



18-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos

TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA,

vykusios 2015 m. gegužės 6 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 18th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'

TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT, 6 May 2015, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 18-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»

ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК, 6 мая 2015 г., Вильнюс, Литва

DEGINIŲ RECIRKULIACIJOS ĮTAKA DYZELINŲ IR B30 MIŠINIŲ DIRBANČIO VARIKLIO DARBO RODIKLIAMS

Justas Žaglinskis¹, Vygintas Daukšys², Paulius Rapalis³, Mindaugas Melaika⁴

¹Vandens transporto technologijų laboratorija, Klaipėdos universitetas, H. Manto 84 Klaipėda, Lietuva

^{2,3}Jūros chemijos laboratorija, Klaipėdos universitetas, H. Manto 84 Klaipėda, Lietuva

⁴Automobilių transporto katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas, J. Basanavičiaus 28 Vilnius, Lietuva

El. paštas: ¹j.zaglinskis@gmail.com; ²vygintas.dauksys@ku.lt; ³paulius.rapalis@ku.lt; ⁴mindaugas.melaika@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje pateikti išmetamųjų deginių recirkuliacijos (EGR) įtakos dyzelinio variklio Audi 1,9 TDI, dirbančio skirtingais degalais, energetiniams ir aplinkosauginiams parametrams tyrimų rezultatai. Tyrimo tikslas susiformavo siekiant išsiaiškinti EGR sistemos poveikį dyzelinio variklio (su tiesioginio degalų įpurškimo sistema) darbo parametrams. Nustatyta, jog energetiniai variklio parametrai (b_e , η_e , λ) pagerėjo atjungus EGR sistemą, tačiau buvo užfiksuotas stiprus (iki 65 %) vieno iš itin kenksmingų komponentų – azoto oksidų koncentracijos padidėjimas išmetamuosiuose deginiuose. Tuo pat metu buvo registruojamas 10–25 % dūmingumo rodiklio sumažėjimas pagal matavimo skalę.

Reikšminiai žodžiai: dyzelinis variklis, išmetamųjų deginių recirkuliacija, aplinkosauginiai parametrai, energetiniai parametrai.

Įvadas

Ozono ardymas, fotocheminis smogas, rūgštus lietus ir kiti žalingi reiškiniai yra stipriai susiję su azoto oksidų (NO_x) emisija į aplinką (Annamalai, Puri 2007). NO_x sąvoka apibrėžiami NO ir NO_2 . Tiek NO, tiek ir NO_2 yra toksiniu poveikiu pasižyminčios dujos, pastarosios net 5 kartus toksiškesnės nei NO. Tačiau didžiausias dėmesys vis dėlto tenka NO susidarymo valdymui prieš ir po degimo proceso, nes dideli NO_2 kiekiai susidaro oksiduojant NO (Levendis *et al.* 1994).

NO formuojasi degimo proceso metu, aukštų temperatūrų zonose. Labiausiai paplitęs NO formavimosi mechanizmas pasiūlytas Zeldovič (Heywood 1988). Pagrindinis NO šaltinis yra atmosferinio azoto oksidacijos reakcijos produktas. NO_x formavimasis įtakojamas atominio deguonies, kuris susidaro degimo proceso metu aukštose temperatūros zonose skylančios deguonies molekulėms:



Vienas iš didžiausių NO_x šaltinių – transporto sektorius, kuriame dyzelinu varomos transporto priemonės sudaro pagrindą. Praktiškai visas ES krovinių ir keleivių

pervežimo transportas yra varomas dyzelinu, o lengvųjų automobilių dalis apie 55 %, skirtingose ES narėse viršija 70 % (International Council on Clean Transportation 2013). NO_x susidarymas dyzeliniuose varikliuose yra aukštos temperatūros įtakojamas reiškinys, vykstantis degimo kameroje temperatūrai pasiekus 2000 °K.

