \frac{\lambda l_t}{1 + \lambda l_t} .$$

Po wstawieniu wielkości $q_{1,2}$ do równania (5) otrzymujemy:

$$R = \frac{Rp + \lambda l_t R_{pow}}{1 + \lambda l_t} .$$

Wartość indywidualna stałej gazowej dla powietrza wynosi:

$$R_{pow} = 287,1 \frac{J}{kg \cdot deg} .$$

Natomiast wartość stałej gazowej dla paliwa określa równanie (4). Ostatecznie stała gazowa mieszanki paliwa z powietrzem wynosi:

$$R = \frac{284,855 + 1,2 \cdot 17,555 \cdot 287,1}{1 + 1,2 \cdot 17,555} = 286,998 \frac{J}{kg \cdot deg} ,$$

a ilość kilogramów mieszanki w punkcie 2:

$$G_2 = \frac{656321 \cdot 0,449 \cdot 10^{-4}}{286,998 \cdot 585} = 0,1756 \cdot 10^{-3} \text{ kg} .$$

Gdy znamy wartość opałową mieszanki W_{un} odniesioną do 1 mm^3, obliczamy, ile wynosi wartość opałowa G_2 mieszanki zawartej w cylindrze. W tym celu znajdujemy objętość normalną mieszanki V_n będącej w stanie "2".

$$V_{2n} = V_n \cdot G_2 \tag{6}$$

z równania dla stanu normalnego mamy:

$$V_n = \frac{R \cdot T_n}{p_n} . \tag{7}$$

Podstawiając równanie (7) do (6) oraz znając wartość opałową mieszanki W_{un} możemy obliczyć ilość energii chemicznej znajdującej się w mieszance będącej w cylindrze

$$Q_{Ch} = W_{un} \cdot V_{2n}$$

$$Q_{Ch} = 2822,5 \cdot \frac{273}{103330} \cdot \frac{656321 \cdot 0,449 \cdot 10^{-3}}{585} = 0,36308 \text{ kJ}$$

Wywiązywane podczas przemiany izochorycznej ciepło powiększa energię wewnętrzną gazu, czyli podnosi temperaturę w cylindrze z T_2 na T_3. Przyrost temperatury w tym idealnym przypadku możemy obliczyć z bilansu energii na podstawie pierwszej zasady termodynamiki:

$$Q_{bil} = G_2 \cdot c_{vs} (T_3 - T_2),$$

gdzie ciepło właściwe spalin liczymy ze wzoru:

$$c_{vs} = \sum g_i \cdot c_{vi} \cdot \tag{8}$$

Udziały masowe określamy na podstawie równania:

$$g_i = \frac{m_i}{m_s} \cdot$$

Ilość poszczególnych produktów spalania dla $\lambda < 1$ z wystarczającą dla omawianego przykładu dokładnością możemy ograniczyć do czterech

$$m_s = m_{CO_2} + m_{H_2O} + m_{O_2} + m_{N_2}$$

Natomiast ich masy powstałe na skutek spalania 1 kg paliwa wynoszą:

$$m_{CO_2} = \frac{44}{12} \left[x \cdot c_{CH_4} + (1-x)\, c_{C_{12}H_{22}}\right] \frac{kg\ CO_2}{kg\ pal}$$

$$m_{H_2O} = \frac{18}{2} \left[x \cdot h_{CH_4} + (1-x)\, h_{C_{12}H_{22}}\right] \frac{kg\ H_2O}{kg\ pal}$$

$$m_{O_2} = 0{,}23\ (\lambda - 1)\ l_t \frac{kg\ O_2}{kg\ pal}$$

$$m_{N_2} = 0{,}77\ (\lambda \cdot l_t) \frac{kg\ N_2}{kg\ pal} \cdot$$

Po podstawieniu danych wyjściowych otrzymujemy:

$$m_{CO_2} = \frac{44}{12} \left[0{,}5 \cdot 0{,}75 + (1-0{,}5) \cdot 0{,}867\right] = 2{,}965$$

