

# MOTORA TERMODINAMISKAIS APRĒKINS

## DARBĀ AR ETANOLDEGVIELĀM

### THERMODYNAMIC CALCULATION OF ENGINE PERFORMANCE WORKING WITH ETHANOL FUELS

G. Birzietis, V. Gulbis

LLU Spēkratu institūts

Motor Vehicle Institute, LLU

**Abstract.** In order to detect indicate and effective parameters of engine for gasoline Ai-93 and two different ethanol/gasoline blends latol 10 and latol 20 (containing 10 and 20 percent of ethanol respectively) thermodynamic calculation was carried out. In order to obtain engine speed characteristic at full throttle setting, calculation was carried out at four crankshaft rotation frequencies. Obtained results show that engine power, torque, fuel consumption per hour and specific fuel consumption increases by increasing ethanol content in blend. Difference in power and fuel consumption between both types of latol and gasoline are more evident at higher engine speeds, however torque and specific fuel consumption increase for latols is constant at all engine speed range.

**Key words:** engine, thermodynamic calculation, ethanol, gasoline, blends.

## 1. Ievads

Salīdzinājumā ar benzīnu, etanola (etilspirta) un benzīna maisījumu (latolu) pielietošana iekšdedzes motoros samazina oglekļa oksīda izplūdi atmosfērā un dod iespēju daļēji aizstāt importēto degvielu ar Latvijā ražotu. Atkarībā no maisījumos izmantotā etanola daudzuma, atšķirīgi ir arī motora darba parametri darbā ar tīru benzīnu un latoliem.

Lai noteiktu motora indicētos un efektīvos parametrus darbā ar Ai-93 markas benzīnu un diviem dažādiem etanola-benzīna maisījumiem - latolu 10 un latolu 20 (satur attiecīgi 10 % un 20 % etanola piemaissījumu benzīnam) veicām motora termodinamisko aprēķinu. Termodinamiskais aprēķins ļauj ar pietiekamu precizitāti analītiski noteikt motora pamatparametrus, kā arī novērtēt tā indicētos un efektīvos parametrus (J. Blīvis u.c., 1980). Jāņem vērā, ka aprēķina formulās ir rinda koeficientu, kuru izvēle pamatojas uz eksperimentu rezultātiem vai analoga tipa motora konstrukcijas analīzi. No pareizas šo koeficientu izvēles lielā mērā ir atkarīga aprēķinu ticamība.

## 2. Metodika

Teorētiskai analīzei tika izvēlēts motors ZMZ-24. Termodinamisko aprēķinu veicām degvielām ar atšķirīgām siltumspējām (L. G. Goran Svahn, 1980):

Degviela	Zemākā siltumspēja, kJ/kg
Ai-93 markas benzīns	44000
10 % etanols + 90 % Ai-93 (latols 10)	42200
20 % etanols + 80 % Ai-93 (latols 20)	40400

Lai no iegūtajiem rezultātiem varētu konstruēt motora ārējo ātruma raksturojumu, nepieciešams aprēķināt motora raksturīgos parametrus tam darbojoties vismaz trīs klokvārpstas griešanās frekvencēs.

Termodinamiskajam aprēķinam izvēlamies sekojošas četras klokvārpstas griešanās frekvences:

- mazu klokvārpstas griešanās frekvenci, kura ir tuvu minimālajai stabilajai motora griešanās frekvencēi, tam strādājot slodzē. Parasti šī frekvence ir ap 20 % no nominālās, pieņemam  $n_1=1000 \text{ min}^{-1}$ ;
- vidēju klokvārpstas griešanās frekvenci, kurā griezes moments sasniedz savu maksimālo vērtību vai ir tuvu tai. Vairumam karburatormotoru šī frekvence ir aptuveni puse no maksimālās,  $n_2=2500 \text{ min}^{-1}$ ;
- griešanās frekvenci, kura atbilst aptuveni 75% no motora maksimālās griešanās frekvences,  $n_3=3500 \text{ min}^{-1}$ ;
- nominālo motora griešanās frekvenci, kurā motors attīsta maksimālo jaudu,  $n_4=4500 \text{ min}^{-1}$ .

