

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Justas ŽAGLINSKIS

DYZELINIŲ VARIKLIŲ, DIRBANČIŲ
ANTROS KARTOS BIODEGALŲ MIŠINIAIS,
EKSPLOATACINIŲ CHARAKTERISTIKŲ
TYRIMAI

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
TRANSPORTO INŽINERIJA (03T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNICA 2014

Disertacija rengta 2010–2014 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Sergejus LEBEDEVAS (Klaipėdos universitetas, transporto inžinerija – 03T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Transporto inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Marijonas BOGDEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – 03T).

Nariai:

prof. dr. Gvidonas LABECKAS (Aleksandro Stulginskio universitetas, transporto inžinerija – 03T),

dr. Laurencas RASLAVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, transporto inžinerija – 03T),

doc. dr. Edgar SOKOLOVSKIJ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – 03T),

dr. Adam TOROK (Budapešto technologijos ir ekonomikos universitetas, transporto inžinerija – 03T).

Disertacija bus ginama viešame Transporto inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2014 m. gruodžio 8 d. 14 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt.

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiusti 2014 m. lapkričio 7 d.

Disertaciją galima peržiūrėti interneto svetainėje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2280-M mokslo literatūros knyga

<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-722-2

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2014

© Justas Žaglinskis, 2014

j.zaglinskis@gmail.com

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Justas ŽAGLINSKIS

THE RESEARCH OF EXPLOITATION
CHARACTERISTICS OF DIESEL ENGINES
RUNNING ON SECOND GENERATION
BIOFUEL BLENDS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
TRANSPORT ENGINEERING (03T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNICA 2014

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2010–2014.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Sergejus LEBEDEVAS (Klaipėda University, Transport Engineering – 03T).

Chairman

Prof Dr Habil Marijonas BOGDEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – 03T).

Members:

Prof Dr Gvidonas LABECKAS (Aleksandras Stulginskis University, Transport Engineering – 03T),

Dr Laurencas RASLAVIČIUS (Kaunas University of Technology, Transport Engineering – 03T),

Assoc Prof Dr Edgar SOKOLOVSKIJ (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – 03T),

Dr Adam TOROK (Budapest University of Technology and Economics, Transport Engineering – 03T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Transport Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **2 p. m. on 8 December 2014**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notifications of intend defending of the dissertation was send on 7 November 2014.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the internet website <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziუმė

Disertacijos tyrimų aktualumą lemia energijos panaudojimo efektyvumo didinimas bei aplinkos taršos mažinimas transporto sektoriuje. Darbe sprendžiami eksperimentiniai, matematinio modeliavimo ir metodologiniai uždaviniai, siekiant kompleksiskai ištirti dyzelinių variklių, dirbančių II kartos RRME, alkoholio ir dyzelino mišiniais, eksploatacinius darbo rodiklius.

Disertacijoje analizuotas ir įvertintas degalų mišinių panaudojimo lengvųjų automobilių ir pagalbiniam laivo dyzeliniuose varikliuose efektas. Tiriamojo darbo problematika, tikslas, uždaviniai suformuoti išanalizavus transporto sektoriaus sandarą, svarbą oro taršos ir energijos sunaudojimo srityse bei ES strateginius planus.

Laboratorijos bei eksploatacijos sąlygomis ištirti I, II kartos biodegalų ir dyzelino mišiniai. Tyrimams panauduotuose varikliuose išbandyti butanolio ir metanolio su rapso metil/butilesteriais bei dyzelino 2 ir 3 komponentų mišiniai. Išbandyti II kartos RRME mišiniai: Sėjamosios judros (*lot. Camelina sativa*) kartu su kiaulienos RRME ir mikro dumblių (*lot. Clorella sp.*). Atlikti dyzelino ir mišinių palyginamieji variklinių savybių tyrimai. Panaudojant mišinius, energijos panaudojimo efektyvumas didėja ~1–4 %; esant šiek tiek išaugusiai NO_x koncentracijai, CO, CH koncentracijos sumažėjimas siekia iki 20 %, o deginių dūmingumas – 55–85 %.

Įvertinti terminės ir mechaninės apkrovos kriterijai, indikuojantys variklio konstrukcinį patikimumą dirbant dyzelinu ir degalų mišiniais.

Ištirta biodyzelinų oksidacinės degradacijos įtaka variklio darbo parametrms, dirbant I kartos rapso ir II *Camelina sativa* metilesterių B30 mišiniais. Efektyviam dyzelinio variklio darbui B30 mišiniais nustatytas *Camelina sativa* (8 mėn.) ir rapso RRME (14 mėn.) saugojimo laikotarpis.

Panaudojant AVL Boost, Impuls modelius sukurta metodika, kuri, esant ribotam eksperimentinių duomenų kiekiui, leidžia modeliuoti dyzelinio variklio darbo parametrus, charakteristikas. Metodikos pagrindą sudaro atvirkštinis šilumos išsiskyrimo charakteristikos pagal slėgio cilindre duomenis nustatymo uždavinio sprendimas. Sprendimui, pagal numatytą metodiką, yra būtini šilumos išsiskyrimo parametrai m ir φ_z . Jų nustatymui pakeičiama esama T. Bulaty ir W. Glanzman metodika. Nustatant m ir φ_z netiesioginiu būdu, o tai supaprastina eksperimentus, panaudota atvirkštinė pakeista metodika, skirtingomis apkrovomis dirbančio 1,9 TDI 1Z variklio išmetimo vamzdžio temperatūros santykinis pokytis bei G. Woschni bei F. Anisits metodika.

Ekspperimentais paremtu skaičiavimo būdu įvertintas mišinių panaudojimo pasirinktame Lietuvos žvejybinių laivų segmente energetinis ir aplinkosauginis efektyvumas, dyzeliną pakeičiant B30 ir B50 mišiniais.

Abstract

The relevance of dissertation research is determined increasing efficiency of energy use and reduction of environmental pollution in the transport sector. In order to accomplish the complex research of diesel engines (running on 2nd generation FAME, alcohol and diesel blends) performance indicators the experimental, simulation and methodological tasks are solved in dissertation.

The analysis and evaluation of effect of fuel blends use in passenger car and vessel auxiliary diesel engines is presented in dissertation.

The problem, aim, tasks of research work formulated after analysis of transport sector structure, the importance of air pollution and energy consumption and the EU's strategic plans.

The blends of 1st and 2nd generation biofuels were investigated using laboratory equipment and in the exploitation conditions. 2 and 3 component blends of diesel, methanol, butanol, rape methyl/butyl esters were tested in diesel engines. Tested 2nd generation FAME blends: False flax (*lat. Camelina sativa*) with pork lards FAME and sea algae (*lat. Clorella sp.*). The comparable research of parameters while engine ran on diesel and blends was carried out. In the case of blends use the energy efficiency increases ~1–4%; at slightly increased NO_x concentration the CO and CH concentrations decreased up to 20% and exhaust smoke, and smokiness decreased – 55–85%.

The evaluation of thermal and mechanical load criteria which indicate 1.9 TDI 1Z engine reliability operating on diesel fuel and blends was carried out.

There was analysed the influence of biodiesel oxidative degradation on 320 DMG work parameters while operated on B30 of 1st gen. rape and 2nd gen. *Camelina sativa* methyl esters. The storage period for efficient engine operation on B30 was determined: *Camelina sativa* – 8 and rape FAME – 14 months.

Using AVL Boost and Impuls models a methodology was developed that, in the case of limited amount of experimental data, gives possibility to simulate engine operating parameters, characteristics. The base of methodology is inverse task solution of heat release characteristics determination according in-cylinder pressure. For the solution according provided methodology the heat release parameters m and φ_z are necessary. For their determination the existing T. Bulaty and W. Glanzman methodology was modified. Indirectly determining m and φ_z that simplifies experiments the modified inverse method used also the relative change of exhaust gas pipe surface temperature while 1.9 TDI 1Z engine works on different load regimes, and G. Woschni and F. Anisits methodology.

Base on experiments the energy and environmental efficiency of B30 and B50 blends instead diesel in Lithuanian fishing vessel segment was calculated.

Žymėjimai

Simboliai

B_d	–	Valandinis degalų sunaudojimas;
b_e	–	Specifinis degalų sunaudojimas;
B_{oro}	–	Dyzelinio variklio oro sunaudojimas;
c_m	–	Stūmoklio greitis;
C_D	–	Elementinės anglies kiekis D;
C_{Biod}	–	Elementinės anglies kiekis biodyzeline;
d_1	–	Vidinės sienelės skersmuo;
d_2	–	Išorinės sienelės skersmuo;
e_m	–	Specifinė kenksmingų komponentų emisija, g/h;
e^p_m	–	Specifinė kenksmingų komponentų emisija, g/kWh;
H_U	–	Degalų žemutinė šiluminė vertė;
k_l	–	Šilumos perdavimo koeficientas;
L_0	–	Stechiometrinė konstanta;
l_0	–	Stechiometrinė konstanta vienam oro moliui;
m	–	Šilumos išsiskyrimo charakteristikos formos parametras;
M^d_g	–	Sausų deginių bendras kiekis;
m^d_g	–	Sausų degimo produktų kiekis;
$m^C_{1\text{ kg}}$	–	1 kg anglies;
$m^D_{1\text{ kg}}$	–	1 kg dyzelino;
$m^{Biod}_{1\text{ kg}}$	–	1 kg biodyzelino;
$m^C_{1\text{ kgCO}_2}$	–	CO ₂ masė sudegus 1 kg anglies;

$m_{1\text{ kgCO}_2}^D$	– CO ₂ masė sudegus 1 kg dyzelino;
$m_{1\text{ kgCO}_2}^{Biod}$	– CO ₂ masė sudegus 1 kg biodyzelino;
m_t^D	– CO ₂ masė sudegus m_t^D ;
m_t^{Biod}	– CO ₂ masė sudegus m_t^{Biod} ;
n	– Variklio sūkių dažnis;
P_e	– Variklio galia;
P_e^D	– Suminė galia pagal sunaudotą dyzelino kiekį;
P_e^{Biod}	– Suminė galia pagal sunaudotą biodyzelino kiekį;
p_{max}	– Maksimalus ciklo slėgis;
p_{me}	– Vidutinis efektinis slėgis;
p_{mi}	– Vidutinis indikatorinis slėgis;
p_K	– Pripūtimo slėgis;
P_e	– Variklio galia;
$r_1 (d_1)$	– Vidinis spindulys (skersmuo);
$r_2 (d_2)$	– Išorinis spindulys (skersmuo);
Q_g^d	– Sausų deginių tūris;
q_l	– Šilumos srautas;
q_{la1}	– Šilumos srautas nuo šilumos nešėjo į sienelę;
q_{li}	– Šilumos srautas per sienelę;
q_{la2}	– Šilumos srautas;
T_0	– Aplinkos temperatūra;
T_{f1}	– Šilumą nešančio fluido temperatūra;
T_{f2}	– Apiplaunančio fluido temperatūra;
T_{ID}	– Deginių temperatūra;
T_K	– Pripučiamo oro temperatūra;
T_{w1}	– vidinės vamzdžio sienelės paviršiaus temperatūra;
T_{w2}	– išorinės vamzdžio sienelės paviršiaus temperatūra;
w_i	– Svorio koeficientas i-tame apkrovos režime;
ΔX_{eks}	– Vidutinis skaičiuojamojo parametro pokytis eksploatacijos metu;
X_{iB_i}	– Parametro reikšmė i-tame apkrovos režime, dirbant i-tais degalais;
X_{iD}	– Parametro reikšmė i-tame apkrovos režime, dirbant dyzelinu;
V_h	– Cilindrų darbinis tūris;
V_t^D	– Suminis dyzelino tūris per eksploatacijos laiką;
V_t^{Biod}	– Suminis biodyzelino tūris per eksploatacijos laiką;
α_1	– Šilumos atidavimo koef. sieniei nuo fluido;
α_2	– Šilumos atidavimo koef. nuo sienelės fluidui;
λ	– Oro pertekliaus koeficientas;

λ_l	– Šilumos laidumo koeficientas;
δ_A	– Santykinė matavimų paklaida;
η_v	– Cilindro užpildymo oru koeficientas;
η_e	– Terminis naudingo veikimo koeficientas;
σ_A	– Absoliuti vid. kvadratinė vidurkio paklaida;
ρ_{oro}	– Oro tankis;
ρ_Σ	– Atsitiktinė absoliuti suminė paklaida;
ρ^D	– Dyzelino tankis;
ρ^{Biod}	– Biodyzelino tankis;
φ_l	– Šilumos išsiskyrimo pradžia;
$\varphi_{deg.pad.}$	– Degalų padavimo kampas;
φ_z	– Šilumos išsiskyrimo trukmė.

Santrumpos

A	– Alkoholis;
a.v.p.k.	– Alkūninio veleno pasisukimo kampas;
AAA	– Aplinkos apsaugos agentūra;
AEŠ	– Atsinaujinantys energijos šaltiniai;
ART	– Apatinis rimties taškas;
B	– Butanolis;
B100	– Gryni biodegalai;
B50/30	– Biodegalų ir mineralinio dyzelino mišinys su atitinkama biokomponento dalimi;
Biodyzelinas	– Riebiųjų rūgščių metil/etil esteris;
BME MI DEE	– Budapešto technologijos ir ekonomikos universitetas Mechanikos inžinerijos fakultetas Energetikos inžinerijos katedra (<i>vengr. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem</i>);
C	– Elementinė anglis;
CH	– Angliavandeniliai;
CH ₄	– Metanas;
CN	– Cetaninis skaičius;
CO	– Anglies monoksidas;
CO ₂	– Anglies dionoksidas;
CS	– Camelina sativa;
CSME	– Camelina sativa riebiųjų rūgščių metilesteris;
D	– Dyzelinas;
DDF	– Difuzinė degimo fazė;
DG	– Dyzelinis generatorius;
DM	– Daugiakomponenčiai mišiniai;
DME	– Dumblių riebiųjų rūgščių metilesteris;
DP	– Darbo procesas;
DV	– Dyzelinis vidaus degimo variklis;

DV	– Dyzelinis variklis;
E	– Etanolis;
EGR	– Deginių recirkuliacija;
EK	– Europos Komisija;
EP	– Europos Parlamentas;
EVS	– Elektroninė valdymo sistema;
H	– Vandenilis;
HS	– Hartridžo skalė;
ID	– Išmetamieji deginiai (deginiai);
JS	– Jodo skaičius;
KDF	– Kinetinė degimo fazė;
KME	– Kiaulienos metilesteris;
KOH	– Kalio šarmas;
KU	– Klaipėdos universitetas;
KU JI	– Klaipėdos universiteto Jūreivystės institutas;
LA	– Likutinės anglies rodiklis;
LG	– Lietuvos geležinkeliai;
M	– Metanolis;
ME	– Metilesteris;
MM	– Matematinis modeliavimas;
NaOH	– Natrio šarmas;
NO _x	– Azoto oksidai;
NP	– Naftos produktai;
NVK	– Naudingo veikimo koeficientas;
OT	– Oro tarša;
PDDC	– Pilnutinio degalų degimo charakteristika;
RBE	– Rapso riebiųjų rūgščių butilesteris;
REE	– Riebiųjų rūgščių etilesteris;
RME	– Rapso riebiųjų rūgščių metilesteris;
RR	– Riebiosios rūgštys;
RRE	– Riebiųjų rūgščių esteris;
RRME	– Riebiųjų rūgščių metilesteris;
RS	– Rūgščių skaičius;
SCME	– Vasarinės Camelina sativa riebiųjų rūgščių metilesteris;
SM	– Dūmingumas;
SP	– Sulfatuoti pelenai;
ŠD	– Šiltnamio dujos;
ŠI	– Šilumos išsiskyrimas;
ŠICh	– Šilumos išsiskyrimo charakteristika;
ŠP	– Šilumos perdavimas;
TDI	– Turbokompresorinio variklio tiesioginio įpurškimo sistema;
TGM	– Deginių temperatūra išmetimo kolektoriuje prieš turbiną;
TOE	– Tona naftos ekvivalento;
TP	– Transporto priemonė;
TS	– Transporto sektorius;

- TTM – Deginių temperatūra už turbinos;
- VGTU TIF ATK – Vilniaus Gedimino technikos universiteto Transporto inžinerijos fakultetas Automobilių transporto katedra;
- Vnt. – Vienetas;
- VRT – Viršutinis rimties taškas;
- WCME – Žieminės Camelina sativa riebiųjų rūgščių metilesteris.

