

Na prawach rękopisu

INSTYTUT KONSTRUKCJI I EKSPLOATACJI MASZYN
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Raport Serii PREPRINTY Nr 041(741)/81

P r a c a d o k t o r s k a

ANALIZA PORÓWNAWCZA
PRZEBIEGÓW WYWIĄZYWANIA CIEPŁA
W SILNIKU WYSOKOPRĘŻNYM
Z BEZPOŚREDNIM WTRYSKIEM

Czesław Kolanek

Promotor: Prof. dr hab. inż. Andrzej Teisseyre

Słowa kluczowe:
silnik spalinowy,
spalanie,
wywiązywanie ciepła

Wrocław 1981

SPIS RZECZY

Ważniejsze oznaczenia	3
Wstęp	4
1. Cel i zakres pracy	7
2. Wyznaczanie przebiegów wywiązywania ciepła - model podstawowy	7
3. Podstawy teoretyczne modyfikacji algorytmu obliczeń	9
3.1. Zmiana ilości czynnika roboczego	9
3.1.1. Zmiana ilości czynnika roboczego w cylindrze spowodowana przedmuchem	9
3.1.2. Zmiana ilości czynnika spowodowana wtryskiem paliwa	12
3.1.3. Zmiana ilości czynnika spowodowana kontrakcją chemiczną	12
3.1.4. Całkowita zmiana ilości czynnika	13
3.2. Aproksymacja zmienności energii wewnętrznej czynnika	13
3.3. Straty energii związane z przedmuchem czynnika	17
3.4. Straty energii związane z przekazywaniem ciepła do ścianek przez promieniowanie	20
3.4.1. Promieniowanie gazu	20
3.4.2. Promieniowanie płomienia	21
3.4.3. Sumaryczny współczynnik przekazywania ciepła do ścianek	22
3.5. Straty energii związane z termiczną dysocjacją składników czynnika roboczego	22
4. Modyfikacje algorytmów obliczeń funkcji spalania β i prędkości wywiązywania ciepła β'	25
5. Opis stanowiska pomiarowego	31
6. Wartości wielkości wejściowych	32
7. Analiza wariantowych przebiegów wywiązywania ciepła	37
8. Wnioski	49
Literatura	49
Załącznik 1 - Zmodyfikowany algorytm obliczeń przebiegów wywiązywania ciepła	
Załącznik 2 - Stechiometria spalania	

WAŻNIEJSZE OZNACZENIA

i	- indeks iteracyjny; oznacza wartości chwilowe wielkości,
A, m^2	- pole przekroju cylindra,
A_{si}, m^2	- pole powierzchni ograniczającej przestrzeń spalania,
B_o, kg	- jednostkowa dawka paliwa,
$b_{czi}, J \text{ kmol}^{-1} K^{-1}$	- współczynnik linearyzacji energii wewnętrznej czynnika,
c_{sr}, ms^{-1}	- średnia prędkość tłoka,
D, m	- średnica cylindra,
$L'_i, J(1^o\text{OWK})^{-1}$	- pochodna pracy absolutnej,
$MR, J \text{ kmol}^{-1} K^{-1}$	- uniwersalna stała gazowa,
n, min^{-1}	- częstość obrotów silnika,
$\bar{n}, kmol$	- ilość kmol czynnika,
p_i, Pa	- ciśnienie czynnika,
p_o, Pa	- ciśnienie otoczenia,
Q_o, J	- energia dawki paliwa,
$Q'_i, J(1^o\text{OWK})^{-1}$	- pochodna energii przekazywanej do ścianek,
S, m	- skok tłoka,
$S'_i, J(1^o\text{OWK})^{-1}$	- suma pochodnych bilansowych energii,
T_i, K	- temperatura czynnika,
$T'_i, K(1^o\text{OWK})^{-1}$	- pochodna temperatury czynnika,
T_s, K	- temperatura ścianki przestrzeni spalania,
$U'_i, J(1^o\text{OWK})^{-1}$	- pochodna energii wewnętrznej czynnika,
V_s, m^3	- objętość skokowa cylindra,
X_{1i}	- wskaźnik drogi tłoka,
X_{vi}	- wskaźnik objętości cylindra,
z	- objętościowe udziały składników w gazach spalinyowych,

- α , 1°OWK - kąt obrotu wału korbowego,
 α_{ki} , $\text{WK}^{-1}\text{m}^{-2}$ - współczynnik przekazywania ciepła przez konwekcję,
 α_{rgi} , $\text{WK}^{-1}\text{m}^{-2}$ - współczynnik przekazywania ciepła przez promieniowanie gazu,
 α_{rfi} , $\text{WK}^{-1}\text{m}^{-2}$ - współczynnik przekazywania ciepła przez promieniowanie płomienia,
 α_{Ti} , $\text{WK}^{-1}\text{m}^{-2}$ - sumaryczny współczynnik przekazywania ciepła,
 β_i - funkcja spalania,
 $\bar{\beta}_i$ - przybliżona funkcja spalania,
 β'_i , 1°OWK^{-1} - prędkość wywiązywania ciepła,
 Γ_i , 1°OWK^{-1} - funkcja objętości cylindra,
 δ - stopień zanieczyszczania świeżego ładunku spaliniem,
 ε - geometryczny stopień sprężania,
 λ - współczynnik nadmiaru powietrza,
 λ_k - stosunek promienia wykorbienia do długości korbowodu,
 μ_o - stechiometryczny współczynnik przemiany molowej,
 μ_c - całkowity współczynnik przemiany molowej.

WSTĘP

Podstawowym zagadnieniem w ocenie procesu spalania w silniku spalinowym jest sprawność wykorzystania ciepła wywiązanego w tym procesie. Z termodynamicznej analizy obiegu cieplnego silnika wynika, że o sprawności wykorzystania ciepła wywiązanego w danym silniku decyduje lokalizacja procesu spalania w stosunku do górnego martwego położenia tłoka (GMP) oraz czas trwania tego procesu. Optymalne z punktu widzenia sprawności wykorzystania ciepła wywiązanego byłoby spalanie całej dawki paliwa przy stałej objętości komory spalania, gdy tłok znajduje się w GMP. Oznaczałoby to, że wiel-

kość będąca stosunkiem wywiązania ciepła do czasu trwania procesu spalania, nazywana prędkością wywiązania ciepła, musiałaby osiągać wartości teoretycznie nieskończenie duże. Taka organizacja procesu spalania powodowałaby uderowy charakter obciążeń mechanizmu korbowego silnika, nadmierną jego głośność oraz toksyczność spalin.

Wynikająca stąd potrzeba godzenia sprzecznych dążeń w projektowaniu czy modernizacji silników wymaga dobrej znajomości przebiegów wywiązania ciepła.

O randze problemu niech świadczy opinia autora monografii [21] prof. dr hab. inż. M. Zabłockiego:

"Uzyskiwanie poprawnego pod względem technicznym ruchu silnika wysokoprężnego (jak np. małe zużycie paliwa, głośność pracy czy zadymienie spalin oraz ich toksyczność) jest uzależnione przede wszystkim od właściwego przebiegu spalania. Jednocześnie jednak proces ten - jak dotąd - jest jednym z najmniej poznanych w silniku spalinowym, pomimo wieloletnich i rozległych badań prowadzonych w tej dziedzinie.

Jednym z najważniejszych czynników charakteryzujących spalanie rozpylonego paliwa w silniku jest przebieg wywiązania ciepła. Decyduje on o zmianach ciśnienia i temperatury w cylindrze oraz dynamicznych wskaźnikach procesu spalania, a tym samym o wielkości pracy indykowanej, przekazywanej na tłok, ekonomiczności wykorzystania ciepła, poziomie obciążeń cieplnych i mechanicznych silnika, a także głośności jego pracy".

Opracowano dotychczas wiele algorytmów wyznaczania przebiegów wywiązania ciepła [1, 2, 6, 7, 14, 20, 21].

Mnogość algorytmów oznacza oprócz indywidualnego widzenia problemu przez ich autorów również przyjęcie różnych założeń upraszczających opis fizycznego modelu procesu spalania.

Jednym z takich algorytmów jest opracowany w Zakładzie Silników Spalinowych Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej algorytm obliczeń przebiegów spalania w silniku wysokoprężnym [3, 16, 17, 18].

Podstawę obliczeń przebiegów spalania stanowił rejestrowany przy określonych parametrach pracy badanego silnika wykres indykatorowy. Mimo sprowadzenia problemu do wspólnej dla publikowanych algorytmów pierwszej zasady termodynamiki, prezentowany algorytm wyróżnia się rozległością rozważań dotyczących stechiome-

trii spalania, sposobem wyznaczania energii wewnętrznej czynnika, doborem równań opisujących przekazywanie energii do ścianek przestrzeni spalania, użyciem uniwersalnej stałej gazowej oraz metodą wyznaczenia przybliżonych i dokładnych wartości funkcji spalania i prędkości wywiązywania ciepła.

Bezwymiarowa postać funkcji spalania i prędkości wywiązywania ciepła pozwala zestawiać i porównywać ich wartości z wynikami badań innych silników.

Omawiany algorytm jest ważny dla następujących założeń:

- czynnik roboczy jest jednorodną mieszaniną powietrza i spalin stechiometrycznych,
- czynnik roboczy podlega prawom przemian gazów doskonałych,
- ilość czynnika w przestrzeni spalania jest stała,
- energia wewnętrzna czynnika jest liniową funkcją temperatury,
- współczynnik przekazywania ciepła do ścianek można wyznaczać wzorem Woschniego,
- temperatura ścianek przestrzeni spalania jest stała i jednakowa dla wszystkich ścianek.

W przedstawionym algorytmie nie uwzględniono:

- straty energii przez promieniowanie,
- straty energii na termiczną dysocjację produktów utleniania,
- straty energii pobieranej przez olej smarujący,
- straty energii związanej z ubywkami czynnika z przestrzeni spalania,
- niecałkowitego i niezupełnego spalania,
- energii tarcia współpracujących elementów,
- energii odparowania paliwa,
- energii kinetycznej dopływającego powietrza,
- energii reszty spalin zalegających przestrzeni spalania.

W pracy nad rozwojem algorytmu podstawowego wyłonilo się zagadnienie takiego uwzględnienia wymienionych wyżej zjawisk fizycznych i aspektów spalania, aby przy możliwie ograniczonej rozbudowie algorytmu obliczeń uzyskać ocenę, które z czynników mają decydujący wpływ, ilościowy.

1. CEL I ZAKRES PRACY

Za cel rozprawy przyjęto rozpoznanie znaczenia wprowadzonych do algorytmu podstawowego modyfikacji sposobu obliczeń oraz elementów bilansu energetycznego, bez rozstrzygania postaci algorytmu do praktycznego wykorzystania w pracach projektowych i badawczych.

Zakres planowanej pracy obejmuje:

- problem wartości początkowych funkcji spalania i prędkości wywiązywania ciepła,
- sposób wyznaczania pochodnej temperatury,
- wygładzanie chwilowych wartości ciśnień w przestrzeni spalania,
- zmienność ilości czynnika, powodowaną nieszczelnością przestrzeni spalania (przedmuchem),
- zmianę ilości czynnika powodowaną wtryskiem paliwa,
- zmienność ilości czynnika powodowaną przemianami molowymi (kontrakcja chemiczna),
- uwzględnienie w bilansie energetycznym ciepła promieniowania gazu i płomienia,
- uwzględnienie strat energii dysocjacji termicznej,
- uwzględnienie strat energii związanych z przedmuchem,
- zmianę sposobu wyznaczania energii wewnętrznej czynnika,
- zmianę równania określającego współczynnik przekazywania ciepła do ścianek.

Ustalona kolejność kroków badawczych wynika ze struktury algorytmu przyjętego za podstawowy.

2. WYZNACZANIE PRZEBIEGÓW WYWIĄZYWANIA CIEPŁA - MODEL PODSTAWOWY

Obliczenia związane z badaniami procesu spalania i wymiany ciepła sprowadzają się do bilansu energetycznego, sformułowanego, w oparciu o pierwszą zasadę termodynamiki.

Model spalania [16], umożliwiający wyznaczanie przebiegów wywiązywania ciepła, stanowiących podstawę podjętych rozważań, przyjmuje ogólne równanie bilansu energetycznego w następującej formie:

$$dQ = dU + p dV \quad (1)$$

gdzie: Q - ciepło pochłonięte przez czynnik - stanowi różnicę między ciepłem wywiązującym się ze spalania paliwa Q_I i odprowadzonym do ścianek przestrzeni spalania Q_{II} .

U - energia wewnętrzna czynnika roboczego,
 pdV - praca absolutna.

Przyjęty model ograniczony jest następującymi założeniami:

1. czynnik roboczy podlega prawom przemian gazów doskonałych,
2. czynnik jest jednorodną mieszaniną powietrza i spalin stechiometrycznych,
3. ilość czynnika w cylindrze silnika jest stała,
4. energia wewnętrzna czynnika jest liniową funkcją temperatury,
5. ciepło odprowadzane do ścianek cylindra określone jest wzorem Woschni'ego.

Model spalania sprowadza się do funkcji wywiązania ciepła β (funkcji spalania, prawa spalania) i jego strumienia β' (prędkość wywiązania ciepła), definiowanych następująco:

$$\beta = \frac{Q_I}{Q_0}, \quad (2)$$

$$\beta' = \frac{d\beta}{d\alpha}, \quad (3)$$

gdzie: $Q_0 = B_0 W$ - ciepło dawki,

B_0 - dawka paliwa na 1 cykl pracy,

W - wartość opałowa paliwa.

Dla tak przyjętych założeń i definicji rozważane funkcje przyjmują następujące postaci obliczeniowe:

$$\beta'_i = \frac{1}{Q_0} (Q'_{IIi} + \bar{n} b_{czi} T'_i + \bar{n} MR \Gamma_i T_i), \quad (4)$$

$$\beta_i = \beta_{i-1} + \frac{1}{2} \Delta\alpha (\beta'_{i-1} + \beta'_i), \quad (5)$$

gdzie: Q'_{IIi} - strumień ciepła odprowadzonego do ścianek cylindra w chwili i ,

$\bar{n}$ - ilość czynnika w cylindrze,

b_{czi} - współczynnik linearyzacji energii wewnętrznej czynnika,

T'_i - pochodna temperatury czynnika po kącie obrotu wału korbowego silnika,

MR - uniwersalna stała gazowa,

Γ_i - funkcja objętości cylindra,

T_i - temperatura czynnika,

$\Delta\alpha$ - interwał kąta obrotu wału korbowego (OWK).

Ze względu na bezwymiarową postać funkcji β i β' , możliwe jest porównywanie ich przebiegów dla silników o różnych parametrach znamionowych.

3. PODSTAWY TEORETYCZNE MODYFIKACJI ALGORYTMU OBLICZEŃ

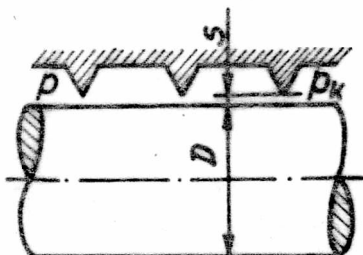
Ze względu na cel postawiony niniejszej pracy, postanowiono uzupełnić model podstawowy o pewne elementy bilansu energetycznego pozwalające dokładniej odwzorować proces termodynamiczny.

3.1. Zmiana ilości czynnika roboczego

Uzupełnienie pierwsze dotyczy ilości czynnika w cylindrze. Ilość czynnika w cylindrze w czasie sprężania, a potem spalania jest zmienna. Zmiany związane są z nieszczelnością pierścieni cylindrowych oraz przemianami fizycznymi i chemicznymi zachodzącymi w przestrzeni spalania.

3.1.1. Zmiana ilości czynnika roboczego w cylindrze spowodowana przedmuchem

Układ elementów silnika: tłok-pierścienie-tuleja cylindrowa można porównać [9] z uszczelnieniem labiryntowym obracającego się wału (rys. 1).



Rys. 1. Schemat uszczelnienia labiryntowego.

Masowe natężenie przepływu czynnika (przedmuch) przez takie uszczelnienie opisuje równanie:

$$\dot{m}_p = A_c \sqrt{\frac{2 \rho_m \Delta p}{z}} \quad (6)$$

gdzie: $A_c = \pi D s \mu$ - pole przekroju szczeliny obwodowej,

D - średnica cylindra,

s - szerokość szczeliny,

μ - współczynnik kontrakcji,

$\rho_m = \frac{p_m}{p} \frac{1}{v}$ - średnia gęstość czynnika,

$p_m = \frac{p + p_k}{2}$ - średnie ciśnienie w labiryncie,

p - ciśnienie przed uszczelnieniem,

p_k - ciśnienie za uszczelnieniem,

v - objętość właściwa czynnika w przestrzeni przed uszczelnieniem,

$\Delta p = p - p_k$ - różnica ciśnień,

z - liczba komór labiryntu.

Adaptując wyrażenie (6) do warunków czynnika w komorze nad tłokiem w silniku i pamiętając, że:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{X_v V_s}{\bar{n} M}, \quad (7)$$

a stąd:

$$\rho_m = \frac{p + p_k}{2p} \frac{\bar{n} M}{X_v V_s}, \quad (8)$$

można je przedstawić w postaci:

$$\dot{m}_p = A_c \sqrt{2 \frac{p + p_k}{2p} \frac{\bar{n} M}{X_v V_s} \frac{p - p_k}{z}}$$

lub po przekształceniach:

$$\dot{m}_p = A_c \sqrt{\frac{M}{z V_s}} \sqrt{\frac{p^2 - p_k^2}{p} \frac{\bar{n}}{X_v}} \quad (9)$$

gdzie: V - objętość przestrzeni spalania nad tłokiem,
 $m = \bar{n} M$ - masa czynnika w przestrzeni spalania nad tłokiem,
 $\bar{n}$ - ilość kmol czynnika,
 M - masa molowa czynnika,
 $X_v = \frac{V}{V_s}$ - wskaźnik objętości cylindra,
 V_s - objętość skokowa cylindra.

W wyrażeniu (9) wielkości A_c , M , z , V_s są wielkościami stałymi. Pamiętając, że na wielkość A_c składa się doświadczalny współczynnik kontrakcji μ można przyjąć:

$$\kappa = A_c \sqrt{\frac{M}{z V_s}} \quad (10)$$

i uznać wyrażenie (10) za wielkość reprezentującą współczynnik proporcjonalności obliczeniowego natężenia przedmuchu do przedmuchu globalnego (ilości czynnika opuszczającego przestrzeń spalania od momentu zamknięcia zaworu ssącego do otwarcia zaworu wylotowego). Oczywiście wartość współczynnika κ należy wyznaczyć doświadczalnie.

Wyrażenie (9) można teraz uprościć do postaci:

$$\dot{m}_p = \kappa \sqrt{\frac{(p^2 - p_k^2) \bar{n}}{p X_v}} \quad (11)$$

Potrzeba wyznaczenia chwilowych ubytków czynnika wymaga kolejnego przekształcenia wzoru (11):

$$\dot{m}_{pi} = \kappa \sqrt{\frac{(p_i^2 - p_k^2) \bar{n}_i}{p_i X_{vi}}} \quad (12)$$

gdzie: $\dot{m}_{pi}$ - chwilowe natężenie przedmuchu,
 p_i , $\bar{n}_i$, X_{vi} - chwilowe wartości ciśnienia, ilości czynnika i wskaźnika objętości cylindra.

