



## 1,9 TDI DYZELINIO VARIKLIO ŠILUMOS IŠSISKYRIMO PARAMETRŲ NUSTATYMO SUPAPRASTINIMO TYRIMAS

Justas ŽAGLINSKIS<sup>1,2</sup>, Kristóf LUKÁCS<sup>3</sup>, Ákos BEREZKY<sup>4</sup>, Paulius RAPALIS<sup>5</sup>

<sup>1,5</sup>Jūreivystės institutas, Klaipėdos universitetas

<sup>2</sup>Vilniaus Gedimino technikos universitetas

<sup>3,4</sup>Budapešto technikos ir ekonomikos universitetas

El. paštas: <sup>1,2</sup>[j.zaglinskis@gmail.com](mailto:j.zaglinskis@gmail.com); <sup>3</sup>[lukacs@energia.bme.hu](mailto:lukacs@energia.bme.hu);

<sup>4</sup>[berezky@energia.bme.hu](mailto:berezky@energia.bme.hu); <sup>5</sup>[pauliusrapalis@gmail.com](mailto:pauliusrapalis@gmail.com)

**Santrauka.** Straipsnyje pateikta dyzelinio Audi variklio 1,9 TDI 1Z šilumos išsiskyrimo parametrų nustatymo metodikos ir jos modifikavimo tyrimas. Šio tyrimo procese atiliko eksperimento duomenims apdoroti ir darbo procesui modeliuoti panaudoti AVL BOOST BURN ir IMPULS programiniai paketai. Tyrime buvo sprendžiamas atvirkščias indikatorinio slėgio nustatymo iš šilumos charakteristikos duomenų uždavinys. Siekiant supaprastinti šilumos išsiskyrimo parametrų nustatymą, panaudota modifikuota T. Bulaty ir W. Glanzman metodika. Maksimalaus slėgio cilindre parametras, kurio nustatymas reikalauja papildomos brangios įrangos, buvo pakeistas objektyviu išmetamųjų dujų temperatūros parametru. Šis modifikavimas leidžia supaprastinti eksperimentinius tyrimus bei leido atlikti pagrindinių variklio darbo parametrų modeliavimą neviršijant 2 % paklaidų ribos. Tyrimo rezultatas vertinamas itin svarbiu variklių bandymų lauko sąlygomis supaprastinimo atžvilgiu.

**Reikšminiai žodžiai:** Audi 1,9 TDI 1Z, šilumos išsiskyrimo parametrai, variklio modeliavimas.

### Įvadas

Vidaus degimo variklių (VDV) mokslinių tyrimų srityje jau ilgą laiką svarbią poziciją užima matematinis modeliavimas (MM), kuris leidžia supaprastinti bei palengvinti kompleksinį tyrimų procesą ir, atlikus pakeitimus, susijusius su VDV, prognozuoti pokyčio efekto rezultatus (Mollenhauer, Tschoeke 2010; Merker *et al.* 2006).

Viena iš svarbiausių charakteristikų VDV tyrimų srityje yra slėgio pokyčio cilindre charakteristika (VDV indikatorinė diagrama), kuri, esant tiek vidiniams, tiek išoriniams pakitimams, atspindi cilindre vykstančius degimo proceso pokyčius, kurie tiesiogiai daro įtaką tiek energiniams, tiek ekologiniams VDV darbo parametrams ir kt. Tačiau vykdant eksperimentinius tyrimus, ypač lauko (eksplotacijos) sąlygomis, indikatorinės diagramos fiksavimas yra sudėtingas, kitais atvejais neįmanomas, kaip ir alkūninio veleno pasisukimo kampo registravimas. Be to, ši įranga yra santykinai brangi ir turi ribotą panaudojimo resursą. Šiai dažnai kylančiai problemai spręsti siūloma panaudoti modeliavimą ir objektyvų (Mollenhauer, Tschoeke 2010) bei darbo proceso pokyčiams jautrų rodiklį – išmetamųjų dujų (ID) temperatūrą, kurios nustatymas reikalauja mažiau išlaidų bei paprastesnių konstrukcinių sprendimų.

Nesant VDV indikatorinio slėgio duomenų registravimo galimybių, gali būti panaudojama MM programa IMPULS sprendžiant atvirkštinį uždavinį, t. y. remiantis šilumos išsiskyrimo charakteristikos (HRC) duomenimis modeliuoti indikatorinę diagramą bei VDV darbo parametrus.

AVL BOOST BURN programa apskaičiuotų preliminarių HRC formos parametro  $m$  ir HR trukmės  $\varphi_z$  reikšmių patikslintiems skaičiavimams panaudota MM programa IMPULS, kurioje HRC aprašoma pagal viengubą Vibe funkciją, kartu su modifikuotu T. Bulaty ir W. Glanzman pasiūlytu HR parametrų nustatymo metodu (Bulaty, Glanzman 1985).