Turinys

ĮVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	3
Tyrimų objektas.....	3
Darbo tikslas.....	4
Darbo uždaviniai	4
Tyrimų metodika	4
Darbo mokslinis naujumas	5
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	5
Ginamieji teiginiai.....	6
Darbo rezultatų aprobavimas.....	7
Disertacijos struktūra.....	7
Padėka	7
1. BIODEGALŲ POREIKIO IR PANAUDOJIMO APŽVALGA IR MOKSLINIŲ TYRIMŲ ANALIZĖ.....	9
1.1. Oro taršos ir energijos panaudojimo statistikos analizė.....	10
1.2. Variklio darbo parametrų pokytį sąlygojančių veiksmų, dyzeliną pakeičiant mišiniais, analizė	17
1.2.1. Biodyzelinų fizikinių ir cheminių savybių analizė	17
1.2.2. Riebiųjų rūgščių metilesterių ir jų mišinių variklinių savybių mokslinių tyrimų analizė.....	20
1.2.3. Alkoholių ir jo mišinių variklinių savybių mokslinių tyrimų analizė	24
1.2.4. Daugiakomponenčių mišinių poreikio analizė	25

1.3. Biodegalų eksploatacinių savybių analizė	27
1.4. Dyzelinio variklio darbo parametrų matematinio modeliavimo programų apžvalga.....	30
1.5. Pirmo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	34
2. DEGALŲ MIŠINIŲ TYRIMŲ METODIKA.....	37
2.1. Eksperimentinių tyrimų metodika	38
2.1.1. Dyzelinių variklių aprašas	39
2.1.2. Dyzelinių variklių bandomieji režimai	41
2.1.4. Tiesioginių parametrų nustatymo tikslumas, diapazonas, įrangos išdėstymo schemas.....	42
2.2. Netiesioginių dyzelinio variklio darbo rodiklių nustatymo metodika	47
2.3. Dyzelinio variklio matematinio modeliavimo priemonių aprašas	50
2.4. Antro skyriaus išvados	52
3. DEGALŲ MIŠINIŲ EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATŲ ANALIZĖ.....	53
3.1. Tiriamųjų biodegalų mišinių aprašas.....	54
3.2. Degalų padavimo kampo reguliavimo įtakos variklio darbo parametrms tyrimai	58
3.3. Butanolio mišinių variklinių savybių tyrimai	62
3.4. Camelina sativa biodyzelino mišinių variklinių savybių tyrimai	69
3.5. Mikro dumblių biodyzelino mišinių variklinių savybių tyrimai.....	74
3.6. Metanolio priedo degalų mišiniuose variklinių savybių tyrimai	79
3.7. Biodyzelino oksidacijos stabilumo įtakos variklio darbo parametrms tyrimas..	85
3.8. Energetinio ir aplinkosauginio efekto vertinimas.....	89
3.9. Tiriamųjų degalų mišinių apibendrintas palyginimas.....	94
3.10. Trečio skyriaus išvados	96
4. ŠILUMOS IŠSISKYRIMO CHARAKTERISTIKOS PARAMETRŲ NUSTATYMO METODIKOS KŪRIMAS	97
4.1. Šilumos išsiskyrimo modelio, atitinkančio iškeltas ribines sąlygas, parinkimas..	98
4.2. Pasirinktų šilumos išsiskyrimo modelių aprobavimas pagal eksperimentinius duomenis	100
4.3. Metodikos algoritmo formavimas ir pagrindimas	103
4.3.1. Variacinių skaičiavimų realizavimas	104
4.3.2. Išmetamųjų deginių temperatūros pasirinkimo pagrindimas	105
4.3.3. Išmetamųjų deginių temperatūros nustatymas netiesioginiais metodais	107
4.4. Praktinis metodikos pritaikymas remiantis atliktų bei kitų tyrėjų eksperimentiniais duomenimis	111
4.4.1. 1,9 TDI variklio modelio sudarymas bei šilumos išsiskyrimo parametrų nustatymo metodikos pritaikymas.....	112
4.4.2. Šilumos išsiskyrimo parametrų nustatymo metodikos pakeitimas: I etapas	114
4.4.3. Darbo parametrų modeliavimas varikliui dirbant dalinės apkrovos režimais	115
4.4.4. Šilumos išsiskyrimo parametrų nustatymo metodikos pakeitimas: II etapas	117

4.4.5. Šilumos išsiskyrimo parametrų nustatymas dyzeliniam varikliui dirbant mišiniams	119
4.5. Šilumos išsiskyrimo parametrų nustatymas iteracijos metodu	121
4.6. Ketvirto skyriaus išvados	126
BENDROSIOS IŠVADOS	127
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	129
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	141
SUMMARY IN ENGLISH.....	143
PRIEDAI.....	159
A priedas. Biodegalų poreikio ir panaudojimo apžvalga ir mokslinių tyrimų analizės medžiaga.....	160
B priedas. Biodegalų eksperimentinių tyrimų priemonių, įrangos, metodikos aprašas.....	168
C priedas. Eksperimentinių biodegalų mišinių tyrimų, rezultatų analizės medžiaga	195
D priedas. Šilumos išsiskyrimo parametrų nustatymo metodikos kūrimo pagalbinė medžiaga.....	214
E priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą disertacijoje.....	233
F priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos	247

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem.....	1
Topicality of the thesis	3
The object of research	3
The aim of the thesis	4
The tasks of thesis	4
The research methods.....	4
Scientific novelty.....	5
The practical significance of the obtained results.....	5
Defended propositions.....	6
Approval of research results.....	7
The structure of dissertation	7
Acknowledgements	7
1. THE REVIEW OF BIOFUEL DEMAND AND USE AND ANALYSIS OF SCIENTIFIC LITERATURE.....	9
1.1. Statistical analysis of air pollution and energy use.....	10
1.2. The analysis of diesel engine parameter changing factors during blends use instead diesel fuel	17
1.2.1. The analysis of biodiesel physical and chemical properties	17
1.2.2. The scientific analysis of engine properties of fatty acid methyl esters and its blends	20
1.2.3. The scientific analysis of engine properties of alcohol and its blends.....	24

1.2.4. The analysis of multicomponent blends demand.....	25
1.3. The analysis of biofuel exploitation characteristics.....	27
1.4. The review of diesel engine work parameter simulation software	30
1.5. Conclusions from Chapter 1 and formulation of the dissertation tasks	34
2. THE METHODOLOGY OF BIOFUEL BLENDS RESEARCH.....	37
2.1. The methodology of experimental research	38
2.1.1. The description of diesel engines	39
2.1.2. Diesel engine testing regimes	41
2.1.4. The accuracy, range of parameter measurement and equipment layout schemes	42
2.2. The methodology of integral parameters determination.....	47
2.3. The description of diesel engine simulation software	50
2.4. Conclusions from Chapter 2.....	52
3. THE ANALYSIS OF BLENDS EXPERIMENTAL RESEARCH RESULTS	53
3.1. The description tested biofuel blends	54
3.2. The research of fuel supply angle adjustment influence to diesel engine parameters	58
3.3. The research of butanol blends engine properties	62
3.4. The research of engine properties of Camelina sativa biodiesel blends	69
3.5. The research of engine properties of sea algae biodiesel blends	74
3.6. The research of engine properties of methanol additive in fuel blends	79
3.7. The research of biodiesel oxidation influence to diesel engine parameters.....	85
3.8. The assessment of energy and environmental effect	89
3.9. Generalized comparison of tested blends	94
3.10. Conclusions from Chapter 3.....	96
4. THE CREATION OF METHODOLOGY OF HEAT RELEASE CHARACTERISTICS PARAMETERS DETERMINATION	97
4.1. The selection heat release model corresponding to the specified boundary	98
4.2. Approval of selected heat release model according to the experimental data	100
4.3. The formation and justification of methodology algorithm.....	103
4.3.1. The realization of variation calculations.....	104
4.3.2. The justification of exhaust gas temperature	105
4.3.3. The determination of exhaust gas temperature using indirect method	107
4.4. The practical adaptation of methodology according carried out tests and other researchers experimental data.....	111
4.4.1. The formation of 1.9 TDI engine model and adaptation of heat release parameters determination methodology.....	112
4.4.2. The modification of heat release parameters determination methodology: step I.....	114
4.4.3. The simulation of diesel engine part-load work parameters	115
4.4.4. The modification of heat release parameters determination methodology: step II.....	117
4.4.5. The determination of parameters heat release parameters while diesel engine running on blends	119

4.5. The determination of parameters heat release parameters using iteration method	121
4.6. Conclusions from Chapter 4	126
GENERAL CONCLUSIONS	127
REFERENCES	129
LIST OF AUTHORS SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE DISSERTATION TOPIC	141
SUMMARY IN ENGLISH.....	141
ANNEXES	159
Annex A. The support material of the review and analysis of research of biofuel demand and utilization	160
Annex B. The description of biofuel experimental research means, equipment, methodology.....	168
Annex C. The support material of the experimental research of blends and analysis of results	195
Annex D. The support material of the heat release characteristics parameters determination methodology.....	214
Annex E. The agreements of co-authors to present publications for thesis	233
Annex F. Copies of scientific publications on the dissertation topic.....	247

Įvadas

Problemos formulavimas

Transporto sektorius (TS) yra vienas iš svarbiausių subjektų, lemiančių daugelio regionų ekonomikos vystymąsi, betarpiškai dalyvauja importo ir eksporto procesuose, tai leidžia skirtingiems regionams išlikti konkurencingais, o taip pat užtikrina socialinį žmonijos komfortabilumą ir kt. TS pokyčiai tiesiogiai susiję su ekonomikos srities pokyčiais bei augančiais žmonijos poreikiais. 1999 m. naujai pagamintų automobilių skaičius siekė apie 40 mln., 2010 m. gale jau siekė apie 60 mln. (Worldometers 2013), toks TS augimas daugelyje išsivysčiusių regionų pripažįstamas nevaldomu augimu.

Kartu su TS augimu auga energijos sunaudojimas, kuris gali neigiamai sąlygoti regiono ekonomiką bei sukelti politinį nestabilumą ypač tokiems regionams kaip ES, kurios didžiausia dalis suvartojamos energijos, 2011 m. duomenimis, 35 % yra naftos produktai, o jos importas iš trečiųjų šalių siekia net ~83 % (European Commission. EU energy in figures, 2013). Analogiška situacija ir Lietuvoje, daugiausiai ir apie trečdalį visos šalyje sunaudojamos energijos, kurios didžioji dalis yra importuojama, tenka TS.

Kartu su augančiu TS bei didėjančiu energijos suvartojimu jame, sulaukiama augančios aplinkos oro taršos (OT), kuri sąlygoja temperatūros pokytį atmosferoje, tuo pačiu ir gamtines stichijas, kenksmingi komponentai

transporto ID tiesiogiai veikia organizmus, o taip pat formuoja tokius antrinius žalingus reiškinius kaip smogą, rūgščius lietus ir kt.

Lietuvai įstojus į ES, palaipsniui buvo priimta ir ratifikuota eilė dokumentų, susijusių su TS efektyvumo didinimu, atsižvelgiant į gyventojų ir ūkio poreikius bei išteklių ir aplinkos sąlygų lemiamus apribojimus, kurių vienas iš paskutiniųjų ilgalaikių strategijų – 2011 m. „Baltoji knyga“ (Europos Komisija. Baltoji knyga, 2011). Joje numatyta: logistikos optimizavimas, transporto ir infrastruktūros naudojimo efektyvumo didinimas taikant informacines sistemas ir naujų degalų rūšių ir varymo sistemų kūrimas bei naudojimas.

Tvarių degalų kriterijai apima gamtos tausojimą, šiltnamio dujų (ŠD) emisijos sumažinimą tiek degalų gamybos, tiek ir jų panaudojimo etapuose, netinkamumą maisto pramonei ir kt. (Lietuvos Respublikos atsinaujinančių išteklių energetikos įstatymas. 38 straipsnis, 2011). EK paskelbtame komunikate (EK Komunikatas. Energetikos technologijos ir inovacijos, 2013) „Energetikos technologijos ir inovacijos“ pateikiami nauji reikalavimai, kuriuose teigiama, kad ne daugiau kaip pusė 10 % tikslo (biodegalų panaudojimo TS) būtų pasiekta naudojant įprastus biodegalus, o kita dalis – panaudojant 2 ir 3 kartos biodegalus, dokumente įvardinamus kaip „pažangieji“, kurių žaliava netinkama maistui.

Šių reikalavimų įgyvendinimas neišvengiamai susijęs su pažangiųjų biodegalų panaudojimo tyrimais transporto vienetuose. Tačiau, siekiant įvertinti regiono ar parko mastu aplinkosauginį ir energetinį efektą pakeičiant mineralinius degalus biodegalais, sudėtinga kiekvienam vienetui atlikti eksperimentinius bandymus. Kur kas tikslingiau panaudoti būdingą parkui transporto vieneta, atlikti eksperimentinius bandymus ir panaudoti matematinio modeliavimo (MM) metodus. Tačiau kai kurie MM programų pradinių duomenų masyvui reikalingų eksperimentinių duomenys DV eksploatacijos sąlygomis sudėtingai nustatomi, o kartais išvis nebenustatomi. Todėl atsiranda poreikis sukurti ir panaudoti metodikas, kurios leistų atlikti DV darbo proceso, energetinių rodiklių MM esant ribotam eksperimentinių duomenų kiekiui.

Grynų biodegalų ar jų mišinių su dyzelinu (D) panaudojimo atveju pasitaiko charakteringi neigiami požymiai, tokie kaip standarto reikalavimų neužtikrinimas, fizikinių savybių pablogėjimas normos ribose, biodegalų eksploatacinių savybių pokyčiai ir kt. Šie trūkumai gali būti pašalinti panaudojant daugiakomponenčius biodegalus ir jų mišinius su D.

O taip pat, biodegalų eksploatacijoje vyksta procesai, tokie kaip oksidacinė ir terminė degradacija, kurie gali pabloginti jų fizikines ir chemines savybes, o jos savo ruožtu gali neigiamai sąlygoti DV aplinkosauginius ir energetinius rodiklius.