$$m_{H_2O} = \frac{18}{12} \left[0{,}5 \cdot 0{,}25 + (1-0{,}5) \cdot 0{,}1325\right] = 1{,}7214$$

$$m_{O_2} = 0{,}23\ (1{,}2 - 1)\ .\ 17.555 = 0{,}8075$$

$$m_{N_2} = 0{,}77\ .\ 1{,}2\ .\ 17{,}555 = 16{,}221$$

masa spalin:

$$m_s = 21{,}715\ \frac{\text{kg spal}}{\text{kg pal}}$$

i odpowiednio udziały masowe:

$$g_{CO_2} = \frac{2{,}965}{21{,}715} = 0{,}1365\ ,$$

$$g_{H_2O} = 0{,}0792\ ,$$

$$g_{O_2} = 0{,}0372\ ,$$

$$g_{N_2} = 0{,}7470\ .$$

Wartość ciepła właściwego dla danego składnika mieszaniny obliczamy podobnie jak wcześniej opisane wartości entropii właściwej. Ponieważ wartość ciepła właściwego jest funkcją temperatury T_3, której nie znamy, równanie to możemy rozwinąć jedynie na drodze iteracji. W tym celu zakładamy T_3 = 2400 K. Dla tej temperatury (wykorzystując dane z tabl. 2) oblicza się ciepło właściwe ze wzoru:

$$C_{v_i} = \frac{T - TP}{TK - TP}\left[C_{v_i}\Big|_0^{TK} - C_{v_i}\Big|_0^{TP}\right] + C_{v_i}\Big|_0^{TP}\ .$$

W naszym przypadku dla założonej temperatury T_3:

$$C_{v\ CO_2} = 1{,}1932\ \frac{kJ}{kg.deg}$$

$$C_{v\ H_2O} = 2{,}5125\ \frac{kJ}{kg.deg}$$

$$C_{v\ O_2} = 0{,}9494\ \frac{kJ}{kg.deg}$$

$$C_{v\ N_2} = 1{,}006\ \frac{kJ}{kg.deg}$$

Tablica 2

Wartości ciepła właściwego gazów $C_v \frac{kJ}{kg \cdot deg}$

T K	N_2	O_2	CO_2	H_2O
273,15	0,7423	0,6548	0,6259	1,3980
373,15	0,7453	0,6737	0,7247	1,4290
473,15	0,7553	0,7030	0,8039	1,4792
573,15	0,7725	0,7348	0,8679	1,5386
673,15	0,7949	0,7637	0,9211	1,6027
773,15	0,8185	0,7674	0,9656	1,6701
873,15	0,8424	0,8089	1,0027	1,7400
973,15	0,8646	0,8261	1,0341	1,8116
1073,15	0,8847	0,8403	1,0601	1,8836
1173,15	0,9027	0,8520	1,0823	1,9536
1273,15	0,9182	0,8625	1,1011	2,0210
1373,15	0,9320	0,8717	1,1170	2,0838
1473 ,15	0,9441	0,8805	1,1304	2,1407
1573,15	0,9546	0,8884	1,1422	2,1972
1673,15	0,9638	0,8964	1,1522	2,2475
1773,15	0,9722	0,9039	1,1610	2,2939
1873,15	0,9793	0,9115	1,1685	2,3367
1973,15	0,9856	0,9186	1,1848	2,3768
2073,15	0,9914	0,9261	1,1807	2,4129
2173,15	0,9965	0,9332	1,1853	2,4459
2273,15	1,0011	0,9404	1,1891	2,4765
2373,15	1,0053	0,9475	1,1924	2,5054
2473,15	1,0094	0,9546	1,1953	2,5318
2573,15	1,0128	0,9613	1,1974	2,5565
2673,15	1,0161	0,9680	1,1987	2,5791
2773,15	1,0191	0,9747	1,1991	2,6004
2873,15		0,9810		2,6205
2973,15		0,9872		2,6394
3073,15				2,6574
3173,15				2,6741
3273,15				

