

Zwykle bywa:

$$p_e = 2,7 \text{ - } 5,5 \text{ kg/cm}^2$$
$$T_e = 900^\circ \text{ - } 1400^\circ \quad (t_e = 627^\circ \text{ - } 1127^\circ \text{ C})$$

IV. WYDAJNOŚĆ SILNIKA. STRATY. WSPÓŁCZYNNIKI SPRAWNOŚCI. BILANS CIEPLNY.

Wiadomem jest, że praca i ciepło są równoważne, to znaczy, że jedno z nich może być zamienione na drugie, przyczem każda kaloria ciepła, przeistoczona w pracę mechaniczną, daje 427 kilogramometrów i odwrotnie 1 kilogramometr pracy zamieniony w ciepło wytwarza $\frac{1}{427}$ kalorii, innymi słowy „cieplny równoważnik pracy” wynosi

$$A = \frac{1}{427} \text{ kal} \quad \dots \quad (21)$$

Termodynamika (nauka o zamianie ciepła na pracę) poucza, że chcąc najkorzystniej zamieniać ciepło na pracę mechaniczną, należy je dostarczyć przy najwyższej, a jednocześnie stałej temperaturze obiegu („izotermicznie”), odprowadzać zaś przy najniższej i również stałej temperaturze, a sprężanie i rozprężanie prowadzić adjabatycznie, czyli bez wymiany ciepła z zewnętrznym otoczeniem. Dowiedziona jest dalej, że nawet przy takim najkorzystniejszym, idealnym, niemożliwym w praktyce obiegu, tylko część dostarczonego ciepła przechodzi w pracę, a reszta jest niepowrotnie stracona z punktu widzenia zamiany na pracę w tymże silniku.

Porównyując teoretyczny, a następnie rzeczywisty obieg silnika z obiegiem idealnym — odrazu widzimy, że odbiegają one (szczególnie *

obieg rzeczywisty) znacznie od najkorzystniejszego obiegu idealnego, a co zatem idzie — przetwarzają w pracę mechaniczną jeszcze mniejszą część dostarczanego w paliwie ciepła.

Oprócz tej jednak teoretycznie nieuniknionej straty istnieje w silniku rzeczywistym cały szereg innych większych i mniejszych strat ciepła lub wytworzonej z ciepła pracy, tak, iż w ostatecznym wyniku na wale silnika, a więc do naszej dyspozycji (napędu śmigła), otrzymujemy t. zw. pracę efektywną (użyteczną), stanowiącą zaledwie nieco więcej, niż 14 całej ilości ciepła, dostarczonego w paliwie, a wyrażonego w jednostkach pracy.

Celem wyjaśnienia i oceny strat, zachodzących w obiegu rzeczywistym, ustalimy następujące pojęcia:

1, Sprawność cieplna lub termodynamiczna η_t .

Jest to stosunek ciepła Q , przetworzonego w pracę w obiegu teoretycznym, do ciepła Q_1 , dostarczonego do silnika w paliwie,

$$\eta_t = \frac{Q}{Q_1} = \frac{\text{ciepło dostar. w paliwie} - \text{ciepło odprowadzone}}{\text{ciepło dostarczone w paliwie}} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad (22)$$

Dla 1 kg mieszanki:

$$\text{ciepło dostarczone } Q_1 = C_v (T_z - T_c) \quad (23)$$

$$\text{ciepło odprowadzone } Q_2 = C_v (T_e - T_a) \quad (24)$$

Zatem

$$\eta_t = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_e - T_a}{T_z - T_c} = 1 - \frac{T_a}{T_c} \cdot \frac{\frac{T_e}{T_a} - 1}{\frac{T_z}{T_c} - 1} \quad (25)$$

Na podstawie wzorów 5 i 12 otrzymujemy

$$\frac{T_e}{T_z} = \frac{T_a}{T_c} = \frac{1}{\epsilon^{0,1}} \quad \text{b} \quad \frac{T_t}{T_n} = \frac{T_z}{T_c} \quad (26)$$

Czyli poprzedni wzór uprości się:

$$\epsilon^{0,1} = 1 - \frac{T}{T_c} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{0,1}} \quad (27)$$

Z tego wzoru wynika, że $\epsilon^{0,1}$ czyli wydajność zamiany ciepła na pracę, rośnie ze wzrostem stopnia sprężania ϵ jak to unaocznia tabela 1.