Aprēķinu sākuma daļā nosakām degmaisījuma un degšanas produkta sastāvu. Nemot vērā ķīmisko sastāvu, katrai no degvielām aprēķinām teorētiski nepieciešamo gaisa daudzumu, sadedzes produkta sastāvu, sadedzes produkta un degmaisījuma gāzes konstantes, rezultātā iegūstot molu maiņas koeficientu. Izmantojot sadedzes produktos ietilpstoto gāzu siltumietilpību empiriskās sakarības, aprēķinām sadedzes produkta siltumietilpību (B. Lukaniņš un dr., 1995).

Ieplūdes procesa vidējā spiediena  $p_a$  (MPa) noteikšanai pie dažādām griešanās frekvencēm izmantojam izteiksmi:

$$p_a = p_0 \cdot \left[ 1 - \frac{n^2}{520 \cdot 10^6} \cdot \left( \frac{V'_h}{f_{vid}} \right)^2 \cdot \frac{1}{z^2} \cdot \left( \frac{e-d}{e-1} \right)^2 \right]^{3.5}, \quad (1)$$

kur  $p_0$  - apkārtējās vides spiediens, MPa;

$n$  - klokvārpstas griešanās frekvence,  $\text{min}^{-1}$ ;

$V'_h$  - viena cilindra darba tilpums,  $\text{m}^3$ ;

$f_{vid}$  - vidējais viena cilindra ieplūdes vārsta caurplūdes laukums,  $\text{m}^2$ ;

$\zeta$  - ieplūdes spiediena zudumu koeficients;

$\varepsilon$  - kompresijas pakāpe;

$\delta$  - atliku gāzu reducētā tilpuma koeficients.

Atliku gāzu koeficiente noteikšanai izmantojam sekojošu tuvinātu izteiksmi (И. Ленин, 1969):

$$\gamma \approx \frac{p_r \cdot (T_0 + \Delta t)}{(\varepsilon \cdot p_a - p_r) \cdot \beta \cdot T_r}, \quad (2)$$

kur  $p_r$  - atliku gāzu spiediens, MPa;

$T_0$  - apkārtējās vides temperatūra, K;

$\Delta t$  - temperatūras pieaugums, kas rodas degmaisījumam uzsilstot no motora karstajām detalām, K;

$\beta$  - molu maiņas koeficients;

$T_r$  - atliku gāzu temperatūra, K.

Atliku gāzu spiediens, temperatūra un degmaisījuma temperatūras pieaugums ir no motora griešanās frekvences atkarīgi lielumi, tādēļ to skaitiskās vērtības pieņem atbilstošas attiecīgajām izvēlētajām griešanās frekvēncēm vērtībām, izmantojot līdzīga tipa motora eksperimentālos pētījumu datus. Degmaisījuma uzsīšana no motora karstajām detalām ir atkarīga arī no degvielas, jo benzīnam un etanola-benzīna maisījumiem ir atšķirīgs iztvaikošanai nepieciešamais siltuma daudzums (J. A. Bolt, 1980). Savukārt atliku gāzu temperatūra degvielām ar etanola piedevu ir mazliet zemāka nekā tīram benzīnam, jo paša etanola degšanas temperatūra ir zemāka (K. Owen, T. Coley, 1995).

Lai aprēķinātu kopējo cikla laikā cilindrā ievadītā degmaisījuma masas daudzumu  $G_{cik}$ , atsevišķi nosakām cilindra pildījumu ar degmaisījumu ieplūdes pamatperioda laikā un degmaisījuma daudzumu, kas ieplūst cilindrā vai atplūst no cilindra papildperiodā (t.i., no momenta, kad virzulis atrodas zemākajā maiņas punktā ZMP līdz ieplūdes vārsta aizvēršanās brīdim).