Ilość czynnika ubywająca z przestrzeni spalania w czasie $\Delta \tau_i$, określa zależność:

$$\bar{n}_{pi} = \frac{\dot{m}_{pi}}{M} \Delta \tau_i \quad (13)$$

Ponieważ $\Delta\tau_1 = \frac{1}{6n} \Delta\alpha_1$, to:

$$\bar{n}_{pi} = \frac{1}{6nM} \dot{m}_{pi} \Delta\alpha_1, \quad (14)$$

gdzie: n – obroty wału korbowego silnika,
 $\dot{m}$ ilość czynnika w cylindrze w chwili $i+1$:

$$\bar{n}_{i+1} = \bar{n}_i - \bar{n}_{pi} \quad (15)$$

3.1.2. Zmiana ilości czynnika spowodowane wtryskiem paliwa

Paliwo wtrysnięte do cylindra w ilości B_0 powoduje przyrost ilości czynnika. Przyrost ten wynosi:

$$\bar{n}_b = \frac{B_0}{M_b} \quad (16)$$

gdzie: M_b – masa molowa oleju napędowego.

3.1.3. Zmiana ilości czynnika spowodowana kontrakcją chemiczną

Z reakcjami chemicznymi przebiegającymi w czasie procesu spalania związane jest zjawisko kontrakcji chemicznej. Zmiany ilości czynnika spowodowane kontrakcją opisuje całkowity współczynnik przemiany molowej μ_c . Ponieważ można założyć, że przemiana molarowa postępuje równocześnie z procesem spalania, to ilość czynnika w chwili i (tzn. na początku przedziału $\Delta\tau_1 = \Delta\alpha_1$) opisuje następujące równanie:

$$\bar{n}_i = \bar{n}_\alpha + \bar{n}_b + (\bar{\beta}_i - \bar{\beta}_{i-1})(\mu_c - 1) \frac{\bar{n}_{\min}}{0,21} B_0 \quad (17)$$

gdzie: $\bar{n}_\alpha$ – ilość czynnika w cylindrze odpowiadająca kątowi początku spalania,

$\bar{\beta}_i$ – przybliżona wartość funkcji spalania.

3.1.4. Całkowita zmiana ilości czynnika

Uwzględniając przedmuch, przemiany molowe i wtrysk paliwa, ilość czynnika w cylindrze można wyrazić równaniem:

$$\bar{n}_i = \bar{n}_\alpha + \bar{n}_b + (\bar{\beta}_i - \bar{\beta}_{i-1})(\mu_c - 1) \frac{\bar{n}_{\min}}{0,21} B_0 - \bar{n}_{pi-1} \quad (18)$$

W rozważaniach na temat energii wewnętrznej czynnika wystąpi wielkość całkowitej zmiany ilości czynnika w przedziale czasu $\Delta\tau_i \equiv \Delta\alpha_i$. Wielkość tę można określić za pomocą następującego równania:

$$\Delta \bar{n}_i = (\bar{\beta}_i - \bar{\beta}_{i-1})(\mu_c - 1) \frac{\bar{n}_{\min}}{0,21} B_0 + \bar{n}_{pi} \quad (19)$$

3.2. Aproksymacja zmienności energii wewnętrznej czynnika

W modelu podstawowym przedstawiono właściwą energię wewnętrzną czynnika jako iloczyn temperatury i średniego molowego ciepła właściwego przy stałej objętości, w przedziale od 0°C do $t^\circ\text{C}$:

$u = (Mc_v)_c \Big|_0^t \cdot t$ i następnie aproksymowano wielomianem pierwszego stopnia.

W niniejszej pracy utrzymano założenie, że czynnik jest jednorodną mieszaniną spalin stechiometrycznych i powietrza, ale stopień wielomianu aproksymującego zależność energii wewnętrznej od temperatury podwyższono.

Korzystając z zależności ((14) - zał. 2) wyznaczono udziały dwutlenku węgla CO_2 , pary wodnej H_2O i azotu N_2 w spalinach stechiometrycznych:

$$z_{\text{CO}_2} = 0,21 \frac{1}{1,216 - 0,21} ,$$

$$z_{\text{H}_2\text{O}} = 0,42 \frac{6 - 1}{1,216 - 0,21} ,$$

$$z_{\text{N}_2} = 0,79 \frac{6}{1,216 - 0,21} .$$

Dla paliwa o składzie: $c = 0,867$ i $h = 0,130$ udziały CO_2 , H_2O i N_2 w spalinach stechiometrycznych wynoszą:

$$z_{\text{CO}_2} = 0,1360,$$

$$z_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1224,$$

$$z_{\text{N}_2} = 0,7417.$$

Korzystając z ogólnej zależności, że średnie molowe ciepło właściwe jednorodnej mieszaniny jest równe sumie ciepł składników tej mieszaniny (spalin stechiometrycznych):

$$(Mc_v)_s \Big|_0^t = (Mc_v)_{\text{CO}_2} \Big|_0^t \cdot z_{\text{CO}_2} + (Mc_v)_{\text{H}_2\text{O}} \Big|_0^t \cdot z_{\text{H}_2\text{O}} + (Mc_v)_{\text{N}_2} \Big|_0^t \cdot z_{\text{N}_2} \quad (20)$$

i w oparciu o tablice termodynamicznych własności gazów [19], wyznaczono średnie molowe ciepło właściwe spalin stechiometrycznych i powietrza (tab. 1)..

T a b e l a 1

Średnie molowe ciepło właściwe przy stałej objętości
 $(Mc_v)_s \Big|_0^t$ - spalin stechiometrycznych ($c = 0,867$,
 $h = 0,130$) i $(Mc_v)_p \Big|_0^t$ - powietrza

$t, ^\circ\text{C}$	$(Mc_v)_s \Big _0^t, \text{Jkmol}^{-1}\text{K}^{-1}$	$(Mc_v)_p \Big _0^t, \text{Jkmol}^{-1}\text{K}^{-1}$
1000	$26,266 \cdot 10^3$	$23,283 \cdot 10^3$
1100	$26,630 \cdot 10^3$	$23,547 \cdot 10^3$
1200	$26,977 \cdot 10^3$	$23,794 \cdot 10^3$
1300	$27,332 \cdot 10^3$	$24,028 \cdot 10^3$
1400	$27,608 \cdot 10^3$	$24,250 \cdot 10^3$
1500	$27,896 \cdot 10^3$	$24,459 \cdot 10^3$
1600	$28,166 \cdot 10^3$	$24,652 \cdot 10^3$
1700	$28,424 \cdot 10^3$	$24,836 \cdot 10^3$
1800	$28,660 \cdot 10^3$	$25,003 \cdot 10^3$
1900	$28,873 \cdot 10^3$	$25,167 \cdot 10^3$
2000	$29,100 \cdot 10^3$	$25,323 \cdot 10^3$
2100	$29,303 \cdot 10^3$	$25,427 \cdot 10^3$
2200	$29,496 \cdot 10^3$	$25,611 \cdot 10^3$
2300	$29,674 \cdot 10^3$	$25,745 \cdot 10^3$
2400	$29,846 \cdot 10^3$	$25,870 \cdot 10^3$
2500	$30,006 \cdot 10^3$	$25,992 \cdot 10^3$

Energia wewnętrzna właściwa (odpowiadająca jednostce masy) gazu jest wyznaczana z iloczynu średniego molowego ciepła właściwego i przyrostu temperatury. Tak uzyskane wartości właściwej energii wewnętrznej spalin stechiometrycznych i powietrza przedstawia tab.2.

T a b e l a 2
Energia wewnętrzna właściwa $(Mc_V)_s \Big|_0^t \cdot t$ - spalin
stechiometrycznych ($c = 0,867$, $h = 0,130$)
i $(Mc_V)_p \Big|_0^t \cdot t$ - powietrza

$t, ^\circ\text{C}$	$(Mc_V)_s \Big _0^t \cdot t, \text{ J/kmol}$	$(Mc_V)_p \Big _0^t \cdot t, \text{ J/kmol}$
1000	$26,266 \cdot 10^6$	$23,283 \cdot 10^6$
1100	$29,293 \cdot 10^6$	$25,902 \cdot 10^6$
1200	$32,372 \cdot 10^6$	$28,553 \cdot 10^6$
1300	$35,532 \cdot 10^6$	$31,236 \cdot 10^6$
1400	$38,651 \cdot 10^6$	$33,950 \cdot 10^6$
1500	$41,844 \cdot 10^6$	$36,689 \cdot 10^6$
1600	$45,066 \cdot 10^6$	$39,443 \cdot 10^6$
1700	$48,321 \cdot 10^6$	$42,221 \cdot 10^6$
1800	$51,588 \cdot 10^6$	$45,005 \cdot 10^6$
1900	$54,859 \cdot 10^6$	$47,817 \cdot 10^6$
2000	$58,200 \cdot 10^6$	$50,646 \cdot 10^6$
2100	$61,536 \cdot 10^6$	$53,397 \cdot 10^6$
2200	$64,891 \cdot 10^6$	$56,344 \cdot 10^6$
2300	$68,250 \cdot 10^6$	$59,214 \cdot 10^6$
2400	$71,630 \cdot 10^6$	$62,088 \cdot 10^6$
2500	$75,015 \cdot 10^6$	$64,980 \cdot 10^6$

Zależności powyższe aproksymowano wielomianami drugiego stopnia:

$$\begin{aligned}
 (Mc_V)_s \Big|_0^t \cdot t &= a_s + b_s t + c_s t^2, \\
 a_s &= -3,29 \cdot 10^6, \\
 b_s &= 28,26 \cdot 10^3, \\
 c_s &= 1,23 \cdot 10^{-2},
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

$$\begin{aligned}
 (Mc_v)_p \Big|_0^t &= a_p + b_p t + c_p t^2, \\
 a_p &= -2,25 \cdot 10^6, \\
 b_p &= 24,56 \cdot 10^3, \\
 c_p &= 0,94.
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

Energia wewnętrzna gazu jest równa iloczynowi ilości gazu $\bar{n}$ i właściwej energii wewnętrznej:

$$U_s = \bar{n}_s (a_s + b_s t + c_s t^2), \tag{23}$$

$$U_p = \bar{n}_p (a_p + b_p t + c_p t^2), \tag{24}$$

gdzie: U_s - energia wewnętrzna spalin stechiometrycznych,
 $\bar{n}_s$ - ilość kmol spalin stechiometrycznych,
 U_p - energia wewnętrzna powietrza,
 $\bar{n}_p$ - ilość kmol powietrza.

Wobec powyższego energia wewnętrzna czynnika znajdującego się w przestrzeni spalania a składającego się w dowolnej chwili ze spalin stechiometrycznych i powietrza nadmiarowego jest sumą energii wewnętrznej tych składników:

$$U_c = U_s + U_p. \tag{25}$$

Równanie energii wewnętrznej czynnika roboczego można również przedstawić w następującej postaci:

$$U_c = \bar{n} (a_c + b_c t + c_c t^2) \tag{26}$$

Dla dowolnej chwili procesu spalania:

$$\bar{n}_s = \bar{n} z_s \tag{27}$$

$$\bar{n}_p = \bar{n} z_p = \bar{n} (1 - z_s) \tag{28}$$

gdzie: z_s - udział spalin stechiometrycznych w masie czynnika - jego wartości chwilowe można wyznaczyć z zależności ((12) - zał. 2),

z_p - udział powietrza w masie czynnika.

Kojarząc powyższe zależności można napisać:

$$\left. \begin{aligned} a_c &= z_s(a_s - a_p) + a_p \\ b_c &= z_s(b_s - b_p) + b_p \\ c_c &= z_s(c_s - c_p) + c_p \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

W bilansie energetycznym modelu występuje pochodna energii wewnętrznej $\frac{dU_c}{d\alpha}$.

Uwzględniając opisaną wcześniej zmienność ilości czynnika i pamiętając, że $\tau = \frac{\alpha}{6n}$, $\frac{dU_c}{d\alpha}$ można wyznaczyć z zależności:

$$\begin{aligned} \frac{dU_c}{d\alpha} &= \bar{n} \frac{d}{dt} (a_c + b_c t + c_c t^2) \frac{dt}{d\alpha} + (a_c + b_c t + c_c t^2) \frac{d\bar{n}}{d\tau} \frac{d\tau}{d\alpha}, \\ \frac{dU_c}{d\alpha} &= \bar{n}(b_c + c_c t) \frac{dt}{d\alpha} + (a_c + b_c t + c_c t^2) \frac{d\bar{n}}{d\alpha}. \end{aligned} \quad (30)$$

W obliczeniach, gdzie ilość czynnika roboczego jest stała, wyrażenie powyższe upraszcza się do postaci:

$$\frac{dU_c}{d\alpha} = \bar{n}(b_c + c_c t) \frac{dt}{d\alpha}. \quad (31)$$

W algorytmie obliczeń wywiązywania ciepła korzystano ze skończonych przyrostów wielkości Δt , $\Delta \bar{n}$ i $\Delta \alpha$. Pochodną energii wewnętrznej dla chwili i określono z równania:

$$\frac{\Delta U_{ci}}{\Delta \alpha} = \bar{n}_i(b_c + c_c t_i) \frac{\Delta t_i}{\Delta \alpha} + \left(\frac{a_c}{t} + b_c t_i + c_c t_i^2 \right) \frac{\Delta \bar{n}_i}{\Delta \alpha}. \quad (32)$$

3.3. Straty energii związane z przemuchem czynnika

Czynnik opuszczający przestrzeń spalania w czasie trwania spalania powoduje obniżenie efektu energetycznego przemiany w stosunku do efektu teoretycznego. Stratę można określić za pomocą następującego wyrażenia:

$$I = (M_1)\bar{n}_p, \quad (33)$$

a stąd jej pochodną:

$$\frac{dI}{d\alpha} = (Mi) \frac{d\bar{n}_p}{d\alpha} + \bar{n}_p \frac{d(Mi)}{dt} \frac{dt}{d\alpha} \quad (34)$$

gdzie: I - entalpia czynnika opuszczającego przestrzeń spalania,
 (Mi) - entalpia właściwa molowa czynnika,
 $\bar{n}_p$ - ilość ubywającego czynnika.

Zależność entalpii właściwej molowej czynnika od jego składu i temperatury można określić analogicznie jak średnie molowe ciepło właściwe (rozdział 3.2). Tak wyznaczone wartości entalpii właściwej molowej spalin stechiometrycznych (dla paliwa o $c = 0,863$ i $h = 0,13$) i powietrza (wg [19]) w funkcji temperatury przedstawia tabela 3. (na str. 19).

Korzystając z zasad aproksymacji średniokwadratowej przybliżono zależności tablicowe entalpii molowej spalin stechiometrycznych i powietrza wielomianami pierwszego stopnia:

$$\begin{aligned} (Mi)_s &= e_s + f_s t, \\ e_s &= -2872,1, \\ f_s &= 38,84, \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} (Mi)_p &= e_p + f_p t, \\ e_p &= -2025,5, \\ f_p &= 34,57. \end{aligned} \quad (36)$$

Wyrażając zależność entalpii molowej czynnika roboczego od temperatury funkcją pierwszego stopnia typu:

$$(Mi)_c = e_c + f_c t \quad (37)$$

równanie (34) można zapisać w postaci:

$$\frac{dI}{d\alpha} = (e_c + f_c t) \frac{d\bar{n}_p}{d\alpha} + \bar{n}_p (f_c) \frac{dt}{d\alpha} \quad (38)$$

gdzie:

$$\left. \begin{aligned} e_c &= z_s''(e_s - e_p) + e_p \\ f_c &= z_s''(f_s - f_p) + f_p \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

z_s'' - udział spalin stechiometrycznych po zakończeniu spalania.

Iteracyjna postać równania (38) wyrażona skończonymi przyrostami wielkości jest następująca:

$$\frac{\Delta I_1}{\Delta \alpha} = (e_c + f_c t_1) \frac{\Delta \bar{n}_{pi}}{\Delta \alpha} + \bar{n}_{pi} f_c \frac{\Delta t_1}{\Delta \alpha}. \quad (40).$$

T a b e l a 3

Entalpia molowa spalin stechiometrycznych
(Mi)_s (c = 0,867; h = 0,130) i powietrza (Mi)_p

t, °C	(Mi) _s , J kmol ⁻¹	(Mi) _p , J kmol ⁻¹
0	0	0
100	3093,2 · 10 ³	2915,4 · 10 ³
200	6260,6 · 10 ³	5861,8 · 10 ³
300	9510,1 · 10 ³	8855,5 · 10 ³
400	12853,1 · 10 ³	11916,2 · 10 ³
500	16289,0 · 10 ³	15048,1 · 10 ³
600	19810,9 · 10 ³	18242,8 · 10 ³
700	23419,3 · 10 ³	21508,6 · 10 ³
800	27103,1 · 10 ³	24824,7 · 10 ³
900	30857,5 · 10 ³	28191,1 · 10 ³
1000	34172,5 · 10 ³	31599,3 · 10 ³
1100	38540,7 · 10 ³	35049,4 · 10 ³
1200	42455,3 · 10 ³	38533,0 · 10 ³
1300	46429,9 · 10 ³	42037,5 · 10 ³
1400	50434,5 · 10 ³	45596,4 · 10 ³
1500	54450,7 · 10 ³	49155,4 · 10 ³
1600	58545,5 · 10 ³	52756,2 · 10 ³
1700	62624,7 · 10 ³	56357,0 · 10 ³
1800	66745,8 · 10 ³	59957,8 · 10 ³
1900	70872,1 · 10 ³	63600,5 · 10 ³
2000	75039,6 · 10 ³	67285,1 · 10 ³
2100	79217,9 · 10 ³	70696,7 · 10 ³
2200	83438,0 · 10 ³	74654,2 · 10 ³
2300	87626,6 · 10 ³	78338,8 · 10 ³
2400	91859,7 · 10 ³	82065,2 · 10 ³
2500	96097,7 · 10 ³	85791,6 · 10 ³

3.4. Straty energii związane z przekazywaniem ciepła do ścianek przez promieniowanie

Współczynnik przekazywania ciepła do ścianek cylindra był wyznaczany w modelu podstawowym za pomocą wzoru Woschni'ego, ujmującego tylko ciepło przekazywane przez konwekcję. Dokładniejsze obliczenia przebiegów wywiązywania ciepła wymagają uwzględnienia również ciepła przekazywanego przez promieniowanie gazu i promieniowanie płomienia.

W pracy wyznaczano współczynnik przekazywania ciepła przez promieniowanie gazu i płomienia metodą Sitkei'a [11] po uwzględnieniu uwag zawartych w [15], dostosowując ją do zakresu zmian wielkości fizycznych występujących w badanych silnikach.