Natomiast ciepło właściwe spalin

$$C_{vs} = 1,1492 \frac{kJ}{kg.deg}$$

Możemy teraz przystąpić do obliczania Q_{bil}:

$$Q_{bil} = 0,1756 \cdot 10^{-3} \cdot 1,1492 (2400 - 585) = 0,36627 \text{ kJ}.$$

Wyrażenie, które ze względu na założony półprocentowy błąd obliczeń powinno być mniejsze lub równe 0,5%, wynosi:

$$\frac{Q_{bil} - Q_{ch}}{Q_{ch}} = \frac{0,3192 \cdot 10^{-2}}{0,363} \cdot 100\% = 0,88\%$$

W związku z tym założona temperatura jest zbyt wysoka. Należy powtórzyć obliczenia dla nowej T_3 mniejszej od poprzedniej. Po kilkakrotnym przeliczeniu zakładamy T_3 = 2,385 K i postępując tak jak poprzednio otrzymujemy:

$$Q_{bil} = 0{,}36276 \text{ kJ}$$

oraz błąd 0,09%, a więc osiągnęliśmy założoną dokładność i tę temperaturę przyjęliśmy do dalszych obliczeń.

Ciśnienie p_3 wyliczamy na podstawie równania stanu i iteracyjnie wyznaczonej temperatury końca spalania T_3:

$$p_3 = \frac{G_3 \cdot R_3 \cdot T_3}{V_3},$$

ponieważ $G_3 = G_2$, $V_3 = V_2$, a zastępcza stała gazowa R_3

$$R_3 = \sum g_i \cdot R_i$$

w naszym przypadku wynosi ona:

$$R_3 = 0{,}0372 \cdot \frac{8314}{32} + 0{,}1365 \cdot \frac{8314}{44} + 0{,}0793 \cdot \frac{8314}{18} =$$

$$+ 0{,}747 \cdot \frac{8314}{28} = 293{,}88 \frac{J}{kg \cdot deg}.$$

Ostateczne ciśnienie p_3 równa się:

$$p_3 = \frac{0{,}1756 \cdot 10^{-3} \cdot 2385 \cdot 293{,}88}{0{,}449 \cdot 10^{-4}} = 2738787 \frac{N}{m^2}.$$

5. Wyznaczanie temperatury końca rozprężania T_4

Przy wyznaczaniu T_4 postępujemy podobnie jak przy sprężaniu, zakładamy, że ekspansja następuje izentropowo przy stałym składzie gazowym, a zatem występuje równość entropii:

$$S_3(T_3) = S_4(T_4)$$

i podobnie jak w równaniu 2 możemy zapisać:

$$\Sigma n_{i3}\left[Ms_i(T_3) - Rm \ln \frac{p_{i3}}{p_o}\right] = \Sigma\, n_{i4}\left[Ms_i(T_4) - Rm \ln \frac{p_{i4}}{p_o}\right].$$

Ilość kmoli danego składnika spalin:

$$n_i = n_3 \cdot z_i \,, \tag{9}$$

gdzie

z_i - udział molowy składnika spalin:

$$z_i = \frac{gi \cdot M_2}{M_i} \,, \tag{10}$$

a n_3 - ilość kilomoli spalin w pkt. 3:

$$n_3 = \frac{G_3}{M_2} \tag{11}$$

po podstawieniu wzorów (10) i (11) do równania (9) otrzymujemy:

$$n_i = \frac{gi \cdot G_3}{M_i} \,.$$

Ilość lmoli mieszanki w pkt. 3:

$$n_3 = \frac{p_3 \cdot V_3}{Rm\ T_3} \,,$$

$$n_3 = \frac{2738787 \cdot 0{,}449 \cdot 10^{-4}}{8314 \cdot 2385} = 0{,}67074 \cdot 10^{-5} \text{ kmol.}$$