Cilindrā iepļūstošā degmaisījuma masas daudzumu ieplūdes pamatperioda laikā  $G_{\text{pam}}$  (mg/ciklā) aprēķinām pēc sekojošas izteiksmes (И. Ленин, 1969):

$$G_{\text{pam}} = \frac{P_a \cdot V'_h}{R_{\text{deg}} \cdot T_a} \cdot \frac{\varepsilon - \delta}{\varepsilon - 1} \cdot 10^6, \quad (3)$$

kur  $T_a$  - ieplūdes procesa beigu temperatūra (K);

$R_{\text{deg}}$  - degmaisījuma gāzes konstante (J/(kg·K)).

Degmaisījuma papildus ieplūdi vai atplūdi papildperiodā  $p_{\Sigma \text{iep}}$ , kurā virzulis pārvietojas no ZMP līdz ieplūdes vārsta aizvēršanās momentam, aprēķinām kā spiedienu  $p_{\Sigma \text{kol}}$  (spiediens uz ieplūdes vārstu no kolektora puses) un  $p_x$  (spiediens uz ieplūdes vārstu no cilindra puses) algebrisko summu. Rezultātā iegūtās  $p_{\Sigma \text{iep}}$  vērtības ar plus (+) zīmi norāda uz degmaisījuma papildus ieplūdi cilindrā, bet vērtības ar mīnus (-) zīmi - uz degmaisījuma atplūdi no cilindra.

Papildus ieplūdes un atplūdes aprēķināšanai sākotnēji ir nepieciešams aprēķināt spiediena  $P_{\Sigma \text{iep}}$  vidējo vērtību klokvārpstai pagriežoties ik pa  $20^\circ$  lielu leņķi (t.i., no  $180^\circ$  līdz  $200^\circ$ , no  $200^\circ$  līdz  $220^\circ$  un no  $220^\circ$  līdz  $240^\circ$ ), tādējādi nosakot degmaisījuma kustību caur ieplūdes vārstu uz cilindru vai no cilindra. Izmantojot atrastās  $p_{\Sigma \text{iep}}$  vērtības nosakām pieplūstošā vai atplūstošā degmaisījuma daudzumu vienam cilindram attiecīgā klokvārpstas pagrieziena laika intervālā  $G_{\text{pag}}$  (mg/ciklā):

$$G_{\text{pag}} = 74 \cdot 10^4 \cdot \mu \cdot f_{\Delta\varphi} \cdot \frac{\Delta\varphi}{n} \sqrt{P_{\Sigma \text{iep}} \cdot \rho_{\text{deg}}}, \quad (4)$$

kur  $\mu$  - koeficients, kas ievērtē vidējo caurplūdes pretestību ieplūdes vārstam. Dotā tipa motoram  $\mu$  ir 0.75-0.85 (И. Ленин, 1969), pieņemam  $\mu=0.80$ ;

$f_{\Delta\varphi}$  - ieplūdes vārsta vidējais caurplūdes laukums attiecīgajā klokvārpstas pagrieziena laika intervālā,  $\text{m}^2$ ;

$\Delta\varphi$  - klokvārpstas pagrieziena leņķis attiecīgajā laika intervālā;

$\rho_{\text{deg}}$  - degmaisījuma blīvums ieplūdes kolektorā,  $\text{kg/m}^3$ ;

$n$  - klokvārpstas griešanās frekvence,  $\text{min}^{-1}$ .

Summējot atsevišķos laika inervālos aprēķinātos degmaisījuma daudzumus iegūst kopējo papildperiodā pievadīto degmaisījuma daudzumu  $G_{\text{pap}}$  (mg/ciklā), kas ieplūst cilindrā vai atplūst no cilindra (no momenta, kad virzulis atrodas ZMP līdz ieplūdes vārsta aizvēršanās momentam).