Darbo aktualumas

Buvo atlikta eilė biodegalų mišinių variklinių bandymų su skirtingos paskirties tiesioginio degalų įpurškimo DV. Tyrimuose panaudoti daugiakomponenčiai RRME ir alkoholio mišiniai, kurių sudėtyje, siekiant praplėsti biodegalų panaudojimo potencialą ir pagerinti žematemperatūrinės mišinio charakteristikas bei išlaikyti cetaninį skaičių, panaudotas butilo alkoholis (butanolis) ir butilesteris. Šie, kaip ir išbandytas metanolio priedas, priklausomai nuo žaliavos pobūdžio gali būti priskiriamas I arba II kartos biodegalams. II kartos Camelina sativa RRME buvo panaudotas su kiaulienos riebalų RRME siekiant užtikrinti standarto reikalavimus (jodo skaičiaus normas). Gauti šiam, perėjimo nuo I prie II kartos biodegalų, laikotarpiui aktualūs mikro dumblių II kartos RRME mišinių variklinių bandymų rezultatai. Šie variklinių bandymų rezultatai yra aktualūs Europos Komisijos paskelbto komunikato „Energetikos technologijos ir inovacijos“ reikalavimų vykdymui ir suteikia informacijos apie potencialių II kartos biodegalų mišinių panaudojimo energetinį ir aplinkosauginį efektą.

Atlikti Camelina sativa (CSME) ir rapso (RME) RRME (mišinių sudėtyje) oksidacijos įtakos DV energetiniams ir aplinkosauginiams parametrams tyrimai yra vieni iš keleto pavienių tokio profilio tyrimų atvejų ir suteikia svarbios informacijos planuojant atitinkamą laikotarpį sandėliuotų biodyzelinų panaudojimą ir prognozuojant DV variklinių savybių pasikeitimą.

Atsižvelgiant į problematiką, kuri kyla formuojant matematiniam modeliui būtinus tiriamojo objekto parametrus, esant ribotiems eksperimentiniams tyrimams, sukurta metodika leidžia vykdyti MM tyrimus esant ribotam eksperimentinių duomenų kiekiui. Sukurta metodika, su priimtinu tikslumu, panaudojant paprastesnį (lyginant su daugiazoniais) vienzonį modelį, leidžia nustatyti DV cilindre šilumos išsiskyrimo charakteristiką (ŠICH) $dx/d\varphi$, pagal kurią pirmiausia atliekami indikatorinės diagramos skaičiavimai, ir kuria remiantis toliau skaičiuojami darbo proceso ir energetiniai parametrai.

Taip pat atliktas transporto paskirties DV eksploatacijoje D pakeitimo į mišinius aplinkosauginis ir energetinis vertinimas yra svarbus vertinant OT bei efektyvaus energijos panaudojimo efektą Klaipėdos uosto akvatorijoje ir Lietuvos vandenyse.

Tyrimų objektas

Transporto dyzelinų variklių, dirbančių I ir II kartos biodegalų su dyzelinu daugiakomponenčiais mišiniais, energetiniai ir aplinkosauginiai rodikliai bei jų tyrimo metodiniai aspektai.

Darbo tikslas

Panaudojant analitinius, statistinio vertinimo ir matematinio modeliavimo metodus bei eksperimentinių duomenų analizę, kompleksiskai įvertinti dyzelinio variklio energetinių ir aplinkosauginių charakteristikų pasikeitimą, dyzeliną pakeičiant biodyzelino ir/ar alkoholio su dyzelinu mišiniais.

Darbo uždaviniai

Įgyvendinant disertacijos tyrimų tikslą buvo suformuoti ir nuosekliai sprendžiami šie uždaviniai:

1. Atlikti II kartos RRME ir alkoholio mišiniais dirbančių dyzelinių variklių energetinių ir aplinkosauginių darbo rodiklių palyginamuosius tyrimus.
2. Atlikti dyzelinių variklių, dirbančių mišiniais, patikimumo rodiklių tyrimus.
3. Ištirti RRME oksidacijos įtaką dyzelinio variklio eksploataciniams energetiniams ir aplinkosauginiams parametrams.
4. Parengti metodiką, kuri padidintų dyzelinių variklių eksploatacinių charakteristikų matematinio modeliavimo adekvatumą.
5. Eksperimentų rezultatais paremtais skaičiavimais įvertinti mišinių panaudojimo transporto sektoriuje energetinį ir aplinkosauginį efektyvumą.

Tyrimų metodika

Eksperimentiniai tyrimai atlikti dyzelinių variklių stenduose (VGTU, BME) ir eksploatacijos sąlygomis (KJP). Eksperimentinių tyrimų objektais pasirinkti skirtingų tipų 3 transporto paskirties dyzeliniai varikliai:

- automobilio paskirties – Audi 1,9 TDI 1Z, VGTU;
- automobilio paskirties – Audi 1,9 TDI 1Z, Budapešto technologijos ir ekonomikos universitetas;
- laivo paskirties – Agco Sisu Valmet 320 DMG su elektros generatoriumi Stamford UC.M224C2 28, Lietuvos Karinės jūrų pajėgos.

Tyrimų rezultatų adekvatumas užtikrintas panaudojant:

- aparatūrą, kurios tikslumas atitinka galiojančių standartų reikalavimus;
- rezultatų apdorojimui matematinės statistikos metodus;
- praktikoje apčiuotus variklių tyrimų metodikas;
- eksperimentinių bei matematinio modeliavimo rezultatų sugretintą analizę, kt.

Disertacijos tyrimų pagrindą sudaro eksperimentiniai ir matematinio modeliavimo metodai. Didelio eksperimentinių duomenų masyvo apdorojimui panaudotas Fortran programavimo kalba sukurtas modelis, orientacinių šilumos išsiskyrimo rodiklių nustatymui panaudotas AVL Boost programos paketu Burn suformuotas modelis, variklio darbo proceso modeliavimui panaudotas Impuls programa sukurtas variklio modelis.

MM ir analitiniuose tyrimuose panaudotos žinomi mokslininkų I. I. Vibe, G. Woschni, F. Anisits, T. Bulaty, W. Glanzman ir kt. matematiniai modeliai bei metodikos.

Tyrimuose panaudota dyzelinių variklių energetinių ir aplinkosauginių parametrų šiuolaikiška ir sertifikuota stacionari ir nešiojama registravimo įranga, kuri atitinka dyzelinių variklių parametrų matavimo standarto keliamus reikalavimus.

Darbo mokslinis naujumas

1. Analitiniais bei matematinio modeliavimo tyrimais pagrįstas dyzelinio variklio darbo proceso ir šilumos išsiskyrimo charakteristikos $dx/d\varphi = f(\varphi)$ parametrų nustatymo metodika.
2. Transporto dyzelinių variklių su tiesioginio degalų įpurškimo sistema dyzelino pakeitimo daugiakomponenčiais RRME ir alkoholio mišiniais įtakos jų energetiniams ir aplinkosauginiams darbo rodikliams duomenys.
3. II kartos RRME (rapso ir *Camelina sativa* aliejaus) biodegalų oksidacijos įtakos dyzelinio variklio su tiesioginio degalų įpurškimo sistema energetiniams bei aplinkosauginiams darbo rodikliams duomenys.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

1. Sukurtas dyzelinio variklio darbo proceso charakteristikų nustatymo metodikos panaudojimas leidžia padidinti eksploatacinių parametrų matematinio modeliavimo metodais tyrimų adekvatumą esant ribotam eksperimentinių duomenų kiekiui.
2. Dyzelinių variklių su tiesioginiu degalų įpurškimu, dirbančių 2 ir 3 komponentų RRME, alkoholio, dyzelino mišiniais, energetiniai ir aplinkosauginiai parametrai, kurių pagrindu įvertinamas energetinis ir aplinkosauginis efektyvumas dyzeliną pakeičiant tiriamaisiais mišiniais.
3. Dyzelinio variklio, dirbančio rapso ir *Camelina sativa* metilesterių ir dyzelino mišiniais, energetinių bei aplinkosauginių parametrų pasikeitimo

(dėl biodegalų oksidacinio nestabilumo) eksploatacijos periodu duomenys, pagal kuriuos galėtų būti sudaromas šių biodegalų efektyvaus panaudojimo transporto sektoriuje struktūros reglamentas.

4. Suformuota metodika, kuri yra pagrįsta norminiais aktais, eksperimentiniais tyrimais, ir jos praktinis pritaikymas vertinant aplinkosauginį ir energetinį efektyvumą eksploatuojamuose dyzelinių variklių parkuose dyzeliną pakeičiant mišiniais.

Ginamieji teiginiai

1. Dyzelinių variklių su tiesioginio įpurškimo degalų sistema, dirbančių II kartos Camelina sativa ir mikro dumblių aliejų metilesterių su dyzelinu mišiniais, variklinės savybės išlieka artimos sertifikuoto rapso aliejaus metilesterio mišinių savybėms. Lyginant su mineralinio dyzelino savybėmis:
 - energijos efektyvumo panaudojimo rodiklis išauga iki ~4 %;
 - aplinkosauginiai rodikliai pagerėja – iki ~80 %.Alkoholio daugiakomponenčiai mišiniai, lyginant su dyzelinu, pasižymi iki 4 % padidėjusiu energijos panaudojimo efektyvumu.
2. Dyzelinio variklio, dirbančio RRME ir mišiniu B30 (RME) bei su alkoholio priedu B30 (RME+10M), patikimumo kriterijai yra ne prastesni nei dirbant mineraliniu dyzelinu.
3. RRME sandėliavimo įprastomis sąlygomis metu, lyginant su dyzelinu, išlaiko pranašumą (B30 sudėtyje) energetinių (η_e) ir aplinkosauginių (CH, SM, NO_x, CO) parametrų atžvilgiu:
 - 14 mėnesių – I kartos RME su Ionol BS 200 antioksidatoriaus 0,02 g/kg_{RME} kiekiu;
 - 8 mėnesius – II kartos Camelina sativa biodyzelinas be antioksidatoriaus.
4. Dyzelinių variklių, dirbančių RRME bei alkoholio mišiniais, eksploatacinių rodiklių tyrimų rezultatai sudaro pagrindą įvertinti eksploatuojamų dyzelinių transporto priemonių (parko mastu) energijos panaudojimo efektyvumo ir aplinkosauginį efektą. Pvz. pakeičiant dyzeliną į B30 RMME laivų paskirties DV parke galima sulaukti iki ~4 % efektyvumo padidėjimo, o taršos atžvilgiu – CO₂ galima sumažinti iki 13 %. Kenksmingų komponentų specifinių emisijų ciklinius rodiklius galima sumažinti iki ~50 %.
5. B30 RRME mišiniai pasižymi geresniais nepilno degimo produktų (CO, CH) emisijos rodikliais nei B50 mišiniai, kurių dalį sudaro alkoholis.
6. Metodas, kurio pagrindą sudaro DV deginių arba išmetimo sistemos detalių paviršių temperatūros registravimas eksploatacijos sąlygomis, leidžia adekvačiai modeliuoti dyzelinio variklio eksploatacijos rodiklius ir šilumos išsiskyrimo charakteristiką, esant ribotam eksperimentinių duomenų kiekiui.

Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tyrimų tema publikuota 13 mokslinių straipsnių: keturi – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į Thomson ISI sąrašą (Lebedevas *et al.* 2012, Lebedevas *et al.* 2013, Lebedevas *et al.* 2013, Makarevičienė *et al.* 2014); keturi – periodiniuose recenzuojamuose mokslo žurnaluose (Žaglinskis *et al.* 2012, Lebedevas *et al.* 2012, Lebedevas *et al.* 2012, Žaglinskis *et al.* 2013); trys – recenzuojamoje tarptautinės konferencijos medžiagoje (Žaglinskis ir Lebedevas 2010, Žaglinskis and Lebedevas 2011, Melaika *et al.* 2013); du – recenzuojamoje respublikinės konferencijos medžiagoje (Lebedevas *et al.* 2012, Žaglinskis 2014).

Disertacijos rengimo metu atliktų tyrimų rezultatai buvo pristatyti aštuoniose mokslinėse konferencijose Lietuvoje: 14, 15-oji tarptautinė konferencija „Transport means“, Klaipėda 2010, 2011; tarptautinio Eureka projekto „E!4018 Camelina-Biofuel“ konferencija „Investigations of Camelina sativa technology to manufacture and usage biofuels under Lithuania and Polish conditions“, Gargždai 2011; 15, 16, 17-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“, Vilnius 2012, 2013, 2014; 8-oji konferencija „Technologijos mokslo darbai vakarų Lietuvoje“, Klaipėda 2012; konferencija Jūros mokslai ir technologijos – 2014, Klaipėda 2014.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai ir bendrosios išvados, literatūros sąrašas, autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas ir šeši priedai.

Darbo apimtis yra 159 puslapiai, neskaitant priedų, disertacijoje panaudotos 46 numeruotos formulės, 42 paveikslai ir 15 lentelių. Rengiant disertaciją buvo panaudoti 171 literatūros šaltinis.

Padėka

Autorius dėkoja moksliniam vadovui prof. habil. dr. S. Lebedevui už įvairiapuse pagalbą rengiant disertaciją. Taip pat VGTU Transporto inžinerijos fakulteto Automobilių transporto katedros akademiniam personalui už kokybišką bendradarbiavimą. Už suteiktą galimybę pasinaudoti esama infrastruktūra autorius dėkoja Karinių jūrų pajėgų vadui fl. adm. K. Macijauskui bei personalui. Už šiltą sutikimą bei geras darbo sąlygas Erasmus stažuotės metu autorius dėkoja Budapešto technologijos ir ekonomikos universiteto docentui dr. A. Berezky ir jo komandai.

Biodegalų poreikio bei panaudojimo apžvalga ir mokslinių tyrimų analizė

TS bei jo plėtra yra svarbu kiekvienam ekonomiškai išsivysčiusiam regionui, kuris siekia išlikti konkurencingu tarptautinėse rinkose. TS yra tiesiogiai susijęs su eksportu, kuris Lietuvoje yra vienas iš svarbiausių šalies ekonomikos variklių. O taip pat sunkiai įsivaizduojama šiuolaikinio žmogaus kasdienybė be mobilumo, kurį suteikia TS. Dėl šių ir dėl daugelio kitų priežasčių nuolat skatinama TS plėtra, jis tobulėja, tačiau kartu su TS plėtra auga ir neigiami veiksniai. Pagrindinius veiksnius galima išskirti į 2 grupes, kurioms Lietuva kaip ir ES bei kiti išsivystę regionai skiria didelį dėmesį:

- ✓ oro tarša iš transporto priemonių ir jos mažinimas;
- ✓ energijos taupymas TS didinant sunaudojimo efektyvumą.

Šių grupių problematikos sprendimui ES išleido norminius dokumentus, kuriuose numatyti ilgalaikės strategijos, terminai, būdai bei priemonės, apimančios konstrukcines TS vienetų tobulinimo technologijas, antrinius ID apdorojimo ir filtravimo metodus, infrastruktūros tobulinimą bei tvarių biodegalų panaudojimą.

1.1. Oro taršos ir energijos panaudojimo statistikos analizė

Oro taršos statistikos analizė. Varikliuose transformuojama iškastinės kilmės degalų šiluminė degimo produktų energija į mechaninę, kaip antrinis – pašalinis produktas, į aplinką yra išmetamos tam tikrą likutinę šiluminę energiją turinčios atidirbusios dujos, kuriose lieka kenksmingų ir nekenksmingų pilnos ir nepilnos oksidacijos komponentų (CO_2 , CO , NO_x , NH_3 , CH , SM , PM , SO_x , H_2O , O_2 , sunkieji metalai ir kt.) (UN Conference on Environment and Development, 1992; United Nations General Assembly, 1992; The United Nations Ozone Secretariat, 2008; Fletcher 2004) Dėl KK , esančių TP ID, vyksta įvairūs procesai, tokie kaip rūgštūs lietūs, šiltnamio efektas ir kt., kurie tiesiogiai ir netiesiogiai daro žalą ekosistemai, neigiamai veikiama flora, fauna bei žmogaus sveikata. Dėl didelio TP skaičiaus, prasčiausiais aplinkosauginiais rodikliais pasižymi sausumos, t. y. kelių transporto segmentas (United States Environmental Protection Agency, 2012; TFS Green, 2012; Searchinger 2008; Fargione 2008).