Ilość kmoli poszczególnych składników spalin:

$$n_{O_2} = \frac{g_{O_2} \cdot G_3}{32} \,,$$

$$n_{CO_2} = \frac{g_{CO_2} \cdot G_3}{44} \,,$$

$$n_{H_2O} = \frac{g_{H_2O} \cdot G_3}{18},$$

$$n_{N_2} = \frac{g_{N_2} \cdot G_3}{28}.$$

Ilość kilomoli poszczególnych składników spalin w naszym przykładzie wynosi:

$$n_{O_2}(3) = \frac{0{,}0372 \cdot 0{,}1756 \cdot 10^{-3}}{32} = 0{,}2041 \cdot 10^{-6} \text{ kmol},$$

$$n_{N_2}(3) = 0{,}4685 \cdot 10^{-5} \text{ kmol},$$

$$n_{H_2O}(3) = 0{,}7734 \cdot 10^{-6} \text{ kmol},$$

$$n_{CO_2}(3) = 0{,}545 \cdot 10^{-6} \text{ kmol}.$$

Udziały molowe składników spalin określone ze wzoru (9) wynoszą odpowiednio:

$$z_{O_2}(3) = \frac{0{,}2041 \cdot 10^{-6}}{0{,}62074 \cdot 10^{-5}} = 0{,}3288 \cdot 10^{-1},$$

$$z_{N_2}(3) = 0{,}7447,$$

$$z_{H_2O}(3) = 0{,}124590,$$

$$z_{CO_2}(3) = 0{,}878 \cdot 10^{-1}.$$

Ciśnienia cząstkowe spalin w pkt. 3 wynoszą:

$$p_i(3) = z_i \cdot p_3,$$

$$p_{O_2}(3) = 0{,}03288 \cdot 2738787 = 90042 \text{ Pa},$$

$$p_{N_2}(3) = 0{,}7447 \cdot 2738787 = 2067049{,}7 \text{ Pa},$$

$$p_{CO_2}(3) = 240470{,}1 \text{ Pa},$$

$$p_{H_2O}(3) = 341225{,}8 \text{ Pa}.$$

W celu obliczenia entropii w pkt. 3 wyznaczamy na podstawie tabeli 1 entropie właściwe dla O_2, N_2, CO_2 i H_2O przy temperaturze T_3:

$$Ms_{O_2}(3) = 72{,}751 \frac{kJ}{kmol.deg},$$

$$Ms_{N_2}(3) = 69{,}376 \frac{kJ}{kmol.deg},$$

$$Ms_{CO_2}(3) = 109{,}037 \frac{kJ}{kmol.deg},$$

$$Ms_{H_2O}(3) = 88{,}037 \frac{kJ}{kmol.deg}.$$

Obecnie możemy przystąpić do wyznaczania entropii w pkt. 3:

$$S_3(T_3) = 0{,}2041 \cdot 10^{-6} \left(72{,}751 - 8{,}314 \cdot \ln \frac{90042}{100000}\right) +$$

$$+ 0{,}4685 \cdot 10^{-5} \left(69{,}376 - 8{,}314 \cdot \ln \frac{2067049}{100000}\right) +$$

$$+ 0{,}7734 \cdot 10^{-6} \left(88{,}0377 - 8{,}314 \cdot \ln \frac{341225}{100000}\right) +$$

$$+ 0{,}545 \cdot 10^{-6} \left(109{,}0375 - 8{,}314 \cdot \ln \frac{240470}{100000}\right) =$$

$$= 0{,}33772 \cdot 10^{-3} \frac{kJ}{kmol.deg}.$$

Następnie, tak jak przy obliczaniu temperatury T_2, zakładamy w pierwszym przybliżeniu temperaturę T_4 równą 1500 K. Dla tej temperatury na podstawie danych z tablicy 1 liczymy ponownie entropię właściwą dla O_2, N_2, CO_2 i H_2O. Dla założonej temperatury wynosi ona odpowiednio:

$$Ms_{O_2}(4) = 55{,}3385 \frac{kJ}{mol \cdot deg},$$

$$Ms_{N_2}(4) = 52{,}8079 \frac{kJ}{mol \cdot deg},$$

$$Ms_{H_2O}(4) = 64{,}629 \frac{kJ}{mol \cdot deg},$$

$$Ms_{CO_2}(4) = 81{,}3601 \frac{kJ}{mol \cdot deg}.$$

Ciśnienia cząstkowe dla założonej temperatury T_4 wynoszą:

$$p_i = \frac{z_i \cdot n_4 \cdot Rm \cdot T_4}{V_4},$$

ponieważ $n_4 = n_3$, a $V_4 = V_1$, możemy wyznaczyć ciśnienia cząstkowe w pkt.4:

$$p_{O_2}(4) = \frac{0{,}03288 \cdot 0{,}62074 \cdot 10^{-5} \cdot 8314 \cdot 1500}{292 \cdot 10^{-6}} = 8715{,}98 \text{ Pa},$$

$$p_{N_2}(4) = 200088{,}6 \text{ Pa},$$

$$p_{CO_2}(4) = 23277{,}3 \text{ Pa},$$

$$p_{H_2O}(4) = 33030{,}35 \text{ Pa}.$$

Mając ciśnienia cząstkowe i entropie właściwe w pkt. 4 możemy przystąpić do obliczania entropii w tym punkcie:

$$S(4) = 0{,}2041 \cdot 10^{-6} \left(55{,}3385 - 8{,}314 \cdot \ln \frac{8715{,}98}{100000}\right) +$$

$$+ 0{,}4685 \cdot 10^{-5} \left(52{,}808 - 8{,}314 \cdot \ln \frac{200088{,}6}{100000}\right) +$$

$$+ 0{,}7734 \cdot 10^{-6} \left(64{,}629 - 8{,}314 \cdot \ln \frac{33030{,}35}{100000}\right) +$$

$$+ 0{,}545 \cdot 10^{-6} \left(81{,}36 - 8{,}314 \cdot \ln \frac{23277{,}3}{100000}\right) =$$

$$= 0{,}343874 \cdot 10^{-3} \frac{kJ}{kmol \cdot deg}$$

Wyrażenie

$$\frac{S(4) - S(3)}{S(3)} \cdot 100\% = 1{,}821$$

znacznie przekracza założony błąd, czyli T_4 należy obniżyć i obliczenie powtórzyć. Przy temperaturze T_4 = 1450 K otrzymujemy S (4) = 0,33744 . 10^{-4} $\frac{kJ}{kmol.deg}$ i błąd 0,06%, a zatem tę temperaturę przyjmujemy do dalszych obliczeń.

Ciśnienie końca rozprężania liczone wg wzoru

$$p_4 = \frac{n_4 \cdot R_m \cdot T_4}{V_4}$$

wynosi

$$p_4 = \frac{0{,}62074 \cdot 10^{-5} \cdot 8314 \cdot 1450}{296 \cdot 10^{-6}} = 256381{,}5 \text{ Pa} .$$

6. Sprawność silnika

Sprawność teoretyczna założonego obiegu:

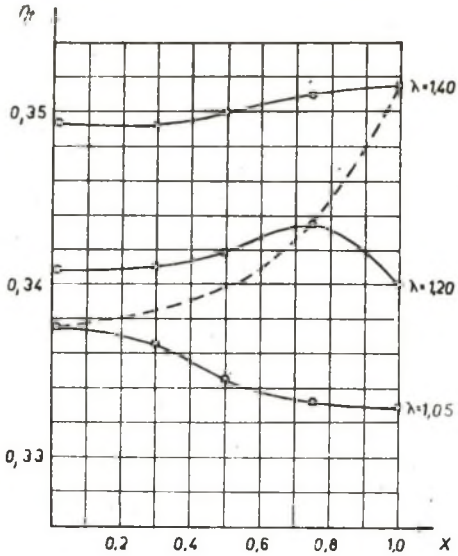
$$\eta_t = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} .$$