3.4.1. Promieniowanie gazu

Równania iteracyjne określające współczynniki przekazywania ciepła na drodze promieniowania gazu mają następujące postaci:
- dla dwutlenku węgla:

$$\alpha_{rCO_2i} = \frac{3.5}{T_i - T_s} (p_{CO_2i} l_i)^{1/3} \left(\frac{T_i}{100}\right)^{-0.5} \left[\left(\frac{T_i}{100}\right)^{3.5} - \left(\frac{T_s}{100}\right)^{3.5} \right] \quad (41)$$

- dla pary wodnej:

$$\alpha_{rH_2Oi} = \frac{3.5}{T_i - T_s} p_{H_2Oi}^{0.8} l_i^{0.6} \left(\frac{T_i}{100}\right)^{-1} \left[\left(\frac{T_i}{100}\right)^3 - \left(\frac{T_s}{100}\right)^3 \right] \quad (42)$$

gdzie: p_{CO_2i} - chwilowe ciśnienie cząstkowe dwutlenku węgla,

$$p_{CO_2i} = z_{CO_2}'' p_i \bar{\beta}_i, \quad (43)$$

z_{CO_2}'' - objętościowy udział CO_2 w czynniku roboczym po zakończeniu procesu spalania,

$\bar{\beta}_i$ - chwilowa przybliżona wartość funkcji spalania,

p_i - chwilowe ciśnienie czynnika,

p_{H_2Oi} - chwilowe ciśnienie cząstkowe pary wodnej,

$$p_{H_2Oi} = z_{H_2O}'' p_i \bar{\beta}_i, \quad (44)$$

z''_{H_2O} - objętościowy udział pary wodnej w czynniku roboczym po zakończeniu procesu spalania,

l_1 - chwilowa, średnia droga promieniowania w przestrzeni spalania,

$$l_1 = 3,6 \frac{V_1}{A_{s1}}, \quad (45)$$

V_1 - chwilowa objętość przestrzeni spalania,

A_{s1} - chwilowa powierzchnia ścianek przestrzeni spalania,

T_1 - chwilowa temperatura gazu,

T_s - temperatura ścianek przestrzeni spalania (średnia).

Udziały z''_{CO_2} i z''_{H_2O} wyznaczano ze wzorów:

$$z''_{CO_2} = 0,21 \frac{1}{6(\lambda + 0,21) - 0,21},$$

$$z''_{H_2O} = 0,42 \frac{6 - 1}{6(\lambda + 0,21) - 0,21}.$$

3.4.2. Promieniowanie płomienia

Wartości (chwilowe) współczynnika przekazywania ciepła przez promieniowanie płomieni obliczano następująco:

$$\alpha_{rf1} = \frac{\epsilon'_{f1} C_0}{T_f - T_s} \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_s}{100} \right)^4 \right] \quad (46)$$

gdzie: ϵ'_{f1} - chwilowa, rzeczywista, względna emisyjność płomieni,

$$\epsilon'_{f1} = \frac{0,18}{1 + 0,9 \frac{1 - \epsilon_{f1}}{\epsilon_{f1}}} \quad (47)$$

ϵ_{f1} - chwilowa względna emisyjność płomieni,

$$\epsilon_{f1} = 1 - \exp(-k_1 p_1 l_1) \quad (48)$$

k_1 - chwilowy współczynnik absorpcji, podany w [11] w postaci wykresu; do obliczeń na maszynie cyfrowej jego wartości wyznaczano z wzoru interpolacyjnego:

$$k_i = \frac{1}{\lambda} \left\{ 0,2440 + 0,2720[\alpha + 25(\lambda - 1,2)] - 0,0004[\alpha + 25(\lambda - 1,2)]^2 \right\} \quad (49)$$

C_0 - stała promieniowania ciała doskonale czarnego,

T_f - temperatura płomienia - jej wartość w oparciu o [15] przyjmowano jako stałą: $T_f = 2100$ K.

3.4.3. Sumaryczny współczynnik przekazywania ciepła do ścianek

Współczynnik przekazywania ciepła pozwalający wyznaczać sumaryczne ciepło oddawane do ścianek jest sumą współczynników konwekcji i promieniowania:

$$\alpha_{T_i} = \alpha_{k_i} + \alpha_{rCO_2} + \alpha_{rH_2O} + \alpha_{rfi} \quad (50)$$

Wartość α_{k_i} wyznaczana jest wzorem Woschni'ego:

$$\alpha_{k_i} = 308,2 D^{-0,214} (c_{\text{sr}} p_i)^{0,786} T_i^{-0,525} \quad (51)$$

gdzie: D - średnica cylindra,

c_{sr} - średnia prędkość tłoka,

p_i - ciśnienie czynnika w cylindrze,

T_i - temperatura czynnika w cylindrze.

3.5. Straty energii związane z termiczną dysocjacją składników czynnika roboczego

Produktami całkowitego i zupełnego spalania paliwa węglowodorowego są dwutlenek węgla CO_2 i para wodna H_2O , które częściowo ulegają dysocjacji termicznej. Wielkość strat energii cieplnej związanej z występowaniem zjawiska dysocjacji można wyznaczyć z następującego równania [2]:

$$Q_d = 5 \cdot 10^3 B_0 (115600 \bar{n}_{H_2O} \varphi_{H_2O} + 136440 \bar{n}_{CO_2} \varphi_{CO_2}) \quad (52)$$

gdzie: $\bar{n}_{H_2O}$, $\bar{n}_{CO_2}$ - ilość kmoli H_2O i CO_2 w spalinach stechiometrycznych,

$$\bar{n}_{H_2O} = z_{H_2O} \bar{n}, \quad (53)$$

$$\bar{n}_{CO_2} = z_{CO_2} \bar{n}, \quad (54)$$

z_{H_2O} , z_{CO_2} - udziały pary wodnej i dwutlenku węgla w spaliniach stechiometrycznych - wyznacza się je wg wzorów ((14) - zał. 2),

$\bar{n}$ - ilość czynnika w cylindrze,

φ_{H_2O} , φ_{CO_2} - stopień dysocjacji H_2O i CO_2 ,

B_0 - jednostkowa dawka paliwa.

Zależność stopnia dysocjacji φ_{H_2O} od temperatury dla reakcji $H_2O \rightleftharpoons H_2 + \frac{1}{2} O_2$, przy $p \approx 0,1$ MPa przedstawioną w tab. 4 [19] można opisać równaniem:

$$\varphi_{H_2O} = 9,31 \cdot 10^{-35} t^{9,76} \quad (55)$$

T a b e l a 4

Stopień dysocjacji pary wodnej φ_{H_2O}
dla reakcji $H_2O \rightleftharpoons H_2 + \frac{1}{2} O_2$, przy
 $p \approx 0,1$ MPa

t, °C	H_2O	t, °C	H_2O
800	$9,62 \cdot 10^{-7}$	1800	$7,86 \cdot 10^{-3}$
1000	$1,78 \cdot 10^{-5}$	2000	$1,83 \cdot 10^{-2}$
1200	$1,51 \cdot 10^{-4}$	2200	$3,72 \cdot 10^{-2}$
1400	$7,70 \cdot 10^{-4}$	2400	$6,73 \cdot 10^{-2}$
1600	$2,87 \cdot 10^{-3}$	2600	$1,12 \cdot 10^{-1}$

Zależność stopnia dysocjacji φ_{CO_2} od temperatury dla reakcji $CO_2 \rightleftharpoons CO + \frac{1}{2} O_2$, przy $p \approx 0,1$ MPa przedstawioną w tab. 5 [19] można opisać równaniem:

$$\varphi_{CO_2} = 2,14 \cdot 10^{-41} t^{12,0} \quad (56)$$

T a b e l a 5

Stopień dysocjacji dwutlenku węgla
 φ_{CO_2} dla reakcji $\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2$, przy
 $p \approx 0,1 \text{ MPa}$

t, °C	CO ₂	t, °C	CO ₂
800	$8,88 \cdot 10^{-7}$	1600	$6,94 \cdot 10^{-3}$
1000	$2,43 \cdot 10^{-5}$	1800	$2,17 \cdot 10^{-2}$
1200	$2,69 \cdot 10^{-4}$	2000	$5,49 \cdot 10^{-2}$
1400	$1,67 \cdot 10^{-3}$		

W bilansie energetycznym spalania występują pochodne bilansowanych wielkości. Pochodną ciepła dysocjacji można określić z równania:

$$Q'_d = 5 \cdot 10^3 B_0 \left(115600 \bar{n}_{\text{H}_2\text{O}} \frac{d\varphi_{\text{H}_2\text{O}}}{dt} \frac{dt}{d\alpha} + 136440 \bar{n}_{\text{CO}_2} \frac{d\varphi_{\text{CO}_2}}{dt} \frac{dt}{d\alpha} \right) \quad (57)$$

gdzie:

$$\frac{d\varphi_{\text{H}_2\text{O}}}{dt} = 9,09 \cdot 10^{-34} t^{8,76}, \quad (58)$$

$$\frac{d\varphi_{\text{CO}_2}}{dt} = 2,57 \cdot 10^{-40} t^{11,0}, \quad (59)$$

$$\frac{dt}{d\alpha} = t'. \quad (60)$$

Wartości chwilowe przyjmują następujące wielkości:

$t_i = (T_i - 273,15)$ i $t'_i = T'_i$, przy czym dt i $d\alpha$ zastąpiono przyrostami skończonymi Δt i $\Delta \alpha$.

4. MODYFIKACJE ALGORYTMÓW OBLICZEŃ FUNKCJI SPALANIA β I PRĘDKOŚCI WYWIĄZYWANIA CIEPŁA β'

W celu przeprowadzenia ilościowej oceny wpływu ugięć wprowadzonych do modelu wywiązywania ciepła w procesie spalania, przygotowano kilka wariantów obliczeń funkcji spalania β i jej pochodnej β' .

Wariant I

Wariant I stanowią obliczenia odpowiadające założeniom przedstawionym w rozdziale 2 wraz z uwagami dotyczącymi wartości początkowych niektórych parametrów.

Algorytm obliczeń funkcji β i β' jest następujący:

1. Temperatura czynnika T_1 dla chwili (kroku) i :

$$T_1 = \frac{(p_1 + p_0) X_{vi} V_s}{MR \bar{n}} \quad (61)$$

gdzie: p_1 - chwilowe ciśnienie czynnika w cylindrze,

p_0 - ciśnienie otoczenia,

X_{vi} - chwilowy wskaźnik objętości cylindra,

$$X_{vi} = \frac{1}{\varepsilon - 1} + \frac{1}{2} X_{1i} \quad (62)$$

$$X_{1i} = 1 - \cos \alpha_1 + \frac{1}{\lambda_k} \left(1 - \sqrt{1 - \lambda_k^2 \sin^2 \alpha_1} \right) \quad (63)$$

X_{1i} - chwilowy wskaźnik drogi tłoka,

ε - geometryczny stopień sprężania,

λ_k - stosunek promienia wykorbienia r do długości korbowodu L ,

α_1 - chwilowy kąt obrotu wału korbowego,

V_s - objętość skokowa cylindra,

MR - uniwersalna stała gazowa,

$\bar{n}$ - ilość kmol czynnika w cylindrze.

W tym wariacie obliczeń ilość czynnika przyjmowano jako średnią arytmetyczną z ilości zassanego powietrza i ilości czynnika na końcu spalania, wyznaczoną wg wzoru:

$$\bar{n} = \bar{n}_{sr} = \frac{\bar{n}_{min}}{0,21} \lambda B_o \left[1 + \gamma + \frac{1}{2\lambda} (\mu_o - 1) \right] \quad (64)$$

2. Pochodna temperatury czynnika po kącie obrotu wału korbowego:

$$\frac{dT_i}{d\alpha} = \frac{\Delta T_i}{\Delta \alpha} = T'_i = \frac{(T_i - T_{i-1}) + (T_{i+1} - T_i)}{\Delta \alpha_{i-1} + \Delta \alpha_i} \quad (65)$$

Dla $i = 1$ przyjmowano $T_i - T_{i-1} = 0$ i $\Delta \alpha_{i-1} = 0$.
Taki sposób liczenia wielkości T był możliwy tylko przy wcześniejszym wyznaczeniu za pomocą równania stanu gazu całego przebiegu temperatury czynnika T_i (od początku do końca spalania), co umożliwiła stała ilość czynnika $\bar{n} = \text{idem}$.

3. Przybliżona wartość funkcji spalania:

$$\bar{\beta}_i = \beta_{i-1} + \Delta \alpha \beta'_{i-1} \quad (66)$$

Dla $i = 1$ przyjmowano $\beta_i = 0$ i $\bar{\beta}_i = 0$.

4. Współczynnik linearyzacji energii wewnętrznej czynnika:

$$b_{czi} = b_{sz} = \frac{(\lambda - \bar{\beta}_i)(\lambda - 1 + \mu_o) + (\lambda - 1)\lambda\gamma}{(\lambda - 1 + \mu_o)(\lambda - \bar{\beta}_i + \mu_o\bar{\beta}_i + \lambda\gamma)} (b_{sz} - b_{pz}) \quad (67)$$

gdzie: b_{sz} , b_{pz} - współczynniki linearyzacji energii wewnętrznej spalin stechiometrycznych i powietrza.

5. Pochodna energii wewnętrznej czynnika:

$$U'_i = \bar{n} b_{czi} T'_i \quad (68)$$

6. Współczynnik przekazywania ciepła do ścianek przestrzeni spalania (przez konwekcję):

$$\alpha_{ki} = 308,2 D^{-0,214} (c_{sr} p_i)^{0,786} T_i^{-0,525} \quad (69)$$

gdzie: D - średnica cylindra,

c_{sr} - średnia prędkość tłoka,

$$c_{sr} = \frac{S n}{30}$$

7. Pochodna ciepła przekazywanego do ścianek:

$$Q'_1 = \frac{1}{6n} A_{s1} \alpha_{k1} (T_1 - T_s) \quad (70)$$

gdzie: n - częstość obrotowa silnika,

A_{s1} - pole powierzchni ograniczającej przestrzeń spalania,

$$A_{s1} = A(y_1 + y_2 + 2x_{11} \frac{S}{D}) \quad (71)$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (72)$$

y_1 - współczynnik określający stosunek pola powierzchni głowicy obrysowanego okręgiem o średnicy D do pola przekroju cylindra A ,

y_2 - współczynnik określający stosunek pola powierzchni denka tłoka do pola A ,

S - skok tłoka,

T_s - temperatura ścianek.

8. Pochodna pracy aboslutnej:

$$L'_1 = \bar{n}(MR) \Gamma_1 T_1 \quad (73)$$

gdzie: Γ_1 - wielkość określająca względną zmianę objętości cylindra w stosunku do kąta obrotu wału korbowego:

$$\Gamma_1 = \frac{\pi}{180} \frac{\sin \alpha_1 + \frac{1}{2} \lambda_k \frac{\sin 2\alpha_1}{\sqrt{1 - \lambda_k^2 \sin^2 \alpha_1}}}{2x_{vi}} \quad (74)$$

9. Suma pochodnych energii:

$$S'_1 = U'_1 + Q'_1 + L'_1 \quad (75)$$

10. Prędkość wywiązywania ciepła:

$$\beta'_1 = \frac{S'_1}{Q_0} \quad (76)$$

11. Funkcja spalania:

$$\beta_i = \beta_{i-1} + \frac{1}{2} \Delta \alpha (\beta'_{i-1} + \beta'_i) \quad (77)$$

Dla $i = 1$ przyjmowano $\beta_i = 0$.

Wariant II

Przyjęte w punkcie 2 wariantu I założenie o zerowej wartości wyrażenia $T_i - T_{i-1} = 0$ dla $i = 1$ wygodne dla przedstawionego algorytmu jest formalnie niepoprawne. W związku z tym w wariacie II zaproponowano wyznaczać dla $i = 1$ tylko temperaturę T_1 , a pełne obliczenia jak w wariacie I przeprowadzić dopiero od $i = 2$ (przy założeniu $\bar{\beta}_1 = 0$ i $\beta_1 = 0$).

Wariant III

Technika określania chwilowych wartości ciśnień spalania w funkcji kąta obrotu wału korbowego przez fotograficzne odwzorowanie przebiegów elektrycznych przesyłanych przez indykator jest źródłem wielu błędów.

W celu ograniczenia wpływu tych błędów na przebiegi β' i β , zaproponowano wygładzanie chwilowych wartości ciśnień spalania.

Jako funkcję przybliżającą wybrano oparty na rachunku najmniejszych kwadratów wielomian drugiego stopnia, następującej postaci:

$$p'_{i+2} = \frac{1}{70} (69p_{i+2} + 4p_{i+1} - 6p_i + 4p_{i-1} - p_{i-2}) \quad (78)$$

$$p'_{i+1} = \frac{1}{35} (2p_{i+2} + 27p_{i+1} + 12p_i - 8p_{i-1} + 2p_{i-2}) \quad (79)$$

$$p'_i = \frac{1}{35} (-3p_{i-2} + 12p_{i-1} + 17p_i + 12p_{i+1} - 3p_{i+2}) \quad (80)$$

Wariant III stanowią obliczenia prowadzone jak w wariacie II z wykorzystaniem funkcji przybliżającej do wygładzania chwilowych wartości ciśnień spalania.

Wariant IV

Ilość czynnika w trakcie procesu spalania jest zmienna. Uwzględnienie tego zjawiska w modelu spalania powoduje, że w całym okresie spalania (potrzebnego do obliczeń pochodnej temperatury wg wzoru 65), bez przeprowadzenia pełnych obliczeń spalania, jest niemożliwe.

Stąd warient IV stanowią obliczenia jak w wariancie II, lecz pochodną temperatury liczy się według wzoru:

$$T'_i = \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta \alpha} \quad (81)$$

Warient V

W wariancie V, będącym w zasadniczej części powtórzeniem wariantu IV, zmieniono ilość czynnika na tę, która odpowiada ilości na początku procesu spalania (tzn. ilość czynnika odpowiadającą kątowni zamknięcia zaworu ssącego pomniejszono o przedmuch liczony wzorami (12-14)). Tę ilość czynnika przyjęto nazywać $\bar{n}_\alpha$.

Warient VI

W stosunku do wariantu V zmiana dotyczyła tylko wartości funkcji spalania β_i dla $i = 2$.

W dotychczasowych warientach zakładano zerowe wartości funkcji spalania β_i i przybliżonej funkcji spalania $\bar{\beta}_i$ dla $i = 2$. Ponieważ założenie $\bar{\beta}_i = 0$ dla $i = 2$ pozwala wyznaczyć wartość β_i , przyjęto taki sposób postępowania (wartość β'_{i-1} wyznaczano z warunku $T'_1 = 0$).

Warient VII

Warient VII to powtórzenie algorytmu według wariantu VI, ale dla wygładzonych za pomocą wzorów (78-80) chwilowych wartości ciśnień spalania.

Warient VIII

Wprowadzono zmienną ilość czynnika odejmując od ilości $\bar{n}_\alpha$ ilości $\bar{n}_{pi}$ opuszczające przestrzeń spalania przez przedmuch, wyznaczane za pomocą wzorów (12-14).

Warient IX

W stosunku do wariantu VIII zmieniono tylko ilość czynnika, powiększając ją o ilość odpowiadającą dawce wtrysniętego paliwa $\bar{n}_b$, wyznaczoną według wzoru (16).

Wariant X

W tym wariacie uwzględniono zmianę ilości czynnika spowodowaną kontrakcją chemiczną (przemianą molową), dodając do sumy $\bar{n} = \bar{n}_a - \bar{n}_{pi} + \bar{n}_b$ element $\bar{n}_{ki}$

$$\bar{n}_{ki} = (\bar{\beta}_1 - \bar{\beta}_{i-1})(\mu_c - 1) \frac{\bar{n}_{min}}{0,21} B_o \quad (82)$$

Wariant XI

Wariant XI to obliczenia funkcji spalania z uwzględnieniem w ciepło przekazywanym do ścianek przestrzeni spalania również ciepła przekazywanego przez promieniowanie gazu i płomienia. Uzyskano to przez powiększenie współczynnika przekazywania o wielkości proponowane w rozdziale 3.4.

Wariant XII

W poprzednich wariantach wyznaczano pochodną energii wewnętrznej czynnika na podstawie jej liniowej zależności od temperatury. W tym wariacie zaproponowano wyznaczanie pochodnej energii wewnętrznej na podstawie zależności kwadratowej, za pomocą równania (30).