Aktyvūs pasistūmėjimai OT mažinimo link prasidėjo paskutiniame XX a. dešimtmetyje. Nuo devintojo dešimtmečio pradžios mokslininkų atliktų tyrimų rezultatuose vis labiau atsispindi globalinio klimato pokyčio problematikos egzistavimas. Tarptautinio bendravimo pagrindu Jungtinės Tautos (JT) ir Pasaulinė meteorogijos organizacija sudarė darbo grupę šiam klausimui nagrinėti (Štreimikienė *et al.* 2003). 1990 m. JT Generalinė asamblėja sudarė darbo grupę, kurios pagrindinis tikslas buvo parengti JT Bendrosios klimato kaitos konvencijos projektą. 1992 m. birželio mėn. įvyko „Žemės viršūnių susitikimas“ Rio de Žaneire (UN Conference on Environment and Development, 1992; United Nations General Assembly, 1992), konvenciją pasirašė 155 šalys, taip pat ir Lietuva. Šalys, pasirašiusios šią konvenciją prisiėmė ir 1987 m. Monrealio protokolo (The United Nations Ozone Secretariat, 2008) įsipareigojimus dėl ozono sluoksnį ardančių medžiagų naudojimo mažinimo. Toliau 1997 m. seka Kioto protokolo priėmimas ir ratifikavimas, po kurio šalys įsipareigojo 2008–2012 m. laikotarpiu ŠD emisiją sumažinti 8 % lyginant su 1990 m. lygiu (Fletcher 2004).

Tarptautiniuose dokumentuose ŠD sąvoka apima keletą junginių grupių, kurie skirstomi stambesnes grupes (United States Environmental Protection Agency, 2012;): NO_x ; CH_4 ; fluoro dujos (anglies perfluoridų junginiai, kt.); CO_2 (deginant iškastinius degalus; nepašalintas dėl miškų kirtimo; kt.).

Dėl įvairios vykdomos veiklos į aplinką išmestam CO_2 tenka apie 77 % viso ŠD kiekio (United States Environmental Protection Agency, 2012) atitinkamai kitoms dujoms – 23 %, o 57 % (A priedas P.A.1 pav.) bendrame balanse sudaro CO_2 , susidaręs deginant iškastinės kilmės kurą ir degalus. Didelis CO_2 kiekis lemia šių dujų prioritetinę vietą OT mažinimo srityje, tuo tarpu kitų ŠD dujų

išmetami kiekiai mažesni, tačiau poveikis aplinkai yra žymiai stipresnis (A priedas P.A.1 lent.) vertinant CO₂ masės vieneto ekvivalentu (TFS Green 2012).

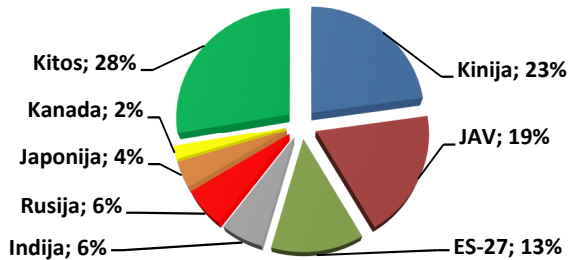
Didžiausi ŠD šaltiniai skirstomi į grupes (United States Environmental Protection Agency, 2012; National Academy of Science, National Research Council Report 2012): pramonė; komerciniai ir gyv. namai; žemdirbystė; šiukšlės ir nutekamieji vandenys; transportas; energijos gamyba; miškininkystė.

Energijos gamybos sektoriaus (26 %) ŠD emisija apima anglies, gamtinių dujų, naftos deginimą gaminant šilumą ir elektros energiją. Pramonės sektorius (19 %) apima iškastinio kuro deginimą, taip pat ir iš cheminių, metalurginių, įvairių medžiagų transformacijos procesuose atsirandančią taršą. Kaip teigia mokslininkai (Searchinger *et al.* 2008, Fargione *et al.* 2008), miškininkystės veiklos indėlis bendrame ŠD emisijos balanse pasireiškia kaip miškų kirtimas, žemės paruošimas žemdirbystei, dirvožemio deginimas. Žemdirbystėje (14 %) ŠD emisijos šaltinių pagrindą sudaro dirvožemio eksploatacija, gyvulių auginimas, ryžių auginimas, biomasės deginimas. TS (13 %) (oro, geležinkelių, kelių, vandens) ŠD emisija generuojama deginant iškastinius degalus (~95 %), pagrindą sudaro lengvieji distiliacijos produktai: dyzelinas ir benzinai. Iš namų ūkių ir komercinių vienetų (8 %) kylanti tarša yra pasekmė tokių procesų kaip patalpų šildymas, maisto ruošimas, kt. Sąvartynai (3 %) generuoja santykinai svarų CH₄ kieki, o su nutekamaisiais vandenimis be CH₄ į aplinką patenka NO_x. ŠD šaltinių pasiskirstymas (United States Environmental Protection Agency, 2012;) pagal indėlį į bendrą ŠD balansą pateiktas A priedo P.A.2 paveiksle.

Analizuojant pastebima, jog TS ŠD kiekis yra mažesnis nei daugelio kitų. Šį pasiskirstymą galima paaiškinti atskirų regionų skirtingų ŠD emisijas generuojančių sektorių išvystymo mastu. Kaip pavyzdys, Kinija, kuri yra viena iš pasaulio pramonės lyderių, dėl pasenusių gamybos technologijų šioje srityje vis dar intensyviai degina anglį. 2011 m. pasaulyje sunaudota 4.3 mlrd. tonų anglies, iš jų 3,8 mlrd. tonų buvo sunaudota Kinijoje (Walsh 2013, Zhou *et al.* 2011). Medžių kirtimas taip pat aktuali ŠD kiekio didėjimą sąlygojanti problema. Brazilijos medienos žaliavos gavyba yra pirma pasaulyje, ji sudaro apie 27 % viso pasaulyje gaunamos medienos žaliavos kiekio (Butler 2005), o ir kituose regionuose šis rodiklis yra didelis (Think Global Green 2013).

Daugiau nei pusė (55 %) visos ŠD emisijos tenka 3 regionams (1.1 pav.). Analizuojant trečią pagal svarbą – ES regioną, matomas kitokio ŠD generavimo pasiskirstymo pobūdis. Remiantis EAA duomenimis (European Environmental Agency, 2013), lyginant su pasauliniu ŠD generavimo charakteriu, ES didesnę dalį – 82,2 % užima CO₂ dujos, atitinkamai kitos dujos – 17,8 % (A priedas P.A.3 pav.). EAA pateikti duomenys rodo, kad reikšmingiausias (~95 %) CO₂ šaltinis yra degimo procesas ir jo likutiniai produktai. Analizuojant duomenis pagal taršos šaltinių tipą, matoma, jog TS ES, skirtingai nei pasauliniame balanse, su 20,3 % dalimi yra vienas iš didžiausių ŠD generuojančių šaltinių,

kuris nusileidžia tik energijos gamybos sektoriui – 31 % (A priedas P.A.4 pav.). Reikia pažymėti, kad šiuo atveju nėra įskaičiuojama tarptautinio transporto, operuojančio ES, esant priešingam atvejui ŠD dalis tenkanti TS sumažintų atotrūkį nuo energijos gamybos sektoriaus.



1.1 pav. Šiltnamio dujų emisijos pasiskirstymas pagal šalis
Fig. 1.1. The distribution of green house gases emission by countries

ES vykdo Kioto protokolo reikalavimuose numatytus tikslus ir 2011 m. buvo pasiekusi 18,4 % ŠD generavimo sumažėjimo lyginant su 1990 metais (European Environmental Agency, 2013). Per šį laikotarpį ŠD generavimo lygis sumažėjo visuose sektoriuose, išskyrus fluoro gamyboje ir naudojime bei TS. TS, pagal statistiką užimantis 2 vietą ŠD generavimo balanse ir turintis nuolat augančią tendenciją yra vienas iš pagrindinių ES taikinių siekiant efektyviai mažinti ŠD patekimą į aplinką. Tam, kad stabilizuoti ir mažinti TS neigiamą poveikį, ES išleido norminius dokumentus, kurie apima platų diapazoną įpareigojimų, būdų ir technologijų, padėsiančių sumažinti ŠD patekimą į aplinką. ES ŠD mažinimo procese problema sprendžiama kompleksiniu principu, t. y. tobulinant infrastruktūrą, optimizuojant eismo srautus, tobulinant TP konstrukciją, naudojant tvarius AES degalus ir kt.

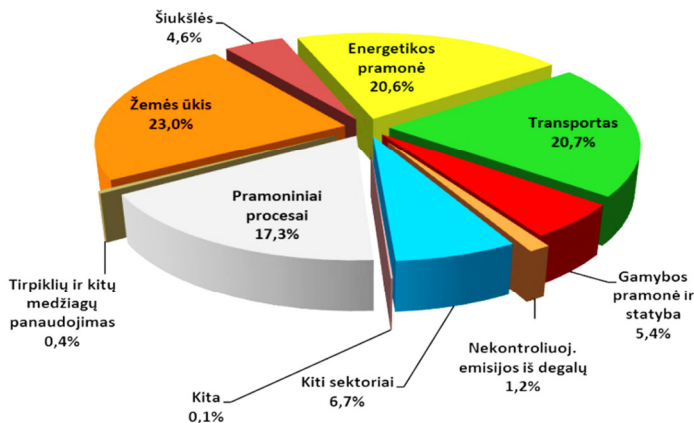
TS – praktiškai vienintelis ES sektorius, kuriame ŠD emisija nuolat auga. Trumpai apžvelgiant aplinkosaugos sektorių, galima tvirtai teigti, jog didelis skaičius mokslininkų dirba srityje, kurioje siekiama sumažinti KK emisijas tiek iš variklių, tiek ir iš jėgainių, kuriose energija gaminama panaudojant degalų oksidacijos reakcijas. Variklių srityje KK emisijos ID bei ŠD mažinimo metodai (neįskaitant judėjimo infrastruktūros) gali būti suskirstyti į 3 grupes:

- pirminiai – paprastai ši grupė pasižymi tuo, kad metodų taikymas apsiriboja variklio DP reguliavimo parametrų optimizavimu bei žemo-vidutinio sudėtingumo konstrukciniais pakeitimais bei technologiniais sprendimais. Čia galima paminėti: degalų įpurškimo parametrų reguliavimą; segmentinės degimo kameros panaudojimą; TK panaudojimą kartu su tarpiniu oro

aušintuvu; vandens (skirtingais būdais) įvedimą į degimo procesą; ID recirkuliaciją ir kt.;

- antriniai – tai metodai, kurių panaudojimas nukreiptas į ID apdorojimo-valymo sritį, kurioje taikomi išoriniai įrenginiai ir technologiniai sprendimai. Čia galima pažymėti: skruberius (*Scrubber*), kurie skirti SO_x pašalinimui; selektyvinį katalitinį mažinimą (*Selective catalytic reduction*), ši technologija skirta ID valymui nuo NO_x; ID valymui nuo PM naudojami įvairios konstrukcijos filtravimo mechanizmai;
- alternatyvių degalų bei kuro panaudojimas – dažnai priskiriamas prie pirminių KK mažinimo metodų. Praktikoje naudojami tvarūs, mažasieriai, su maksimaliai sumažintu sunkiųjų metalų kiekiu, mažesnį elementinės anglies kiekį turintys degalai, pagaminti iš AES ir kt.

2011 m., neskaitant miškininkystės veiklos, dirbamos žemės teritorijos pasikeitimo faktoriaus, Lietuvoje į aplinką buvo išmesta 21611,7 tūkst. tonų ŠD skaičiuojant CO₂ ekvivalentu (Konstantinavičiūtė *et al.* 2013). Stebint ŠD pasiskirstymą (1.2 pav.) pagal OT šaltinius, matoma, jog TS (20,7 %) yra artimas energetikos sektoriui (20,6 %) ir nusileidžia tik žemės ūkiui, kurio emisijos (23 %) mastas susijęs su CH₄ emisija iš gyvulininkystės segmento.



1.2 pav. Šiltnamio dujų emisijos pasiskirstymas pagal ūkio sektorius 2011 m.

Fig. 1.2. The distribution of green house gases emission by sectors

Energijos (įvairaus pavidalo energija) sektorius, kurį apima energetikos pramonė, transportas, gamybos pramonė ir statyba, nekontroliuojamos emisijos iš degalų, kiti sektoriai, kita, yra pagrindinis (54,7 %) ŠD (CO₂, CH₄, N₂O dujos) generavimo šaltinis. ŠD emisijos pasiskirstymas Lietuvoje pagal dujų rūšį,

skaičiuojant CO₂ ekvivalentu, pateiktas A priedo P.A.5 paveiksle (European Environmental Agency, 2012). Matoma, jog CO₂ sudaro pagrindinę dalį (66,5 %) visos ŠD emisijos, likusi dalis tenka N₂O (17,2 %), CH₄ (15,4 %), fluoro dujoms (0,9 %). Didžiausias CO₂ šaltinis – energijos sektorius sudaro 80,6 % (2011 m.) visos šalies CO₂ emisijos. Energetikos pramonės ir transporto indėlis šalies CO₂ balanse atitinkamai siekia 39,3 % ir 39,4 %.

TS CO₂, N₂O, CH₄ emisijos atžvilgiu kelių transportas yra problematiškiausias, tai parodo A priedo paveikslai P.A.6 a, P.A.6 b, P.A.6 c, pagrįsti statistiniais duomenimis (Konstantinavičiūtė *et al.* 2013).

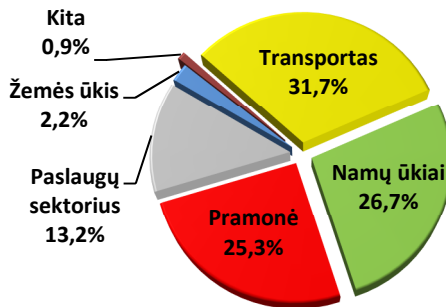
TS yra problematiškiausias lyginant su sektoriais, kurių veiklą apima tik energijos transformacija, t. y. neatsižvelgiant į žemės ūkį, kuris pasižymi aukšta CH₄ emisija, susijusia su gyvulininkyste. Kelių transporto segmentas stipriai lenkia (CO₂ – ~21–2100, N₂O – ~40–17300, CH₄ – ~65–2600 kartų) kitus TS segmentus (A priedas P.A.6 a, P.A.6 b, P.A.6 c pav.). Kelių transporto segmentas dėl savo specifikos yra prioritetinis sektorius OT mažinimo atžvilgiu.