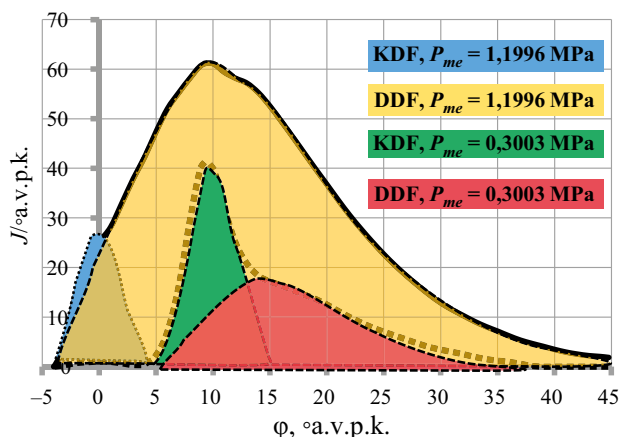
I. I. Vibe 1962 m. pasiūlė lengvai suprantamą ir praktiškai pritaikomą (derinant su eksperimentiniais duomenimis) HRC VDV cilindre aprašymo formą, kuri dėl savo patrauklumo naudojama ir šiuolaikiniuose matematinio modeliavimo paketuose. Taikant kitus matematinius modelius, reikia apskaičiuoti santykinius dydžius ir konstantas bei kriterinius parametrus pradinių duomenų bloko formavimo etape, šis veiksnys gali riboti praktinį modelio pritaikymą derinant su eksperimento duomenimis. Atsižvelgiant į tyrimo tikslą, kuris apima MM vykdymo supaprastinimo,

atsisakant brangios įrangos, galimybę, pasirenkamas kuo paprastesnis ir lengvai suprantamas, eksperimentiniais tyrimais pagrįstas vienzonis modelis (tyrimo objektas). Tyrimo tikslui pasiekti buvo sprendžiami šie uždaviniai:

- atlikti VDV, dirbančio  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$  ( $p_{me} = 1,1996\text{--}0,3003$ ) įprastu mineraliniu dyzelinu, darbo parametrų registravimą;
- pagal gautus eksperimentinius duomenis suformuoti AVL BOOST BURN pradinių duomenų bloką ir apskaičiuoti preliminarius HRC parametrus;
- pagal gautus eksperimentinius duomenis suformuoti IMPULS pradinių duomenų bloką bei panaudojant T. Bulaty ir W. Glanzman nemonifikuotą ir modifikuotą metodikas nustatyti tikruosius HRC parametrus, įvertinti metodikų taikymo galimybes;
- atlikti VDV darbo parametrų MM panaudojant skirtingais būdais gautus HRC parametrus ir palyginti juos su eksperimentiniais VDV darbo parametrais.

Vibe funkcijos taikymas skirtingais atvejais pasižymi ribotumu dėl HR aproksimavimo viena kreive (Yeliana *et al.* 2011; Pešić *et al.* 2010) galimybės. Dyzeliniam VDV, turinčiam pripūtimo sistemą, dirbant aukštų apskukų ir artimais nominaliai galiai režimais, dėl santykinai trumpo laiko ir greitai vykstančių procesų HR vyksta difuzinėje degimo fazėje (DDF). Aukštų apskukų dyzelinio VDV, turinčio pripūtimo sistemą, dirbančio dalinės apkrovos (nepilnos apkrovos) režimais, mažėjant apkrovai, HRC pobūdis stipriai keičiasi. Dirbant dalinių VDV apkrovų režimais, HR procesas įgauna dvifazę formą, t. y. išryškėja pirminė kinetinė degimo fazė (KDF) ir antrinė DDF (1 pav.). HR aprašymas viena Vibe funkcija tampa netikslus ir nekorektiškas.

Tačiau dėl degalų porcijos ar konvertuotos energijos kiekio diferencijavimo dviejų fazių degimo procese (KDF ir DDF) bei papildomų HRC Vibe parametrų kiekio dvigubos Vibe funkcijos taikymas yra santykinai sudėtingas ir atima



1 pav. HR fazių pasiskirstymas priklausomai nuo VDV  $p_{me}$   
Fig. 1. The distribution of heat release phases by engine  $p_{me}$

daug laiko. Siekiant sumažinti atliekamų tyrimų apimtį, tyrimuose tikslinga panaudoti MM programą, kuri paremta vienos Vibe funkcijos HR charakteristikos aprašymo metodika ir leidžia modeliuoti VDV darbo parametrus tiek dirbant nominaliu režimu, tiek – dalinių apkrovų režimais, o HRC parametrų  $m$  ir  $\varphi_z$  santykiai dirbant dalinės ir nominalios (arba aukštos) apkrovos režimais būtų nustatomi pagal G. Woschni ir F. Anisits (Woschni, Anisits 1974) metodiką.

## Tyrimų metodika

Motoriniai bandymai atlikti Budapešto technikos ir ekonomikos universiteto Mechanikos inžinerijos fakulteto Energetikos inžinerijos katedros *Jendrassik György* VDV tyrimų laboratorijoje. Tyrimams panaudotas *Audi* kompanijos gamybos automobilio paskirties dyzelinis 1,9 TDI keturių cilindrų IZ tipo VDV. VDV su vieno tūrio degimo kamera, esančia stūmoklyje (tiesioginis degalų įpurškimas), turintis laisvo (turbininis kompresorius) pripūtimo sistemą, išmetamųjų dujų recirkuliacijos sistemą (EGR), kuri bandymo metu buvo atjungta (siekiant neiškreipti cilindre vykstančių šilumos mainų procesų duomenų), ir elektroninę valdymo sistemą (EVS). Dyzelinio VDV 1,9 TDI IZ pagrindiniai techniniai duomenys pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. VDV 1,9 TDI IZ pagrindiniai techniniai duomenys  
Table 1. The main operating parameters of engine 1.9 TDI IZ

Rodiklis	Dimensija	Reikšmė
Variklio darbinis tūris	cm <sup>3</sup>	1896
Cilindrų skaičius	–	4
Suspaudimo laipsnis	–	19,5
Didžiausioji galia	kW	66 (4000 min <sup>-1</sup> )
Sukimo momentas	Nm	202 (1900 min <sup>-1</sup> )
Cilindro skersmuo	mm	79,5
Stūmoklio eiga	mm	95,5

Bandymai atlikti VDV dirbant apkrovos charakteristika ( $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ ,  $p_{me} = 1,1996\text{--}0,3003$ ) įprastu mineraliniu dyzelinu (D) su 5 % RRME priedu, kuris atitinka standarto LST EN 590:2014 reikalavimus (LST EN 590:2014). Pagrindinės fizikinės D savybės pateiktos 2 lentelėje.