ϵ	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
ty	0,40	0,43	0,45	0,48	0,50	0,51	0,53	0,54

Tabl. 1. Wpływ stopnia sprężania na sprawność cieplną silnika.

Powyższe obliczenie sprawności η_v — dokonano w założeniu, że ciepło właściwe mieszanki przed i po spalaniu jest niezmiennie, niezależne od temperatury i że podczas spalania nie zachodzi zjawisko dysocjacji. Warunki te w istocie nie są zachowane (patrz str. 739) i wobec tego, po ich uwzględnieniu przyjąć należy dla najlepszego składu mieszanki

$$\eta_{it} \approx 1 - \frac{1}{\epsilon^{0,295}} \quad (28)$$

Straty, ujęte współczynnikiem η_{it} , nie są zależne od konstruktora, lecz wynikają z przyjętego w silniku lotniczym cyklu pracy,

2. Sprawność indykowana η_i

Jeśli teraz przejdziemy do obiegu rzeczywistego, czyli tych przemian i zjawisk cieplnych,

jakie zachodzą w cylindrze realnego silnika, to napotykamy tutaj szereg bardzo poważnych strat.

Straty cieplne.

a) Spalanie zachodzi nie przy stałej objętości, lecz trwa jeszcze zwykłe podczas suwu roboczego (p , str. 739), co obniża ciśnienie i temperaturę (p_z i T_z), a więc zmniejsza pole pracy wykresu. Strata ta wynosi około 4% ciepła dostarczanego w paliwie (Q_i).

b) Strata na niezupełne spalanie, gdy przy nieodpowiedniej regulacji gaźnika mieszanka jest zbyt bogatą i w spalinach obecny jest tlenek węgla (CO). W tym wypadku nie uzyskujemy z paliwa właściwej mu całkowitej ilości ciepła, którego część, zawarta w palnym jeszcze gazie (CO), zostaje usunięta wraz ze spalinami. Strata ma różną wartość, w zależności od składu mieszanki.

c) Część ciepła otrzymana przy spalaniu mieszanki, przechodzi dzięki przewodnictwu i promieniowaniu bezpośrednio na ścianki cylindra.

Największa ilość ciepła przechodzi do ścianek w chwili wybuchu i wynosi 5 ÷ 1% ciepła, wytworzonego z mieszanki. Oddawanie ciepła ściankom zachodzi dalej podczas suwu rozprężania i w pierwszej połowie tego skoku obniża wydajność silnika, w drugiej zaś połowie skoku to przechodzenie ciepła nie może być uważane za stratę, gdyż zachodzi ono kosztem zmniejszenia straty wydechowej (patrz niżej).

Podczas wydechu następuje dalsza wędrówka ciepła ku ściankom, lecz część tego ciepła zostaje następnie zwrócona w okresie ssania i na początku sprężania.

W drugiej połowie suwu sprężającego znowu mamy przechodzenie ciepła ku ściankom od na-

grzanej podczas sprężania mieszanki. Ciepło pobrane przez ścianki zostaje uniesione przez wodę chłodzącą lub wypromieniowane w otoczenie, skąd zowiemy je „stratą na chłodzenie”, a wielkość jej zależy od intensywności i sposobu chłodzenia (wodne lub powietrzne), ilości obrotów, i t- p. Ogólnie wynosi ona od 10 do 14% ciepła wytworzonego podczas spalania, a jeśli włączyć do tego ciepło od tarcia tłoków — to strata ta dochodzi do 16%.

d) Strata wydechowa — jest to ilość ciepła, zawarta w usuwanych z silnika gorących spalinach. Jest ona bardzo znaczna i wynosi średnio około 40 % ciepła, zawartego w mieszance.

e) Straty przez promieniowanie części niechłodzonych, jak karter, zawory i Ł p., nie są wielkie i wynoszą od 5 -~ 1% *