Siekiant sumažinti NO_x emisiją išmetamuosiuose deginiuose būtina kontroliuoti aukštų temperatūrų pikus. Vienas iš paprasčiausių būdų sumažinti NO_x emisiją vėlinant degalų įpurškimą į degimo kamerą. Šis būdas yra veiksmingas, tačiau didina degalų sąnaudas, o tai verčia naudoti efektyvesnius NO_x mažinimo metodus, tokius kaip išmetamųjų deginių recirkuliacija (EGR). Ilgėjanti užsiliepsnojimo trukmė, didėjanti šiluminė talpa ir į cilindrą pripučiamo oro praskiedimas inertinėmis dujomis yra pagrindiniai veiksniai, nusakantys NO_x emisijos mažinimo mechanizmo principą panaudojant EGR (Agrawal *et al.* 2004). Išmetamųjų deginių (ID) dalies sugrąžinimas į cilindrą padeda sumažinti NO_x emisiją, tačiau pastebimas kietųjų dalelių (PM) emisijos padidėjimas (Park, Bae 2014; Maiboom *et al.* 2008). Siekiant didžiausio efektyvumo kartu su EGR naudojami PM filtrai. Didelė dalis automobilių, važinėjančių keliais turi EGR sistemas, tačiau nėra aprūpinti PM filtrais. Dėl šios priežasties kyla poreikis atlikti dyzelinio variklio, dirbančio su EGR sistema ir be jos, darbo parametru tyrimus.

Tyrimai atlikti panaudojant automobilio paskirties dyzelinį variklį su EGR sistema ir atjungus ją. Atsižvelgiant į mineralinių degalų su didesne biokomponento dalimi panaudojimo transporto perspektyvą, panaudotas rapso metilesterio ir mineralinio dyzelino mišinys B30, kurio variklinių bandymų duomenys palyginti su mineralinio dyzelino duomenimis.

Tyrimų metodika. Tyrimuose panaudotas „Audi“ dyzelinis 1,9 TDI 4 cilindrų 1Z tipo variklis. Variklis su vieno tūrio degimo kamera, esančia stūmoklyje (tiesioginis degalų įpurškimas), aprūpintas turbokompresoriniu oro pripūtimo agregatu, turintis EGR bei elektroninę valdymo (EVS) sistemas. 1,9 TDI variklio pagrindiniai techniniai duomenys pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Variklio 1,9 TDI pagrindiniai techniniai duomenys

Parametras	Dimensija	Reikšmė
Variklio darbinis tūris	cm ³	1896
Cilindrų skaičius	–	4
Suspaudimo laipsnis	–	19,5
Maksimali galia	kW	66 (4000 min ⁻¹)
Sukimo momentas	Nm	180 (2000–2500 min ⁻¹)
Vidutinis efektyvusis slėgis	MPa	1,19 (prie 180 Nm)
Cilindro skersmuo	mm	79,5
Stūmoklio eiga	mm	95,5

Bandymuose panaudotas mineralinis dyzelinas su 5 % RRME priedu (toliau D), atitinkantis standarto LST EN 590:2009+A1 reikalavimus, ir jo mišinys B30 su rapso metilesteriu, atitinkančiu LST EN 14214 standarto reikalavimus. Pagrindinės fizikinės D ir B30 mišinio savybės pateiktos 2 lentelėje.

2 lentelė. Pagrindinės fizikinės degalų savybės

Rodiklis	Dimensija	Dyzelinas	B30
Tankis prie 15 °C	kg/m ³	840	853,4
Klampus prie 40 °C	mm ² /s	2,52	2,99
Šilumingumas (žem.)	MJ/kg	43,44	40,92
El. sudėtis (C/H/O)	%	85,9/13,0/0,7	80,98/13,49/4,46

Tyrimai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VGTU) Automobilų transporto katedros (ATK) variklių laboratorijoje panaudojant automatizuotą stendą KH-5543 su svarstykliniu dinamometru, variklio sukimo momentui nustatyti. Stende kaip variklio stabdis naudojamas elektrinis asinchroninis variklis su faziniu rotoriumi, skystiniu reostatu ir dinamometru. Maksimalus stendo matuojamas sukimo momentas – 440 Nm, apkrovos galia 125 kW. Sukimo momento matavimo paklaida sudaro 0,8 % nuo išmatuotos reikšmės.