2 lentelė. Pagrindinės fizikinės dyzelino savybės  
Table 2. The main physical properties of diesel fuel

Parametras	Dimensija	Reikšmė
Tankis esant 15 °C	kg/m <sup>3</sup>	844,7
Klampusis esant 40 °C	mm <sup>2</sup> /s	2,93
Kaloringumas (žem.)	KJ/kg	42 800
Pliūpsnio temperatūra	°C	63
Cetaniškas skaičius	–	51
Ribinė filtruojamumo temperatūra	°C	–7

Tyrimai atlikti panaudojant Borghy & Saveri FE 350 S VDV apkrovos standą su elektromagnetiniu stabdžiu, apskukų diapazonas 100–8000 min<sup>-1</sup>, maksimali stabdymo galia – 257 kW, maksimalus stabdymo sukimo momentas ( $M_i$ ) – 1400 Nm, inercijos momentas – 0,681 kg/m<sup>2</sup>, tikslumas ±0,94 Nm. Taip pat stendiniuose bandymuose panaudotas AVL 7030 gravimetrinis degalų sunaudojimo matavimo įrenginys, kurio tikslumas <0,2 %. Slėgis cilindre buvo nustatomas panaudojant šveicarų įmonės pagamintų srovės stiprintuvo KIAG 5001, kvarcinį slėgio jutiklio KIAG 6031 ir jutiklio laikiklio KIAG 6421 rinkinį, kurio matavimo tikslumas ±1,0 %. Alkūninio veleno pasisukimo kampui (a.v.p.k.) nustatyti buvo panaudotas Hengstler RI32-O/50ER.11KB sūkių registravimo daviklis, kurio darbinė temperatūra nuo –10 iki 60 °C, matavimo diapazonas nuo 100 iki 6000 min<sup>-1</sup>.

Šiame tyrime taikyti praktikoje žinomi metodai bei modeliavimo programos. Taikytas AVL kompanijos programos vienas iš paketų BOOST BURN (toliau BURN), kuris, panaudojant eksperimentinius duomenis, leidžia skaičiuoti HRC ir jos rodiklius. Taip pat panaudota Sankt Perterburgo Centriniam dyzelinių VDV mokslinių tyrimų institute FORTRAN programavimo kalba sukurta vienzoninio VDV darbo parametrų MM programa IMPULS.

HRC ir jos parametrų  $m$  ir  $\varphi_z$  analizė atliekama pagal gerai žinomą mokslininko I. I. Vibe 1962 ir 1963 m. pasiūlytą HRC formą (Vibe 1962):

$$\frac{dx}{d\left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)} = C(m+1)\left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)^m e^{-6,908\left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)^{m+1}}, \quad (1)$$

$$\frac{\varphi}{\varphi_z} = \frac{\varphi_E - \varphi_1}{\varphi_z}, \quad (2)$$

čia:  $\frac{\varphi}{\varphi_z}$  – santykinis HR laikas;  $\varphi_E$  – einamasis alkūninio veleno pasisukimo kampas;  $\varphi_1$  – degimo pradžia (užsiliepsnojimas), a.v.p.k.;  $\varphi_z$  – degimo trukmė, °a.v.p.k.;  $C$  – konstanta, esant 0,999 degalų sudegimo faktoriui, lygi 6,908;  $m$  – HR formos parametras.

Vibe HR parametrai  $m$  ir  $\varphi_z$  VDV dirbant dalinės apkrovos režimais aprašomi pagal G. Woschni ir F. Anisits išraiškas:

$$\frac{m_i}{m_0} = \left(\frac{\varphi_{ti0}}{\varphi_{ti}}\right)^{a2} \cdot \frac{P_i \cdot T_0}{P_0 \cdot T_i} \cdot \left(\frac{n_0}{n_i}\right)^{a1}, \quad (3)$$

$$\frac{\varphi_{zi}}{\varphi_{z0}} = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_i}\right)^{a2} \cdot \left(\frac{n_i}{n_0}\right)^{a4}, \quad (4)$$

čia:  $a1, a2, a3, a4$  – pastovūs koeficientai;  $T_0$  ir  $T_i$  – atitinkamai pripučiamo oro temperatūra [°K] dirbant nominaliu ir

$i$ -tuoju apkrovos režimu;  $P_0$  ir  $P_i$  – atitinkamai pripučiamo oro slėgis [Pa] dirbant nominaliu ir  $i$ -tuoju apkrovos režimu;  $\varphi_{ti}$  ir  $\varphi_{ti0}$  – atitinkamai HR indukcijos periodas [°a.v.p.k.] dirbant nominaliu ir  $i$ -tuoju apkrovos režimu.