Opisane tutaj straty należą do rzędu strat cieplnych, a zależą one od właściwego ukształtowania komory dawkowej, umieszczenia świec (dokładne spalanie), wyboru stosunku skoku tłoka do średnicy cylindra (straty na chłodzenie i promieniowanie), ilości obrotów, regulacji rozrządu i gaźnika, oraz całego szeregu innych czynników, znajdujących się w rozporządzeniu konstruktora, a miarą tych strat jest Ł zw. „sprawność indykowana”, czyli stosunek ciepła 0/ przetworzonego na pracę w rzeczywistym obiegu silnika — do ciepła Q_{f} zawartego w dawce mieszanki.

$$\eta_i = \frac{Q_{\text{f}}}{Q_{\text{0}}}; \quad \text{O f } i j \wedge \dots \dots (29)$$

Uwzględniając omówione straty, można przyjąć, że sprawność indykowana przy najlepszych warunkach pracy i najmniejszych stratach ciepła wyrazi się wzorem

$$\eta_i = 1 - \frac{L}{\varepsilon_{0,25}} \dots \dots (29.)$$

3- Pełnota wykresu. %

Jak wiadomo, pole wykresu indykatorowego daje nam ilościowe ujęcie wytworzonej w cylindrze silnika pracy lub też równoważnego mu ciepła. Stosunek pola wykresu indykatorowego, zdjętego z cylindra silnika rzeczywistego, do pola wykresu obiegu teoretycznego — zowie się „pełnotą wykresu”.

Pojęcie to określić również można jako stosunek ciepła Q_i , przetworzonego w pracę w obiegu rzeczywistym, do ciepła Q , zamienionego na pracę w obiegu teoretycznym,

$$\eta_{\text{om}} = \frac{Q_i}{Q} = \frac{U_{Q_i}}{U_{Q_i} + U_{\text{tr}}}$$

Współczynnik ten wskazuje nam, jak silnia rzeczywisty zbliża się do silnika idealnego, jest więc niejako oceną zdolności, wiedzy i praktyki konstruktora. Wynosi on 0,85 — 0,95,

STRATY MECHANICZNE

4. Sprawność mechaniczna η_{m}

Dotychczas omawialiśmy straty cieplne w związku z warunkami zamiany ciepła na pracę w cylindrze rzeczywistego silnika. Lecz, aby osiągnąć w silniku zamierzony obieg, koniecznem jest wykonanie szeregu czynności pomocniczych, jak zassanie mieszanki, sprężenie jej, usunięcie spalin, napęd zaworów i iskrowników, napęd pompek: wodnej i smarowej i Ł p., co wymaga pewnego wkładu pracy, czerpanej z energii rozprężających się w cylindrze spalin.

Praca, potrzebna na zassanie i sprężanie dawki oraz wydech spalin, jest już uwzględniona w pojęciu sprawności indykowanej, jednakże

bez uwzględnienia wydatku pracy, koniecznego dla pokonania tarcia gazów (mieszanki i spalin) w zaworach i rurach wlotowych i wydechowych, Oznaczając moc, potrzebną dla pokonania tych » z w, „oporów hydraulicznych” przez N_s , a moc zużytą na napęd pomocniczych mechanizmów (rozrząd, pompki, zapalanie i t. p.) i pokonanie tarcia w łożyskach, pierścieniach, czopach, tłokowych i t. p. — przez Nt , otrzymamy, iż i

ogólne straty mechaniczne

$$N_m = N_s + Nt \quad . \quad . \quad . \quad (31)$$

Jeśli zatem straty te odejmiemy od mocy indykowanej M (mocy wytworzonej w cylindrze), to jako resztę otrzymamy „moc efektywną”, inaczej „użyteczną”, N_{et} czyli moc na wale silnika, pozostającą do naszej dyspozycji, a więc w silniku lotniczym — do napędu śmigła

$$N_e = N_i - N_m = N_i - (N_s + Nt) \quad (32)$$

Miara strat mechanicznych jest „sprawność mechaniczna” silnika, t. j. stosunek mocy efektywnej do mocy indykowanej,

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} \quad \text{iub} \quad \eta_m = \frac{N_{et}}{N_i} \quad . \quad . \quad (33)$$

ponieważ ciepło i praca są równoważne.