3 lentelė. Dujų analizatoriaus MAHA MET 6.3 matavimo diapazonas ir tikslumas

Matuojami komponentai	CO	CO ₂	CH	O ₂	NO _x
Matavimo diapazonas	0–15 % (tūr.)	0–20 % (tūr.)	0–2000 ppm (Heksanas, tūr.) 0–4000 ppm (Propanas, tūr.)	0–25 % (tūr.)	0–5000 ppm (tūr.)
Matavimo tikslumas	0,03 % (tūr.)	0,05 % (tūr.)	10 ppm (tūr.)	0,1 % (tūr.)	32–120 ppm (tūr.)
Maksimali skir. geba	0,001 % (tūr.)	0,01 % (tūr.)	10 ppm (tūr.)	0,01 % (tūr.)	1 ppm (tūr.)
Matavimo principas	IR spindulių	IR spindulių	IR spindulių	Elektrochem.	Elektrochem.
Lambda reikšmė	Pateikimo diapazonas 0,5–9,999 / skir. geba: 0,001 / skaičiuojama remiantis Brettschneider				
Kietųjų dalelių neskaidrumo matavimo diapazonas	0,0001–3,000 m ⁻¹ (0,01–700 mg/m ³)				
Matavimo metodas / matavimo tikslumas / PM dydis	Išskaidytos šviesos / 0,0001 m ⁻¹ (0,01 mg/m ³) / 70–10 000 nm				

Variklio išmetamųjų deginių analizei buvo panaudoti MAHA MET 6.3 ir AVL DiCom 4000 ID analizatoriai, prietaisų matavimo diapazonas ir tikslumas pateikti atitinkamai 3 ir 4 lentelėse. ID temperatūra buvo matuojama termopora TP-02A, kuri turi tiesioginį ryšį su matavimo modulių Datalogger DL-2000. Matavimo diapazonas 0–650 °C.

Degalų sąnaudos buvo matuojamos elektroninėmis SK-5000 svarstyklėmis, kurių maksimali svėrimo riba – 5000 g, padalos vertė – 1 g. Valandinio degalų sunaudojimo matavimo tikslumas siekia 0,5 %.

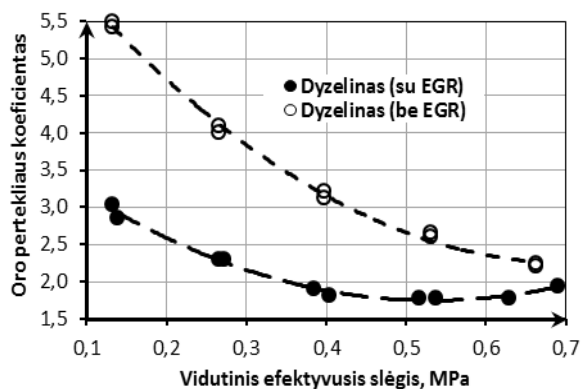
4 lentelė. Dujų analizatoriaus AVL DiCom 4000 matavimo diapazonas ir tikslumas

	Matavimo diapazonas	Skiriamoji geba
Neskaidrumas	0...100 %	0,1 %
Absorbcijos koef. k	0...99,99 m ⁻¹	0,01 m ⁻¹
Azoto oksidai	0–5000 ppm (tūr.)	1 ppm
Angliavandeniliai	0–20 000 ppm (tūr.)	1 ppm
Anglies monoksidas	0–10 % (tūr.)	0,01 % (tūr.)
Anglies dioksidas	0–20 % (tūr.)	0,1 % (tūr.)
Degūonis	0–25 % (tūr.)	0,01 % (tūr.)
Oro pertekliaus koef.	0–9,999	0,001

Tiriamąjo variklio apkrovos diapazonas siekė nuo $p_{me} = 0,133$ iki $p_{me} = 0,663$ MPa (dirbant $n = 2500$ min⁻¹ režimu), 20 Nm žingsniu matuojami 5 apkrovos taškai nuo 20 Nm iki ~100 Nm.

EGR sistemos funkcionavimo sustabdymas buvo atliekamas kanale tarp išmetimo ir įsiurbimo kolektorių įstatant metalinę pertvarą.