HR indukcijos periodas nustatomas pagal J. T. Jerio-mino metodiką:

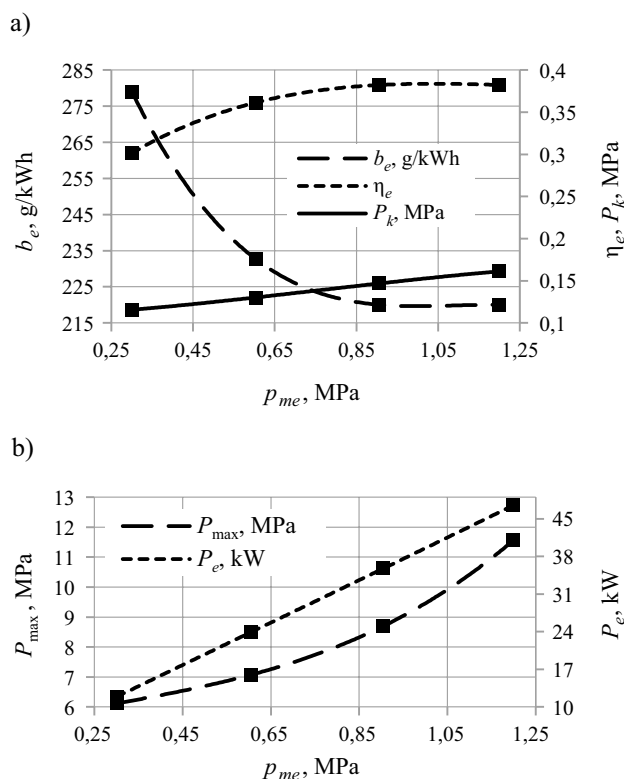
$$\varphi_{ti} = 6 \cdot n \cdot \tau_i, \quad (5)$$

$$\tau_i = K_\tau \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{T}{P}\right)^{0,5} \cdot \exp\left(\frac{E}{R_M \cdot T}\right), \quad (6)$$

čia:  $E/R_M$  – aktyvacijos energijos santykis su dujų pastoviąja (moline) energija;  $K_\tau$  – konstanta;  $T$  – pripučiamo oro temperatūra, K;  $P$  – pripučiamo oro slėgis, Pa;  $n$  – VDV apskukas, min<sup>-1</sup>.

HRC parametrą  $m$  ir  $\varphi_z$  nustatyti pagal išorinius VDV darbo parametrus taikoma T. Bulaty ir W. Glanzman pasiūlyta ir šio straipsnio autorių modifikuota metodika.

VDV apkrovos diapazonas dirbant  $n = 2500$  min<sup>-1</sup> režimu siekė nuo žemos ( $p_{me} = 0,3003$  MPa) iki aukštos apkrovos ( $p_{me} = 1,1996$  MPa). Matuojami 4 apkrovos taškai  $p_{me} = 1,1996, 0,9043, 0,6038, 0,3003$  MPa. Pagrindinių VDV parametrų priklausomybė nuo vidutinio efektinio slėgio ( $p_{me}$ ) skirtinguose apkrovos taškuose pavaizduota 2 pav. a ir b dalyse.



2 pav. Eksperimentinių duomenų priklausomybė nuo  $p_{me}$ :

a)  $P_k, b_e, \eta_e$ ; b)  $P_{max}, P_e$

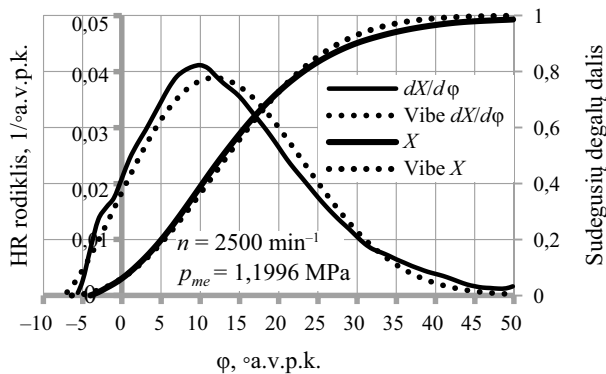
Fig 2. The dependence of experimental data on  $p_{me}$ :

a)  $P_k, b_e, \eta_e$ ; b)  $P_{max}, P_e$

## Tyrimų rezultatai ir analizė

Pirmiausia BURN programa pagal laboratorijoje atliktų 1,9 TDI 1Z VDV tyrimų rezultatus modeliuojama HRC ir nustatomi preliminarius (šiuo atveju  $\varphi_1 = -7,53^\circ$  a.v.p.k.,  $\varphi_z = 56,4^\circ$  a.v.p.k.,  $m = 1,33$ ) Vibe HR parametrai  $m$  ir  $\varphi_z$ . 3 pav. pateikti MM normalizuoto HR rodiklio ( $dX/d\varphi$ ) pagal slėgio duomenis ir Vibe metodiką rezultatai bei einamosios sudegusių degalų masės dalies rezultatai, kurių pradinis skaičiavimo duomenų blokas sudarytas remiantis 4 apkrovos taškų eksperimentiniais rezultatais.

Aukštų apsučių ir apkrovų režimais dirbančio dizelinio VDV, turinčio pripūtimo sistemą, HRC būdinga viena dominuojanti degimo fazė (DF), t. y. difuzinė (DDF), o kinetinė degimo fazė (KDF) skirtingais atvejais sunku arba neįmanoma atskirti. Galima daryti prielaidą, kad vyksta vienfazis DDF, išreikštas HR, kuris dažnai gan tiksliai gali būti aprašomas vienguba Vibe HR funkcija. Tačiau mažėjant VDV apkrovai atsiranda KDF, esant žemoms apkrovoms KDF tampa dominuojančia, o HRC tampa panaši į bazinio (be pripūtimo sistemos, vidutinių apsučių) VDV HR charakteristiką.