Łatwo zrozumieć, że wielkość η_m jest oceną racjonalnego i dokładnego wykonania mechanizmu oraz montażu silnika i zależy nie tylko od konstruktora, ale i od sumienności, i precyzyjności warsztatu mechanicznego.

Dla dobrze wykonanych silników wartość sprawności mechanicznej waha się w granicach

$$\eta_m = 0,85 \text{ - } 0,92,$$

wyższe liczby dotyczą silników większej mocy,

Należy również zaznaczyć, że:

a) ze wzrostem ilości obrotów strata mocy na pokonanie obrotów tarcia rośnie szybciej, niż moc użyteczna, co wpływa na spadek η_m , jak to wskazuje rys. 9>

b) ze wzrostem wysokości lotu moc silnika maleje, a opory tarcia pozostają prawie niezienne, stąd wynika, że sprawność mechaniczna maleje ze zwiększeniem się wysokości lotu

Wysokość	η_m	Wysokość	η_m
metry	—	metry	—
0	0,860	5000	0,764
1000	0,845	6000	0,735
2000	0,830	7000	0,700
3000	0,811	8000	0,663
4000	0,788	—	—

Tab. 2. Teoretycznie obliczony spadek η_m ze wzrostem wysokości lotu. Na ziemi przyjęto $\eta_m = 0,86$

5. Sprawność „użyteczna” (efektywna) η_e

Sprawnością „użyteczną” lub „efektywną” nazywamy stosunek ciepła Q_e , równoważnego mocy uzyskanej na wale silnika, do całkowitego ciepła Q_i dostarczonego silnikowi w paliwie

$$\eta_e = Sk \quad (34)$$

Stosunek ten wskazuje, jaka część energii zawarta w dostarczonem paliwie, zostaje otrzymana na wale silnika, i stąd zowie się często „współczynnikiem wydajności” silnika.

Wartość η_e dla wykonanego silnika łatwo jest obliczyć, znając zużycie paliwa i moc na wale.

Oznaczamy:

B — zużycie benzyny w gr/KM[^] i godz.

W_u — wartość opałowa użyteczna benzyny w kal/kg, czyli ilość kalorii, otrzymana po zupełnem spaleniu 1 kg benzyny (przy $V = \text{const}$) bez skraplania się pary wodnej, wytworzonej po spaleniu.

Ponieważ $1 \text{ KM} = 75 \text{ kgm/sek}$, a 1 kgm jest równoważny $\frac{1}{75}$ kalorii, zatem:

$$1 \text{ KM na godzinę} = \sqrt[6]{32,3} \text{ kcal/g.} \quad (35)$$

Silnik zużywa Bgt/KM_e i godz., czyli otrzymuje $Q_x = \frac{L}{1000} \text{ "v"}$ kal/godz., a zwraca w tymże czasie w postaci mocy mechanicznej na wale $Q_e = 632,3$ kalorii, zatem według wzoru 34

$$j_e = \frac{632,3 \cdot 1000}{B \cdot W_u} \quad . \quad . \quad . \quad (36)$$

Przykład. Silnik zużywa $B = 230 \text{ gr/KM}_e$ godz. Przyjmując dla benzyny lotniczej $W_u = 10500 \text{ kal/kg}$, otrzymujemy

$$\lambda = \frac{632,3 \cdot 1000}{230,10500} = 2,7476$$

Ze wzorów 29, 30, 33 i 34 otrzymamy:

$$j_m = \frac{1}{W!} \sum_{i=1}^n \hat{j}_i - j_j^J \quad f_i' = Hg \quad i_i''$$