Wariant XIII

Do poprzedniego wariantu wprowadzono poprawkę uwzględniającą za pomocą równania (57) straty energii związane z dysocjacją termiczną CO_2 i H_2O .

Wariant XIV

Do poprzednich trzech wariantów wprowadzono poprawkę uwzględniającą za pomocą równania (38) straty energii związane z przedmuchem czynnika.

Wariant XV

We wszystkich poprzednich wariantach używano współczynnika przekazywania ciepła do ścianek wyznaczanego wzorem Woschni. W wariacie XV użyto wzoru zaproponowanego przez Zapfa [22], będącego efektem badań wymiany ładunku w silniku wysokoprężnym:

$$\alpha_{ki} = 535 D^{-0,22} (c_{sr} p_1)^{0,78} T_i^{-0,52} \quad (83)$$

5. OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO

Dla przeprowadzenia analizy porównawczej przebiegów wywiązywania ciepła według założonych wariantów obliczeń funkcji spalania i jej pochodnej potrzebny był zbiór wartości pomiarowych wielkości przedstawionych w poprzednich rozdziałach.

Pomiary przeprowadzono na 6-cylindrowym, 4-suwowym silniku z zapłonem samoczynnym o następujących parametrach znamionowych:

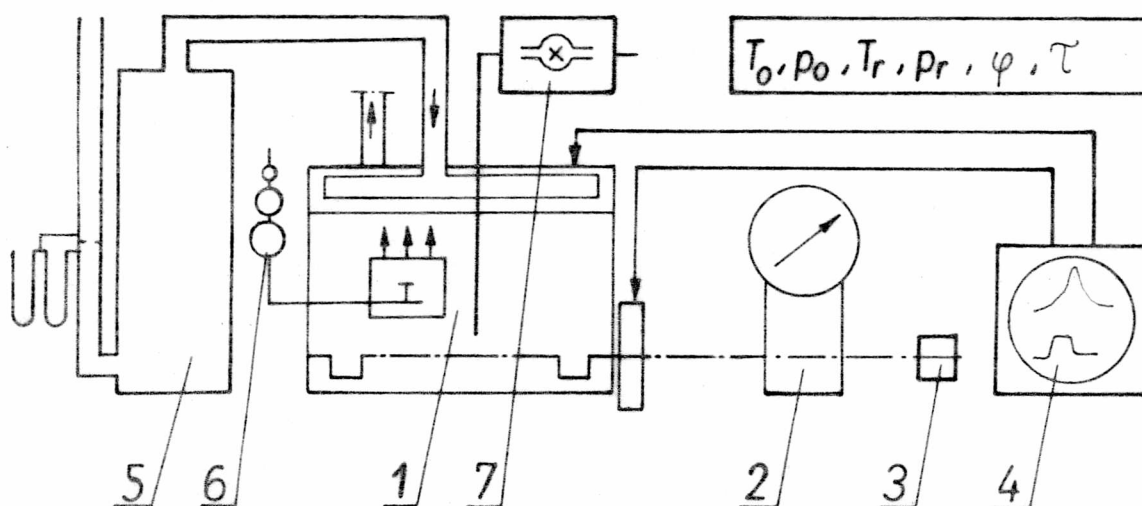
$$N_e \approx 100 \text{ kW przy } n = 2600 \text{ min}^{-1},$$

$$M_o \text{ max} = 423,65 \text{ Nm przy } n = 1600 \text{ min}^{-1},$$

$$V_s = 1,09 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3,$$

$$\epsilon = 16.$$

Silnik był zabudowany na stanowisku hamownianym, wyposażonym w hamulec obciążeniowy, wodny DPX-4 firmy Froude i uzbrojony w czujniki i instalacje pomiarowe (rys. 2).



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego: 1 - silnik badany, 2 - hamulec obciążeniowy, 3 - obrotomierz, 4 - zestaw do indykowania, 5 - układ pomiarowy natężenia przepływu powietrza, 6 - układ pomiarowy zużycia paliwa, 7 - układ pomiarowy natężenia przedmuchu.

Cisnienie czynnika w cylindrze p_1 określano za pomocą zestawu do indykowania PM4-RFT, wprowadzając w głowicę silnika przetwornik piezokwarcowy 6Q500-AVL. Rejestracji i odwzorowania przebiegów ciśnień dokonywano metodą fotograficzną.

Obroty silnika n mierzono za pomocą częstotliwościomierza elektronicznego typ C549A.

Dawkę jednostkową paliwa B_0 wyznaczano metodą objętościową, przez pomiar czasu zużycia przez silnik znanej objętości oleju napędowego o mierzonej w celu redukcji jego gęstości temperaturze.

Temperaturę spalin T_r określano za pomocą termopary płaszczowej Ni-CrNi doprowadzonej w pobliże zaworu wylotowego.

Ciśnienie spalin p_r mierzono za pomocą rtęciowego manometru U-rurkowego.

Stopień napełnienia ζ wyznaczano za pomocą układu pomiarowego natężenia przepływu powietrza zasysanego do silnika, zaprojektowanego według zaleceń PN-65/M-53950.

Ilość czynnika opuszczającego przestrzeń spalania w okresie zamknięcia zaworów (przedmuch) określano przez pomiar czasu odpompowania ze skrzyni korbowej silnika założonej objętości gazów. Odpompowanie prowadzono tak, by różnica ciśnień atmosferycznego i w skrzyni korbowej była równa zero.

Czas mierzono za pomocą stopera mechanicznego. Temperatury otoczenia, powietrza na zwężce (w układzie pomiarowym natężenia przepływu powietrza zasysanego do silnika), czynnika chłodzącego w głowicy, gazów odpompowywanych ze skrzyni korbowej, oleju napędowego i barometru mierzono za pomocą termometrów cieczowych.

Wilgotność względną powietrza zasysanego do silnika mierzono za pomocą higrometru włosowego.

6. WARTOŚCI WIELKOŚCI WEJŚCIOWYCH

Ilościową ocenę poszczególnych wariantów obliczeń funkcji spalania β i jej pochodnej β' przeprowadzono w oparciu o mierzone i wyznaczone wartości występujących w algorytmie wielkości dla 100 % obciążenia badanego silnika przy częstotliwości obrotów 1600 min^{-1} (częstość obrotów maksymalnego momentu obrotowego).

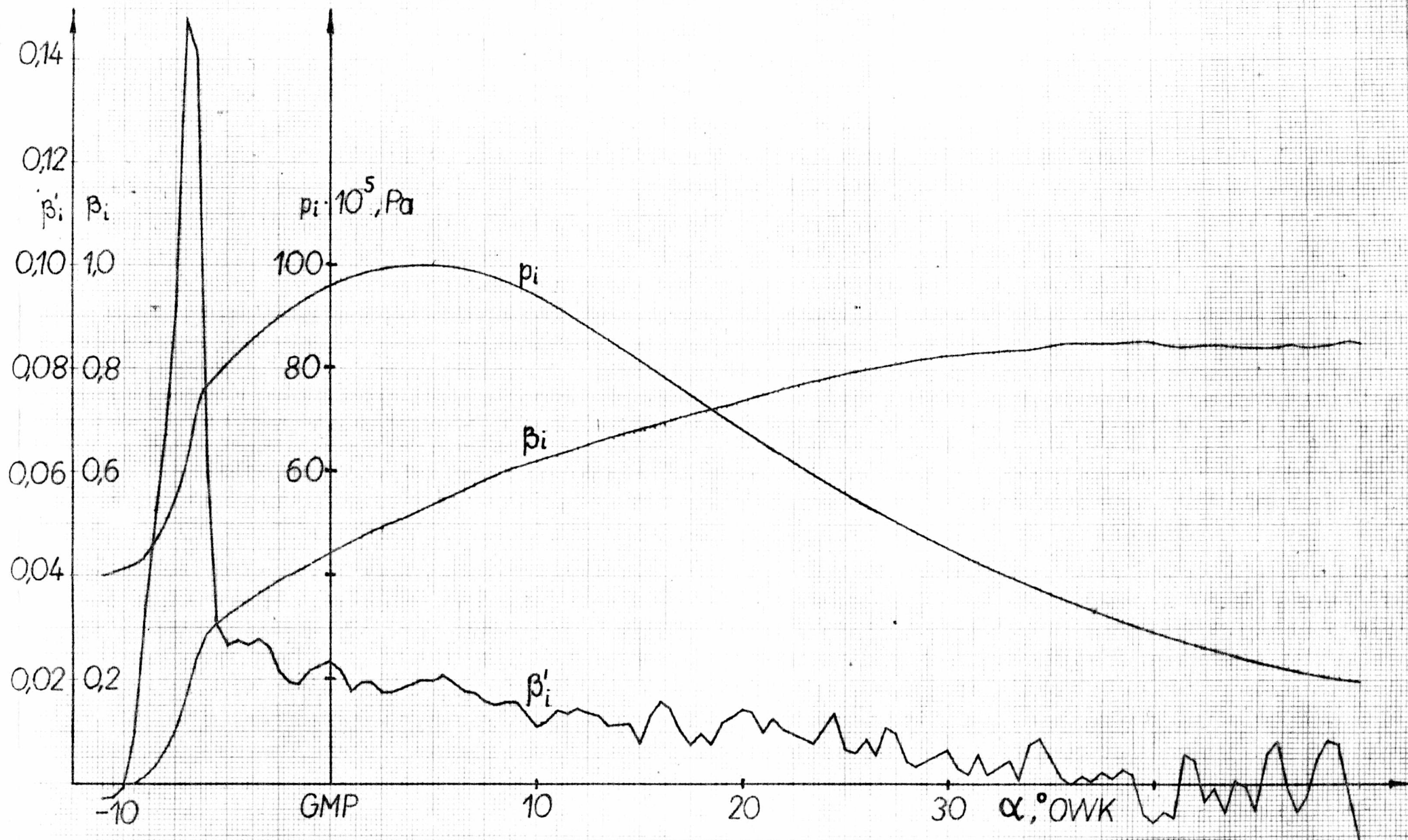
W oparciu o zasady przedstawione w pracy [20] wytypowano reprezentatywny ze względu na ciśnienie maksymalne przebieg ciśnień w przestrzeni spalania, będący podstawą dalszych obliczeń. Odczytane co 0,5 stopnia obrotu wału korbowego wartości ciśnień przedstawia tab. 6 (na str. 33) i rys. 3 (na str. 34). [5].

Częstość obrotów silnika w okresie pomiarowym: $n = 1591 \text{ min}^{-1}$.
Dawka wtrysniętego paliwa: $B_0 = 0,0619 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$.

T a b e l a 6

Cisnienie w przestrzeni spalania: $p_1 \times 10^5$ Pa - odczytane, $p'_1 \times 10^5$ Pa - wygładzone w funkcji kąta obrotu wału korbowego

Lp	α_1	p_1	p'_1	Lp	α_1	p_1	p'_1	Lp	α_1	p_1	p'_1	Lp	α_1	p_1	p'_1	Lp	α_1	p_1	p'_1
1	-11,0	40,20	40,20	26	1,5	98,50	98,52	51	14,0	84,50	84,60	76	26,5	52,80	52,82	101	39,0	30,90	30,88
2	-10,5	40,80	40,80	27	2,0	99,10	99,08	52	14,5	83,30	83,22	77	27,0	51,70	51,74	102	39,5	30,20	30,18
3	-10,0	41,30	41,30	28	2,5	99,50	99,48	53	15,0	81,80	81,79	78	27,5	50,80	50,75	103	40,0	29,40	29,43
4	-9,5	42,10	42,06	29	3,0	99,70	99,73	54	15,5	80,30	80,39	79	28,0	49,70	49,72	104	40,5	28,70	28,69
5	-9,0	43,60	43,79	30	3,5	99,90	99,88	55	16,0	79,20	79,12	80	28,5	48,60	48,59	105	41,0	28,00	27,97
6	-8,5	46,70	46,51	31	4,0	100,00	100,02	56	16,5	77,90	77,97	81	29,0	47,50	47,52	106	41,5	27,30	27,40
7	-8,0	50,10	50,16	32	4,5	100,10	100,09	57	17,0	76,70	76,61	82	29,5	46,50	46,48	107	42,0	27,00	26,88
8	-7,5	54,70	54,47	33	5,0	100,10	100,09	58	17,5	75,10	75,17	83	30,0	45,50	45,53	108	42,5	26,30	26,38
9	-7,0	60,70	61,75	34	5,5	100,00	100,03	59	18,0	73,70	73,69	84	30,5	44,60	44,54	109	43,0	25,80	25,77
10	-6,5	71,00	70,01	35	6,0	99,90	99,85	60	18,5	72,30	72,25	85	31,0	43,50	43,55	110	43,5	25,20	25,19
11	-6,0	76,30	76,33	36	6,5	99,50	99,54	61	19,0	70,80	70,90	86	31,5	42,60	42,59	111	44,0	24,60	24,65
12	-5,5	78,90	78,99	37	7,0	99,10	99,07	62	19,5	69,70	69,58	87	32,0	41,70	41,67	112	44,5	24,20	24,14
13	-5,0	80,80	80,91	38	7,5	98,50	98,50	63	20,0	68,30	68,43	88	32,5	40,70	40,76	113	45,0	23,60	23,62
14	-4,5	82,90	82,85	39	8,0	97,80	97,79	64	20,5	67,30	67,18	89	33,0	39,90	39,87	114	45,5	23,10	23,13
15	-4,0	84,80	84,82	40	8,5	97,00	97,02	65	21,0	65,90	65,97	90	33,5	39,00	38,98	115	46,0	22,80	22,77
16	-3,5	86,70	86,73	41	9,0	96,20	96,20	66	21,5	64,70	64,69	91	34,0	38,10	38,17	116	46,5	22,40	22,39
17	-3,0	88,60	88,57	42	9,5	95,30	95,28	67	22,0	63,50	63,47	92	34,5	37,50	37,43	117	47,0	21,90	21,90
18	-2,5	90,20	90,18	43	10,0	94,20	94,19	68	22,5	62,20	62,23	93	35,0	36,70	36,75	118	47,5	21,40	21,41
19	-2,0	91,50	91,52	44	10,5	93,00	93,03	69	23,0	61,00	60,97	94	35,5	36,00	35,94	119	48,0	21,00	21,01
20	-1,5	92,70	92,67	45	11,0	91,90	91,90	70	23,5	59,70	59,72	95	36,0	35,10	35,16	120	48,5	20,70	20,69
21	-1,0	93,80	93,87	46	11,5	90,80	90,77	71	24,0	58,50	58,50	96	36,5	34,40	34,36	121	49,0	20,40	20,42
22	-0,5	95,10	95,00	47	12,0	89,60	89,64	72	24,5	57,40	57,44	97	37,0	33,60	33,63	122	49,5	20,10	20,09
23	0	96,10	96,21	48	12,5	88,50	88,45	73	25,0	56,40	56,29	98	37,5	32,90	32,89	123	50,0	19,60	19,60
24	0,5	97,30	97,18	49	13,0	87,20	87,26	74	25,5	55,00	55,12	99	38,0	32,20	32,19				
25	1,0	97,90	97,95	50	13,5	86,00	85,91	75	26,0	54,00	53,92	100	38,5	31,50	31,53				



Rys. 3. Przebiegi ciśnienia czynnika w cylindrze p_i , prędkości wyłazywania ciepła β'_i oraz funkcji β_i w funkcji kąta obrotu wału korbowego dla wariantu podstawowego algorytmu obliczeń.

Wartość opakowa oleju napędowego: $W = 42000 \text{ kJ kg}^{-1}$.

Ciepło dawki: $Q_o = B_o W$; $Q_o = 0,0619 \cdot 10^{-3} \cdot 42000 = 2,601 \text{ kJ} = 2601 \text{ J}$.

Natężenie przepływu powietrza zasysanego do silnika (zredukowane):

$$\dot{V}_p = 269,1 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}.$$

Ciśnienie otoczenia: $p_o = 101044 \text{ Nm}^2$.

Temperatura otoczenia: $t_o = 28,5^\circ\text{C}$.

Wilgotność powietrza: $\varphi = 38 \%$.

Stopień napełnienia cylindra:

$$\zeta = \frac{\dot{V}_p}{30 n_i \dot{V}_s}; \quad \zeta = \frac{269,1}{30 \cdot 1591 \cdot 6 \cdot 1,09 \cdot 10^{-3}} = 0,86.$$

Masowe udziały pierwiastków węgla i wodoru w oleju napędowym:

$$c = 0,867; \quad h = 0,130.$$

Minimalna ilość tlenu potrzebna do spalania 1 kg oleju napędowego:

$$n_{\min} = \frac{c}{12} + \frac{h}{4}, \quad n_{\min} = 0,105 \text{ kmol kg}^{-1}.$$

Współczynnik nadmiaru powietrza:

$$\lambda = \frac{0,21}{n_{\min}} \frac{\zeta}{B_o} \frac{V_s}{MR} \frac{p_o}{T_o}, \quad \lambda = \frac{0,21 \cdot 0,86 \cdot 1,09 \cdot 10^{-3} \cdot 101044}{0,105 \cdot 0,0619 \cdot 10^{-3} \cdot 8314,3 \cdot 301,7} = 1,22.$$

Ciśnienie spalin: $p_r = 106000 \text{ N m}^{-2}$.

Temperatura spalin: $T_r = 778 \text{ K}$.

Stopień zanieczyszczenia:

$$\varepsilon = \frac{1}{\zeta(\varepsilon - 1)} \frac{p_r}{p_o} \frac{T_o}{T_r}, \quad \varepsilon = \frac{106000 \cdot 301,7}{0,86(16 - 1) \cdot 101044 \cdot 778} = 0,032.$$

Liczba Moliera:

$$\sigma = \frac{c + 3h}{c}, \quad \sigma = \frac{0,867 + 3 \cdot 0,130}{0,867} = 1,45.$$

Stechiometryczny współczynnik przemiany molowej:

$$\mu_o = 1 + 0,63 \frac{h}{\sigma c}, \quad \mu_o = 1 + 0,63 \frac{0,130}{1,45 \cdot 0,867} = 1,065.$$

Całkowity współczynnik przemiany molowej:

$$\mu_c = 1 + \frac{\mu_o - 1}{\lambda(1 + \varepsilon)}, \quad \mu_c = 1 + \frac{1,065 - 1}{1,22(1 + 0,032)} = 1,052.$$

Ilość czynnika w cylindrze jako średnia arytmetyczna z ilości na początku i na końcu spalania:

$$\bar{n} = \frac{\bar{n}_{\min}}{0,21} \lambda B_o \left[1 + \varepsilon + \frac{1}{2\lambda} (\mu_o - 1) \right],$$

$$\bar{n} = \frac{0,105}{0,21} \cdot 1,22 \cdot 0,0619 \cdot 10^{-3} \left[1 + 0,032 + \frac{1}{2 \cdot 1,22} (1,065 - 1) \right] = 4,0 \cdot 10^{-5} \text{ kmol}.$$

Masa molowa oleju napędowego:

W oparciu o informacje w pracy [9] przyjęto $M_b = 150 \text{ kg kmol}^{-1}$.