Tyrimų rezultatai ir analizė. Oro pertekliaus koeficientas (λ) yra vienas iš svarbiausių parametru variklio darbo tyrimuose. Šis parametras ypač svarbus tyrimuose, susijusiuose su EGR panaudojimu, ir leidžia įvertinti oro, dalyvaujančio degimo procese, kiekį (Mollenhauer, Tschoeke 2010). Dujų analizatoriumi AVL DiCom 4000 buvo nustatytos λ reikšmės varikliui dirbant D. λ matavimų duomenys (1 pav.) atskleidė kaip EVS, priklausomai nuo variklio apkrovos sąlygų, reguliuoja EGR vožtuvo pralaidumą. Vertinant grafinį λ matavimo duomenų pasiskirstymą, galima teigti, jog EGR vožtuvo pralaidumas pradedamas reguliuoti variklio vidutiniam efektyviajam slėgiui (apkrovai) pasiekus $p_{me} = 0,4$ – $0,5$ MPa ($P_e = \sim 16$ – 19 kW) reikšmę. Tai pagrindžia λ duomenų pasikeitimo stabilizavimasis ties minėtomis variklio apkrovos reikšmėmis bei toliau sekantis jų augimas.

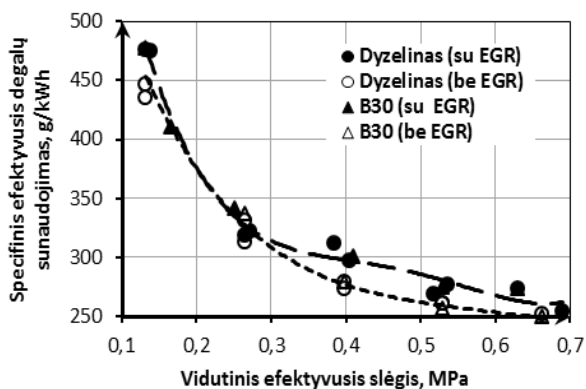


1 pav. λ priklausomybė nuo p_{me} , varikliui dirbant mineraliniu dyzelinu režimais $p_{me} = 0,133 - 0,689$ MPa, $n = 2500$ min⁻¹

Varikliui dirbant be EGR, λ reikšmės visame tiriamajame apkrovos diapazone 1,2–1,8 karto didesnės lyginant su atveju kai EGR sistema funkcionuoja. Šis λ pokytis leidžia spręsti apie būsimą energetinių ir aplinkosauginių parametrų pasikeitimo pobūdį (Agarwal *et al.* 2011; Saleh 2009).

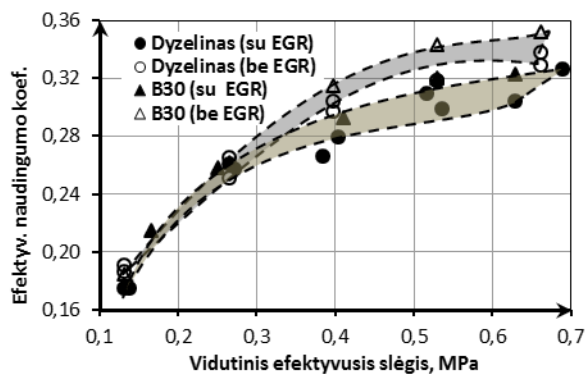
Varikliui dirbant vidutinės ir aukštesnės apkrovos režimais, lyginamųjų degalų sąnaudų (b_e) parametras yra jautrus λ pokyčiui. Šį faktą pagrindžia $b_e = f(p_{me})$ priklausomybė. Varikliui dirbant be EGR apkrovos režimais $p_{me} = 0,4 - 0,6$ MPa, b_e sumažėja atitinkamai nuo 9 % iki 7 % (2 pav.). Apkrovai pasiekus artimą $p_{me} = 0,7$ MPa reikšmę, stebimas λ reikšmių suartėjimas, kuris sąlygoja b_e reikšmių suartėjimą.