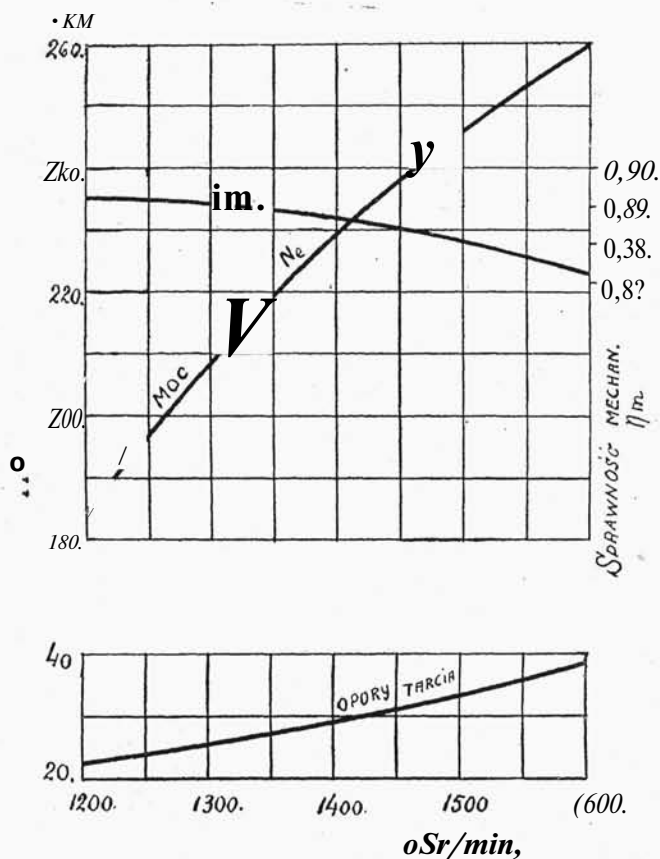
$$r_{je} = 7\sqrt{7} m = \text{иг } 3JJJ3 \left(* \quad * \right) \quad (37)$$

Sprawność użyteczna równa się iloczynowi pełnoty wykresu oraz sprawności termicznej i mechanicznej, a więc poprawienie chociażby jednej z nich — zwiększy wydajność silnika..

Sprawność mechaniczna jest już doprowadzona do znacznych wartości i na tej drodze trudno oczekiwać większych sukcesów, pozostaje sprawność termiczna i pełnota wykresu, a ra-

czej jednocząca te dwa pojęcia sprawność indykowana $\eta_i \approx f(g' \backslash t$.

Usiłowania obecnych konstruktorów idą w kierunku zwiększania r_{fi} przez podniesienie stopnia sprężania s (patrz wzór 28), czemu jednak staje na przeszkodzie zjawisko samozapłonów i detonacji, wobec czego czynione są również próby zastosowania do silników lotniczych obiegu Diesel'a, pozwalającego na wyso-



Rys. 9. Zależność mocy efektywnej (użytecznej) sprawności mechanicznej i oporów tarcia—od ilości obrotów.

kie e przez sprężanie samego powietrza i już po sprężeniu stopniowe wtryskiwanie paliwa.

Podnosi to sprawność termiczną, stwarza jednocześnie warunki dokładnego spalania i umożliwia stosowanie ciężkich, a więc tańszych paliw (ropa). Wysiłki te są na pomyślnej drodze w dziedzinie konstrukcji silników samochodowych i w okresie prób dla silników lotniczych.

Na zakończenie tego działu podajemy tablicę i bilans cieplny silnika. Tablica 3 zawiera wartości sprawności, wyliczone według przytoczonych poprzednio wzorów (27, 28 i 29a), i wielkość sprawności efektywnej (użytecznej), określonej przez prof. Ricardo na silniku doświadczalnym ze zmiennym stopniem sprężania.