Podstawiając wyznaczone wcześniej temperatury obliczamy sprawność teoretyczną dla założonych w podrozdziale 2 wartości:

$$\eta_t = 0{,}38723 \cdot 100\% = 38{,}723\% .$$

7. Wyznaczanie sprawności teoretycznej w funkcji zmieniających się parametrów regulacyjnych

Wykorzystując wcześniej przedstawiony algorytm, wyznaczono przebieg sprawności teoretycznej dla współczynnika nadmiaru powietrza λ = 1,05; 1,2; 1,4 przy następujących udziałach masowych metanu zawartego w paliwie do całkowitej ilości paliwa x = 0,99; 0,75; 0,5; 0,3; 0,01. Obliczenia przeprowadzono w języku Fortran na maszynie liczącej, a wyniki obliczeń zamieszczono w tablicy 3 oraz na rys. 3.



Rys. 3. Wpływ udziału masowego metanu w paliwie na sprawność teoretyczną dla różnych wartości współczynnika nadmiaru powietrza

Fig. 3. The influence of the mass fraction of methane in the fuel on the theoretic efficiency for different values of the air superate

Tablica 3

Wyniki obliczeń

Lp.	Lambda	X	T_1	T_2	T_3	T_4	Sprawność
1	1,40	0,01	347,62	705,00	2330,00	1405,00	0,34930
2	1,40	0,30	347,62	705,00	2310,00	1392,00	0,34930
3	1,40	0,50	347,62	705,00	2295,00	1380,00	0,35070
4	1,40	0,75	347,62	704,00	2280,00	1370,00	0,35128
5	1,40	0,99	347,62	704,00	2265,00	1360,00	0,35145
6	1,20	0,01	347,62	705,00	2540,00	1557,00	0,34094
7	1,20	0,30	347,62	705,00	2515,00	1540,00	0,34123
8	1,20	0,50	347,62	700,00	2490,00	1525,00	0,34225
9	1,20	0,75	347,62	705,00	2475,00	1510,00	0,34329
10	1,20	0,99	347,62	705,00	2460,00	1505,00	0,34052
11	1,05	0,01	347,62	701,00	2735,00	1695,00	0,33757
12	1,05	0,30	347,62	705,00	2707,00	1675,00	0,33697
13	1,05	0,50	347,62	705,00	2685,00	1665,00	0,33466
14	1,05	0,75	347,62	705,00	2660,00	1650,00	0,33382
15	1,05	0,99	347,62	705,00	2643,00	1640,00	0,33314

Analizując tabelę widzimy, że mieszanka uboga (w przedziałach, które rozpatrywaliśmy) powoduje spadek temperatury T_3. Podobnie wzrost metanu w paliwie powoduje w każdym z rozpatrywanych przypadków spadek temperatury końca spalania.

Chcąc natomiast przeanalizować wykres (nr 3), należy rozpatrzyć wspólny wpływ udziału metanu w paliwie i współczynnika nadmiaru powietrza. Przy zwiększającym się współczynniku nadmiaru powietrza sprawność rośnie bez względu na udział metanu w paliwie. Przebieg wzrostu tej sprawności jest jednak uzależniony od współczynnika nadmiaru powietrza. Dla współczynnika $\lambda = 1,4$ sprawność teoretyczna dla zasilania silnika tylko paliwem gazowym jest większa niż przy zasilaniu tylko paliwem ciekłym. Znana zależność mówiąca, że dla zasilania silnika spalinowego paliwami gazowymi współczynnik nadmiaru powietrza jest większy niż dla zasilania paliwami ciekłymi potwierdziła się w naszych obliczeniach wzrostem sprawności, natomiast charakter krzywej przedstawiającej wpływ udziału metanu w paliwie na sprawność przy stechiometrycznym współczynniku nadmiaru powietrza wykazał wzrost sprawności dla paliw ciekłych. Spowodowane jest to tym, że paliwa ciekłe największą prędkość rozprzestrzeniania płomienia mają przy składzie lekko wzbogaconym (np. $\lambda = 0,9$), przy którym osiąga się największe prędkości reakcji. Natomiast paliwa gazowe na skutek lepszego wymieszania z powietrzem osiągają większe spalania przy mieszankach nieznacznie uboższych.