3 pav. Šilumos išsiskyrimo (normalizuota; pagal viengubą Vibe) ir pilnutinio degalų degimo charakteristikos

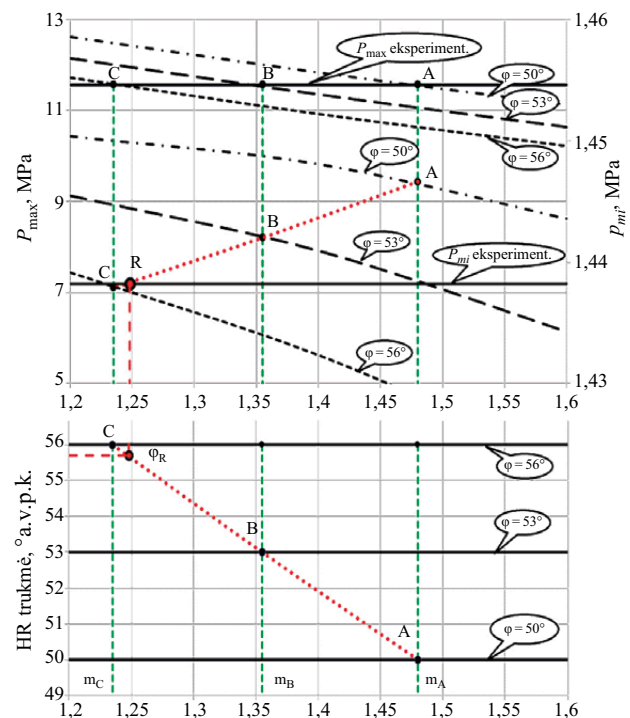
Fig. 3. The characteristics of heat release (normalized; single Vibe) and total fuel combustion

HR charakteristikai įgavus dvizonį profilį, sudarytą iš KDF ir DDF, tolesnis vienos Vibe funkcijos taikymas lemia santykinai didelę paklaidą ir praktiškai tampa bevertis. Tada dalinių VDV apkrovų režimų HR charakteristikai aprašyti galima taikyti dvigubą Vibe funkciją, kuri atskirai aprašo kiekvieną DF, bei naudoti darbo proceso parametru MM programą, kuri paremta dviguba Vibe funkcija ir pasižymi santykinai aukštesniu sudėtingumo lygiu. Arba galima taikyti viengubą Vibe funkciją aprašant aukštos apkrovos režimo HR charakteristiką ir panaudoti MM programą, kuri dalinių VDV apkrovų režimų darbo proceso rodiklių MM atliktų remdamasi nominalaus (arba aukštos apkrovos) režimo duomenimis, taip pat ir HRC.

Preliminarios ir orientacinės HR parametru  $m$  ir  $\varphi_z$  skaitinės reikšmės imamos iš BURN skaičiavimų. Siekiant tiksliau nustatyti HR parametrus  $m$  ir  $\varphi_z$  taikoma MM programa IMPULS bei Bulaty ir Glanzman metodika. Pagal BURN apskaičiuotas  $m$  ir  $\varphi_z$  orientacines reikšmes imamos 3 skirtingos  $m$  reikšmės esant 3 skirtingoms  $\varphi_z$  reikšmėms ir atliekami skaičiavimai taikant IMPULS programos 1,9 TDI VDV modelį, kuris yra sudarytas atsižvelgiant į eksperimentinius duomenis.

Toliau IMPULS programa skaičiavimai atliekami su 3 skirtingomis  $m$  (1,2, 1,4, 1,6) reikšmėmis, esant 3 skirtingoms  $\varphi_z$  reikšmėms ( $50^\circ$ ,  $53^\circ$ ,  $56^\circ$ ), ir pagal Bulaty ir Glanzman metodiką nustatomos tikslios  $m$  ir  $\varphi_z$  reikšmės (4 pav.), kurios naudojamos patikslintam matematiniam modeliavimui programoje IMPULS.

Pritaikius Bulaty ir Glanzman metodiką (pagal  $P_{max}$  ir  $p_{mi}$ ) nustatytos patikslintos  $m$  ir  $\varphi_z$  reikšmės. Tačiau vykdant eksperimentinius tyrimus kur kas tikslingiau panaudoti  $p_{me}$ . Bulaty ir Glanzman metodu nustatytos  $m$  ir  $\varphi_z$  reikšmės artimos tiek pagal  $p_{mi}$  ( $m = 1,248$  ir  $\varphi_z = 55,70^\circ$ ), tiek pagal  $p_{me}$  ( $m = 1,240$  ir  $\varphi_z = 55,85^\circ$ ). Atlikus VDV darbo parametru matematinį modeliavimą programa IMPULS, esant šioms skirtingoms  $m$  ir  $\varphi_z$  kombinacijoms, pasiekiamas santykinai aukštas tikslumas (3 lentelė).



4 pav. Grafinis  $m$  ir  $\varphi_z$  reikšmių nustatymas Bulaty ir Glanzman metodu pagal  $P_{max}/p_{mi}$

Fig. 4. The graphical estimation of  $m$  and  $\varphi_z$  according Bulaty and Glanzman methodology ( $P_{max}/p_{mi}$ )

3 lentelė. VDV darbo parametrų MM rezultatų palyginimas ( $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ ,  $p_{me} = 1,1996 \text{ MPa}$ )

Table 3. The comparison of simulated engine work parameters ( $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ ,  $p_{me} = 1,1996 \text{ MPa}$ )

Rodiklis	$p_{mi}$ metodu	$p_{me}$ metodu	Paklaida, %
$P_{max}$ , MPa	11,559	11,571	-0,104
$p_{me}$ , MPa	1,1996	1,1995	0,008
$P_e$ , kW	47,361	47,36	0,002
$b_e$ , g/kWh	220,62	220,6	0,009
$\eta_e$	0,3816	0,3815	0,013
TGM, °C	946,76	946,72	0,004
TTM, °C	887,18	887,13	0,006

Paaškinimai:  $P_{max}$  – maksimalus ciklo slėgis;  $p_{me}$  – vidutinis efektyvusis slėgis;  $P_e$  – galia;  $b_e$  – specifinis degalų sunaudojimas;  $\eta_e$  – terminis naudingo veikimo koeficientas (NVK); TGM – išmetamųjų dujų (ID) temperatūra išmetimo kolektoriuje; TTM – ID temperatūra už turbinos.