Energijos panaudojimo statistikos analizė. ES, kaip ir kiti išsivystę pasaulio regionai, kurie neturi pilnai savo energetinių poreikių užtikrinančių rezervų, importuoja nuolat brangstančią energiją. Artimoje ateityje galimybė gauti energijos išteklių taps vis svarbesnė, o tai gali tiesiogiai ir netiesiogiai paveikti ES ekonomikos augimą, politinius ir kitokio pobūdžio sprendimus, susijusius su užsienio ryšiais ir t. t. Todėl energijos tausojimas bei efektyvus jos panaudojimas ES ūkyje – vienas iš svarbiausių aspektų 2011 metais EK paskelbtoje strategijoje „Europa 2020“ pavyzdinė iniciatyva „Tausiai išteklius naudojanti Europa COM (2011) 21. EK teigia (Europos Komisija. Pasiūlymas, 2011), jog efektyvus energijos vartojimas yra ekonomiškiausias ir greičiausias būdas padidinti energetinį saugumą ir veiksmingas būdas mažinti ŠD emisijas. Šios strategijos įgyvendinimas savaime įneša teigiamą indėlį tiek į ekonomikos augimo stabilumo užtikrinimą, kuris susijęs su energijos išteklių tausojimu ir importo mažinimu, tiek ir į aplinkosauginių problemų sprendimą.

ES sunaudoja santykinai didelį kiekį energijos, 2011 m. su 1698 mln. tonų naftos ekvivalento (MTOE) energijos suvartojimu užėmė 3 vietą (13,4 %) pasaulyje, nusileisdama tik Kinijai (19,3 %) ir JAV (17,4 %) (European Commission. EU energy in figures, 2013) ES daugiausiai energijos suvartoja naftos ir jos produktų pavidalu – 35 %, dujų – 24 % bei kieto kuro – 17% (A priedas P.A.7 pav.), o branduolinė ir AEŠ energija, kurią praktiškai ES pasigamina sau, atitinkamai 14 % ir 10 %. ES patiria nuostolių energijos importo srityje. Pateikti duomenys rodo, jog didžiausiu suvartojimu ES pasižymintys energijos šaltiniai pasižymi didžiausiais importo rodikliais. Analizuojant 1995–2011 m. laikotarpį pastebima, kad dujų importas kasmet (išskyrus 2010 m.) auga, bendras energijos importas nuo 2005 m. praktiškai stabilizuojasi (A

priedas P.A.8 pav.), kaip ir kieto kuro bei naftos ir jos produktų, tačiau pastarojo šaltinio importo rodiklis sudaro ~0,83. Tai rodo, jog didžiausią poreikį turinčio energijos šaltinio ES pasigamina tik apie 17 %, o bendras importas nuo 2005 m. siekia apie 83 % (European Commission. EU energy in figures, 2013).

ES yra bene stipriausiai išvystytas TS pasaulyje, tad nenuostabu, jog šis sektorius ES pasižymi didžiausiu (31,7 %) energijos sunaudojimu (1.3 pav.), absoliutūs skaičiai pateikti A priedo P.A.2 lentelėje. Neatsižvelgiant į tai, kad TS pasižymi minėtais rodikliais, TS yra nuolat augantis tiek vienetų, tiek ir energijos suvartojimo atžvilgiu (A priedas P.A.9 pav.) (Eurosat data).



1.3 pav. Europos sąjungos energijos suvartojimas pagal sektorius 2010 m.

Fig. 1.3. European Union energy consumption by sectors in 2010

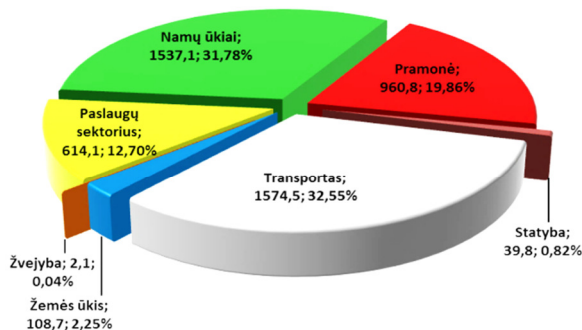
Europos vadovai, EK, EP atkreipė dėmesį į bendrą situaciją ir 2011 m. išleido Bendros Europos transporto erdvės kūrimo planą „Baltoji knyga“, kuriame numatė ilgalaikes strategijas bei atnaujinti energijos vartojimo efektyvumo reglamentavimo teisės aktų sistemą, priimti norminius dokumentus, kuriais būtų siekiama bendro energijos vartojimo efektyvumo tikslo – iki 2020 m. sutaupyti 20 % ES suvartojamos pirminės energijos, o po 2020 m. šį rodiklį didinti (Europos Komisija. Pasiūlymas, 2011).

Kaip teigiama EK dokumente „Baltoji knyga“, per pastaruosius 4 dešimtmečius, neatsižvelgiant į techninę pažangą, žymesnių pasistūmėjimų efektyvaus energijos naudojimo srityje nebuvo pastebima, šiuo klausimu galima teigti, kad per minėtąjį laikotarpį TS išliko praktiškai nepakitęs. Efektyvus energijos naudojimas TS išaugo, tačiau praktiškai visas (96 %) energijos poreikis yra užtikrinamas nafta ir jos produktais (Europos Komisija. Baltoji knyga, 2011). Taip pat EK numočiusi eilę planininių punktų siekiant spręsti TS kylančias energijos vartojimo ir aplinkosaugines problemas.

Vienas iš tokių punktų yra viso TS energijos vartojimo efektyvumo didinimas panaudojant tvarias degalų rūšis. Čia būtų galima panaudoti I kartos bei aukštesniu tvarumo laipsniu pasižyminčius – II kartos biodegalus. Biodegalai, priklausomai nuo žaliavos rūšies, gamybos proceso, biokomponento koncentracijos, cheminių ir fizikinių savybių, variklio darbo sąlygų ir kt., skirtingais atvejais pasižymi aukštesniu energijos vartojimo efektyvumo rodikliu, kurio teigiamas efektas sąlygojamas žemesnio H_u ir artimo degalų sunaudojimo, lyginant su D (Lebedevas *et al.* 2012, Žaglinskis *et al.* 2012, Lebedevas *et al.* 2013, Tesfa *et al.* 2011, Makarevičienė *et al.* 2014, Das *et al.* 2013). Paprastai geresniais efektyvumo rodikliais pasižymi mišiniai su D, kuriuose biokomponento kiekis siekia iki 30 %, didesnė biokomponento koncentracija lemia neproporcingai didesnę degalų sunaudojimą, kas, savo ruožtu, mažina efektyvumą (Tesfa *et al.* 2011).

EK ir patariantys ekspertai teigia (Europos Komisija. Pasiūlymas, 2011), kad energijos vartojimo efektyvumas, taupymas ir jos tausojimas duoda naudos visai ES ekonomikai, viešajam sektoriui, verslui ir privatiems asmenims. ES ūkyje įgyvendinant strateginius planus, siekiant plėtoti efektyvų energijos panaudojimą, bus galima užtikrinti teigiamą poveikį tiek ekonomikai, tiek ir darbo vietų kūrimui. Savaime suprantama, kad efektyviai taupant energiją, atsiras papildomi finansai, kurie galės būti skirti kitoms sritims.

Pagal energijos suvartojimą Lietuvoje pirmauja namų ūkių sektorius (31,78 %) ir TS (32,55 %) (1.4 pav.), kurie bendrame balanse sudaro beveik 2/3 sunaudojamos energijos kiekio (Lietuvos statistikos departamentas, 2012). Analizuojant didžiausią energijos vartotoją – TS pagal atskirų jo segmentų padėtį bendrame balanse, matoma, jog daugiausiai energijos sunaudoja kelių transporto segmentas – ~90 % (A priedo P.A.10 pav.).



1.4 pav. Energijos suvartojimas pagal ūkio sektorius (TOE; %)

Fig. 1.4. The consumption of energy by sectors (TOE; %)

Visą TS analizuojant pagal energijos šaltinio/degalų rūšį matoma, jog daugiausiai sunaudojama kelių transporto D (Lietuvos statistikos departamentas, 2012), kuris sudaro 2/3 visame balanse skaičiuojant TOE (A priedas P.A.11 pav.). Kelių transporto dyzelino pagrindinis kiekis – 93,64 % tenka kelių transportui, likusi dalis tenka geležinkelių – 5,93 %, vidaus vandenų – 0,11 % ir kitam transportui – 0,32 % (A priedas P.A.12 pav.). Kitam transportui priskiriami oro bendrovių kelių TP, uostų laivų krautuvai bei įvairūs kranai.

Reikia pažymėti tai, jog tarptautinio vandens transporto vienetai, kurie įplaukia į Klaipėdos jūrų uostą, dėl ekonominių sumetimų bunkeriamą vykdo atviroje jūroje, o degalų kiekis nėra įskaitomas į bendrą balansą.

Kelių transportas OT ir energijos sunaudojimo atžvilgiu yra problematiškiausias, o tai savaime suformuoja prioritetinę vietą TS segmentų eilėje energijos taupymo ir OT mažinimo priemonių pritaikymo atžvilgiu.

Išanalizavus Lietuvos TS, šiame darbe išskiriami du Lietuvai aktualūs TS segmentai, kurie savo specifika yra patrauklūs biodegalų panaudojimo atžvilgiu t. y. kelių ir vandens transporto segmentai. Šios analizės pagrindu pasirenkami dviejų tipų aukštų sūkių dažnio tiesioginio įpurškimo DV: vandens transporto (taip pat universalios) paskirties DV VALMET 320 DMG (sumontuotas laive kaip dyzelinis generatorius), kuris pritaikytas dirbti biodegalais ir jų mišiniais; kelių transporto paskirties 2 vnt. – 1992/94 m. Audi 1,9 TDI (stendo sudedamoji dalis), nepritaikytas dirbti biodegalais. Audi 1,9 TDI (stendo sudedamoji dalis), nepritaikytas dirbti biodegalais. Mišinių panaudojimo DV eksperimentų bei skaičiavimų pagrindu disertacijoje vykdomas energetinio ir aplinkosauginio efekto vertinimas vieno iš pasirinktų (vandens transporto) Lietuvos transporto segmentų eksploatacijoje D pakeičiant D ir biodegalų mišiniais.

1.2. Variklio darbo parametrų pokytį sąlygojančių veiksnių, dyzeliną pakeičiant mišiniais, analizė

1.2.1. Biodyzelinų fizikinių ir cheminių savybių analizė

Biologinės kilmės degalai žinomi daugiau nei 100 metų. Nuo pat DV sukūrimo jis buvo skirtas dirbti riešutų aliejumi, tačiau naftiniai degalai dėl įvairių priežasčių ilgą laiką dominavo DV degalų srityje. Atsiradus alternatyvos naftiniams degalams poreikiui vėl buvo atsigręžta į biologinės kilmės degalus. Tačiau aliejus ar didesnės koncentracijos aliejaus ir D mišiniai neužtikrino DV gamintojų keliamų reikalavimų. Tai užkirto kelią platesniam jų panaudojimui.

Šiai problemai spręsti buvo panaudotas aliejų esterifikacijos procesas panaudojant A, kurie gali būti arba gaminami iš biologinės kilmės žaliavos: E, M, B, kt. (Bouaid *et al.* 2007, Martinez *et al.* 2014, Sakai *et al.* 2010).

Labiausiai paplitusi DV RRE gamybos žaliava – aliejai iš rapsų, sojų, palmių, taip pat ir gyvūninės kilmės riebalai tokie kaip kiaulienos, jautienos, paukštienos ir žuvų (Demirbas 2008). Dėl atitinkamų standartų reikalavimų tenkinimo auglinės kilmės RRE gali būti maišomi su gyvulinių riebalų RRE.

Vienas iš populiariausių RRE gamybos būdų yra aliejų transesterifikacija. Pagrindinis šios technologijos tikslas – sumažinti aliejaus ar taukų kinematine klampą. Transesterifikacijos metu trigliceridai konvertuojami į digliceridus, o tolimesniame etape iki monogliceridų ir gaunamas rezultatas – RRE. Trumpiau tariant, RRE išgaunamas trigliceridų transesterifikacijos procese, kuriame panaudojamas A. Jei gamyboje panaudojamas E, tada gaunamas RREE, jei RRE gaminamas iš aliejų ar taukų panaudojant M – RRME. Įprastai, dėl žemos kainos, šiame procese naudojamas M. Bazinė (šarminė) transesterifikacija yra efektyvesnė lyginant su rūgštine bei fermentine (Ma and Hanna 1999). Triglicerido transesterifikacijos cheminė išraiška pateikta 1.1 formulėje.



Prieš patekdamas į degalų rinką turi atitikti jam keliamus standartų reikalavimus, kurių pagrindiniai yra EN 14214 – ES ir ASTM D 6751-02 – JAV. RRME fizikinėmis savybėmis yra artimas D, tačiau RRME panaudojimo DV ir eksploataavimo (plačiaja prasme: sandėliavimas, kt.) savybės skiriasi. Atliekant įvairių mokslinių tyrimų analizę, lyginant su D, RRME pasižymi:

- didesniu tankiu, kuris yra svarbi savybė, sąlygojanti įpurškiamų degalų išpurškimo efektyvumą lieso mišinio degimo sistemose. Tankis yra vienas iš faktorių, sąlygojančių išpurkštų degalų lašelių smulkiadispersiškumą. Esant didesniam RRME tankiui didesnė masinė degalų dalis yra įpurškama į cilindrą, tai sąlygoja didesnį degalų sunaudojimą (Silitonga *et al.* 2013). RRME, pagaminti iš augalų aliejų ir gyvulinių taukų, pasižymi didesniu tankiu bei aukštesniu pasipriešinimo suspaudimui laipsniu lyginant su D;
- padidėjusia kinematine klampa (Demirbas 2008), kuri yra vienas iš svarbiausių degalų rodiklių, kuris indikuoja medžiagos (jos sluoksnių) pasipriešinimą judėjimui, tai daro įtaką degalų įpurškimo ir išpurškimo kokybę, ypač esant šaltesnėms aplinkos sąlygoms. Dėl ilgų, nemobilių molekulių grandinių, RRME pasižymi didesniu klampiu, lyginant su D. Padidėjusi klampa blogina išpurškimo savybes ir mažina purkštukų tikslumą. Kuo mažesnė klampa, tuo lengviau degalų sistemai tiekti degalus ir juos išpurkšti (Islam *et al.* 2004);
- sumažėjusiu stabilumu (oksidaciniu, terminiu, kt.). Kurių vienas svarbiausias sandėliavimo proceso metu – oksidacinis stabilumas, kuris sąlygojamas

aplinkos oro poveikio. Oksidacija pasireiškia kaip RRME sudarančių RR grandinių degradacija, kurios metu formuojami hioperoksidai, kurie, procesui besivystant, suyra ir formuoja antrinės degradacijos produktus (Pullen and Saeed 2014), tokius kaip aldehidai, ketonai, karboksirūgštys, oligomerai, guma, nuosėdos ir t. t. Oksidacinis stabilumas yra svarbus parametras, kuris nusako RRME biodegalų oksidacijos laipsnį, dalyvavimo reakcijose su oru potencialą, apsprendžia apie oksidacijos procesą stabdančių priedų (antioksidantų) panaudojimą. Išsamesnė RRME biodegalų oksidacijos proceso detalizacija yra aprašyta tolimesniame šio skyriaus punkte;