Variklio dirbančio B30 mišiniu b_e parametras, atsižvelgiant į EGR sistemos pokyčius, kinta analogiškai kaip ir dirbant D (2 pav.). Varikliui dirbant padidintos biokomponento dalies degalais stebimas artimos b_e reikšmės lyginant su variklio darbu D. Toks b_e reikšmių išsibarstymo charakteris suteikia tvirtą pagrindą efektyviam degalų panaudojimui. Tai pagrindžia efektyviojo naudingumo koeficiento (η_e) priklausomybė $\eta_e = f(p_{me})$, kuri pateikta 3 paveiksle.



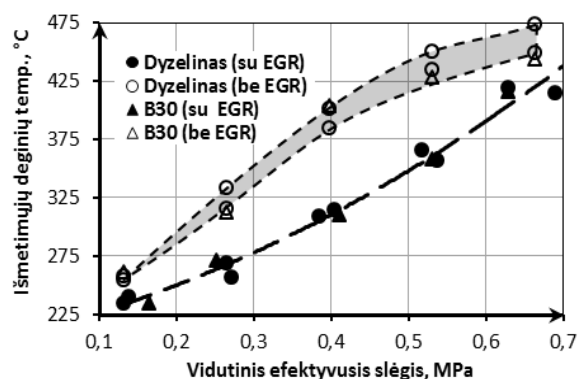
2 pav. b_e priklausomybė nuo p_{me} , varikliui dirbant skirtingais degalais, $p_{me} = 0,133 - 0,689$ MPa, $n = 2500$ min⁻¹

Ryškesni skirtumai pastebimi apkrovai pasiekus 0,4–0,6 MPa reikšmes. Varikliui dirbant B30 mišiniu ir D be EGR sistemos, minėtame apkrovos diapazone η_e išauga vidutiniškai iki 2–3 %. Didžiausiomis η_e reikšmėmis pasižymi variklio darbas B30 mišiniu be EGR sistemos.



3 pav. η_e priklausomybė nuo p_{me} , varikliui dirbant skirtingais degalais, $p_{me} = 0,133 - 0,689$ MPa, $n = 2500$ min⁻¹

Recirkuliuojamų deginių įtaka degimo produktų cilindre temperatūrai, kuri lemia NO_x susidarymo intensyvumą, gali būti įvertinta matuojant ID temperatūrą. Atjungus EGR sistemą šis rodiklis, varikliui dirbant tiriamaisiais apkrovos režimais, padidėja iki ~25 % (4 pav.). Skirtingų degalų panaudojimas praktiškai neturi įtakos ID temperatūrai.



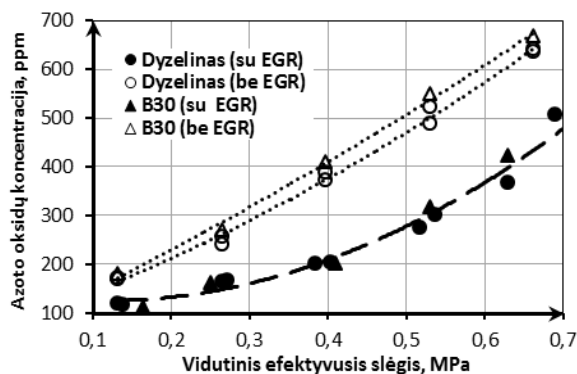
4 pav. ID temperatūros priklausomybė nuo p_{me} , varikliui dirbant skirtingais degalais, $p_{me} = 0,133 - 0,689$ MPa, $n = 2500$ min⁻¹

Atjungus EGR sistemą cilindre esantį degųjų mišinį sudaro didesnis kiekis šviežio oro, kuris gerina degimo procesą, tokiu būdu didindamas termodinaminę temperatūrą, o taip pat didina atmosferinio azoto, dalyvaujančio oksidacijos reakcijose, kiekį (Mollenhauer and Tschoeke 2010). Šios dvi pagrindinės sąlygos lemia aukštesnius NO_x emisijos rodiklius, kurių ryškus pokytis pavaizduotas 5 paveiksle. Atjungus EGR sistemą stebimas stiprus NO_x koncentracijos padidėjimas: varikliui dirbant minimalios ir maksimalios tiriamosios apkrovos režimais padidėjimas siekia iki ~40 %, o dirbant dalinės tiriamos apkrovos režimais net iki ~65 %.