Ilość kmol czynnika odpowiadającego dawce wtrysniętego paliwa:

$$n_b = \frac{B_o}{M_b}, \quad n_b = \frac{0,0619 \cdot 10^{-3}}{150} = 4,1 \cdot 10^{-7} \text{ kmol.}$$

Natężenie przepływu gazów opuszczających przestrzeń spalania silnika (przez nieszczelności):

$$\dot{V}_{pr} = 3,56 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}.$$

Ilość kmol czynnika opuszczającego przestrzeń spalania z 1 cylindra w 1 cyklu pracy ((przy założeniu objętości molowej $V_m = 24,58 \text{ m}^3 \text{kmol}^{-1}$ dla warunków $p_n = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Nm}^{-2}$, $t_n = 20^\circ \text{C}$ [9]):

$$\bar{n}_{pr} = 3,33 \cdot 10^{-3} \frac{\dot{V}_{pr}}{n_i V_m}, \quad \bar{n}_{pr} = 3,33 \cdot 10^{-3} \frac{3,56}{1591,6 \cdot 24,85} = 5,01 \cdot 10^{-7} \text{ kmol.}$$

Chwilowe wartości ubytku czynnika można wyznaczyć za pomocą wzorów (12-14). Suma $\bar{n}_{pi}$ ubytków chwilowych stanowi ubytek całkowity odpowiadający $\bar{n}_{pr}$.

$$\sum_{i=1}^1 \bar{n}_{pi} = \bar{n}_{pr}$$

Powyższa zależność pozwala wyznaczyć metodą kolejnych przybliżeń wartość współczynnika κ , będącego elementem wzoru (12). Dla omawianego punktu pomiarowego wartość κ wynosiła: $\kappa = 0,000031$.

Znajomość wartości κ pozwoliła na wyznaczenie ilości czynnika na początku procesu spalania $\bar{n}_\alpha$ (będącej różnicą ilości czynnika odpowiadającej kątowni zamknięcia zaworu ssącego $\bar{n}'$ i sumy ubytków $\sum_{i=1}^1 \bar{n}_{pi}$ od zamknięcia zaworu ssącego do rozważanego momentu):

$$\bar{n}_\alpha = 3,883 \cdot 10^{-5} \text{ kmol.}$$

Temperatura wody chłodzącej mierzona w głowicy:

$$t_c = 80^\circ \text{C}, \quad T_c = 353 \text{ K.}$$

W oparciu o metodę i wyniki przedstawione w pracy [20] określono średnią temperaturę ścianki $T_g = 393 \text{ K.}$

7. ANALIZA WARIANTOWYCH PRZEBIEGÓW WYWIĄZYWANIA CIEPŁA

Jako miary wpływu wprowadzanych do modelu podstawowego zmian przyjęto używać stosunku chwilowych wartości funkcji spalania i prędkości wywiązywania ciepła rozważanego wariantu do odpowiadających im wartości chwilowych dla wariantu pierwszego, oraz oceny końcowej wartości funkcji β i wartości maksymalnej funkcji β' .

Zestawienie cech wariantowych przebiegów wywiązywania ciepła przedstawia tab. 7 (na str. 38).

Zestawienie wariantowych, chwilowych wartości prędkości wywiązywania ciepła β' i funkcji spalania β przedstawia tab. 8 (na str. 39-41).

Zestawienie względnych wartości funkcji spalania przedstawia tab. 9 (na str. 42 i 43) i rys. 4 (na str. 44) oraz rys. 5 (na str. 45).

Zestawienie względnych wartości funkcji β' przedstawia tab. 10 (na str. 46).

Przebiegi prędkości wywiązywania ciepła β' i funkcji spalania β na tle ciśnień czynnika w cylindrze w funkcji kąta obrotu wału korbowego dla wariantu I przedstawia rys. 3.

Analiza zestawionych wyżej informacji pozwala na następujące stwierdzenia:

1. Różniący warianty II i I sposób zadawania wartości początkowych wielkościom T' , β' i β powoduje znaczny wzrost wartości funkcji spalania w obszarze początku spalania i nieznaczny, bo wynoszący tylko około 0,2 % wzrost wartości końcowej. Wartość maksymalna prędkości wywiązywania ciepła β' , jak i kąt, przy którym to maksimum występuje nie uległy zmianie.
2. W wariacie III wartości chwilowe ciśnień czynnika w cylindrze były wygładzane. Spowodowało to obniżenie wartości $\beta'_{\max}$ o 5 % i wzrost odpowiadającej wartości β o 1,3 %. Wartość końcowa β uległa nieznacznemu podwyższeniu (mniej niż 0,01 %).
3. Wyznaczanie pochodnej temperatury T'_1 na podstawie bieżącej T_1 i poprzedniej T_{1-1} wartościach temperatury jest jedyną różnicą między wariantem IV i II. Taka poprawka spowodowała zmianę charakteru krzywej. W obszarze początku spalania wartość funkcji zmieniła znak i zmalała 7,5 raza. W obszarze występowania $\beta'_{\max}$ wartości β były średnio o 13 % niższe niż w wariacie II. Wartość końcowa β jest jednak o 0,7 % wyższa od odpowiadającej jej wartości z wariantu I.

T a b e l a 7

Cechy wariantowych przebiegów wywiązywania ciepła

Nr war.	n_i	T'_i	T'_1	T'_2	$\bar{\beta}_1$	$\bar{\beta}_2$	β_1	β_2	Wyglądanie	$\beta'_{\max}$	$\alpha(\beta'_{\max})$	$\beta(\alpha_{\max})$	Uwagi
I	$\bar{n}_{sr}$	$\frac{T_{i+1} + T_{i-1}}{2 \Delta \alpha}$	0			$\neq 0$		$\neq 0$	0*	0,1482	-7,0	0,8510	
II	$\bar{n}_{sr}$		**					0	0	0,1482	-7,0	0,8526	
III	$\bar{n}_{sr}$		**					0	1*	0,1408	-7,0	0,8527	
IV	$\bar{n}_{sr}$		**					0	0	0,1907	-6,5	0,8570	
V	$\bar{n}_{\alpha}$		**					0	0	0,1907	-6,5	0,8577	
VI	$\bar{n}_{\alpha}$	$\frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta \alpha}$	0	$\neq 0$	0	0	0	$\neq 0$	0	0,1908	-6,5	0,8590	
VII	$\bar{n}_{\alpha}$								0,1505	-6,5	0,8589		
VIII	$\bar{n}_{\alpha} - \bar{n}_{pi}$							1	0,1505	-6,5	0,8658		
IX	$\bar{n}_{\alpha} - \bar{n}_{pi} + n_b$							0,1505	-6,5	0,8650			
X	$\bar{n}_{\alpha} - \bar{n}_{pi} + \bar{n}_b + \bar{n}_{ki}$							0,1464	-6,5	0,8341			
XI								0,1464	-6,5	0,8446	+ α_r		
XII								0,1445	-6,5	0,8457	zmiana U'		
XIII								0,1445	-6,5	0,8457	+ Q_d		
XIV								0,1445	-6,5	0,8457	+ I		
XV								0,1456	-6,5	0,9183	zmiana α_k		

0 - nie; 1 - tak; ** - nie liczy się

T a b e l a 8

Wariantowe wartości chwilowe prędkości wywiewania ciepła β' i funkcji spalania β .

α °OWK	$\beta' I$	βI	$\beta' II$	βII	$\beta' III$	βIII	$\beta' IV$	βIV	$\beta' V$	βV
-11,0	-0,0030	0,0000	-0,0030	0,0000	-0,0030	0,0000	-0,0030	0,0000	-0,0030	0,0000
-10,5	-0,0028	-0,0015	-0,0028	0,0000	-0,0028	0,0000	-0,0019	0,0000	-0,0018	-0,0012
-10,0	-0,0004	-0,0023	-0,0004	-0,0008	-0,0008	-0,0009	-0,0036	-0,0014	-0,0036	-0,0026
-9,5	0,0102	0,0002	0,0102	0,0017	0,0121	0,0019	0,0030	-0,0015	0,0030	-0,0027
-9,0	0,0336	0,0111	0,0336	0,0126	0,0321	0,0130	0,0175	0,0036	0,0175	0,0024
-8,5	0,0525	0,0327	0,0525	0,0341	0,0512	0,0338	0,0498	0,0204	0,0498	0,0192
-8,0	0,0670	0,0625	0,0670	0,0640	0,0666	0,0633	0,0553	0,0467	0,0553	0,0455
-7,5	0,0923	0,1024	0,0923	0,1038	0,1021	0,1054	0,0787	0,0802	0,0788	0,0790
-7,0	0,1482	0,1625	0,1482	0,1640	0,1408	0,1661	0,1060	0,1264	0,1060	0,1252
-6,5	0,1413	0,2348	0,1413	0,2363	0,1310	0,2341	0,1907	0,2006	0,1907	0,1994
-6,0	0,0643	0,2862	0,0643	0,2877	0,0752	0,2856	0,0913	0,2711	0,0913	0,2699
-5,5	0,0307	0,3100	0,0307	0,3115	0,0316	0,3123	0,0375	0,3033	0,0375	0,3021
-5,0	0,0266	0,3243	0,0266	0,3258	0,0251	0,3265	0,0243	0,3187	0,0243	0,3176
-4,5	0,0275	0,3378	0,0275	0,3394	0,0266	0,3394	0,0291	0,3321	0,0292	0,3309
-4,0	0,0267	0,3514	0,0267	0,3529	0,0274	0,3530	0,0263	0,3459	0,0263	0,3448
-2,0	0,0195	0,4009	0,0195	0,4025	0,0194	0,4025	0,0199	0,3976	0,0199	0,3966
0	0,0234	0,4434	0,0234	0,4450	0,0231	0,4450	0,0208	0,4395	0,0208	0,4386
2	0,0193	0,4831	0,0193	0,4847	0,0189	0,4846	0,0205	0,4807	0,0205	0,4799
4	0,0190	0,5190	0,0190	0,5205	0,0191	0,5206	0,0183	0,5171	0,0183	0,5164
6	0,0193	0,5586	0,0193	0,5602	0,0193	0,5602	0,0217	0,5571	0,0217	0,5565
8	0,0151	0,5927	0,0151	0,5943	0,0152	0,5944	0,0156	0,5926	0,0157	0,5921
10	0,0110	0,6214	0,0110	0,6230	0,0115	0,6230	0,0118	0,6226	0,0119	0,6222
12	0,0144	0,6476	0,0144	0,6491	0,0141	0,6492	0,0130	0,6482	0,0130	0,6478
14	0,0114	0,6730	0,0114	0,6746	0,0115	0,6748	0,0075	0,6746	0,0076	0,6743
16	0,0159	0,6961	0,0159	0,6976	0,0157	0,6977	0,0186	0,6967	0,0187	0,6965
18	0,0097	0,7185	0,0097	0,7201	0,0079	0,7201	0,0099	0,7207	0,0099	0,7206
20	0,0142	0,7407	0,0142	0,7423	0,0141	0,7424	0,0081	0,7419	0,0081	0,7418
22	0,0102	0,7649	0,0102	0,7665	0,0110	0,7664	0,0123	0,7670	0,0123	0,7671
24	0,0106	0,7831	0,0106	0,7847	0,0111	0,7850	0,0091	0,7851	0,0092	0,7852
26	0,0088	0,8012	0,0088	0,8027	0,0068	0,8027	0,0132	0,8038	0,0132	0,8038
28	0,0047	0,8179	0,0047	0,8195	0,0056	0,8194	0,0052	0,8213	0,0053	0,8215
30	0,0067	0,8275	0,0067	0,8290	0,0057	0,8290	0,0049	0,8303	0,0049	0,8306
32	0,0018	0,8349	0,0018	0,8364	0,0033	0,8363	0,0048	0,8368	0,0049	0,8391
34	0,0073	0,8411	0,0073	0,8427	0,0059	0,8431	-0,0002	0,8435	-0,0001	0,8439
36	0,0000	0,8506	0,0000	0,8522	0,0005	0,8523	-0,0051	0,8547	-0,0050	0,8552
38	0,0010	0,8529	0,0010	0,8545	0,0020	0,8545	0,0015	0,8567	0,0015	0,8572
40	-0,0072	0,8508	-0,0072	0,8524	-0,0069	0,8526	-0,0098	0,8565	-0,0097	0,8570
42	0,0047	0,8471	0,0047	0,8487	0,0039	0,8482	0,0188	0,8497	0,0189	0,8503
44	0,0006	0,8437	0,0006	0,8452	-0,0013	0,8456	-0,0062	0,8471	-0,0062	0,8477
46	0,0083	0,8457	0,0083	0,8473	0,0066	0,8470	0,0125	0,8471	0,0125	0,8478
48	0,0050	0,8451	0,0050	0,8466	0,0043	0,8468	0,0012	0,8472	0,0012	0,8479
50	-0,0106	0,8510	-0,0106	0,8526	-0,0094	0,8527	-0,0106	0,8570	-0,0106	0,8577

α ROWK	$\beta' VI$	βVI	$\beta' VII$	βVII	$\beta' VIII$	$\beta VIII$	$\beta' IX$	βIX	$\beta' X$	βX
-11,0	-0,0030	0,0000	-0,0030	0,0000	-0,0030	0,0000	-0,0030	0,0000	-0,0030	0,0000
-10,5	-0,0018	0,0000	-0,0018	0,0000	-0,0018	-0,0012	-0,0018	-0,0012	-0,0018	-0,0012
-10,0	-0,0036	-0,0014	-0,0036	-0,0014	-0,0036	-0,0025	-0,0035	-0,0025	-0,0035	-0,0025
-9,5	0,0030	-0,0015	0,0021	-0,0017	0,0022	-0,0029	0,0022	-0,0029	0,0022	-0,0029
-9,0	0,0175	0,0036	0,0223	0,0044	0,0223	0,0032	0,0233	0,0032	0,0222	0,0033
-8,5	0,0498	0,0205	0,0422	0,0205	0,0422	0,0194	0,0422	0,0194	0,0416	0,0192
-8,0	0,0553	0,0467	0,0603	0,0461	0,0604	0,0450	0,0604	0,0450	0,0594	0,0445
-7,5	0,0788	0,0803	0,0730	0,0794	0,0730	0,0784	0,0730	0,0784	0,0716	0,0772
-7,0	0,1060	0,1265	0,1313	0,1305	0,1314	0,1295	0,1314	0,1295	0,1296	0,1275
-6,5	0,1908	0,2007	0,1505	0,2009	0,1505	0,2000	0,1505	0,1999	0,1464	0,1965
-6,0	0,0913	0,2712	0,1116	0,2664	0,1117	0,2655	0,1117	0,2655	0,1071	0,2599
-5,5	0,0375	0,3043	0,0389	0,3041	0,0390	0,3032	0,0390	0,3032	0,0362	0,2957
-5,0	0,0243	0,3188	0,0247	0,3199	0,0248	0,3192	0,0248	0,3191	0,0247	0,3109
-4,5	0,0292	0,3322	0,0260	0,3326	0,0261	0,3319	0,0261	0,3318	0,0255	0,3234
-4,0	0,0263	0,3461	0,0276	0,3460	0,0278	0,3454	0,0278	0,3453	0,0269	0,3365
-2,0	0,0199	0,3979	0,0206	0,3980	0,0208	0,3977	0,0208	0,3976	0,0199	0,3869
0	0,0208	0,4399	0,0246	0,4401	0,0248	0,4402	0,0248	0,4401	0,0239	0,4278
2	0,0205	0,4812	0,0199	0,4813	0,0201	0,4818	0,0201	0,4816	0,0194	0,4676
4	0,0183	0,5177	0,0190	0,5177	0,0192	0,5187	0,0192	0,5185	0,0185	0,5030
6	0,0217	0,5578	0,0200	0,5578	0,0202	0,5591	0,0202	0,5589	0,0193	0,5417
8	0,0157	0,5934	0,0153	0,5933	0,0155	0,5953	0,0155	0,5950	0,0148	0,5762
10	0,0119	0,6235	0,0121	0,6234	0,0123	0,6257	0,0123	0,6253	0,0116	0,6052
12	0,0130	0,6491	0,0146	0,6493	0,0148	0,6520	0,0148	0,6517	0,0142	0,6303
14	0,0076	0,6756	0,0123	0,6758	0,0125	0,6789	0,0125	0,6785	0,0121	0,6559
16	0,0187	0,6978	0,0143	0,6979	0,0144	0,7014	0,0144	0,7010	0,0139	0,6774
18	0,0099	0,7219	0,0077	0,7225	0,0079	0,7263	0,0078	0,7258	0,0075	0,7011
20	0,0081	0,7431	0,0159	0,7433	0,0161	0,7475	0,0161	0,7470	0,0155	0,7214
22	0,0123	0,7684	0,0117	0,7682	0,0119	0,7727	0,0119	0,7722	0,0115	0,7454
24	0,0092	0,7865	0,0086	0,7868	0,0087	0,7916	0,0087	0,7910	0,0083	0,7634
26	0,0132	0,8051	0,0055	0,8056	0,0057	0,8106	0,0056	0,8101	0,0053	0,7815
28	0,0053	0,8228	0,0081	0,8226	0,0083	0,8279	0,0083	0,8273	0,0077	0,7980
30	0,0049	0,8319	0,0073	0,8322	0,0074	0,8377	0,0074	0,8371	0,0071	0,8074
32	0,0049	0,8404	0,0036	0,8400	0,0037	0,8457	0,0037	0,8451	0,0035	0,8150
34	-0,0001	0,8452	0,0044	0,8460	0,0045	0,8519	0,0045	0,8513	0,0044	0,8210
36	-0,0050	0,8565	0,0017	0,8566	0,0018	0,8627	0,0018	0,8620	0,0019	0,8312
38	0,0015	0,8585	0,0015	0,8583	0,0016	0,8645	0,0016	0,8639	0,0016	0,8330
40	-0,0097	0,8583	-0,0070	0,8585	-0,0069	0,8649	-0,0069	0,8642	-0,0067	0,8333
42	0,0189	0,8515	0,0036	0,8513	0,0037	0,8578	0,0037	0,8571	0,0034	0,8266
44	-0,0062	0,8490	-0,0018	0,8499	-0,0018	0,8565	-0,0018	0,8558	-0,0017	0,8253
46	0,0125	0,8491	0,0079	0,8493	0,0079	0,8560	0,0079	0,8553	0,0079	0,8249
48	0,0012	0,8491	0,0012	0,8496	0,0013	0,8564	0,0013	0,8557	0,0015	0,8252
50	-0,0106	0,8590	-0,0094	0,8589	-0,0094	0,8658	-0,0094	0,8650	-0,0094	0,8341