- aukštesne drumstimosi taško temperatūra, kuriai esant šaldomuose RRME vaško kristalai tampa matomi plika akimi. Stingimo temperatūra tai temperatūra, kuriai esant degaluose esantis vaškas nebetirpsta ir pradeda formuoti „želinę“ masę, taigi tai yra žemiausia temperatūra, kuriai esant degalai gali formuoti tekėjimo srautą;
- aukštesne šalto filtro užsikimšimo temperatūra arba filtravimo temperatūra paprastai naudojama kaip rodiklis apibūdinti degalų eksploataavimo savybes esant žematemperatūrinėms klimato sąlygoms (Demirbas 2008);
- aukštesne pliūpsnio taško temperatūra, kurią pasiekus esant tiesioginiam kontaktui su atvira ugnimi degalai užsiliepsnoja. Šis parametras yra svarbus bet kurių degalų saugaus transportavimo, sandėliavimo ir eksploataavimo atžvilgiu. Aukštesnės reikšmės pliūpsnio taškas neigiamai veikia DV užvedimo ir įsilimo savybes, o taip pat gali būti anglies nuosėdų susidarymo degimo kameroje priežastimi (Silitonga *et al.* 2013);
- dėl biologinės RRME kilmės ypatumų, nekontroliuojamo patekimo į aplinką atvejais RRME yra praktiškai nekenksmingas, o savaiminė biodegradacija (Mudge and Pereira 1999) lemia per santykinai trumpą laikotarpį pašalinti iš aplinkos, tuo tarpu kai NP patekimas į aplinką daro stiprią žalą bei pašalinimas iš aplinkos yra problemiškas;
- padidėjusiu jodo skaičiumi, kuris sąlygoja RRME oksidaciją ir DV purkštukuose nuosėdų susidarymą, o taip pat didesnis JS lemia prastesnį RRME stabilumą (Silitonga *et al.* 2013). JS yra vienas iš faktorių, sąlygojančių DV NO_x emisiją. Pagal standartą JS negali viršyti 120 I₂/100 g_{RRME}. RRME, pagaminti iš augalinės kilmės aliejų, dažnu atveju pasižymi aukštesniu JS nei nurodytas standarte EN 14214. Siekiant sumažinti RRME JS, jie yra maišomi su gyvulinės kilmės RRME. Šiame darbe pateikti 3 komponentų *Camelina sativa* RRME, kiaulienos RRME ir D mišinio motorinių tyrimų rezultatai;
- likutinės anglies rodiklis parodo likutinį anglies kiekį po degimo proceso. RRME LA yra gerokai svarbesnis nei D, nes RRME LA turi stiprią koreliaciją su RR, gliceridais, RRME muilais, polimerais, aukštesniu nesočiųjų riebalų kiekiu ir neorganinėmis priemaišomis (Silitonga *et al.* 2013);

- sumažėjusiu sulfatuotų pelenų (SP) kiekiu, kuris parodo neorganinių teršalų, tokių kaip abrazyvinių kietųjų dalelių ir katalizatoriaus likučio, o taip pat ir tirpiųjų metalų muilų kiekį degaluose. Didesnis SP kiekis sąlygoja degimo proceso sutrikimus;
- mažesniu H_U , nusakančiu išskirtos energijos kiekį sudegus vienam degalų masės vienetui, taip pat nusakančiu RRME, kaip alternatyvos D, tinkamumą. Įprastai RRME H_U yra žemesnis dėl sudėtyje esančio O_2 , tačiau didesnis O_2 kiekis RRME gali pagerinti degimo procesą ir sumažinti nepilno degimo produktų emisiją. Be to, RRME pasižymi mažesniu sieros ir aromatinių aromatinių CH kiekiu, kuris turi įtakos degimo proceso metu susiformavusių kenksmingų sieros oksidų (SO_x) ir CH emisijai (Ma and Hanna 1999);
- techniniu atžvilgiu RRME yra agresyvus, DV degalų sistemose pažeidžia detalių paviršius, degalų padavimo sistemos gumines dalis. Degalų bakuose veikia kaip tirpiklis, tirpdydamas nuosėdų masyvus ir atlaisvindamas įvairaus dydžio frakcijas, kurios užkemša filtrus (Wardle 2003);
- dėl cheminės sudėties, t. y. dėl esančio O_2 , RRME panaudojimas DV pasižymi mažesnėmis nepilno degimo produktų emisijomis (Lebedevas *et al.* 2012, Žaglinskis *et al.* 2012, Lebedevas *et al.* 2013, Labeckas and Slavinskas 2006, Usta *et al.* 2005, Al-Dawody and Bhatti 2013, Rahman *et al.* 2013, Rosca *et al.* 2009, Qi *et al.* 2010, Usta *et al.* 2005). Kitų mokslininkų atliktų variklinių RRME savybių tyrimų rezultatai analizuojami kitame punkte.

1.2.2. Riebiųjų rūgščių metilesterių ir jų mišinių variklinių savybių mokslinių tyrimų analizė

DV transformuojant degalų šiluminę energiją į mechaninę, atidirbę degimo produktai išmetami į aplinką, kartu su jais ir kenksmingų komponentų junginiai. ID sudaro kenksmingi (Lakieji organiniai junginiai, metaniniai CH, nemetaniniai CH junginiai, CO, sunkieji metalai [Pb, Cd, Zn, Cu, Cr, Ni, Se], H_2S , SO_2 , PM, NO_x , N_2O , NH_3 , NO_2) ir nekenksmingi CO_2 , O_2 , H_2O junginiai (Aplinka, energija ir transportas, 2003).

Iš DV išmetami junginiai yra labai įvairūs tiek savo sandara, struktūra, tiek fizinėmis ir cheminėmis savybėmis. Apie kai kuriuos iš jų yra surinkta nedidelis kiekis duomenų, turima informacija dažniausiai neleidžia tiksliai įvertinti poveikio žalą aplinkai bei sunku išmatuoti, dėl ko yra užkertamas kelias jų normavimui ir kontrolei.

KK emisijų norminiai dokumentai rengiami surinkus pakankamai duomenų apie skirtingų KK poveikį aplinkai. Šiuo metu išvystytose KK emisijų iš DV

normavimo „terpėse“, veikiančiose ES ir JAV, normavimai vykdomi pagal CO, CH, NO_x, PM, SM ir kt. (European Union emission standards).

Degalų degimas yra vienas iš svarbiausių procesų, sąlygojančių DV emisijų, darbo ir patvarumo rodiklius. Slėgis cilindre, indukcijos periodas, degimo trukmė ir ŠI sąlygoja degimo proceso efektyvumą (Tesfa *et al.* 2013). Skirtingos degalų fizikinės ir cheminės savybės sąlygoja degimo, ŠI procesų, emisijos rodiklių bei kt. skirtumus tarp biodyzelinų ir D (Ozsezen *et al.* 2008, Canakci *et al.* 2009, Canakci 2007, Scholl and Sorenson 1993). Šios tyrimų krypties rezultatų apstu mokslinėje literatūroje. Varikliniai bandymai rodo, jog biodyzelinai pasižymi nestipriu P_e ir M_t sumažėjimu, kurį sąlygoja H_U sumažėjimas, sutrumpėjęs indukcijos periodas, įpurškimo slėgis ir DV suspaudimo laipsnis. Mokslininkų grupė (Altin *et al.* 2001) ištyrė, kad naudojant saulėgrąžų, sojos, medvilnės RRME, DV ($n = 1700 \text{ min}^{-1}$) M_t sumažėjo apie 10 %, o P_e – 15–20 %. Kiti mokslinių publikacijų autoriai nustatė nežymiai padidėjusį 1 cilindro Peter AC1 DV ($n = 2400$ ir $n = 3000 \text{ min}^{-1}$) b_e , jam dirbant RME (Nwafor *et al.* 2000). Saulėgrąžų RRME atliktų tyrimų (Antolin *et al.* 2002) rezultatuose pažymėta, jog H_U , lyginant su D, yra mažesnis ~12 %, tačiau, kaip teigia autoriai, degalų sąnaudos yra mažesnės nei jų gaminama energija.

Tačiau dalis publikuotų tyrimų rezultatų parodė, jog skirtingais atvejais panaudojant mišinius gali būti stebimas neryškus DV P_e išaugimas lyginant su D. Šis efektas sąlygojamas biodyzelino sudėtyje esančio O₂, kuris sąlygoja aukštesnį pilnutinio degalų sudegimo laipsnį riebaus mišinio degimo zonoje (Agarwal and Das 2001, Kalam *et al.* 2003, Kalligeros *et al.* 2003).

Biodyzelinai ir jų mišiniai su D pasižymi ankstesne KDF pradžia lyginant su D, šis pokytis atsiranda dėl trumpesnio užsiliepsnojimo vėlavimo (indukcijos periodo). Bendru atveju, lyginant su D, pasižymi sumažėjusiu p_{max} padidėjimo rodiklio ir maksimalaus ŠI rodiklio sumažėjimu. Biodyzelinai pasižymi aukštesnio laipsnio difuziniu degimu lyginant su D. Tyrimai rodo, jog biodyzelinų panaudojimas DV be pakeitimų įmanomas su priimtinais ŠI svyravimais, o atlikus DV, dirbančio biodyzeliniais ar mišiniais, darbo proceso optimizaciją, t. y. padidinus įpurškimo slėgį, trukmę, suspaudimo laipsnį, galima pasiekti geresnių degimo ir ŠI proceso rodiklių (Gumus 2010, Kannan 2011).

Bendrai analizuojant mokslinę literatūrą (Tormos *et al.* 2010, Nabi *et al.* 2009, Roskilly *et al.* 2008, Lujan *et al.* 2009, Kousoulidou *et al.* 2010, Nurun *et al.* 2006, Canakci 2007, Murillo *et al.* 2007, Buyukkaya 2010) galima pasakyti, kad įvairių rūšių mišinių ir grynų RRME palyginamieji (su D) tyrimai, atlikti panaudojant skirtingų paskirčių DV (aukštų n tiesioginio įpurškimo, su Common rail degalų sistema, su TK, be TK, laivų paskirties, standinius vieno cilindro ir kt.), rodo, jog esant artimam ar šiek tiek žemesniam η_e , grynų RRME ir jų mišinių su D sunaudojimas yra didesnis, kuris skirtingais atvejais siekė 11–13 %. Registruojant nepilno degimo produktų (CO, HC, PM) emisijas ir SM,

panaudojant RRME, buvo pastebėti reikšmingi sumažėjimai kiekvienu atveju. NO_x emisijos padidėjimas (11–20 %) buvo registruojamas praktiškai visuose tyrimuose, atliktuose panaudojant DV be EGR sistemos. Kitų tyrimų (Kalligeros *et al.* 2003, Lin and Huang 2003) rezultatai rodo, jog panaudojant mišinius buvo pasiektos žemesnės NO_x emisijos reikšmės. Šį pokytį lemia didesnis, lyginant su D, O_2 kiekis biodyzeline, kuris trumpina užsiliepsnojimo vėlavimo periodą ir sumažina degalų, dalyvaujančių KDF, kiekį, tuo pačiu mažina maksimalią degimo temperatūrą, kuri tiesiogiai daro įtaką NO_x emisijos sumažėjimui (Monyem and Van Gerpen 2001).

Siekiant praplėsti biodegalų žaliavos sektorių bei pagerinti RRME ir D mišinių fizikines savybes (kinematinę klampą, kt.) kartu maišomas ir A. Sojos, gyvulinių riebalų, RRME, maišytų su M, ricinų, panaudoto aliejaus mišinių variklinės savybės charakteringos bendriems RRME panaudojimo požymiams (Aydin and Ilkic 2010, Cheng *et al.* 2008, Najafi *et al.* 2007, Valente *et al.* 2010, Krohn and Frupp 2012, Thamsiriroj and Murphy 2011). DV panaudojant DM buvo pastebėti aukštesni M_t ir P_e rodikliai. CO_2 emisijos tyrimai pateikia dvejopus rezultatus, kurių dalis teigia, kad CO_2 emisija yra artima D, kita – teigia, kad CO_2 emisija panaudojant RRME yra mažesnė dėl mažesnio C kiekio degalų sudėtyje. Tačiau RRME gyvavimo ciklas pasižymi mažesnėmis CO_2 emisijomis, skirtingų RRME gyvavimo cikle gali būti pasiektas apie 20–30 % CO_2 sumažėjimo efektas (Qi *et al.* 2010, Coniglio *et al.* 2013).

Alkoholio priedo panaudojimas RRME ir D mišiniuose plačiai sutinkamas literatūroje. Skirtingų santykių B ir D mišinių (B5, B10, B20) panaudojimas Audi 1,9 TDI 1Z DV ($n = 1500 \text{ min}^{-1}$) ištirtas Vengrijos ir Afrikos mokslininkų (Siwale *et al.* 2013). Atitinkamai buvo užfiksuoti reikšmingiausi pasikeitimai esant 75 % $p_{e \text{ nom}}$: SM sumažėjimas – 55,5 %, 77,8 %, 85,1 %; CO sumažėjimas – 35,7 %, 57,1 % ir 71,4 %; NO_x padidėjimas – 10,3 %, 32,3 % ir 54,4 %; CH padidėjimas 21,4 %, 71,4 %, 214 %. Taip pat buvo nustatytas ryškėjantis KDF atsiradimo aspektas didinant B kiekį mišinyje.

5 % M priedo B20 mišiniuose panaudojimą Mitsubishi 4D68 DV ištyrė mokslininko Mat Yasin komanda (Mat Yasin *et al.* 2014). Tyrimai buvo atliekami DV dirbant tiek skirtingų n režimais (dalinės apkrovos režimas, 1500–3500 min^{-1}) bei nekintamų n (2500 min^{-1}) kintamos apkrovos režimais ($p_{me} = 0,05, 0,4, 0,7 \text{ MPa}$). Lyginant su D, buvo nustatyta žemesnė DV išvystoma galia bei 4–6 % išaugęs b_e B20 ir B20+M5 panaudojimo atveju. Taip pat buvo registruojamas 13 % NO_x emisijos padidėjimas tuo tarpu kai CO ir CO_2 sumažėjo iki 17–18 %. B20+M5 atveju buvo nustatyta ~7 % trumpesnis ŠI periodas, autoriai tai grindė didesne A specifine šiluma.

Bendru požiūriu RRME mišinių su D panaudojimas skirtingais atvejais didina DV degalų sunaudojimą, o taip pat NO_x emisiją, tačiau stipriai ir efektyviai mažina nepilno degimo produktų emisijas, gerina energijos

panaudojimą. Pastarieji teiginiai RRME leido įsitvirtinti degalų rinkoje kaip priedas D. Labiausiai paplitę RRME, pagaminti iš rapso, palmių, sojų, saulėgrąžų, kokosų, jatrofos aliejaus. Neatsižvelgiant į RRME paskirtį, panaudojimo ir kt. savybes, juos vienijantis veiksnys yra tinkamumas maisto pramonei. EK 2013 m. paskelbtame komunikate „Energetikos technologijos ir inovacijos“ pateikė naujus reikalavimus, kad ne daugiau nei pusė 10 % tikslo būtų pasiekta naudojant įprastinius biodegalus, o kita dalis – panaudojant II ar III kartos biodegalus, netinkamus maisto gamybai. Ši ES pateikta strategija buvo viena iš lemiančių faktorių pasirenkant disertacijos tyrimų kryptis.

II kartos biodyzelinų gamybai naudojamas aliejus paprastai spaudžiamas iš (Atabani *et al.* 2013) *Jatropha curcas*, *Calophyllum inophyllum*, *Sterculia foetida*, *Madhuca indica*, *Pongamia glabra*, linų sėklų, *Pongamia pinnata*, gumamedžio sėklų, *Azadirachta indica*, *Camelina sativa*, *Lesquerella fendleri*, tabako ir kt. O taip pat mikrodumbliai yra patrauklūs II kartos (skirtinguose šaltiniuose priskiriami prie III kartos biodegalų) biodyzelinų gamybai. Lyginant su maistinės kilmės biodyzeliniais, pagaminti iš mikrodumblių biodyzelinai yra ekonomiškesni pasižymi aukščiausiu derlingumo lygiu (Mata *et al.* 2010), palyginimui – biodyzelino gamybos iš mikrodumblių potencialas yra 25 kartus didesnis nei iš palmių.