Analizuojant skaičiavimų, atliktų naudojant nustatytas  $m$  ir  $\varphi_z$  (pagal  $p_{mi}$  ir  $p_{me}$ ) reikšmes, rezultatus, matomi artimi rezultatai, kurių didžiausias nuokrypis neviršija  $\pm 0,1$  % ribų. Esant santykinai nedidelei paklaidai, galima teigti, jog VDV parametrai pagal Bulaty ir Glanzman metodiką priimtiniu tikslumu skaičiuojami tiek pagal  $p_{mi}$ , tiek pagal  $p_{me}$ .

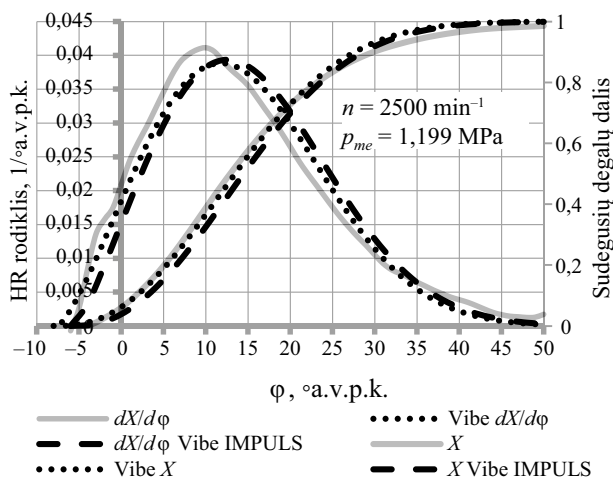
4 lentelėje pateiktos HR parametrų  $m$  ir  $\varphi_z$  reikšmės, VDV darbo parametrų skaičiavimo rezultatai ( $P_{max}/p_{me}$ ) bei jų palyginimas su eksperimentiniais duomenimis.

4 lentelė. VDV darbo parametrų matematinio modeliavimo (pagal  $P_{max}/p_{me}$ ) ir eksperimento rezultatų palyginimas  
Table 4. The comparison of simulated engine work parameters (according  $P_{max}/p_{me}$ ) and experimental results

$m = 1,240$ ir $\varphi_z = 55,85^\circ$ ( $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ , $p_{me} = 1,1996 \text{ MPa}$ )					
$P_{max}$ , MPa	$P_{max}$ , MPa	$p_{me}$ , MPa	$P_e$ , kW	$b_e$ , g/kWh	$\eta_e$
MM	11,571	1,1995	47,4	220,6	0,3815
Eksperimentiniai	11,560	1,1996	47,50	220,0	0,3823
$\delta$ , %	0,095	-0,008	-0,3	0,277	-0,197

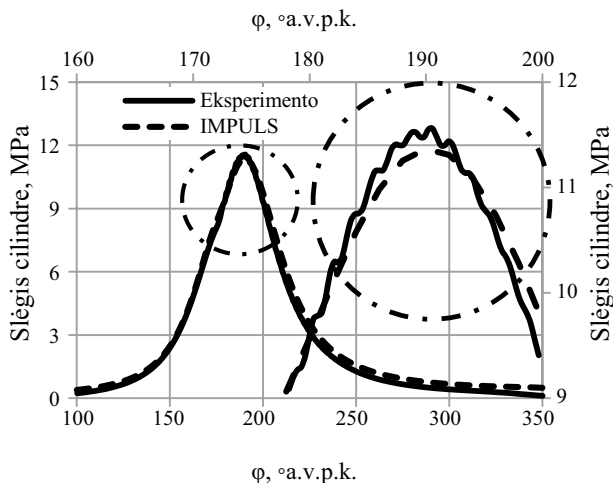
MM būdu gautų VDV darbo rodiklių paklaida neviršija  $\pm 0,3$  % ribų lyginant su eksperimentiniais duomenimis (4 lentelė). Dėl šios priežasties būtų galima teigti, jog 1,9 TDI VDV aukštos apkrovos taške matematinis modelis yra suderintas ir galima atlikti tolesnius skaičiavimus bei pasikliauti gautais rezultatais, tačiau itin svarbu palyginti pagal BURN ir pagal IMPULS gautas Vibe HR charakteristikas (5 pav.) bei IMPULS ir eksperimentines indikatorines diagramas (6 pav.).

Analizuojant BURN ir IMPULS programomis gautų Vibe HR charakteristikų duomenis, pastebimas santykinai žemo lygio nesutapimas. Šis veiksnys, kaip rodo VDV darbo parametrų MM ir eksperimento rezultatų paly-



5 pav. AVL BOOST BURN ir IMPULS programa gautų HR ir pilnutinio degalų degimo charakteristikų palyginimas

Fig. 5. The comparison of heat release and total fuel combustion characteristics simulated with AVL BURN and IMPULS



6 pav. Eksperimentinių ir IMPULS gautų slėgio cilindre charakteristikų palyginimas

Fig. 6. The comparison of experimental pressure trace and IMPULS simulated

ginimo duomenys (4 lentelė), netrukdo suderinti VDV matematinio modelio pagal gautuosius eksperimentinius duomenis.