ad. Tabel 8

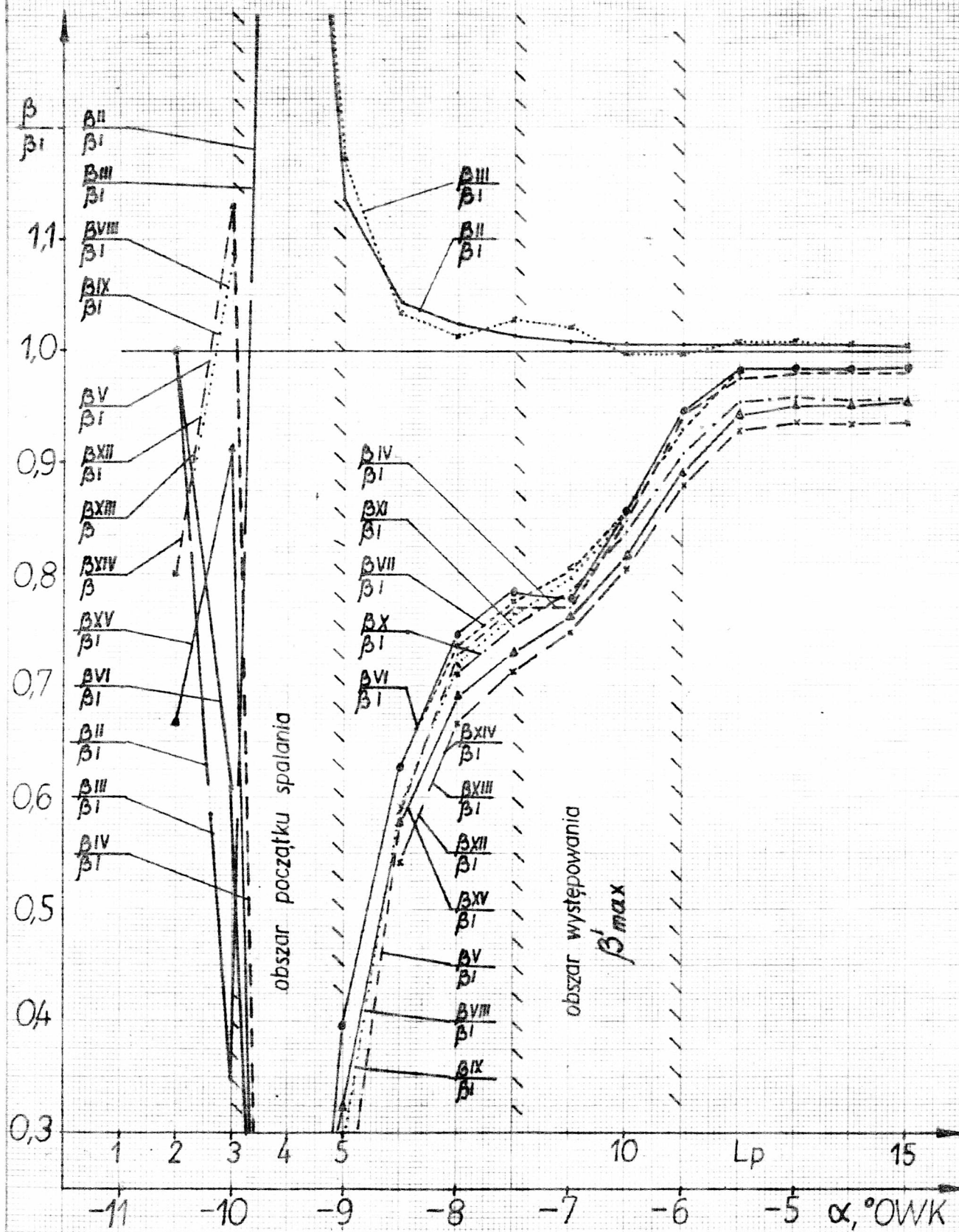
α °DNK	β'_{XI}	β_{XI}	β'_{XII}	β_{XII}	β'_{XIII}	β_{XIII}	β'_{XIV}	β_{XIV}	β'_{XV}	β_{XV}
-11,0	-0,0030	0,0000	-0,0030	0,0000	-0,0030	0,0000	-0,0030	0,0000	-0,0026	0,0000
-10,5	-0,0018	-0,0012	-0,0019	-0,0012	-0,0019	-0,0012	-0,0019	-0,0012	-0,0014	-0,0010
-10,0	-0,0035	-0,0025	-0,0035	-0,0026	-0,0035	-0,0026	-0,0035	-0,0026	-0,0030	-0,0021
-9,5	0,0022	-0,0028	0,0019	-0,0030	0,0019	0,0030	0,0019	-0,0030	0,0023	-0,0023
-9,0	0,0222	0,0033	0,0207	0,0026	0,0207	0,0026	0,0207	0,0026	0,0212	0,0036
-8,5	0,0016	0,0192	0,0394	0,0177	0,0394	0,0177	0,0394	0,0177	0,0399	0,0189
-8,0	0,0594	0,0445	0,0566	0,0417	0,0566	0,0417	0,0566	0,0417	0,0573	0,0432
-7,5	0,0716	0,0772	0,0688	0,0730	0,0688	0,0730	0,0688	0,0730	0,0695	0,0749
-7,0	0,1296	0,1275	0,1251	0,1215	0,1251	0,1215	0,1251	0,1215	0,1260	0,1238
-6,5	0,1464	0,1965	0,1445	0,1889	0,1445	0,1889	0,1445	0,1889	0,1456	0,1917
-6,0	0,1071	0,2599	0,1077	0,2519	0,1077	0,2519	0,1077	0,2519	0,1090	0,2554
-5,5	0,0362	0,2957	0,0374	0,2882	0,0374	0,2882	0,0374	0,2882	0,0387	0,2923
-5,0	0,0247	0,3109	0,0240	0,3036	0,0240	0,3036	0,0240	0,3036	0,0253	0,3083
-4,5	0,0255	0,3235	0,0253	0,3159	0,0253	0,3159	0,0253	0,3159	0,0266	0,3212
-4,0	0,0269	0,3366	0,0269	0,3289	0,0269	0,3290	0,0269	0,3290	0,0283	0,3350
-2,0	0,0199	0,3869	0,0202	0,3797	0,0202	0,3797	0,0202	0,3797	0,0217	0,3886
0	0,0240	0,4279	0,0243	0,4211	0,0243	0,4211	0,0243	0,4211	0,0260	0,4333
2	0,0195	0,4679	0,0198	0,4619	0,0198	0,4619	0,0198	0,4619	0,0215	0,4774
4	0,0186	0,5035	0,0190	0,4983	0,0190	0,4983	0,0190	0,4983	0,0208	0,5173
6	0,0194	0,5426	0,0200	0,5384	0,0200	0,5384	0,0200	0,5384	0,0218	0,5610
8	0,0150	0,5774	0,0154	0,5743	0,0154	0,5743	0,0154	0,5743	0,0172	0,6005
10	0,0118	0,6068	0,0122	0,6045	0,0122	0,6045	0,0122	0,6045	0,0139	0,6342
12	0,0144	0,6324	0,0148	0,6307	0,0148	0,6307	0,0148	0,6307	0,0165	0,6638
14	0,0123	0,6584	0,0125	0,6575	0,0125	0,6575	0,0125	0,6575	0,0141	0,6939
16	0,0141	0,6803	0,0144	0,6798	0,0144	0,6798	0,0144	0,6798	0,0160	0,7194
18	0,0077	0,7044	0,0078	0,7046	0,0078	0,7046	0,0078	0,7046	0,0092	0,7472
20	0,0158	0,7252	0,0161	0,7257	0,0161	0,7257	0,0161	0,7257	0,0175	0,7712
22	0,0117	0,7496	0,0119	0,7508	0,0119	0,7508	0,0119	0,7508	0,0132	0,7991
24	0,0085	0,7681	0,0087	0,7696	0,0087	0,7696	0,0087	0,7696	0,0099	0,8205
26	0,0056	0,7867	0,0056	0,7886	0,0056	0,7886	0,0056	0,7886	0,0068	0,8419
28	0,0080	0,8036	0,0082	0,8058	0,0082	0,8058	0,0082	0,8058	0,0094	0,8615
30	0,0074	0,8135	0,0074	0,8156	0,0074	0,8156	0,0074	0,8156	0,0084	0,8734
32	0,0038	0,8215	0,0037	0,8236	0,0037	0,8236	0,0037	0,8236	0,0047	0,8834
34	0,0046	0,8279	0,0046	0,8299	0,0046	0,8299	0,0046	0,8299	0,0055	0,8915
36	0,0021	0,8386	0,0019	0,8407	0,0019	0,8408	0,0019	0,8408	0,0027	0,9041
38	0,0018	0,8409	0,0017	0,8428	0,0017	0,8428	0,0017	0,8428	0,0025	0,9078
40	-0,0065	0,8416	-0,0068	0,8433	-0,0068	0,8433	-0,0068	0,8433	-0,0062	0,9098
42	0,0036	0,8354	0,0038	0,8365	0,0038	0,8365	0,0038	0,8365	0,0045	0,9043
44	-0,0015	0,8344	-0,0016	0,8355	-0,0016	0,8355	-0,0016	0,8355	-0,0010	0,9046
46	0,0081	0,8345	0,0081	0,8354	0,0081	0,8354	0,0081	0,8354	0,0087	0,9056
48	0,0017	0,8352	0,0015	0,8361	0,0015	0,8361	0,0015	0,8361	0,0021	0,9075
50	-0,0092	0,8446	-0,0092	0,8457	-0,0092	0,8457	-0,0092	0,8457	-0,0087	0,9183

T a b e l a 9

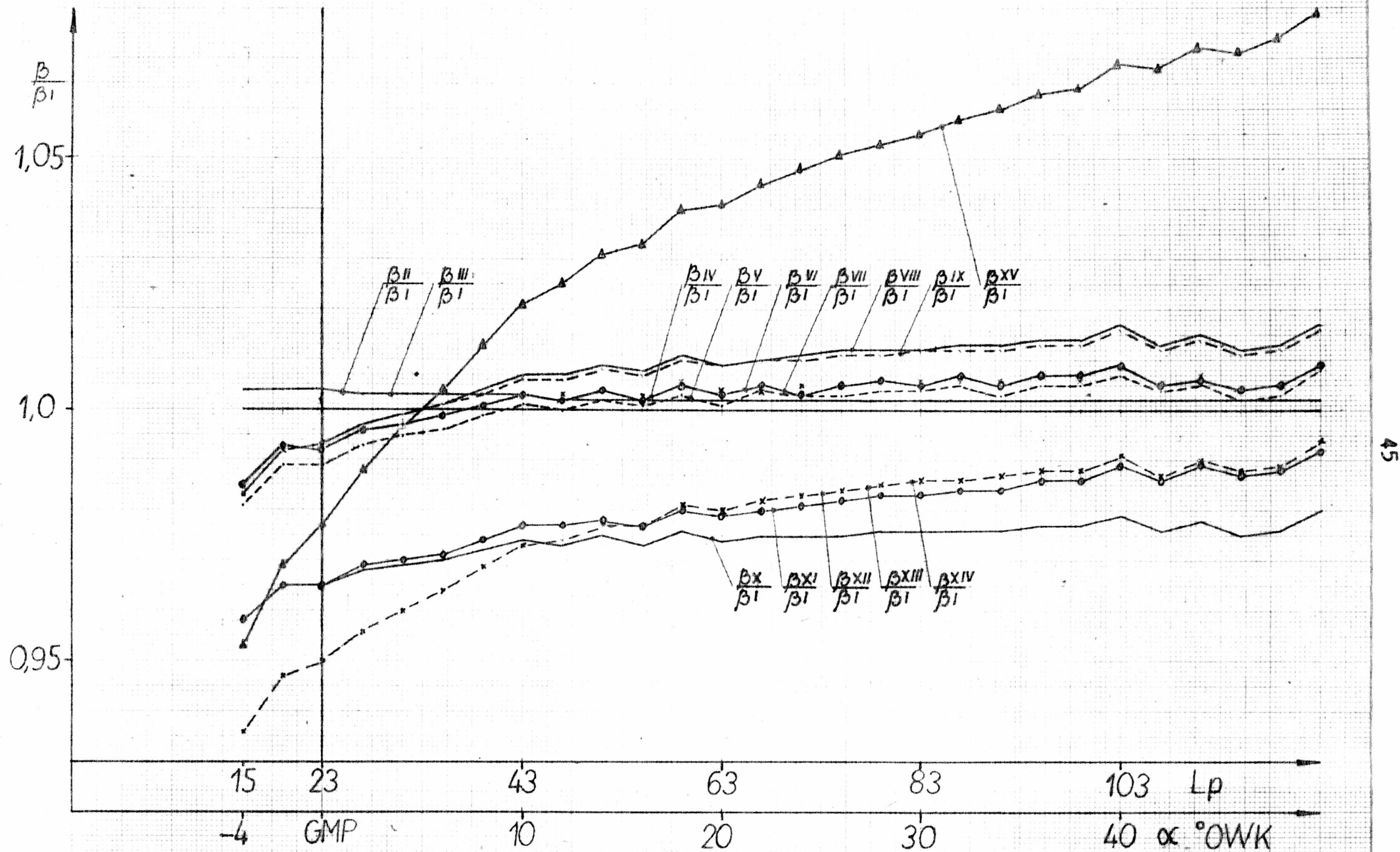
Względne wartości wariantowych funkcji spalania

α °OWK	ρ_{II}/ρ_I	ρ_{III}/ρ_I	ρ_{VI}/ρ_I	ρ_V/ρ_I	ρ_{VI}/ρ_I	ρ_{VII}/ρ_I	ρ_{VIII}/ρ_I
-11,0	-	-	-	-	-	-	-
-10,5	0	0	0	0,800	0	0	0,800
-10,0	0,348	0,391	0,609	1,130	0,609	0,609	1,087
-9,5	8,500	9,500	-7,500	-13,500	-7,500	-8,500	-14,500
-9,0	1,135	1,171	0,324	0,216	0,324	0,396	0,288
-8,5	1,043	1,034	0,624	0,587	0,627	0,630	0,593
-8,0	1,024	1,013	0,747	0,728	0,747	0,738	0,720
-7,5	1,014	1,029	0,783	0,771	0,784	0,775	0,766
-7,0	1,009	1,022	0,778	0,779	0,778	0,803	0,797
-6,5	1,006	0,997	0,854	0,849	0,855	0,856	0,852
-6,0	1,005	0,998	0,947	0,943	0,948	0,931	0,928
-5,5	1,005	1,007	0,978	0,975	0,982	0,981	0,978
-5,0	1,005	1,007	0,983	0,979	0,983	0,986	0,984
-4,5	1,005	1,005	0,983	0,980	0,983	0,985	0,983
-4,0	1,004	1,004	0,984	0,981	0,985	0,985	0,983
-2,0	1,004	1,004	0,992	0,989	0,993	0,993	0,992
0	1,004	1,004	0,991	0,989	0,992	0,993	0,993
2	1,003	1,003	0,995	0,993	0,996	0,996	0,997
4	1,003	1,003	0,996	0,995	0,997	0,997	0,999
6	1,003	1,003	0,997	0,996	0,999	0,999	1,001
8	1,003	1,003	1,000	0,999	1,001	1,001	1,004
10	1,003	1,003	1,002	1,001	1,003	1,003	1,007
12	1,002	1,002	1,001	1,000	1,002	1,003	1,007
14	1,002	1,003	1,002	1,002	1,004	1,004	1,009
16	1,002	1,002	1,001	1,001	1,002	1,003	1,008
18	1,002	1,002	1,003	1,003	1,005	1,006	1,011
20	1,002	1,002	1,002	1,001	1,003	1,004	1,009
22	1,002	1,002	1,003	1,004	1,005	1,004	1,010
24	1,002	1,002	1,003	1,003	1,003	1,005	1,011
26	1,002	1,002	1,003	1,003	1,005	1,005	1,012
28	1,002	1,002	1,004	1,004	1,006	1,006	1,012
30	1,002	1,002	1,003	1,004	1,005	1,006	1,012
32	1,002	1,002	1,005	1,005	1,007	1,006	1,013
34	1,002	1,002	1,003	1,003	1,005	1,006	1,013
36	1,002	1,002	1,005	1,005	1,007	1,007	1,014
38	1,002	1,002	1,004	1,005	1,007	1,006	1,014
40	1,002	1,002	1,007	1,007	1,009	1,009	1,017
42	1,002	1,001	1,003	1,004	1,005	1,005	1,013
44	1,002	1,002	1,004	1,005	1,006	1,007	1,015
46	1,002	1,002	1,002	1,002	1,004	1,004	1,012
48	1,002	1,002	1,002	1,003	1,005	1,005	1,013
50	1,002	1,002	1,007	1,008	1,009	1,009	1,017

α °OWK	$\beta IX/\beta I$	$\beta X/\beta I$	$\beta XI/\beta I$	$\beta XII/\beta I$	$\beta XIII/\beta I$	$\beta XIV/\beta I$	$\beta XV/\beta I$
-11,0	-	-	-	-	-	-	-
-10,5	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,667
-10,0	1,087	1,087	1,087	1,130	1,130	1,130	0,913
-9,5	-14,500	-14,000	-14,000	-15,000	-15,000	-15,000	-11,500
-9,0	0,288	0,297	0,297	0,234	0,234	0,234	0,324
-8,5	0,593	0,587	0,587	0,541	0,541	0,541	0,578
-8,0	0,720	0,712	0,712	0,667	0,667	0,667	0,691
-7,5	0,766	0,754	0,754	0,713	0,713	0,713	0,731
-7,0	0,797	0,785	0,785	0,748	0,748	0,748	0,762
-6,5	0,851	0,837	0,837	0,805	0,805	0,805	0,816
-6,0	0,928	0,908	0,908	0,880	0,880	0,880	0,892
-5,5	0,978	0,954	0,954	0,930	0,930	0,930	0,943
-5,0	0,984	0,959	0,959	0,936	0,936	0,936	0,951
-4,5	0,982	0,957	0,957	0,935	0,935	0,935	0,951
-4,0	0,983	0,958	0,958	0,936	0,936	0,936	0,953
-2,0	0,992	0,965	0,965	0,947	0,947	0,947	0,969
0	0,993	0,965	0,965	0,950	0,950	0,950	0,977
2	0,997	0,968	0,969	0,956	0,956	0,956	0,988
4	0,999	0,969	0,970	0,960	0,960	0,960	0,997
6	1,001	0,970	0,971	0,964	0,964	0,964	1,004
8	1,003	0,972	0,974	0,969	0,969	0,969	1,013
10	1,006	0,974	0,977	0,973	0,973	0,973	1,021
12	1,006	0,973	0,977	0,974	0,974	0,974	1,025
14	1,008	0,975	0,978	0,977	0,977	0,977	1,031
16	1,007	0,973	0,977	0,977	0,977	0,977	1,033
18	1,010	0,976	0,980	0,981	0,981	0,981	1,040
20	1,009	0,974	0,979	0,980	0,980	0,980	1,041
22	1,010	0,975	0,980	0,982	0,982	0,982	1,045
24	1,010	0,975	0,981	0,983	0,983	0,983	1,048
26	1,011	0,975	0,982	0,984	0,984	0,984	1,051
28	1,011	0,976	0,983	0,985	0,985	0,985	1,053
30	1,012	0,976	0,983	0,986	0,986	0,986	1,055
32	1,012	0,976	0,984	0,986	0,986	0,986	1,058
34	1,012	0,976	0,984	0,987	0,987	0,987	1,060
36	1,013	0,977	0,986	0,988	0,988	0,988	1,063
38	1,013	0,977	0,986	0,988	0,988	0,988	1,064
40	1,016	0,979	0,989	0,991	0,991	0,991	1,069
42	1,012	0,976	0,986	0,987	0,987	0,987	1,068
44	1,014	0,978	0,989	0,990	0,990	0,990	1,072
46	1,011	0,975	0,987	0,988	0,988	0,988	1,071
48	1,012	0,976	0,988	0,989	0,989	0,989	1,074
50	1,016	0,980	0,992	0,994	0,994	0,994	1,079



Rys. 4. Chwilowe wartości stosunków wariantowego przebiegu funkcji spalania β do β_I (wariant podstawowy), od początku obliczeń do -4° OWK.



Rys. 5. Chwilowe wartości stosunków wariantowego przebiegu funkcji spalania β do β_I (wariant podstawowy), od -4° OWK do końca obliczeń.