Bendru atžvilgiu vertinant I, II kartos RRME ir jų mišinių su D savybes, ypatingų skirtumų nėra pastebima, nes tiek I tiek ir II kartos RRME prieš patekdami į rinką turi tenkinti to paties EN 14214 standarto reikalavimus.

Įprasta, jog didinant RRME kiekį mišinyje b_e didėja, mokslininkai (Aliyu *et al.* 2011) ištyrė II kartos Krotono (*lot. Croton megalocarpus*) RRME mišinius B5, B20, B50, B100 ir nustatė, kad šiais mišiniais dirbančio 3 cilindrų DV Perkins D3.142 ($n = 1380 \text{ min}^{-1}$) b_e , lyginant su D, išauga atitinkamai 2,65 %, 3,8 %, 4,7 % ir 4,7 %. Šių autorių pastebėtas įprastiems mišinių tyrimų duomenims priešingas rezultatas (CO atžvilgiu), didinant RRME kiekį mišinyje CO emisija didėja, šį efektą autoriai aiškina, kad nors ir RRME kiekyje esantis O_2 gerina pilnutinį degimo procesą, tačiau dėl didesnės mišinio klampos bei D pritaikytų purkštukų panaudojimo vyksta blogesnis degalų išpurškimas tuo pačiu ir degiojo mišinio formavimas.

S. W. Kruczyński, vienas iš mokslininkų, kuris *Camelina sativa* II kartos RRME panaudojimo Perkins 1104-C44 DV tyrimuose (Kruczynski 2013) nustatė M_t padidėjimą (iki 5 %) ir iki ~20 % ($1000\text{--}2200 \text{ min}^{-1}$). Nustatyti aukštesni CO, NO_x , PM rodikliai, kurių charakteris grindžiamas prastene išpurškimo kokybe, atsiradusia dėl didesnio CSME tankio ir klampio. Taip pat RRME panaudojimo atveju buvo nustatyta intensyvesnis, bet trumpesnis ŠI DV dirbant $n = 2200 \text{ min}^{-1}$ (236 Nm) ir 1400 min^{-1} (210 Nm) n režimais.

Apie mikrodumblių RRME (DME) panaudojimą DV mokslinės literatūros yra mažai. Vieni iš tokio profilio tyrimų (Tuccar *et al.* 2014) teigia, jog

panaudojant Mitsubishi canter 4D34-2A DV DME ir D mišinius B5, B10, B20, B50, B100, P_e sumažėjo 1–6 % diapazone (didėjančia tvarka, 6 % – B100). M_t sumažėjimas siekė nuo ~4 % ($n = 1400 \text{ min}^{-1}$) ir iki 13 % ($n = 2400 \text{ min}^{-1}$). NO_x koncentracija visame tirtų n diapazone sumažėjo ~9 %, autoriai grindžia ilgesniu indukcijos periodu, CO koncentracija sumažėjo vidutiniškai 9 %. Analizuojant šią publikaciją, pastebima palyginimo su kitų autorių tyrimų rezultatais stoka, tai pagrindžia anksčiau išdėstytą nuomonę, jog DME panaudojimo DV tyrimai šiuo metu yra nauja tyrimų kryptis.

1.2.3. Alkoholių ir jo mišinių variklinių savybių mokslinių tyrimų analizė

A gali būti naudojami kaip priedai mineraliniams degalams. A – yra degalai, kurių molekulės turi viena O_2 molekulę daugiau. Praktiškai bet kokios A šeimos molekulės gali būti panaudotos kaip degalai. Varikliuose naudojami A yra M (CH_3OH), E ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), propanolis ($\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$) ir B ($\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$) (Demirbas 2008). Tačiau tik du iš jų ekonomiškai patrauklūs panaudojimo varikliuose procese, t. y. M ir E. M yra gaminamas įvairiai, dažniausiai skystų produktų, pagamintų iš medžio, anglies, gamtinių ir naftos dujų, distiliavimo būdu. E įprastai gaminamas biomasės biokonversijos keliu (Bala 2005).

Šių A panaudojimas plačiai ištirtas (Beeckmann *et al.* 2014, Siwale *et al.* 2014, Zhang *et al.* 2014) kibirkštiniuose varikliuose. Didesnės E ar M koncentracijos mišinių su D panaudojimas yra apribotas dėl jų maišymosi su D (Rakopoulos 2013). Mechanškai maišant M arba E su D pastebimas homogeniškas mišinys A kiekiui esant iki 5 %, didinat šį kiekį, be papildomų priedų, pastebimi heterogeniniai mišinio požymiai. Tačiau mokslininkams (Rakopoulos *et al.* 2014, Rakopoulos *et al.* 2011) tiriant kito alkoholio – B ir D mišinius, buvo pastebėta, jog mišinyje galima panaudoti iki 30 % B.

B pasižymi tuo, kad gali būti gaminamas panaudojant nemaistinės kilmės biomasės dujas (II kartos degalai), o taip pat pasižymi aukštesniu H_u , CN, žemesniu garavimo slėgiu ir itin geromis, lyginant su E ir M, maišymosi su D savybėmis (Rakopoulos *et al.* 2011). O taip pat, lyginant su M ir E, B savybės yra artimesnės D (Rakopoulos *et al.* 2011, Hansen *et al.* 2009). Literatūroje B ir D mišinių panaudojimo DV tyrimų rezultatai, lyginant su D-E-RRME mišinių tyrimais, nėra itin paplitę, šioje srityje pastebimas žymus C. D. Rakopoulos mokslininko indėlis (Rakopoulos *et al.* 2010, Rakopoulos *et al.* 2010).

Mokslininkai tirdami D ir D su B mišinį B40 nustatė (Merola *et al.* 2011), jog pastarasis pasižymi aukštesniu degimo efektyvumu. B40 panaudojimas vieno cilindro 2 taktų DV, esant fiksuotam degalų įpurškimui, sumažino jo nepilno degimo produktų emisiją į aplinką, tačiau padidino OH išmetimus. Tai

sąlygojo B esantis O_2 , o taip pat B pasižymi lakumu, kuris gerina degiojo mišinio homogeniškumą degimo kameroje.

B mišiniai su D ar/ir biodyzeliniais pasižymi ilgesniu indukcijos periodu, šį veiksnį sąlygoja mažesnis B CN. Mokslininkai (Liu *et al.* 2012) ištyrė, jog sojos biodyzelino ir D mišinio (B0/S20/D80) indukcijos periodas 0,2 ms, o tuo tarpu mišinių su B (B5/S15/D80 ir B10/S10/D80) 0,4 ms. Taip pat šie mokslininkai (Liu *et al.* 2012) nustatė ŠI rodiklio sumažėjimą B panaudojimo atveju, kuris buvo tikėtinas dėl mažesnio B tankio bei H_U , kuris lėmė mažesnę įvestos energijos kiekį tuo pačiu ir maksimalių slėgio cilindre reikšmių sumažėjimą.

Taip pat šie mokslininkai nustatė, kad B priedas tiek D, tiek ir D mišiniui su biodyzelinu gali sumažinti SM emisijas esant įvairioms temperatūroms degimo zonoje, o ypač didėjant temperatūrai. SM bei kitų nepilno degimo produktų sumažėjimas DV ID panaudojant B pagrindžiami kitų mokslininkų tyrimais: D.C. Rakopoulos Ricardo/Cussons Hydra 4 taktų vieno cilindro DV (Rakopoulos 2013), 4 cilindrų DV Mitsubishi Canter (Tuccar *et al.* 2014) ir kt. (Rakopoulos 2013, Dogan 2011, Lujaji *et al.* 2011).

Siekiant degalų gamyboje naudoti vis mažiau neatsinaujinančių išteklių, kita B panaudojimo, kaip biologinės kilmės A, kryptis yra jo panaudojimas aliejaus peresterinimo procese. Lietuvos mokslininkai ištyrė (Makarevičienė *et al.* 2013) RME ir RBE su D mišinius B10, B20, B30 DV Audi 1,9 TDI 1Z ($n = 2500 \text{ min}^{-1}$, $M_t = 100 \text{ Nm}$) ir nustatė, kad padidinus minėtųjų RRE biokomponento dalį mišinyje iki 30 %, jie savo fizikinėmis ir cheminėmis savybėmis šiek tiek skiriasi. Variklinių RME ir RBE savybių stipriausias pokytis (lyginant su D) pastebimas B30 panaudojimo atveju, kuris pasiskirstė atitinkamai: b_e padidėjimas – 5 % ir 6 %; η_e padid. – 3 % (abiem atvejais); CO sumažėjimas – 33 % (abiem atvejais); CO₂ sumažėjimas – 3 % ir 1 %, CH sumaž. – 25 % ir 38 %; SM sumaž. – 53 % ir 49 %; padid. NO_x – 2 %.

B, pagamintas iš biologinės kilmės žaliavos techniškai yra patrauklesnis lyginant su E dėl keleto priežasčių: H_U didesnis iki ~25 %; B pasižymi lėtesniu garavimu, tai padidina jo eksploatacijos saugumą; skirtingai nei E, B gali būti transportuojamas egzistuojančiais vamzdiniais; B tinka didesnės koncentracijos degalų mišiniams su D, o taip pat gali būti naudojami kibirkštiniuose varikliuose kaip gryni degalai, kai tuo tarpu E, atlikus variklio pakeitimus, gali tik 85 % mišinyje su benzinu. Tačiau B gamyba ir praktinis panaudojimas yra apribotas ekonominių veiksnių: brangi gamyba, išplitusi E rinka, kt.

1.2.4. Daugiakomponenčių mišinių poreikio analizė

Intensyvesnį įprastų biodegalų panaudojimą kaip D priedą riboja veiksniai, atsirandantys dėl biokomponento dalies didinimo mišinyje. Šie veiksniai stipriai

priklauso nuo RR profilio (Coniglio *et al.* 2013, Demirbas 2008) ir kaip palyginimas su D gali būti suskirstyti į šias grupes:

- ✓ veiksniai, atsirandantys dėl mišinių fizikinių savybių pokyčio:
 - prastesnėmis žematemperatūrinėmis charakteristikomis, tokiomis kaip drumstimosi ir stingimo temperatūros, šaltu oru tai gali sukelti filtro užsikimšimą;
 - žemesniu energijos kiekiu, kaip pavyzdys, RME H_U siekia 37–38 MJ/kg, tuo tarpu D siekia 42–43,5 MJ/kg;
 - didesniu tankiu ir kinematine klampa, kurie lemia prastesnę degalų smulkiadispersiškumą išpurškimo metu, neigimai sąlygoja purkštukų tikslumą, degalų pasiskirstymą degimo kameroje. Reikia paminėti tai, jog šis trūkumas nėra pašalinamas po peresterinimo proceso, tačiau stipriai sumažina klampį. O taip pat didina purkštukų koksavimąsi;
- ✓ veiksniai, atsirandantys dėl mišinių motorinių savybių pasikeitimo:
 - priklausomai nuo RRME profilio ir kiekio mišinyje, daugeliu panaudojimo atvejų pasižymi aukštesne NO_x emisija;
 - žemesnėmis išsvystomomis DV P_e , n , $M_{t\ max}$ sumažėja, lyginant su D, tačiau šis veiksnys pastebimas kartu su n sumažėjimu;
 - stokoja pranašumo ekonomiško atžvilgiu, lyginant su D. DV, dirbantis RRME, pasižymi didesniu degalų sunaudojimu, o taip pat produkcijos kaina degalų rinkose yra aukštesnė, lyginant su D;
- ✓ veiksniai, atsirandantys mišinių eksploatacijos metu:
 - mažesnis atsparumas oksidacinei ir aukštatemperatūrinei degradacijai, stabilumo padidinimas reikalauja papildomo stabilizatorių kiekio;
 - priemaišomis, tokiomis kaip laisvosios RR, glicerinu ir priemaišomis, likusiomis po gamybos proceso gali pagreitinoti DV dėvėjimąsi, koroziją ir akroleino gamybą, kuris yra vienas iš pradinių smogą sukeliančių veiksnių;
 - sluoksniavimasis (separacija), formuojant mišinius su įprastu A – E;
 - kt.
- ✓ degalų naudojimo ir gamybos iš maistinės kilmės žaliavos veiksnys:
 - moralinė atsakomybė dėl žaliavos, tiesiogiai tinkamos maisto gamybai, panaudojimo ne pirmo būtinumo srityje, atsižvelgiant į tai, jog dalis pasaulio žmonijos jaučia maisto stygių;
 - ES strateginiai sprendimai, verčiantys plėtoti II kartos biodegalų gamybą iš atsinaujinančios nemaistinės kilmės žaliavos.

DM panaudojimas gali būti vienas iš būdų visiškai arba iš dalies likviduojant šiuos neigiamus efektus sukeliančius veiksnius. Taip pat DM

panaudojimas leidžia praplėsti biodegalų žaliavos bazę bazinio mišinio sudėtyje papildant kitu, atitinkamas savybes gerinančiu, biokomponento priedu.

Tyrimuose išbandyti DM, be žaliavos potencialo plėtros aspekto, apėmė keleto kitų, su mišinių panaudojimu susijusių problemų sprendimo kryptį:

- ✓ išbandyto A-B (DM sudėtyje) specifinė garavimo šiluma yra mažesnė nei E ir M, todėl DV, dirbantis šiais DM, lengviau užvedamas šaltuoju metu laikotarpiu. B panaudojimas DM leidžia pagerinti žematemperatūrinės degalų charakteristikas. Būtent plačiai paplitusių RME vienas iš pagrindinių trūkumų eksploatacijoje yra susijęs su ribotomis jų panaudojimo galimybėmis šaltuoju laiku. B, separacijos atžvilgiu, kaip jau buvo minėta, yra stipriai pranašesnis už E ir M, o taip pat H_U yra didesnis už minėtųjų A. RBE panaudojimas leido praplėsti ekperimentinių DV darbo parametrų duomenų bazę, kurioje aliejaus esterifikacijos procese vietoje M panaudotas B. Kaip II kartos biodegalai, B gali būti gaunamas iš celiuliozės turinčios biomasės, turintis didesnes perspektyvas nei E. Pagal ASU mokslininkų ir tyrėjų duomenis tiek B30 tiek ir B50 DM atitiko EN 14214 standarto keliamus reikalavimus;
- ✓ taip pat siekiant sumažinti maistinės žaliavos panaudojimą degalų gamybai, buvo pasiūlyta panaudoti maistui netinkamo augalo CSME (SCME, WCME), tačiau dėl didelio JS (pagrįsta ASU tyrėjų), kuris neleido užtikrinti galiojančių standartų normas, buvo pridedama KME priedo, kuris pasižymi žemu JS. Tai leidžia praplėsti II kartos RRME žaliavos potencialą ir efektyviai realizuoti atliekinius kiaulienos riebalus;
- ✓ buvo išbandyti B30 su M priedu. M gali būti gaminamas kaip II kartos aukštesnysis A ir praplėsti biodegalų žaliavos potencialą.

1.3. Biodegalų eksploatacinių savybių analizė

Šiame punkte glaustai apžvelgiamos eksploatacinės savybės, kurių vienos, tiesiogiai susijusios su diseratacijos darbo tyrimais, analizė yra išplėsta.