Spiediens saspiedes procesa beigās:

$$p_c = p_{\text{aiz}} \cdot \varepsilon_f^{\kappa_1}, \quad (5)$$

kur  $\kappa_1$  - saspiedes politropas kāpes rādītājs;

$\varepsilon_f$  - faktiskā kompresijas pakāpe; ja ieplūdes vārsts aizvēries pie  $60^\circ$  pēc ZMP,  $\varepsilon_f \approx 0.8\varepsilon$ ;

$p_{\text{aiz}}$  - spiediens ieplūdes vārsta aizvēršanās brīdī, MPa.

Temperatūru saspiedes procesa beigās  $T_c$  aprēķinām pēc izteiksmes:

$$T_c = \frac{P_c \cdot V'_h \cdot 10^{12}}{G_{\text{cik}} \cdot (1 + \gamma) \cdot R_{\text{deg}} \cdot (\varepsilon - 1)}. \quad (6)$$

Lai noteiktu motora darba cikla maksimālo temperatūru, t.i. temperatūru satedzes procesa beigās  $T_z$  (K), izmantojam sekojošu vienādojumu:

$$\frac{\xi \cdot (Q_z - \Delta Q_z) \cdot G_{\text{d.cik}}}{G_{\text{cik}} \cdot (1 + \gamma)} + c_{v_0} \cdot T_c = c''_{v_r} \cdot T_z, \quad (7)$$

kur  $\xi$  - siltuma izmantošanas koeficients;

$Q_z$  - degvielas zemākā siltumspēja, kJ/kg;

$\Delta Q_z$  - siltuma zudumi, kas rodas degvielas nepilnīgas sadedzes rezultātā, kJ/kg;

$G_{d,cik}$  - cilindrā padotās degvielas daudzums cikla laikā, mg/ciklā;

$G_{cik}$  - cilindrā ievadītā degmaisījuma daudzums cikla laikā, mg/ciklā;

$c_{v_0}$  - degmaisījuma siltumietilpība, J/(kg·K);

$T_c$  - saspiedes procesa beigu temperatūra, K;

$c''_{v_r}$  - sadedzes produktu vidējā siltumietilpība temperatūru intervālā no nulles līdz  $T_z$ , J/(kg·K).

Tā kā degmaisījuma un sadedzes produktu siltumietilpības  $c_{v_0}$  un  $c''_{v_r}$  palielinās lineāri līdz ar temperatūras pieaugumu, tad lai noteiktu temperatūru sadedzes procesa beigās, ir nepieciešams atrisināt vienādojumu (7). Cikla maksimālo spiedienu, kā arī izpletes procesa spiedienu un temperatūru nosakām pēc tradicionālajām aprēķinu formulām (J. Blīvis u.c., 1980).

Cikla vidējo teorētisko indicēto spiedienu  $p'_i$  (MPa), kas atbilst nenoapjalotam indikatora diagrammas laukumam, aprēķinām pēc sekojošas izteiksmes:

$$p'_i = \frac{1}{\varepsilon - 1} \left( \frac{p_z - \varepsilon \cdot p_b}{\kappa_2 - 1} + \frac{p_c - \varepsilon \cdot p_a}{\kappa_1 - 1} \right), \quad (8)$$

kur  $p_z$  - cikla maksimālais spiediens, MPa;

$p_b$  - izpletes procesa beigu spiediens, MPa;

$\kappa_2$  - izpletes politropas kāpes rādītājs.

Pārejot no teorētiskā spiediena uz īsteno ievērtē gāzu apmaiņas zudumus motorā, kuri ir ekvivalenti indikatora diagrammas laukumam, kas atrodas starp ieplūdes un izplūdes līnijām.