T a b e l a 10

Względne wartości wariantowych prędkości wywiązywania ciepła

α °C WK	β_I	β_{II}/β_I	β_{III}/β_I	β_{IV}/β_I	β_{V}/β_I	β_{VI}/β_I	β_{VII}/β_I	β_{VIII}/β_I	β_{IX}/β_I	β_{X}/β_I	β_{XI}/β_I	β_{XII}/β_I	β_{XIII}/β_I	β_{XIV}/β_I	β_{XV}/β_I
-11,0	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,87
-10,5	1	1,00	0,68	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,68	0,68	0,50
-10,0	1	2,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	8,75	8,75	8,75	8,75	8,75	8,75	8,75	7,50
-9,5	1	1,19	0,29	0,29	0,29	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,19	0,19	0,19	0,23
-9,0	1	0,96	0,52	0,52	0,52	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,62	0,62	0,62	0,63
-8,5	1	0,98	0,95	0,95	0,95	0,80	0,80	0,80	0,79	0,79	0,75	0,75	0,75	0,75	0,76
-8,0	1	0,99	0,83	0,83	0,83	0,90	0,90	0,90	0,89	0,89	0,84	0,84	0,84	0,84	0,86
-7,5	1	1,11	0,85	0,85	0,85	0,79	0,79	0,79	0,76	0,76	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
-7,0	1	0,95	0,72	0,72	0,72	0,89	0,89	0,89	0,87	0,87	0,84	0,84	0,84	0,84	0,85
-6,5	1	0,93	1,35	1,35	1,35	1,07	1,07	1,07	1,04	1,04	1,02	1,02	1,02	1,02	1,03
-6,0	1	1,17	1,42	1,42	1,42	1,74	1,74	1,74	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,70
-5,5	1	1,03	1,22	1,22	1,22	1,27	1,27	1,27	1,18	1,18	1,22	1,22	1,22	1,22	1,26
-5,0	1	0,94	0,91	0,91	0,91	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,90	0,90	0,90	0,90	0,95
-4,5	1	0,97	1,06	1,06	1,06	0,95	0,95	0,95	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92	0,92	0,96
-4,0	1	1,03	0,99	0,99	0,99	1,03	1,04	1,04	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,06
-2,0	1	0,99	1,02	1,02	1,02	1,06	1,07	1,07	1,02	1,02	1,04	1,04	1,04	1,04	1,11
0	1	0,99	0,89	0,89	0,89	1,05	1,06	1,06	1,02	1,02	1,04	1,04	1,04	1,04	1,11
2	1	0,98	1,06	1,06	1,06	1,03	1,04	1,04	1,01	1,01	1,03	1,03	1,03	1,03	1,11
4	1	1,01	0,96	0,96	0,96	1,00	1,01	1,01	0,97	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,09
6	1	1,00	1,12	1,12	1,12	1,03	1,05	1,05	1,00	1,01	1,04	1,04	1,04	1,04	1,13
8	1	1,01	1,03	1,04	1,04	1,01	1,03	1,03	0,98	0,99	1,02	1,02	1,02	1,02	1,14
10	1	1,05	1,07	1,08	1,08	1,10	1,12	1,12	1,05	1,07	1,11	1,11	1,11	1,11	1,26
12	1	0,98	0,90	0,90	0,90	1,01	1,03	1,03	0,99	1,00	1,03	1,03	1,03	1,03	1,15
14	1	1,01	0,66	0,67	0,67	0,85	1,10	1,10	1,06	1,08	1,10	1,10	1,10	1,10	1,24
16	1	0,99	1,17	1,18	1,18	0,90	0,91	0,91	0,87	0,89	0,91	0,91	0,91	0,91	1,01
18	1	0,81	1,02	1,02	1,02	0,79	0,81	0,80	0,77	0,79	0,80	0,80	0,80	0,80	0,95
20	1	0,99	0,57	0,57	0,57	1,12	1,13	1,13	1,09	1,11	1,13	1,13	1,13	1,13	1,23
22	1	1,08	1,21	1,21	1,21	1,15	1,17	1,17	1,13	1,15	1,17	1,17	1,17	1,17	1,29
24	1	1,05	0,86	0,87	0,87	0,81	0,82	0,82	0,78	0,80	0,82	0,82	0,82	0,82	0,93
26	1	0,77	1,50	1,50	1,50	0,63	0,65	0,64	0,60	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,77
28	1	1,19	1,11	1,13	1,13	1,72	1,77	1,77	1,64	1,70	1,74	1,74	1,74	1,74	2,00
30	1	0,85	0,73	0,73	0,73	1,09	1,10	1,10	1,06	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,25
32	1	1,83	2,67	2,72	2,72	2,00	2,06	2,06	1,94	2,11	2,06	2,06	2,06	2,06	2,61
34	1	0,81	-0,03	-0,01	-0,01	0,60	0,62	0,62	0,60	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,75
36	+	-	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
38	1	2,00	1,50	1,50	1,50	1,50	1,60	1,60	1,60	1,80	1,70	1,70	1,70	1,70	2,50
40	1	0,96	1,36	1,35	1,35	0,97	0,96	0,96	0,93	0,90	0,94	0,94	0,94	0,94	0,86
42	1	0,83	4,00	4,02	4,02	0,77	0,79	0,79	0,72	0,77	0,81	0,81	0,81	0,81	0,96
44	1	-2,16	-10,33	-10,33	-10,33	-3,00	-3,00	-3,00	-2,83	-2,50	-2,67	-2,67	-2,67	-2,67	-1,67
46	1	0,80	1,51	1,51	1,51	0,95	0,95	0,95	0,95	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	1,05
48	1	0,86	0,24	0,24	0,24	0,24	0,26	0,26	0,30	0,34	0,30	0,30	0,30	0,30	0,42
50	1	0,87	1,00	1,00	1,00	0,89	0,89	0,89	0,89	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,82

Wartość maksymalna β' wzrosła w stosunku do wartości $\beta'_{\max}$ w wariancie I o 28,7 %. Maksimum $\beta'_{\max}$ przesunęło się o $0,5^\circ$ OWK w stronę GMP.

4. W wariancie V ilość czynnika była stała, ale obniżona do poziomu na początku spalania (odliczono sumaryczny przedmuch od zamknięcia zaworu ssącego do początku spalania), pochodną temperatury T' wyznaczono na podstawie wartości temperatury bieżącej i poprzedniej, a warunki początkowe zadano jak w wariancie II. Chwilowych wartości ciśnień czynnika nie wygładzano. Efektem opisanych zabiegów było kilkukrotne zmniejszenie wartości funkcji β w obszarze początku spalania i wzrost wartości końcowej β w obszarze początku spalania i wzrost wartości końcowej β o 0,8 % (w stosunku do wariantu I). W obszarze maksimum funkcji β' wartości funkcji β były niższe średnio o 13 %. Wartość $\beta'_{\max}$ wzrosła o 29 % (w stosunku do wartości $\beta'_{\max}$ w wariancie I).
5. W wariancie VI przyjęto wartość funkcji β dla $i = 2$ wyliczać (w wariancie V β dla $i = 2$ przyjmowano równe zero). Ta jedyna w stosunku do wariantu V zmiana spowodowała wzrost wartości maksymalnej β' o 0,05 % (w stosunku do wariantu V). Końcowa wartość β wzrosła o 0,9 % w stosunku do wariantu I, a w stosunku do wariantu V o 0,15 %.
6. Wygładzanie chwilowych wartości ciśnień czynnika różniące wariant VII od wariantu VI nie spowodowało zmiany charakteru przebiegu funkcji β (wartość końcowa wzrosła o 0,01 %). Znacznie, bo o 21 % zmalała wartość $\beta'_{\max}$ (w stosunku do wariantu VI). W stosunku do wartości $\beta'_{\max}$ z wariantu I, $\beta'_{\max}$ w wariancie VII jest wyższe o 1,6 %.
7. W wariancie VIII uwzględniono chwilowe ubytki czynnika z przestrzeni spalania (przedmuch). Zmienna ilość czynnika nie spowodowała zmiany charakteru funkcji spalania, choć wartość końcowa β wzrosła o 0,8 % w stosunku do wariantu VII, a o 1,7 % w stosunku do wariantu I. Wartość maksymalna β' nie uległa zmianie.
8. Uwzględnienie w ilości czynnika wzrostu jego masy związanej z wtryskiem paliwa nie spowodowało zauważalnych zmian w przebiegach funkcji β' i β . Wartość końcowa β zmalała o 0,09 % (w stosunku do wariantu VIII).

9. W wariancie X uwzględniono zjawisko wzrostu ilości czynnika wraz z przebiegiem spalania, spowodowane przemianami molowymi. Wynikiem takiego postępowania było zmniejszenie wartości chwilowych funkcji β przy zachowanym charakterze jej przebiegu. Wartość końcowa β zmalała o 3,6 % w stosunku do wariantu IX, a w stosunku do wariantu I była mniejsza o 2 %. Wartość maksymalna β' zmalała o 2,7 % w stosunku do wariantu IX i była mniejsza o 1,2 % od wartości $\beta'_{\max}$ w wariancie I.
10. Kolejna zmiana w modelu obliczeń przebiegu wywiązywania ciepła to powiększenie bilansu energetycznego o ciepło promieniowania gazu i płomienia. Poprawki te spowodowały systematyczny wzrost wartości chwilowych β po GMP, osiągając wartość końcową większą o 1,3 % od wariantu X, a mniejszą o 0,8 % od wariantu I. Wartość maksymalna funkcji β' , jak i charakter jej przebiegu nie uległ zmianie.
11. Nowym elementem w wariancie XII był sposób wyznaczania energii wewnętrznej czynnika. Liniową zależność energii wewnętrznej od temperatury zastąpiono zależnością kwadratową, co spowodowało obniżenie chwilowych wartości funkcji β od początku spalania do 10° OWK, a w dalszym przebiegu nieznaczny wzrost ponad wartości odpowiadające wariantowi XI. Wartość końcowa β wzrosła o 0,13 % w stosunku do wariantu XI. Obniżeniu o 1,3 % uległa wartość $\beta'_{\max}$ w stosunku do wariantu XI i była mniejsza o 0,5 % od $\beta'_{\max}$ z wariantu I.
12. Warianty XIII i XIV, ujmujące straty energetyczne związane z przedmuchem czynnika i dysocjacją termiczną nie wnoszą zauważalnych zmian w przebiegach funkcji β' i β .
13. Największe zmiany w przebiegu funkcji β' i β wniósł wariant XV. Liczenie współczynnika przekazywania ciepła zaproponowanym w wariancie XV wzorem spowodowało zrównanie chwilowych wartości funkcji spalania wariantu XV i I dla około 5° OWK, a następnie wzrost do wartości końcowej, większej o 7,9 %. Wartość maksymalna β' była przy tym niższa o 1,8 % od wartości $\beta'_{\max}$ z wariantu I.

8. WNIOSKI

Analiza porównawcza przebiegów wywiązywania ciepła dla różnych ich wariantów pozwala na wyprowadzenie następujących wniosków:

1. Wprowadzenie zasady niepełnych obliczeń w pierwszym kroku (dla $i = 1$), w celu umożliwienia wyznaczenia prawdziwej wartości pochodnej temperatury w kroku drugim T_2' jest celowe. Wymaga to jednak rozpoczynania obliczeń przed domniemanym początkiem spalania.
2. Przyjmując dla $i = 2$ (drugiego kroku obliczeniowego) wartość przybliżoną funkcji spalania $\bar{\beta}_2$ równą zero, należy wartość funkcji β wyliczać (nie zerować).
3. Uznaje się za celowe wygładzanie chwilowych wartości ciśnień czynnika w cylindrze.
4. Założenie zmiennej ilości czynnika uwzględniającej tylko (mniej kłopotliwe w obliczeniach) przemiany molowe jest celowe.
5. Przyjęcie zmiennej ilości czynnika powoduje potrzebę wyznaczania pochodnej temperatury T_i' na podstawie wartości T_{i-1} i T_i .
6. Uwzględnienie w bilansie energetycznym spalania ciepła promieniowania gazu i płomienia jest zasadne.
7. Straty energetyczne przedmuchu i dysocjacji termicznej można pominąć.
8. Wartości współczynnika przekazywania ciepła przez konwekcję należy wyznaczać według wzoru Zapfa.

LITERATURA

- [1] Butkiewicz M., Łapucha R.: Opracowanie szczegółowej metody obliczania wydzielania ciepła podczas procesu spalania w silniku wysokoprężnym na podstawie wykresu indykatorowego. Opracowanie Ośrodka Silników Instytutu Lotnictwa. Warszawa 1969.
- [2] D'jačenko N.H.: Teorija dvigatelej vnutrennego sgoranija. Mašinstroenije, Leningrad 1974.
- [3] Drozd C., Teisseyre A.: Opracowanie metod obliczeniowych procesu spalania w silniku wysokoprężnym. Cz. I. Sprawozdanie Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 1969.
- [4] Jaskuła A., Kowalczyk M., Merksz J.: Niektóre spostrzeżenia dotyczące techniki opracowania wykresu indykatorowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej - Maszyny Robocze i Pojazdy 1974, Nr 14.

- [5] Kaczmarek W.: Analiza przebiegów wywiązywania ciepła w silnikach z zapłonem samoczynnym w zależności od parametrów pracy silnika. Praca dyplomowa. Politechnika Wrocławska, Wrocław 1981.
- [6] Korabelščikov N.I., Popelyško A.P., Cybikov B.B.: K metodike rasčeta zakona teplovydelenia v dizeljach po indikatornoj diagrame. Trudy Sibirskogo Avtom. - Dor. Inst. 1975, Nr 60.
- [7] Michalecki M.: Badanie procesu wydzielania ciepła w dwusuwowym wysokoprężnym silniku spalinowym na podstawie wykresu indykatorowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej - Mechanika V 1962, Nr 29.
- [8] Möhlenkamp H.: Zur Genauigkeit der Brenngesetzrechnung eines Dieselmotors mit. nichtunterteiltem Brennraum. MTZ, 1976, 37, Nr 7-8.
- [9] Ochęduszek S.: Termodynamika stosowana. WNT Warszawa 1967.
- [10] Rozenblit G.B.: Teploperedatča v dizeljach. Masinostroenije, Moskva 1977.
- [11] Sitkei G.: Beitrag zur Theorie des Wärmeüberganges im Motor. Konstruktion 1962, Nr 14.
- [12] Sitkei G.: Heat transfer and thermal loading in internal combustion engines. Akadémiai Kiadó - Budapest 1974.
- [13] Strzałkowski A., Śliżyński A.: Matematyczne metody opracowania wyników pomiarów. PWN Warszawa 1978.
- [14] Suski J.: Obliczenie prędkości przemian i przekazywania energii z wykresu indykatorowego. Sprawozdania Instytutu Lotnictwa 3.41.108. Warszawa 1975.
- [15] Šechovcov A.F.: Matematičeskoje modelirovanije teploperedatči v bystrochodnych dizeljach. Višša Škola, Charkov 1978.
- [16] Teisseyre A.: Analiza obliczeniowa przebiegów spalania. Cz. II. Badanie przebiegu spalania w silnikach wysokoprężnych, Wrocław 1972.
- [17] Teisseyre A.: Obliczenie przebiegu spalania w silniku wysokoprężnym na podstawie wykresu indykatorowego. Silniki Spalinowe 1973, Nr 1.
- [18] Teisseyre A.: Obliczeniowa analiza przebiegu spalania w silniku wysokoprężnym z bezpośrednim wtryskiem. Prace Instytutu Lotnictwa. 1975, nr 61.
- [19] Vukalović V.N.: Termodinamičeskiye svojstva gazov. Moskva 1953.

- [20] Wiśniewski S.: Obciążenia cieplne silników tłokowych. WKŁ, Warszawa 1972.
- [21] Zabłocki M.: Wtrysk i spalanie paliwa w silnikach wysokoprzężnych. WKŁ, Warszawa 1976.
- [22] Zapf H.: Beitrag zur Untersuchung des Wärmeübergange während des Ladungswechsels im Viertakt-Dieselmotor. MTZ, 1969, nr 12.

Mgr inż. Czesław Kolanek
Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn
Politechniki Wrocławskiej

Pracę złożono w Redakcji Inst. KEM 15.06.81r.

ODBIORCY:

1. Biblioteka i Ośrodek Informacji Inst. KEM	1
2. Biblioteka Główna PWr	1
3. Promotor - Prof. dr hab. inż. Andrzej Teisseyre	1
4. Recenzenci	2
5. Autor	2

ZMODYFIKOWANY ALGORYTM OBLICZEŃ β i β .

Wobec powyższych ustaleń proponuje się następujący algorytm obliczeń przebiegów wywiązywania ciepła w silniku wysokoprężnym z bezpośrednim wtryskiem:

1. Wygładzanie chwilowych wartości ciśnień w przestrzeni spalania wg wzorów:

$$p'_{i+2} = \frac{1}{70} (69p_{i+2} + 4p_{i+1} - 6p_i + 4p_{i-1} - p_{i-2}),$$

$$p'_{i+1} = \frac{1}{35} (2p_{i+2} + 27p_{i+1} + 12p_i - 8p_{i-1} + 2p_{i-2}),$$

$$p'_i = \frac{1}{35} (-3p_{i-2} + 12p_{i-1} + 17p_i + 12p_{i+1} - 3p_{i+2}).$$

2. Przybliżona wartość funkcji spalania:

$$\tilde{\beta}_i = \beta_{i-1} + \Delta\alpha \beta'_{i-1},$$

$$\text{dla } i = 1; 2, \tilde{\beta}_i = 0.$$

3. Ilość czynnika w cylindrze:

$$\bar{n}_i = \frac{\bar{n}_{\min}}{0,21} B_o [\lambda(1 + \gamma) + (\tilde{\beta}_i - \tilde{\beta}_{i-1})(\mu_c - 1)]$$

4. Temperatura czynnika:

$$T_i = \frac{(p_i + p_o) X_{v1} V_s}{MR \bar{n}_i}$$

5. Pochodna temperatury:

$$T'_i = \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta\alpha}$$

$$\text{dla } i = 1, T'_i = 0$$

6. Pochodna energii wewnętrznej czynnika:

$$U'_c = \bar{n}_i [b_c + c_c(T_i - 273)] T'_i$$

7. Sumaryczny współczynnik przekazywania ciepła:

$$\alpha_{Ti} = \alpha_{ki} + \alpha_{rCO_2i} + \alpha_{rH_2O_i} + \alpha_{rfi} ,$$

gdzie:

$$\alpha_{ki} = 535 D^{-0,22} (c_{sr} p_i)^{0,78} T_i^{-0,52} ,$$

$$\alpha_{rCO_2i} = \frac{3,5}{T_i - T_s} (p_{CO_2i} l_i)^{1/3} \left(\frac{T_i}{100} \right)^{-0,5} \left[\left(\frac{T_i}{100} \right)^{3,5} - \left(\frac{T_s}{100} \right)^{3,5} \right] ,$$

$$\alpha_{rH_2O_i} = \frac{3,5}{T_i - T_s} p_{H_2O_i}^{0,8} l_i^{0,6} \left(\frac{T_i}{100} \right)^{-1} \left[\left(\frac{T_i}{100} \right)^3 - \left(\frac{T_s}{100} \right)^3 \right] ,$$

$$p_{CO_2i} = z_{CO_2}'' p_i \bar{\beta}_i ,$$

$$p_{H_2O_i} = z_{H_2O}'' p_i \bar{\beta}_i ,$$

$$\alpha_{rfi} = \frac{\epsilon'_{fi} C_o}{T_f - T_s} \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_s}{100} \right)^4 \right] .$$