Atlikus MM ir eksperimento HR charakteristikų bei indikatorinės diagramos analizę, kuri parodo santykinai žemo lygio nesutapimą, galima teigti, jog 1,9 TDI VDV aukštos apkrovos taške IMPULS matematinis modelis yra suderintas su eksperimentiniais duomenimis ir leidžia, remiantis nustatytais HR parametrais, modeliuoti indikatorinę diagramą gana tiksliai. Tačiau, siekiant vykdyti MM tyrimus platesniame apkrovų diapazone, ne ką mažiau svarbesnis VDV darbo parametrų suderinamumas dirbant dalinių apkrovų režimais.

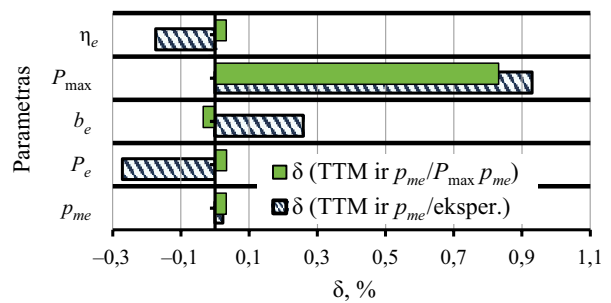
Pagal eksperimentinius dalinių apkrovų režimų duomenis sutvarkius pradinis IMPULS duomenų blokus, toliau atliekamas MM. Su eksperimentiniais duomenimis suderintas IMPULS matematinis modelis su aukštos apkrovos taške nustatytais  $m$  ir  $\varphi_z$  reikšmėmis (pagal  $P_{\max}/P_{me}$ ), dirbant dalinių apkrovų režimais, VDV darbo parametrų matematinę modeliavimą leidžia atlikti:

- $P_{me}$ ,  $P_e$ ,  $b_e$ ,  $\eta_e$  – neviršijant  $\pm 0,4$  % paklaidų ribų. Aukštas tikslumas pasiekiamas nežymiai koreguojant trinties nuostolius;
- $P_{\max}$  – neviršijant  $\sim 2$  % paklaidų ribų, dominuojanti paklaidų riba 0,1–0,5 %;
- $P_k$  – neviršijant iki 7,5 % paklaidų ribų. Tokia, santykinai aukšta, paklaida VDV dirbant dalinės apkrovos režimais, atliekant MM, buvo tikėtina. Šios paklaidos dydžiui darė įtaką pradinių pripūtimo duomenų nurodymo sudėtingumas. Tokie duomenys kaip įsiurbimo organų bei praeinamojo skerspūvio plotas, dirbant dalinės apkrovos režimais, yra nekoreguojami TK NVK ir kt.

Daugelio VDV darbo parametrų MM programų pradinių duomenų masyvai reikalauja indikatorinės diagramos arba atskirų jos duomenų, arba HR charakteristikos, kuri savo ruožtu nustatoma pagal indikatorinės diagramos duomenis arba aprašoma Vibe funkcija. Indikatorinio slėgio nustatymas yra vienas iš svarbiausių parametrų (visų pirma HR charakteristikos ir jos parametrų nustatymo atžvilgiu) VDV tyrimų srityje, tačiau šio parametro nustatymo prietaisai ir įranga yra santykinai brangūs, o atskiros dalys turi naudojimo resurso limitą.

Vienas iš būdų supaprastinti VDV tyrimus, taip pat sumažinti išlaidas – taikyti IMPULS matematinę modelį, kuriame svarbūs HR rodikliai  $m$  ir  $\varphi_z$  būtų nustatomi taikant modifikuotą Bulaty ir Glanzman metodiką. Objektivyus ir jautrus darbo proceso pokyčiams cilindre rodiklis yra ID temperatūra, kuria būtų galima pakeisti  $P_{\max}$  nustatant HR rodiklius  $m$  ir  $\varphi_z$  pagal Bulaty ir Glanzman metodiką. Pagal ID temperatūrą nustatyta  $\varphi_z = 55,85^\circ$  (paklaida  $\sim 0,27$  %) ir  $m = 1,212$  (paklaida  $\sim 2,26$  %), šio parametro paklaida šiuose tyrimuose vertinama kaip santykinai ryški, kuri daro tiesioginę įtaką  $P_{\max}$  ir duoda apie 1 % paklaidą (7 pav.). Paveiksle pavaizduoti VDV darbo parametrų MM rezultatų palyginimas taikant skirtingą  $m$  ir  $\varphi_z$  nustatymo metodiką bei palyginimas su eksperimentiniais duomenimis.

Atlikto matematinio modeliavimo dirbant dalinių apkrovų režimais rezultatai rodo, jog TTM/ $P_{me}$  metodika pasižymi artimais skaičiavimų rezultatais lyginant su  $P_{\max}/P_{me}$  metodika bei autentiška Bulaty ir Glanzman metodika  $P_{\max}/P_{mi}$ .



7 pav. Pagal skirtingą metodiką nustatytų VDV darbo parametrų palyginimas su eksperimentiniais duomenimis  
Fig. 7. The comparison of engine work parameters estimated using different methodology with experimental data

Su eksperimentiniais duomenimis suderintas IMPULS matematinis modelis (su rodikliais  $m$  ir  $\varphi_z$ , nustatytais pagal TTM/ $P_{me}$ ), dirbant dalinės apkrovos režimais, VDV darbo parametrų matematinę modeliavimą leidžia atlikti:

- $P_{me}$ ,  $P_e$ ,  $b_e$ ,  $\eta_e$  – neviršijant  $\pm 0,35$  % paklaidų ribų. Aukštas tikslumas pasiekiamas nežymiai koreguojant trinties nuostolius;
- $P_{\max}$  – neviršijant iki 6,0 % paklaidų ribų, dominuojanti paklaidų riba  $\pm 2$ –2,5 %;
- $P_k$  – neviršijant iki 7,8 % paklaidų ribų. Tokia, tikėtina, santykinai aukšta, paklaida, dirbant dalinės VDV apkrovos režimais, atliekant MM, atsirado dėl tokių pat priežasčių, kurios nurodytos skaičiavimų pagal  $P_{\max}/P_{me}$  metodiką rezultatų apibendrinime.