Lai konstruētu ārējo ātruma raksturojumu motora darbībai ar Ai-93 markas benzīnu un iepriekšminētajiem etanola-benzīna maisījumiem aprēķinājām sekojošus rādītājus četros izvēlētajos ātruma režīmos: motora attīstīto efektīvo jaudu  $N_e$  (kW), griezes momentu  $M$  (N·m), degvielas patēriņu stundā  $G_{st}$  (kg/h), degvielas efektīvo īpatpatēriņu  $g_e$  (g/kWh):

$$N_e = \frac{p_e \cdot V_h \cdot n}{30 \cdot \tau}; \quad M = 9550 \frac{N_e}{n}; \quad g_e = 3600 \frac{\rho_{deg,m} \cdot \eta_V}{p_i \cdot \alpha \cdot l_0 \cdot \eta_{meh}}; \quad G_{st} = \frac{g_e \cdot N_e}{1000}, \quad (9)$$

kur  $V_h$  - motora darba tilpums, dm<sup>3</sup>;

$p_e$  - vidējais efektīvais spiediens, MPa;

$\tau$  - taktība, četrtaktu motoram  $\tau=4$ ;

$\eta_V$  - pildījuma koeficients;

$p_i$  - cikla īstenais indicētais spiediens, MPa;

$\alpha$  - gaisa pāruma koeficients;

$l_0$  - teorētiski nepieciešamais gaisa daudzums 1 kg degvielas sadedzināšanai, kg;

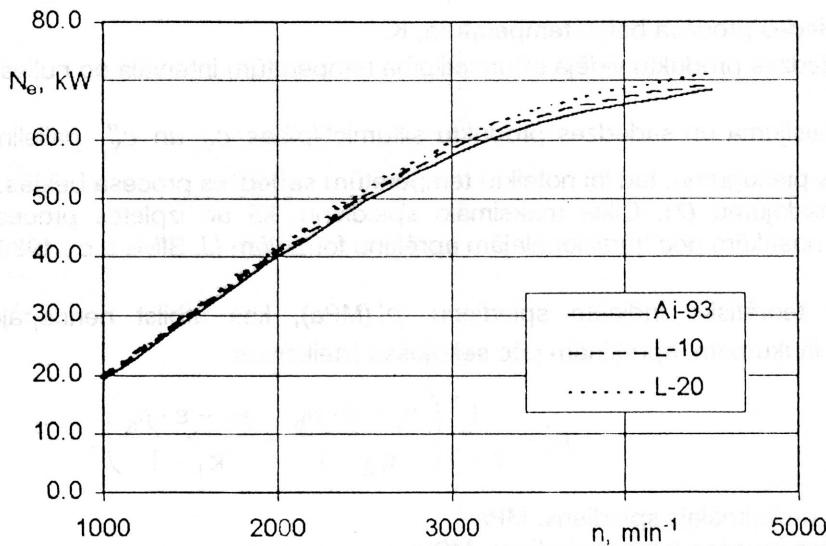
$\eta_{meh}$  - mehāniskais lietderības koeficients.

Motora dinamisko un ekonomisko parametru aprēķinus, izmantojot doto metodiku, veicām ar datorprogrammas MS Excel 7.0 pašidzību, iegūstot aprēķina rezultātus kompleksu tabulu un grafiku veidā.