Otrzymany wykres wyraźnie sugeruje, że maksymalna sprawność silnika dwupaliwowego w przypadku wzrostu udziału metanu w paliwie rośnie wraz ze wzrostem współczynnika nadmiaru powietrza, co na wykresie nr 3 zaznaczono grubą linią przerywaną.

Przechodząc z kolei do oceny dokładności obliczeń należy jeszcze raz podkreślić, że mimo iż ich praktyczna przydatność jest ograniczona, a dokładność wyników zależy w bardzo dużym stopniu od prawidłowości doboru licznych współczynników empirycznych, to jednak otrzymane wykresy potwierdziły przydatność obliczeń teoretycznych do analizy pracy silnika oraz słuszność poczynionych założeń.

Spis ważniejszych oznaczeń

G - masa mieszanki
Mp - masa drobinowa
Ms - entropia właściwa
Q_{ch} - ilość energii chemicznej
Q_{bil} - ilość energii wyznaczonej z bilansu
R - indywidualna stała gazowa
Rm - uniwersalna stała gazowa
S - entropia
T - temperatura

Tp - temperatura początku
Tk - temperatura końca
ΔT - przyrost temperatury
V - objętość
Vs - objętość skokowa cylindra
Wu - wartość opałowa
W_{un} - objętościowa wartość opałowa
c - udziały masowe węgla
c_v - ciepło właściwe przy stałej objętości
g - udziały masowe
h - udziały masowe wodoru
l_t - stała stechiometryczna
m - masa
n - ilość kilomoli
p - ciśnienie
x - stosunek omawianych paliw
z - udziały molowe
γ - współczynnik resztek spalin
ε - stopień sprężania
η_t - sprawność teoretyczna
η_v - sprawność napełniania
λ - współczynnik nadmiaru powietrza.

Spis indeksów

1,2,3,4 - punkty na wykresie 2
i - ilość składników
n - warunki normalne
o - otoczenie
p - paliwo
pocz - początkowe
pow - powietrze
s - spaliny.

LITERATURA

Marek Brzeżański: Dwupaliwowe zasilanie silnika z zapłonem iskrowym w aspekcie oszczędności ciekłych paliw węglowodorowych. Rozprawa doktorska, Kraków 1986.

Recenzent:
Doc. dr hab. inż. Stanisław Jarnuszkiewicz

Wpłynęło do Redakcji 16.10.1986

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ МЕТАНА НА КПД ДВИГАТЕЛЯ
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Р е з ю м е

В работе теоретически определено влияние добавки метана на КПД двигателя с учётом изменяющихся коэффициентов потребления воздуха. Расчёты даны в форме примера, что облегчает понимание. Так как количество неизвестных в расчётах больше, чем количество связывающих уравнений, то имеющиеся проблемы можно было устранить только путём итерраций с применением ЭВМ. С этой целью, учитывая алгоритм приведён в [1], получены результаты потверждающие пригодность теоретических расчётов а также правильность предпринятых предположений, получая таким образом сокращение дорогостоящих исследований на стендах.

THE EFFECT OF METHANE ADDITION ON THE EFFICIENCY OF THE COMBUSTION ENGINE

S u m m a r y

In this paper theoretical determination of the effect of methane addition on the efficiency of the engine with decreasing coefficient of air need is presented. Computations are presented in the form of example which makes the way of thinking much more reasonable. The problems had to be solved by iterations using computers because the number of variables is greater than the one of the equations. The algorithm from the work [1] is used to obtain the results proving the usability of theoretical calculations and correctness of assumptions. This leade to the shortage of the costfull stand tests.