EGR sistema užtikrina artimas NO_x rodiklių reikšmes tiek D, tiek ir B30 mišinio panaudojimo atveju, tačiau skirtumai išryškėja atjungus EGR sistemą – B30 atveju NO_x koncentracijos maksimalus padidėjimas siekia ~6 %.

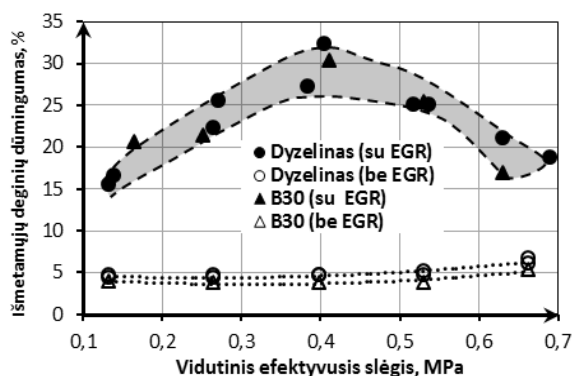
Mokslinėje literatūroje plačiai sutinkamas (Zhang *et al.* 2008; Labeckas, Slavinskas 2006; Labeckas, Slavinskas 2013; Ushakov, Valland 2013) panašaus pobūdžio NO_x emisijos rodiklių pasiskirstymas D ir biodegalų mišinius panaudojant dyzeliniuose varikliuose su tiesio-

ginio degalų įpurškimo sistema. NO_x rodiklių padidėjimą B30 panaudojimo atveju galima paaiškinti (Hoekman and Robbins 2012) temperatūrinių pikų išaugimu, kurie sąlygojami greitesnio (intensyvesnio) degimo proceso. O taip pat dėl B30 cheminės struktūros skirtumų, kurie atsiranda dėl O_2 kiekio ir lemia NO_x susidarymui palankų liesesnį degalų–oro mišinį.



5 pav. NO_x koncentracijos priklausomybė nuo p_{me} , varikliui dirbant skirtingais degalais, $p_{me} = 0,133 - 0,689 \text{ MPa}$, $n = 2500 \text{ min}^{-1}$

EGR sistema, recirkuliuodama ID atgal į cilindrą, mažina oro, dalyvaujančio degimo procese kiekį ir tuo pačiu mažina temperatūrą variklio cilindre. Šis faktorius sąlygoja nepilno degimo produktų (NDP) kiekio padidėjimą ID (Mollenhauer, Tschoeke 2010).



6 pav. SM priklausomybė nuo p_{me} , varikliui dirbant skirtingais degalais, $p_{me} = 0,133 - 0,689 \text{ MPa}$, $n = 2500 \text{ min}^{-1}$

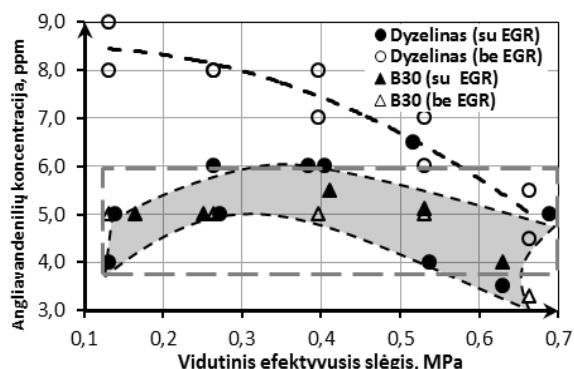
ID dūmingumas (SM) yra vienas jautriausiai reaguojančių į EGR sistemos darbą rodiklių. Tai pagrindžia atliktų bandymų rezultatai (6 pav.).

Šių bandymų duomenys rodo, jog SM rodiklio pokytis praktiškai nepriklauso nuo panaudotų degalų rūšies. Tačiau EGR sistemos atjungimas duoda 10–25 % pagerėjimą (pagal rodiklio matavimo skalę). SM charakteristika gerai atspindi EVS darbą EGR vožtuvo pralaidumo atžvilgiu.