### 3. Rezultāti un analīze

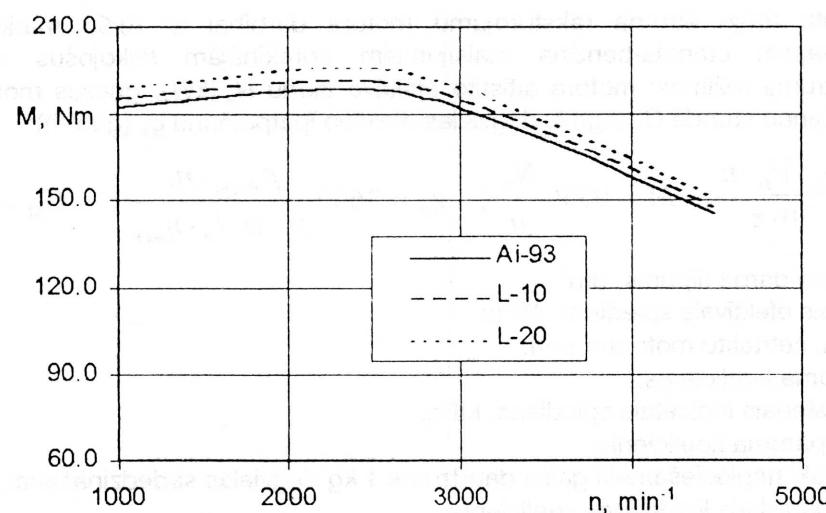
Aprēķinu rezultātā konstruētie pētāmā motora ārējie ātruma raksturojumi doti 1.-4. attēlos. Efektīvās jaudas izmaiņa atkarībā no motora griešanās frekvences (1. att.) darbā ar trim dažādām degvielām: benzīnu Ai-93, benzīna Ai-93 un etanola 10% maisījumu (latols L-10) un benzīna Ai-93

un etanola 20 % maisījumu (latols L-20) rāda, ka pieaugot etanola daudzumam degvielā, mazliet palielinās motora attīstītā jauda. Tas izskaidrojams ar to, ka etanolam ir lielāks iztvaikošanas siltums, rezultātā motora cilindru pildījuma koeficients darbā ar latoliem ir augstāks. Lielāko jaudu visā motora apgriezieni diapazonā dod latols L-20 ( $N_{e\max} = 71.4 \text{ kW}$ ). Motora jaudas pieaugums darbā ar latoliem ir izteiktāks.



1. att. Efektīvās jaudas  $N_e$  izmaiņa atkarībā no motora griešanās ātruma  $n$  benzīnam Ai-93, latolam L-10 un latolam L-20 (benzīna un etanola attiecīgi 10 % un 20 % maisījumiem).

Fig. 1. Change of engine power  $N_e$  depending on engine speed  $n$  for gasoline Ai-93, latol L-10 and latol L-20 (blends of gasoline Ai-93 with ethanol 10 % and 20 % respectively).



2. att. Griezes momenta  $M$  izmaiņa atkarībā no motora griešanās ātruma  $n$  benzīnam Ai-93, latolam L-10 un latolam L-20.

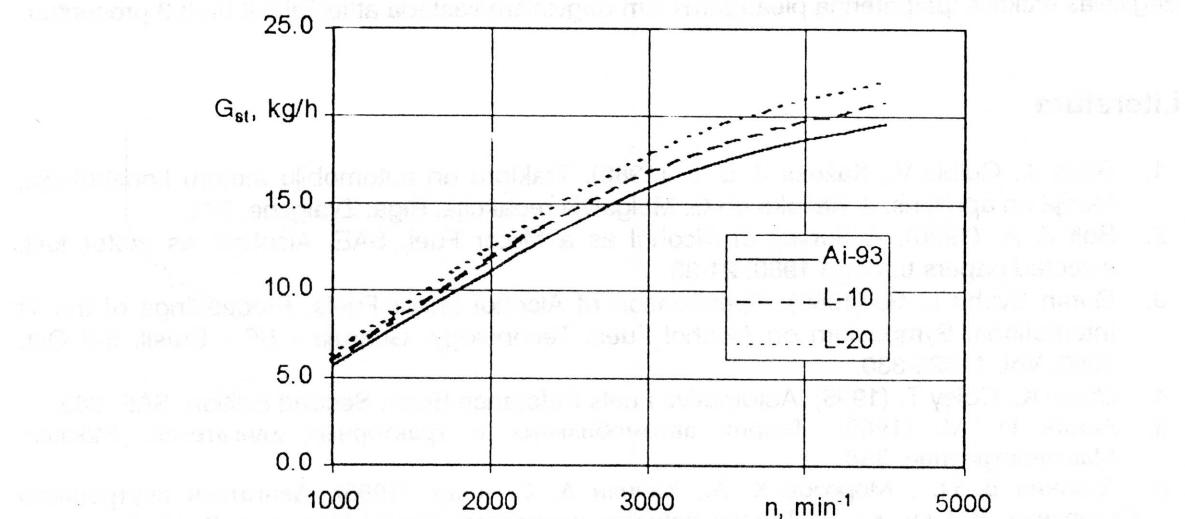
Fig. 2. Change of engine torque  $M$  depending on engine speed  $n$  for gasoline Ai-93, latol L-10 and latol L-20.