8. Pochodna ciepła przekazywanego do ścianek:

$$Q'_i = \frac{1}{\delta n} A_{si} \alpha_{Ti} (T_i - T_s) .$$

9. Pochodna pracy absolutnej:

$$L'_i = \bar{n}_i M R \Gamma_i T_i .$$

10. Suma pochodnych energii:

$$S'_i = U'_i + Q'_i + L'_i .$$

11. Prędkość wywiązywania ciepła:

$$\beta'_i = \frac{S'_i}{Q_o}$$

12. Funkcja spalania:

$$\beta_i = \beta_{i-1} + \frac{1}{2} \Delta \alpha (\beta'_{i-1} + \beta'_i)$$

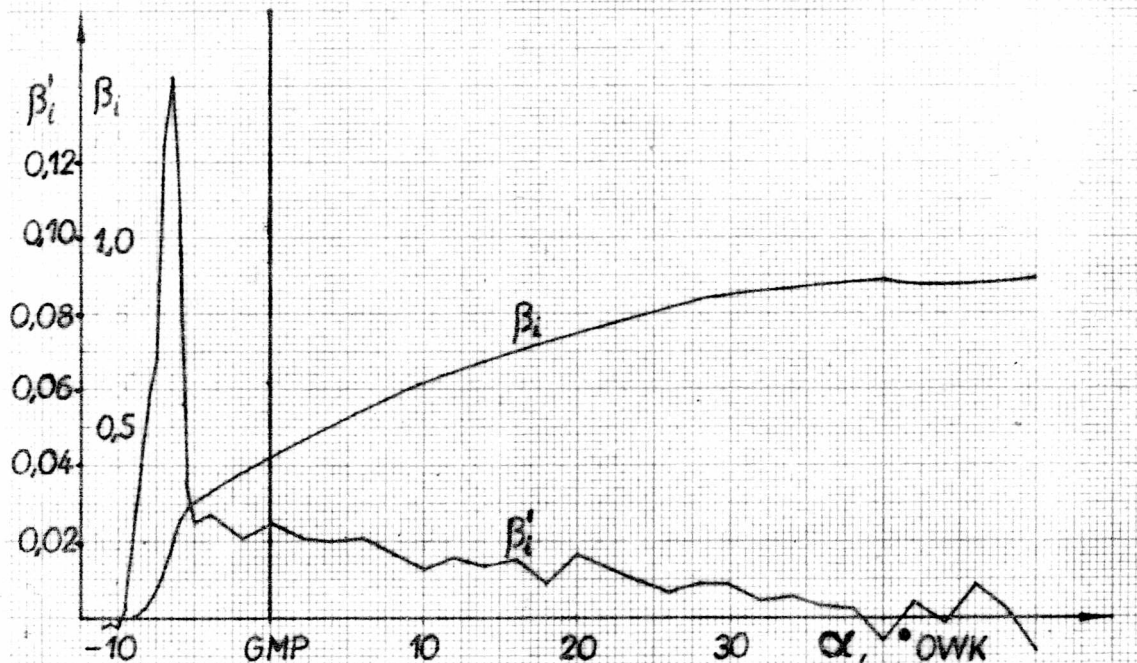
$$\text{dla } i = 1, \beta_i = 0.$$

Uzyskane za pomocą proponowanego algorytmu przebiegi β' i β (dla wartości wielkości wejściowych z rozdziału 7) przedstawiają tabela 1z1 i rys.1z1.

T a b e l a 1 z 1

Przebiegi β' i β według zmodyfikowanego algorytmu obliczeń

α °OWK	β'	β	α °OWK	β'	β	α °OWK	β'	β
-11,0	-0,0025	0,0000	-4,0	0,0276	0,3282	24	0,0096	0,7970
-10,5	-0,0014	-0,0010	-2,0	0,0210	0,3803	26	0,0065	0,8176
-10,0	-0,0030	-0,0021	0	0,0252	0,4236	28	0,0089	0,8365
-9,5	0,0024	-0,0023	2	0,0209	0,4663	30	0,0083	0,8380
-9,0	0,0212	0,0036	4	0,0201	0,5049	32	0,0045	0,8577
-8,5	0,0396	0,0188	6	0,0210	0,5470	34	0,0054	0,8656
-8,0	0,0566	0,0428	8	0,0165	0,5851	36	0,0028	0,8778
-7,5	0,0685	0,0741	10	0,0133	0,6175	38	0,0025	0,8813
-7,0	0,1247	0,1224	12	0,0159	0,6461	40	-0,0060	0,8833
-6,5	0,1423	0,1892	14	0,0137	0,6750	42	0,0042	0,8782
-6,0	0,1053	0,2511	16	0,0155	0,6996	44	-0,0009	0,8784
-5,5	0,0364	0,2866	18	0,0089	0,7263	46	0,0087	0,8796
-5,0	0,0253	0,3020	20	0,0170	0,7495	48	0,0022	0,8814
-4,5	0,0261	0,3148	22	0,0129	0,7763	50	-0,0087	0,8918



Rys.1z1. Przebiegi prędkości wywiązywania ciepła β' i funkcji spalania β dla zmodyfikowanego wariantu algorytmu obliczeń.

STECHEMETRIA SPALANIA

W celu przybliżenia wzorów używanych do wyznaczania udziałów powietrza, spalin stecheometrycznych, azotu, dwutlenku węgla i pary wodnej w czynniku roboczym w czasie procesu spalania i po jego zakończeniu, przytoczono fragmenty rozważań przedstawionych w pracy [16].

1. Stechiometria dwuskładnikowego czynnika roboczego

Czynnik roboczy w cylindrze silnika wewnętrznego spalania można traktować jako mieszaninę dwóch składników: spalin stecheometrycznych i powietrza.

Ilość dwuskładnikowego czynnika roboczego przed spalaniem jest równa:

$$\bar{n}' = \frac{\lambda}{0,21} \bar{n}_{\min} (1 + r) = \left| \frac{\lambda}{0,21} \bar{n}_{\min} \right|_p + \left| \frac{\lambda}{0,21} \bar{n}_{\min} r \right|_r \quad (1)$$

gdzie:

- λ - współczynnik nadmiaru powietrza,
- $\bar{n}_{\min} = \frac{c}{12} + \frac{h}{4}$ - minimalna ilość tlenu potrzebna do całkowitego spalania 1 kg paliwa,
- c, h - udziały pierwiastka węgla i wodoru w paliwie,
- $r = \frac{\bar{n}_r}{\bar{n}_p}$ - stopień zanieczyszczenia,
- $\bar{n}_r, \bar{n}_p$ - ilość kmoli reszty spalin i świeżego ładunku,
- indeks p - powietrze,
- indeks r - reszta gazów pozostałych z poprzedniego cyklu pracy.

W części wzoru (1) reprezentującej powietrze, można wyodrębnić powietrze niezbędne do całkowitego i zupełnego spalania (powietrze stecheometryczne) i powietrze będące nadmiarem:

$$\bar{n} = \left| \frac{1}{0,21} \bar{n}_{\min} \right|_p + \left| \frac{\lambda - 1}{0,21} \bar{n}_{\min} \right|_p + \left| \frac{\lambda}{0,21} \bar{n}_{\min} r \right|_r \quad (2)$$

Po spalaniu zmienia się ilość kmoli czynnika odpowiadająca pierwszemu wyrazowi z indeksem p , proporcjonalnie do stecheometrycznego współczynnika przemiany molowej μ_0 , a łączna ilość czynnika wynosi:

$$\bar{n}'' = \left| \frac{\mu_0}{0,21} \bar{n}_{\min} \right|_s + \left| \frac{\lambda - 1}{0,21} \bar{n}_{\min} \right|_p + \left| \frac{\lambda \gamma}{0,21} \bar{n}_{\min} \right|_r \quad (3)$$

gdzie indeks s oznacza spaliny stechiometryczne.

Udziały powietrza z_p'' i spalin stechiometrycznych z_s'' po zakończeniu spalania wynoszą:

$$\left. \begin{aligned} z_p'' &= \frac{\frac{\lambda - 1}{0,21} \bar{n}_{\min}}{\frac{\mu_0}{0,21} \bar{n}_{\min} + \frac{\lambda - 1}{0,21} \bar{n}_{\min}} = \frac{\lambda - 1}{\lambda - 1 + \mu_0} \\ z_s'' &= 1 - z_p'' = \frac{\mu_0}{\lambda - 1 + \mu_0} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Udziały powietrza i spalin stechiometrycznych w reszcie gazów mogą być dla ustalonych warunków pracy obliczone z równań (4). Na podstawie wzorów (3) i (4) można sformułować równanie na ilość czynnika po zakończeniu spalania w uproszczonej formie:

$$\bar{n}'' = \frac{\bar{n}_{\min}}{0,21} [\lambda (1 - \gamma) + \mu_0 - 1] = \left| \bar{n}'' z_p'' \right|_p + \left| \bar{n}'' z_s'' \right|_s \quad (5)$$

Korzystając z równania (1) można wyprowadzić wzory na udziały powietrza i spalin stechiometrycznych na początku spalania. Wyodrębniając te składniki w reszcie gazów można napisać:

$$\bar{n}' = \left| \frac{\lambda}{0,21} \bar{n}_{\min} \right|_p + \left| \frac{\lambda}{0,21} \bar{n}_{\min} \gamma z_p'' \right|_p + \left| \frac{\lambda}{0,21} \bar{n}_{\min} \gamma z_s'' \right|_s \quad (6)$$

a po podstawieniu wzoru (4):

$$\begin{aligned} \bar{n}' &= \left| \frac{\lambda}{0,21} \bar{n}_{\min} \right|_p + \left| \frac{\lambda}{0,21} \bar{n}_{\min} \gamma \frac{\lambda - 1}{\lambda - 1 + \mu_0} \right|_p + \\ &+ \left| \frac{\lambda}{0,21} \bar{n}_{\min} \gamma \frac{\mu_0}{\lambda - 1 + \mu_0} \right|_s \end{aligned} \quad (7)$$

Udziały powietrza i spalin stechiometrycznych na początku spalania wynoszą:

$$\left. \begin{aligned} z_p' &= \frac{(\lambda - 1)(1 + \gamma) + \mu_0}{(\lambda - 1 + \mu_0)(1 + \gamma)} \\ z_s' &= \frac{\gamma \mu_0}{(\lambda - 1 + \mu_0)(1 + \gamma)} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Przy rozpatrywaniu procesu spalania potrzebna jest również znajomość udziałów powietrza z_p i spalin stechiometrycznych z_s dla dowolnej chwili spalania. Ich wartości można określić korzystając z funkcji spalania β , będącej stosunkiem ilości paliwa spalonego B do dawki cyklu B_0 :

$$\beta = \frac{B}{B_0}$$

Ilość kmoli czynnika w dowolnej chwili spalania jest równa:

$$\bar{n} = \left| \frac{\lambda - 1}{0,21} \bar{n}_{\min} \right|_p + \left| \frac{\lambda}{0,21} \bar{n}_{\min} \gamma \right|_r + \left| \frac{1 - \beta}{0,21} \bar{n}_{\min} \right|_p + \left| \frac{\beta}{0,21} \bar{n}_{\min} \mu_0 \right|_s \quad (9)$$

Po wyodrębnieniu w reszcie gazów powietrza i spalin stechiometrycznych i pogrupowaniu wyrazów, powyższe równanie przyjmie postać:

$$\bar{n} = \left| \frac{\lambda - \beta}{0,21} \bar{n}_{\min} \right|_p + \left| \frac{\lambda}{0,21} \bar{n}_{\min} \gamma z_p'' \right|_p + \left| \frac{\lambda}{0,21} \bar{n}_{\min} \gamma z_s'' \right|_s + \left| \frac{\mu_0 \beta}{0,21} \bar{n}_{\min} \right|_s \quad (10)$$

Zastępując udziały po zakończeniu spalania wzorami (1) otrzymuje się:

$$\bar{n} = \left| \frac{(\lambda - \beta)(\lambda - 1 + \mu_0) + (\lambda - 1)\lambda \gamma}{\lambda - 1 + \mu_0} \frac{\bar{n}_{\min}}{0,21} \right|_p + \left| \frac{\lambda \gamma \mu_0 + \beta \mu_0 (\lambda - 1 + \mu_0)}{\lambda - 1 + \mu_0} \frac{\bar{n}_{\min}}{0,21} \right|_s \quad (11)$$

Udziały powietrza i spalin stechiometrycznych dla dowolnej chwili wynoszą odpowiednio:

$$\left. \begin{aligned} z_p &= \frac{(\lambda - \beta)(\lambda - 1 + \mu_0) + (\lambda - 1)\lambda \gamma}{(\lambda - 1 + \mu_0)(\lambda - \beta + \mu_0 \beta + \lambda \gamma)} \\ z_s &= \frac{\beta(\lambda - 1 + \mu_0) + \lambda \gamma}{(\lambda - 1 + \mu_0)(\lambda - \beta + \mu_0 \beta + \lambda \gamma)} \mu_0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

2. Udziały składników w spalinach stechiometrycznych

W spalinach stechiometrycznych można wyodrębnić azot N_2 , dwutlenek węgla CO_2 i parę wodną H_2O . Ilość spalin stechiometrycznych po zakończeniu spalania (nie licząc tych z reszty spalin - jest to dopuszczalne w przypadku wyznaczania udziałów N_2 , CO_2 i H_2O) wynosi:

$$\bar{n}_s'' = \left| 0,79 \frac{\bar{n}_{\min}}{0,21} \right|_{N_2} + \left| \frac{c}{12} \right|_{CO_2} + \left| \frac{h}{2} \right|_{H_2O} \quad (13)$$

Powyższe równanie pozwala na wyznaczenie udziałów N_2 , CO_2 i H_2O w spalinach stechiometrycznych. Wynoszą one:

$$\begin{aligned} z_{N_2} &= 0,79 \frac{c + 3h}{c + 3,63h} = 0,79 \frac{\sigma}{1,21\sigma - 0,21} \\ z_{CO_2} &= 0,21 \frac{c}{c + 3,63h} = 0,21 \frac{1}{1,21\sigma - 0,21} \\ z_{H_2O} &= 0,21 \frac{6h}{c + 3,63h} = 0,42 \frac{\sigma - 1}{1,21\sigma - 1} \end{aligned} \quad (14)$$

gdzie: $\sigma = \frac{c + 3h}{c}$ - liczba Moliera.

3. Stechiometria pięcioskładnikowego czynnika roboczego

Rzeczywisty proces spalania w silniku wewnętrznego spalania jest spalaniem niecałkowitym (część węgla zawartego w paliwie opuszcza przestrzeń spalania w postaci sadzy) i niezupełnym (część węgla ulegająca spalaniu utlenia się tylko do tlenku węgla)*).

*) W rozważaniach pominięto problem powstawania niespalonych węglowodorów, aldehydów, tlenków azotu i dwutlenku siarki.

Tak więc w gazach spalinowych można wyróżnić pięć składników gazowych: tlen, azot, parę wodną, dwutlenek węgla i tlenek węgla.

Równanie bilansu uczestniczącego w spalaniu węgla można zapisać następująco:

$$c = c^{II} + c^I = c^{II} + c^{III} + c^{IV} \quad (15)$$

gdzie: c - udział węgla w paliwie,
 c^{II} - udział węgla nie ulegającego spalaniu,
 c^I - udział węgla ulegającego spalaniu,
 c^{III} - udział węgla ulegającego spalaniu na CO ,
 c^{IV} - udział węgla ulegającego spalaniu na CO_2 .

Ustalono następujące zależności między składnikami bilansu węgla:

$$c^{II} = x c, \quad (16)$$

x - stopień niecałkowitości spalania,

$$c^I = (1 - x)c, \quad (17)$$

$$c^{III} = y c^I = y(1 - x)c, \quad (18)$$

y - stopień niezupełności spalania,

$$c^{IV} = (1 - y)c^I = (1 - y)(1 - x)c. \quad (19)$$

Ilość dwuskładnikowego czynnika roboczego przed spalaniem jest wg (1) równa:

$$\bar{n}' = \left| \frac{\lambda}{0,21} \bar{n}_{\min} \right|_p + \left| \frac{\lambda}{0,21} \bar{n}_{\min} \gamma \right|_r$$

W ilości odpowiadającej świeżemu ładunkowi (indeks p) można wyodrębnić tlen biorący udział w spalaniu (niecałkowitym i niezupełnym), tlen nie biorący udziału w spalaniu i azot:

$$\begin{aligned} \frac{\lambda}{0,21} \bar{n}_{\min} = & \left| (1 - y)(1 - x) \frac{c}{12} + y(1 - x) \frac{c}{24} + \frac{h}{4} \right|_{O_2} + \\ & + \left| \bar{n}_{\min} (\lambda - 1) + x \frac{c}{12} + y(1 - x) \frac{c}{24} \right|_{O_2} + \left| \frac{0,79}{0,21} \lambda \bar{n}_{\min} \right|_{N_2} \end{aligned} \quad (20)$$

Po spaleniu zamiast pierwszego wyrazu powstaną trzy, odpowiadające ilości dwutlenku węgla, tlenku węgla i wody.

$$\begin{aligned} \bar{n}'' = & \left| (1-y)(1-x) \frac{C}{12} \right|_{CO_2} + \left| y(1-x) \frac{C}{12} \right|_{CO} + \left| \frac{H}{2} \right|_{H_2O} + \\ & + \left| \bar{n}_{\min}(\lambda - 1) + x \frac{C}{12} + y(1-x) \frac{C}{24} \right|_{O_2} + \left| \frac{0,79}{0,21} \lambda \bar{n}_{\min} \right|_{N_2} + \\ & + \left| \frac{\lambda}{0,21} \bar{n}_{\min} \gamma \right|_r \end{aligned} \quad (21)$$

Równanie (21) pozwala wyznaczyć udziały pięciu składników w spalinach (oczywiście przy układaniu stosunków określających udziały poszczególnych składników należy pominąć ostatni wyraz stanowiący resztę spalin o takich samych proporcjach udziałów).

Udziały te wynoszą:

$$\left. \begin{aligned} z''_{O_2} &= 0,21 \frac{5(\lambda - 1) + 0,5y(1-x) + x}{5(\lambda + 0,21) - 0,21[1 - 0,5y(1-x)]} \\ z''_{N_2} &= 0,79 \frac{5\lambda}{5(\lambda + 0,21) - 0,21[1 - 0,5y(1-x)]} \\ z''_{CO_2} &= 0,21 \frac{(1-y)(1-x)}{5(\lambda + 0,21) - 0,21[1 - 0,5y(1-x)]} \\ z''_{CO} &= 0,21 \frac{y(1-x)}{5(\lambda + 0,21) - 0,21[1 - 0,5y(1-x)]} \\ z''_{H_2O} &= 0,42 \frac{5-1}{5(\lambda + 0,21) - 0,21[1 - 0,5y(1-x)]} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Dla spalania całkowitego ($x = 0$) i zupełnego ($y = 0$):

$$\left. \begin{aligned} z''_{O_2} &= 0,21 \frac{5(\lambda - 1)}{5(\lambda + 0,21) - 0,21} \\ z''_{N_2} &= 0,79 \frac{5\lambda}{5(\lambda + 0,21) - 0,21} \\ z''_{CO_2} &= 0,21 \frac{1}{5(\lambda + 0,21) - 0,21} \\ z''_{H_2O} &= 0,42 \frac{5-1}{5(\lambda + 0,21) - 0,21} \\ z''_{CO} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