Dyzeliniai varikliai dėl lieso degiojo mišinio savybių išmeta tik penktadalį angliavandenilių (CH) emisijos lyginant su kibirkštiniais varikliais (Fattah *et al.* 2013). Du pagrindiniai veiksniai, sąlygojantys CH junginių emisiją dyzeliniame variklyje yra: 1) per liesas degusis mišinys indukcijos periodo metu; 2) blogas degalų ir oro mi-

šinio susidarymas dėl per mažo išpurškimo greičio, pavėlinantis degimo procesą. Dirbant mažos apkrovos režimais arba be apkrovos būtinas geros kokybės degusis mišinys, tai labai svarbu greitų sūkių sąlyginai mažo cilindro tūrio dyzeliniams varikliams (Fattah *et al.* 2013).

Šiuo atveju žemesnių apkrovų ($p_{me} = 0,1 - 0,4 \text{ MPa}$) diapazone stebimos aukštesnės CH koncentracijos reikšmės (7 pav.). CH emisijos rodiklio reikšmių išsibastymą praktiškai galima suskirstyti į dvi grupes: variklio be EGR sistemos, dirbančio D; likę kiti, kurių tarpusavio vertinimas dėl duomenų išsibastymo artimo matavimo prietaiso skiriamajai gebai (1 ppm) nėra tikslingi.

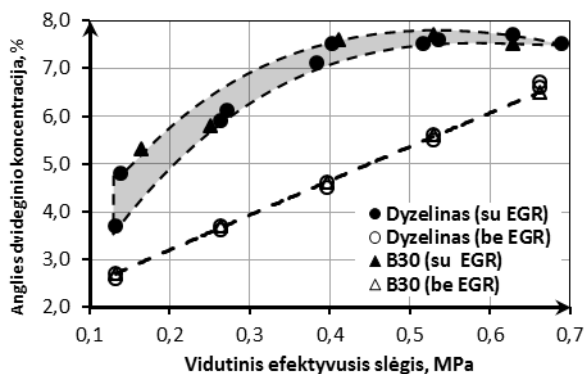


7 pav. CH koncentracijos priklausomybė nuo p_{me} , varikliui dirbant skirtingais degalais, $p_{me} = 0,133 - 0,689 \text{ MPa}$, $n = 2500 \text{ min}^{-1}$

Varikliui be EGR sistemos dirbant D, stebimas CH pokyčio (5–9 ppm diapazone) pobūdis, kuris yra sąlygotas minėtųjų priežasčių. Didėjant apkrovai mažėja λ , šis parametras apibūdina degiojo mišinio liesumo lygį ir sąlygoja CH susidarymą.

Varikliui su EGR sistema dirbant tiriamaisiais degalais, CH emisijos pokytis siekia apie 4–6 ppm reikšmes, kurios sąlygotos mažesnės vertės λ . Viena iš priežasčių, dėl kurių dyzelinis variklis be EGR sistemos, dirbantis B30 mišiniu, pasižymi mažesniu CH emisijos rodikliu, gali būti O_2 kiekis, kuris degimo proceso metu mažina nepilno degimo produktų kiekį.

Recirkuliuojami ID daro stiprią įtaką variklio, dirbančio $p_{me} = 0,1 - 0,4 \text{ MPa}$ apkrovos režimais, CO_2 emisijos rodikliui (8 pav.).



8 pav. CO_2 koncentracijos priklausomybė nuo p_{me} , varikliui dirbant skirtingais degalais, $p_{me} = 0,133 - 0,689 \text{ MPa}$, $n = 2500 \text{ min}^{-1}$

Apkrovai pasiekus $p_{me} = 0,4 - 0,5$ MPa EGR vožtuvo pralaidumas pasiekia maksimumą, toliau didėjant apkrovai recirkuliuojamų ID srautas mažinamas. Analizuojant CO₂ koncentracijos duomenis nepastebėta ryškesnio pokyčio panaudojant skirtingus degalus, tačiau EGR sistemos funkcionavimas tiriamajame variklio apkrovos diapazone 1–3 % (pagal matavimo skalę) didina CO₂ emisijos rodiklį.