lielākas jaudas diapazonā. Saīdzinājumā ar tīru benzīnu, latols L-10 un latols L-20 maksimālās jaudas diapazonā dod attiecīgi par 1.5 un 3 kW lielāku jaudu, procentuāli jaudas pieaugums ir attiecīgi 2.2 un 4.4 procenti.

Pieaugot etanola saturam degvielu maisījumā, griezes moments (2. att.) palielinās. Šis pieaugums ir gandrīz vienāds visā motora apgriezienu diapazonā. Gan darbā ar benzīnu Ai-93, gan arī ar latoliem motors attīsta maksimālo griezes momentu vienā un tajā pašā apgriezienu diapazonā (2000-2500 min<sup>-1</sup>). Benzīnam tas ir 188.6 Nm, latolam L-10 - 192.1 Nm, latolam L-20 - 195.8 Nm, t.i., latoliem maksimālais griezes moments ir attiecīgi par 1.9 un 3.8 procentiem lielāks nekā benzīnam.

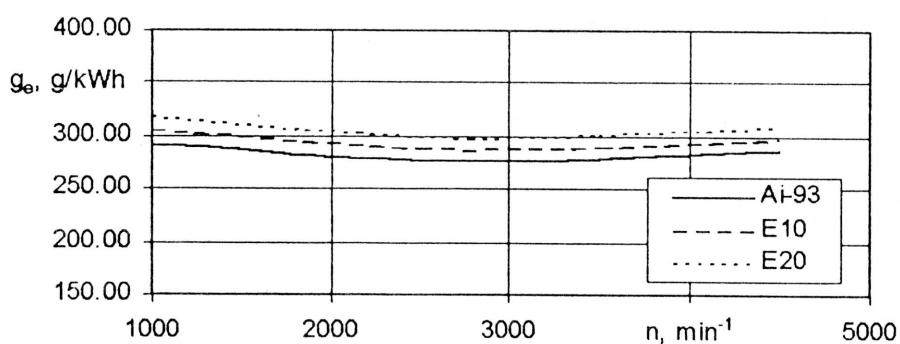
Zemāka siltumspēja ir viens no faktoriem, kas nosaka latola L-10 un latola L-20 lielāku patēriņu saīdzinājumā ar benzīnu. Palielinoties etanola daļai latolu sastāvā, pieaug motora degvielas patēriņš (3. att.), turklāt, palielinoties motora apgrieziem, starpība degvielas patēriņā starp benzīnu un latoliem pieaug. Maksimālā patēriņu starpība ir novērojama pie apgrieziem, kas atbilst maksimālai jaudai, un šī starpība sastāda 1.2 kg/h latolam L-10 un 2.5 kg/h latolam L-20, t.i., stundas degvielas patēriņš darbā ar latolu L-10 un ar latolu L-20 ir attiecīgi par 6.1 un 12.7 procentiem lielāks nekā darbā ar benzīnu Ai-93.