Atsižvelgiant į šiame skyriuje atliktą HR parametrų  $m$  ir  $\varphi_z$  nustatymo analizę ir MM rezultatų adekvatumą eksperimentiniams rezultatams, galima teigti, jog pasirinkta ir modifikuota Bulaty ir Glanzman metodika gan tiksliai leidžia atlikti VDV, dirbančio dyzelinu, darbo proceso rodiklių matematinę modeliavimą. Svarbu paminėti, jog tinkamai nustačius HR rodiklių  $m$  ir  $\varphi_z$  reikšmes ir žinant eksperimentinius VDV duomenis (apkrovos ir kt.), galima matematiškai modeliuoti vieno iš svarbiausių rodiklio – indikatorinio slėgio cilindre absoliučias reikšmes esant norimam alkūninio veleno pasisukimo kampui.

## Išvados

Pasirinktas tyrimo algoritmas leidžia, remiantis aukštos apkrovos ( $p_{me} = 1,1996$  MPa,  $n = 2500$  min<sup>-1</sup>) režimo rodikliais, modeliuoti 1,9 TDI 1Z VDV, jam dirbant dalinių apkrovų režimais, darbo proceso parametrus gan tiksliai:

- $P_{me}$ ,  $P_e$ ,  $b_e$ ,  $\eta_e$  – neviršijant  $\pm 0,4$  % paklaidų ribų;
- $P_{\max}$  – neviršijant  $\sim 2$  % paklaidų ribų, dominuojanti paklaidų riba 0,1–0,5 %;
- $P_k$  – neviršijant iki 7,5 % paklaidų ribų.

Vykiant tyrimą sklandžiai modifikuotas Bulaty ir Glanzman HR parametrų  $m$  ir  $\varphi_z$  nustatymo metodas pasirenkant ID temperatūrą.

Bendruoju atžvilgiu galima teigti, jog sudarytas 1Z VDV modelis gali būti taikomas tolesniuose tyrimuose ir jų plėtoje.

### Padėka

Straipsnio autoriai dėkoja kompanijai AVL List GmbH už suteiktą galimybę panaudoti modeliavimo programą (AVL BOOST).

### Acknowledgements

Authors are grateful to AVL List GmbH Company for the possibilities to use their simulation software (AVL BOOST).

### Literatūra

- Bulaty, T.; Glanzman, W. 1985. Opredelenija parametrov teplovidelenija na osnove zakona sgoranija Vibe. Ekspresinformacija, in *Porshnevije i gazoturbinnije dvigateli 11*. Vserossijskij institut nauchnoi i technicheskoi informaciji, Moskva.
- Yeliana, Y.; Cooney, C.; Worm, J.; Michalek, D. J.; Naber, J. D. 2011. Estimation of double-Wiebe function parameters using least square method for burn durations of ethanol-gasoline blends in spark ignition engine over variable compression ratios and EGR levels, *Applied Thermal Engineering* 31(14–15): 2213–2220.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.01.040>
- LST EN 590:2014. *Automobiliniai degalai. Dyzelinai. Reikalavimai ir tyrimo metodai*.
- Merker, G.; Schwarz, C.; Stiesch, G.; Otto, F. 2006. *Simulating combustion: simulation of combustion and pollutant formation for engine-development*. Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-25161-3.
- Mollenhauer, K.; Tschoeke, H. 2010. *Handbook of Diesel engines*. Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-89082-6.  
<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-89083-6>
- Pešić, R. B.; Davinić, L. J.; Taranović, D. S.; Miloradović, D. M.; Petković, D. D. 2010. Experimental determination of double wiebe function parameters in diesel engines with biodiesel, *Thermal science* 14: S197–S208.  
<http://dx.doi.org/10.2298/TSCI100505069P>
- Vibe, I. I. 1962. *Novoe o rabočem cikle dvigatelei*. Moskva: Gosudarstvennoe nauchno-technicheskoe izdatelstvo mashinostroitelnoi literaturi.
- Woschni, G.; Anisits, F. 1974. Experimental investigation and mathematical presentation of rate of heat release in diesel engines dependent upon engine operating conditions, *SAE Technical Paper* 740086. <http://dx.doi.org/10.4271/740086>

## THE RESEARCH OF SIMPLIFICATION OF 1.9 TDI DIESEL ENGINE HEAT RELEASE PARAMETERS DETERMINATION

J. Žaglinskis, K. Lukács, Á. Bereczky, P. Rapalis

### Abstract

The investigation of modified methodology of Audi 1.9 TDI 1Z diesel engine heat release parameters' determination is represented in the article. In this research the AVL BOOST BURN and IMPULS software was used to treat data and to simulate engine work process. The reverse task of indicated pressure determination from heat release data was solved here. T. Bulaty and W. Glanzman methodology was modified for purpose to simplify the determination of heat release parameters. The maximal cylinder pressure, which requires additional expensive equipment, was changed into the objective indicator – exhaust gas temperature. This modification allowed to simplify the experimental engine tests and also gave simulation results in an error range up to 2% of main engine operating parameters.

The study results are assessed as an important point for the simplification of engine test under field conditions.

**Keywords:** Audi 1.9 TDI 1Z, heat release parameters, engine simulation.