Išvados

Atliktų EGR sistemos funkcionavimo įtakos dyzelinio variklio energetiniams ir aplinkosauginiams parametrams tyrimų rezultatai parodė, jog atjungus EGR sistemą:

– λ visame apkrovos diapazone išauga 1,2–1,8 karto dirbant mineraliniu dyzelinu;

– maksimalus 7–9 % b_e sumažėjimas pasiekiamas variklio apkrovai esant $p_{me} = 0,4 - 0,6$ MPa diapazone. Analogiškame variklio apkrovos diapazone pasiekiamas maksimalus η_e padidėjimas, kuris siekia 2–3 % tarp tos pačios degalų rūšies;

– NO_x koncentracija, priklausomai nuo variklio apkrovos, didėja iki 65 %. B30 panaudojimo atveju NO_x koncentracijos maksimalus padidėjimas siekia ~6 % lyginant su D panaudojimo atveju.

– SM rodiklis sumažėja 10–25 % vertinant pagal rodiklio matavimo skalę;

– dėl artimo duomenų išsibarstymo (3–9 ppm diapazone) CH koncentracijos pokyčio vertinimas nėra tikslingas;

– CO₂ koncentracija tiriamajame variklio apkrovos diapazone sumažėja 1–3 % vertinant pagal rodiklio matavimo skalę.

Literatūra

- Agarwal, D.; Singh, S. K.; Agarwal, A. K. 2011. Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on performance, emissions, deposits and durability of a constant speed compression ignition engine, *Applied Energy* 88: 2900–2907.
- Agrawal, A. K.; Singh, S. K.; Sinha, S.; Shukla, M. K. 2004. Effect of EGR on the exhaust gas temperature and exhaust opacity in compression ignition engines, *Sadhana* 29(3): 275–284.
- Annamalai, K.; Puri, I. K. 2007. *Combustion science and engineering, CRC series in computational mechanics and applied analysis*. CRC Press, New York.
- Fattah, I. M. R.; Masjuki, H. H.; Liaquat, A. M.; Ramli, R.; Kalam, M. A.; Riazuddin, V. N. 2013. Impact of various biodiesel fuels obtained from edible and non-edible oils on engine exhaust gas and noise emissions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 18: 552–567.
- Heywood, J. B. 1988. *Internal combustion engine fundamentals*. New York: Mc-Graw Hill.
- Hoekman, S. K.; Robbins, C. 2012. Review of the effects of biodiesel on NO_x emissions Fuel Processing Technology, 96: 237–249.
- International Council on Clean Transportation. 2013. *European vehicle market statistics. Pocketbook 2013*.
- Labeckas, G.; Slavinskas, S. 2006. The effect of rapeseed oil methyl ester on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions, *Energy Conversion and Management* 47: 1954–1967.
- Labeckas, G.; Slavinskas, S. 2013. Performance and emission characteristics of a direct injection diesel engine operating on KDV synthetic diesel fuel, *Energy Conversion and Management* 66: 173–188.
- Levendis, Y. A.; Pavalatos, I.; Abrams, R. F. 1994. *Control of diesel soot hydrocarbon and NO_x emissions with a particular trap*. SAE 940460.
- Maiboom, A.; Tauzia, X.; Hétet, J. F. 2008. Experimental study of various effects of exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions of an automotive direct injection diesel, *Energy* 33(1): 22–34.
- Mollenhauer, K.; Tschoeke, 2010, *Handbook of Diesel engines*, Springer Heidelberg Dordrecht, London, New York.
- Park, Y.; Bae, C. 2014. Experimental study on the effects of high/low pressure EGR proportion in a passenger car diesel engine, *Applied Energy* 133(15): 308–316.
- Saleh, H. E. 2009. Effect of exhaust gas recirculation on diesel engine nitrogen oxide reduction operating with jojoba methyl ester, *Renewable Energy* 34: 2178–2186.
- Ushakov, S.; Valland, H. 2013. Combustion and emissions characteristics of fish oil fuel in a heavy-duty diesel engine, *Energy Conversion and Management* 65: 228–238.
- Zhang, X.; Gao, G.; Li, L.; Wu, Z. 2008. Characteristics of combustion and emissions in a DI engine fueled with biodiesel blends from soybean oil, SAE 1832.