Degvielas efektīvais īpatpatēriņš  $g_e$  ir atkarīgs no jaudas  $N_e$  un stundas degvielas patēriņa  $G_{st}$ . Darbā ar latoliem, motora degvielas īpatpatēriņš ir mazliet augstāks nekā darbā ar benzīnu (4. att.). Tas izskaidrojams ar to, ka degvielas stundas patēriņa pieaugums latoliem, saīdzinājumā



3. att. Degvielas patēriņa stundā  $G_{st}$  izmaiņa atkarībā no motora griešanās ātruma  $n$  benzīnam Ai-93, latolam L-10 un latolam L-20.

Fig. 3. Change of fuel consumption  $G_{st}$  depending on engine speed  $n$  for gasoline Ai-93, latol L-10 and latol L-20.



4. att. Degvielas efektīvā īpatpatēriņa  $g_e$  izmaiņa atkarībā no motora griešanās ātruma  $n$  benzīnam Ai-93, latolam L-10 un latolam L-20.

Fig. 4. Change of specific fuel consumption  $g_e$  depending on engine speed  $n$  for gasoline Ai-93, latol L-10 and latol L-20.

ar benzīnu, ir lielāks par jaudas pieaugumu. Rezultātā arī patēriņas degvielas daudzums uz jaudas vienību darbā ar latoliem ir lielāks. Saīdzinot motora darbu ar benzīnu un latolu, īpatpatēriņa pieaugums ir nemainīgs visā motora griešanās ātruma diapazonā. No izmēģinātajiem diviem latolu veidiem lielāko īpatpatēriņu uzrāda latols L-20, kura minimālais īpatpatēriņš ir 299.8 g/kWh, t.i., par 22.9 g/kwh (8.3 %) lielāks nekā benzīnam (276.9 g/kWh).

#### 4. Slēdziens

1. Motora ZMZ-24 saīdzinošais termodinamiskais aprēķins darbā ar benzīnu Ai-93, un šī benzīna maisījumiem ar 10 un 20 % etanola piedevu (latolu L-10 un latolu L-20) parāda, ka palielinot etanola saturu degvielā, palielinās motora attīstītā jauda un griezes moments. Maksimālās jaudas pieaugums darbā ar latolu L-10 un latolu L-20 ir attiecīgi 2.2 un 4.4 procenti, bet maksimālā griezes momenta pieaugums darbā ar latoliem ir 1.9 un 3.8 procenti.
2. Strādājot ar latoliem, saīdzinājumā ar benzīnu Ai-93, pasliktinās motora ekonomiskie parametri: stundas degvielas patēriņš un degvielas efektīvais īpatpatēriņš. Stundas degvielas patēriņš darbā ar latolu L-10 palielinās par 6.1 %, bet darbā ar latolu L-20 - par 12.7 %, savukārt degvielas efektīvā īpatpatēriņa pieaugums šīm degvielām sastāda attiecīgi 3.8 un 8.3 procentus.

#### Literatūra

1. Blīvis J., Gulbis V., Kažoks J. u. c. (1980). Traktoru un automobiļu motoru konstrukcija, teorija un aprēķins. J. Kažoka un G. Melgalyja redakcijā. Rīga: Zvaigzne. 371.
2. Bolt J. A. (1980). A Survey of Alcohol as a Motor Fuel. SAE. Alcohols as motor fuel: selected papers through 1980. 21-33.
3. Goran Svahn L. G. (1980). Specification of Alcohol Motor Fuels. Proceedings of the VI International Symposium on Alcohol Fuels Technology. Guaruja - SP - Brasil, 5-8 Oct. 1980, Vol. 1. 325-330.
4. Owen K., Coley T. (1995). Automotive Fuels Reference Book: Second Edition. SAE. 963.
5. Ленин И. М. (1969). Теория автомобильных и тракторных двигателей. Москва: Машиностроение. 368.
6. Луканин В. Н., Морозов К. А., Хачиян А. С. и др. (1995). Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов: Учеб./ Под. ред. В. Н. Луканина. Москва: Высшая школа. 368.