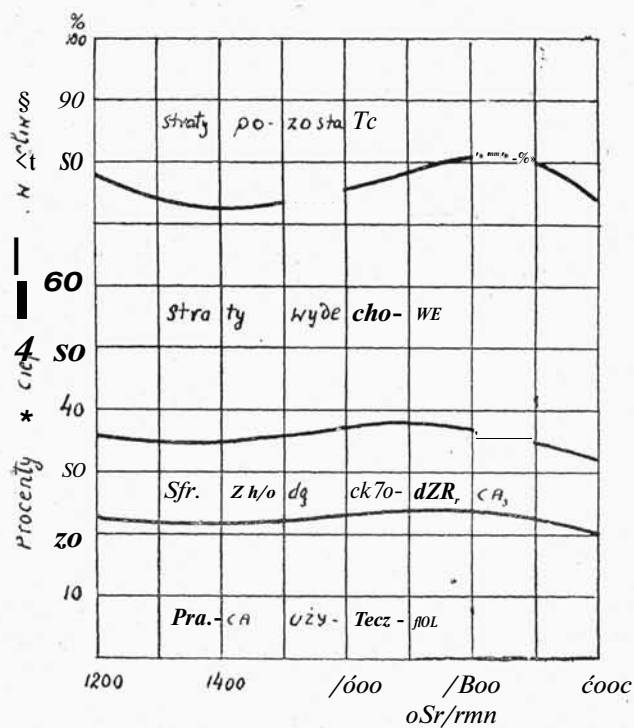
Stopień sprężania ε	Sprawność: cieplna, indykowana i efektywna			wg. Ricardo
	$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{0,4}}$	$\eta_i = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{0,295}}$	$\eta_e = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{0,25}}$	
4,0	0,426	0,336	0,296	0,277
4,5	0,452	0,359	0,314	0,297
5,0	0,475	0,378	0,332	0,316
5,5	0,494	0,396	0,348	0,332
6,0	0,512	0,411	0,361	0,346
6,5	0,527	0,424	0,375	0,360
7,0	0,540	0,437	0,386	0,372
7,5	0,553	0,449	0,396	0,383
8,0	0,565	0,460	0,406	—

Tab. 3. Zależność sprawności od stopnia sprężania.

Tablica 4 wskazuje, jak rośnie moc silnika w miarę wzrostu stopnia sprężania.

Nazwa silnika	Normalna ilość obrót.	Moc nominalna	Stopień sprężania ϵ	Moc maksymalna N_{max}
Hispano Suiza	1500	160 KM.	4,7	160 KM
			5,3	165 „
			6,2	169 „
Liberty	1700	400 KM.	4,9	380 KM.
			5,5	398 „
Lorraine	1900	450 KM.	5,3	463 KM..
			5,5	473 „
			6,0	495 ..

Tab. 4. Zależność mocy silnika od stopnia sprężania.



Rys. 10. Bitfians cieplny silnika Uberty 400 KM.

Na rys. 10 podany jest cieplny bilans silnika Liberty 400 KM- Widzimy, że z całkowitego ciepła, dostarczonego w paliwie, tylko część (ok. 22%) przetwarza się na pracę użyteczną (efektywną), reszta pozostaje niewyżytkowana, uchodząc z silnika jako straty, przyczem zmiana ilości obrotów niewiele wpływa na rozdział tych strat.

V. STOPIEŃ NAPEŁNIENIA

(sprawność objętościowa) — η_v .

DOŚWIADCZENIA JUDGE'A

Silnik czerpie swą moc z ciepła, wytworzonego przez spalanie mieszanki. Moc ta jest więc proporcjonalna do wagowej ilości zasysanej dawki, *należy* przeto wyjaśnić warunki, w jakich zachodzi napełnianie cylindra.

Podczas suwu zasysania świeża mieszanka w 4-ro suwowym silniku powinna teoretycznie zapełnić całą objętość skokową cylindra, posiadając prężność i temperaturę otaczającego powietrza.

W rzeczywistości rzecz się ma nieco inaczej. Na początku suwu zasysania w przestrzeni dawkowej znajdują się pozostałe tam po wydechu spaliny, o prężności nieco wyższej od atmosferycznej i o temperaturze większej niż temperatura mieszanki. Wobec tego na początku suwu tłoka następuje rozprężanie się pozostałych w cylindrze spalin do prężności zasysania (która jest tem niższa od ciśnienia otoczenia, im większa jest ilość obrotów silnika i im większe opory w gaźniku, rurze i zaworze wlotowym ma pokonać mieszanka, aby z należyłą szybkością zapełnić cylinder za ustępującym tłokiem), po-