Pasirinkto termino „biodegalų eksploatacinės savybės“ samprata apima tokias biodegalų charakteristikas kaip:

- ✓ biodegalų agresyvumas (rūgštingumas, plaunančios savybės, polimerizacija, kt.) – daro įtaką DV degalų sistemai, sandarinančioms medžiagoms, kt.;
- ✓ žematemperatūrinės charakteristikos, nusakančios biodegalų gebėjimą išlaikyti panaudojimui tinkamas savybes esant žemai aplinkos temperatūrai. Stipriausias efektas pasireiškia DV paleidimo momentu bei šalto DV darbo periodu, blogina įpurškimo ir išpurškimo savybes ir kt.

- ✓ biodegalų oksidacinis ir terminis stabilumas (peroksidų ir laisvųjų radikalų formavimasis dėl oksidacijos ar temperatūros poveikio, ribojantis praktinį biodegalų panaudojimą) – daro įtaką DV darbo parametrams ir jų sistemų funkcionavimui.

Biodegalų agresyvumas. Biodegalų agresyvumas pasireiškia tirpinančiomis savybėmis, o tai kelia problemas degalų sistemos sandarinimo medžiagoms ir detalių eksploatacijai. Naudojant biodegalus yra didelė tikimybė tam tikriems gumos ir elastomerų junginiams, kurie naudojami senesniuose DV, suminkštėti ir degraduoti. Šios problemos gali būti sprendžiamos iš standartinių guminių medžiagų pagamintus degalų sistemos sandarinimo elementus ir komponentus pakeičiant į sintetinius bei atsparius biodegalų agresyvumo poveikiui (Hasan *et al.* 2006). Atsparios medžiagos gali būti tokios kaip teflonas, nailonas, nitrilas, vitonas a401-c, vitonas GFLT, fluorotas silikonas, poliuretanai.

Reikia pažymėti, kad degalų sistemų segmentai, pagaminti iš žalvario, bronzos, vario, švino, alavo esant agresyviai biodyzelino poveikiui oksiduojasi ir sudaro nuosėdas. Todėl švininiuose, cinkuotuose, variniuose vamzdžiuose ir sujungimuose bei žalvariniuose reguliatoriuose gali susidaryti nuosėdų, o tai gali paskatinti filtrų užsikimšimą. Pažeistas ar potencialiai pažeidžiamas dalis rekomenduotina pakeisti iš nerūdijančio plieno, aliuminio ar iš kitų atsparių medžiagų pagamintomis dalimis.

Žematemperatūrinės charakteristikos. Šias savybes apibūdina anksčiau išvardinti parametrai, tokie kaip drumstimosi, stingimo ir šalto filtro užsikimšimo temperatūra. Biodegalų savybė, kuriai stipriausiai daro įtaką žemos temperatūros aplinka, yra kinematinė klampa, jos pokytis tiesiogiai susijęs su degalų įpurškimo sistemos darbu. Krentant aplinkos temperatūrai klampa didėja, tuo pačiu mažėja degalų tankis, o tai blogina degalų išpurškimo savybes ir mažina purkštukų tikslumą. Kuo mažesnis klamos parametras, tuo lengviau degalų sistemai tiekti degalus ir juos išpurkšti (Islam *et al.* 2004).

Taip pat žema temperatūra gali sąlygoti parafininių kristalų formavimąsi degaluose, o tai gali sukelti degalų pratekėjimo pro filtrą sutrikimus. Taip pat žemai temperatūrai paveikus vandens ir degalų emulsiją (degalų sistemoje atsitiktinai eksploatacijos metu atsiradęs vanduo) gali susidaryti sąlygos atskirų ledo fragmentų formavimuisi, o tai gali lemti filtrų užkimšimą.

Bendru atveju, siekiant išvengti žemos temperatūros aplinkos keliamų nepatogumų, praktikoje naudojami priedai, kurie mažina klampą, saugo nuo parafininių kristalizacijos, o taip pat neleidžia vandeniui formuoti kristalų.

Terminis stabilumas. Kadangi DV degalų sistemoje pakartotinai, dėl degalų grįžtamojo veiksnio, cirkuliuoja paduoti į įpurškimo sistemą degalai, jie santykinai ilgai yra veikiami aukštos temperatūros, atsiradusios dėl šilumos nuvedimo nuo purkštuko konstrukcijos. Ilgai aukštos temperatūros veikiamų biodegalų laisvieji radikalai gali sukelti įvairius ciklizacijos ir oligomerizacijos

procesus, o taip pat kaip neigiamą efektą – „Diels Alder“ reakciją (Mittelbach and Enzelsberger 1999). DV ir degalų sistemų gamintojų pozicija yra ta, kad minimalūs terminio stabilumo reikalavimai turi būti užtikrinti tam, kad išvengti polimerizacijos produktų formavimosi, apsaugant degalų sistemą (siurblius, vamzdelius ir purkštukus) nuo apgadinimo ir degalų filtrus nuo užsikimšimo. Šis norminis parametras yra svarbus ir yra įtrauktas į EN 14214 standartą.

Oksidacinis stabilumas. Ši savybė tiesiogiai susijusi su degalų saugojimo (sandėliavimo) procesu ir taip pat su disertacijos rengimo metu atliktu biodegalų oksidacijos įtakos DV energetiniams ir aplinkosauginiams parametrams tyrimu.

Daugelis biodegalų rūšių pagaminti panaudojant transesterifikacijos metodą, kuris vyksta tarp trigliceridų ir A suformuojant esterius ir gliceriną. Trigliceridas yra glicerino molekulė su 3 prijungtomis ilgomis RR grandinėmis. Trigliceridas, dalyvaujant katalizatoriui NaOH arba KOH, reaguoja su A, t. y. E arba M (dažniausiai tam naudojamas) ir formuoja mono alkilo esterį ir gryną gliceriną. RRME gamyboje M ir KOH mišiniui teikiama pirmenybė, nes biodegalai, pagaminti naudojant šiuos, transesterifikacijos proceso elementus, pasižymi aukštesniu atsparumo oksidacijai laipsniu.

RRME oksidacinė degradacija vyksta dėl ilgalaikio kontaktavimo su aplinkos oru. Atsižvelgiant į RRME cheminę sandarą, oksidacija gali priklausyti nuo keleto faktorių, tokių kaip žaliavos, RR profilio, temperatūros, šviesos, spindulių intensyvumo, savo sudėtyje turimų natūralių antioksidatorių, kt.

Mokslinėje literatūroje plačiai aprašyta oksidacijos problematika, su kuria susiduriama vykdant ilgalaikį RRME sandėliavimą. Oksidacinis stabilumas yra parametras, apibūdinantis biodegalų degradacijos tendencijas bei nusakantis degalų atsparumą cheminiams pokyčiams. Oksidacinis stabilumas, ilgėjant sandėliavimo laikotarpiui, mažėja (A priedas P.A.13 pav.). Šis parametras susijęs su galimai atsirandančiomis DV dalių eksploatacijos problemomis (Karavalakis *et al.* 2010). Pagrindiniai oksidacijos proceso produktai yra peroksidai ir hidroperoksidai (A priedas P.A.14 pav.). Vykstant tolimesnei degradacijai minėtieji produktai formuoja trumpesnių grandinių junginius, tokius kaip mažo molekulinio svorio rūgštis, aldehidus, ketonus ir A (Schober and Mittelbach 2004, Tang *et al.* 2008). A atsiradimas biodegaluose sumažina pliūpsnio taško temperatūrą (Lin and Chiu 2010), o taip pat, atsiradus rūgštims, padidėja bendras rūgščių kiekis (A priedas P.A.15 pav.), galintis sąlygoti didesnę korozijos laipsnį (Paligova 2008). Reakcijos, kuriose dalyvauja nestabilios hidroperoksidų rūšys ir kitų RR grandinės, gali suformuoti didelio molekulinio svorio frakcijas, tokias kaip dimerines ir trimerines rūgštis, kurios gali sąlygoti filtro, purkštukų užkimšimą, nuosėdų formavimąsi (Waynick 2005).

Bendru atveju, RRME, stipriai paveiktus oksidacijos, galima atskirti dėl patamsėjusios rudos spalvos lyginant su ką tik pagaminto geltona spalva bei dėl

panašaus į dažų skleidžiamo kvapo. Taip pat oksidacijos paveikti degalai pasižymi didesniu rūgščių skaičiumi, tankiu ir klampa.

Daugumoje žaliavinių aliejų yra natūralaus antioksidatoriaus – vitamino E (tokoferolis). Tačiau aliejaus rafinavimo proceso metu tokoferolis gali būti pašalintas. Siekiant išvengti santykinai greitos RRME oksidacijos, būtina išsaugoti oksidacinį stabilumą, kuris (atsparumas oksidacijai) gali būti padidintas pridendant natūralių arba sintetinių antioksidatorių. Natūralūs priedai pasižymi prastesniu efektyvumu lyginant su sintetiniais antioksidatoriais (Sendzikiene *et al.* 2005, Dinkov *et al.* 2009). Priklausomai nuo RRME tipo, efektyviai veikiančių antioksidatorių koncentracija siekia nuo 200 iki 1000 ppm. Antioksidatorius veikia kaip medžiaga, surišanti laisvuosius radikalus ir stabdanti grandines reakcijas. Oksidacijos procese RR peroksido radikalai yra stabilizuojami ir oksidacijos grandinė yra nutraukiama.

A priedo P.A.13, P.A.14, P.A.15, P.A.16, P.A.17 paveiksluose pateikta RRME oksidacijos parametrų tendencija priklausomai nuo sandėliavimo laikotarpio. Oksidacijos parametrų pokyčiai ištirti ASU Aplinkos technologijos cheminių ir biocheminių tyrimų laboratorijos mokslininkų dalyvaujant bendrame tarptautiniame projekte EUREKA E!4018 „Camelina – Biofuel“, ir yra būdingi kitų mokslininkų rezultatams (Karavalakis *et al.* 2011, Thompson *et al.* 2013). Tyrimai atlikti su vasarinių, žieminių *Camelina sativa* ir kiaulienos riebalų ME mišiniais, atitinkamai SCME ir WCME, kurie savo sudėtyje neturėjo antioksidatoriaus priedo. Tyrimo rezultatai parodė, jog oksidacijos stabilumas ir cheminių bei fizikinių savybių pokytis priklauso nuo RRME gamyboje panaudotos žaliavos, o taip pat parodo antioksidatoriaus Ionol BS 200, kuris buvo panaudotas UAB „Mestilla“ pagamintame RME, teikiamą pranašumą.

Rinkoje labiausiai paplitę sintetiniai antioksidatoriai, kurių pagrindiniai yra: butilhidroksitoluenas, butilhidroksianizolas, tretino butilhidrochinonas, propilo galatas ir kt; pagal gamintojus: Baynox Plus (*Lanxess*), Ethanox 4760E (*Albemarle*), Bioextend (*Eastman*), BF 320 (*Kemin*), BS 200 (*Ionol*).

1.4. Dyzelinio variklio darbo parametrų matematinio modeliavimo programų apžvalga

Kita svarbi DV tyrimų dalis yra tyrimai panaudojant MM priemonės. DV darbo parametrų tyrimai, kaip ir pats DV projektavimas, testavimas įvairiuose darbo režimuose, tame tarpe ir pokyčio prognozavimas dirbant skirtingai degalais, reikalauja eilės eksperimentinių tyrimų, kas, savo ruožtu, reikalauja santykinai daug laiko ir materialinių išteklių. Dažnai, siekiant išvengti šių sąnaudų, pasitelkiami matematiniai DV darbą aprašantys modeliai. Šie modeliai,

panaudojant kompiuterinę įrangą, leidžia sumažinti eksperimentinių tyrimų, projektavimo, prognozavimo apimtis, o taip pat ir laiko sąnaudas.

Analogiškai kaip ir šiame tiriamajame darbe siekiant DV parko, regiono, t. t. mastu įvertinti D pakeitimą mišiniais, nėra tikslinga atskirai tirti kiekvieną transporto priemonę. Tikslingiau tirti vieną, parkui būdingą, TP ir panaudoti su eksperimentu suderintą matematinį modelį. Tačiau DV tyrimų praktikoje modelio pradinių duomenų bloko sudarymas reikalauja slėgio cilindre charakteristikos, kurios nustatymas yra konstrukciškai apsunkintas. Kaip darbo rezultatai rodo, šiai problemai spręsti yra galimybė panaudoti MM programas su atitinkamais pakeistų metodikų papildymais.

DV modeliavimas pradėtas vykdyti daugiau nei prieš keturis dešimtmečius ir yra tęsiamas iki šių laikų. Įprastai, stūmoklinio DV darbo ciklui modeliuoti naudojami vienzoniniai modeliai, multizoniniai ir kvazidimensiniai. Priklausomai nuo to, kaip modeliai gali būti panaudoti, juos galima suskirstyti į šias kategorijas: masės balanso, kuri aprašoma degalų, patekusių į cilindrą virsmis; energijos arba 1-ojo termodinamikos dėsnio; impulso ir kitų fizinių ir cheminių parametrų, kt.

Paplitusių DV darbo parametrų MM programų rezultatai pasižymi santykinai aukštu tikslumu lyginant su eksperimentiniais rezultatais bei plačiomis pritaikymo galimybėmis. Dažniausiai pasitaikančios DV MM tyrimuose yra šios programos: AVL (paketai: Boost, Fire, Exite, Cruise, kt.), Diesel RK, Ricardo, GT Suite (paketai: GT power, kt.), KIVA, Dynomation, Ricardo ir kt. Siekiant aukšto tikslumo, šios programos ar atskiri jų paketai apima keletą modelių, kurie aprašo atskirų DV svarbių sisteminių (pripūtimo, reguliavimo, išmetimo, kt.), procesinių (degimo, degalų išpurškimo, degiojo mišinio formavimosi, KK susidarymo, kt.), konstrukcinių vienetų funkcionavimą ir kt. Tokios plačios MM programų pritaikymo galimybės leidžia plėtoti esamų eksploatuojamų ir naujai kuriamų DV tyrimus.

Panaudojant MM programos Ricardo paketą WAVE, D. L. McCollum (McCollum *et al.* 2004) buvo siekiama tirti ir kaupti informaciją apie automobilinių DV darbo parametrus bei vertinti ateities emisijų mažinimo normų pritaikymo galimybes šiame sektoriuje. Panaudojus Ricardo WAVE kartu su Advisor 2002 WAVE paketu, buvo suformuota universalioji DV degalų sunaudojimo ir NO_x charakteristika, kuri buvo naudojama DV emisijų mažinimo efektyvumo tyrimuose.

Ricardo WAVE programa, kaip sudedamoji tyrimų dalis, leidžia greitai ir tiksliai optimizuoti DV komponentus, buvo panaudota kuriant aliumininį karbiuratorinį variklį, pasižyminti stipriai sumažėjusia CO₂ emisija. Šia MM programa sukurtas modelis leido sudaryti universaliąją DV charakteristiką bei atlikti atskirų elementų optimizaciją su naujai suprojektuotomis cilindro galvutėmis (Shaerlaeckens and Deckers 1994). P. A. Golubev panaudojė šią

MM programą ZMZ 514.10 ir 4052.10 ZMZ DV tyrimuose, kurių tikslas buvo oro įsiurbimo atvamzdžio geometrijos optimizacija, pasiekė 15% tūrinio efektyvumo padidėjimo (Golubev *et al.* 2013).

Siekiant sumažinti NO_x ir PM emisiją vandens-degalų emulsijos panaudojimo būdu A. Alahamer (Alahamer *et al.* 2010) panaudojo Diesel-RK MM programą (Maskvos Baumano technikos universitetas), kuria buvo skaičiuojami temperatūros, slėgio, ŠI cilindre duomenys. Indijos mokslininkų atliktuose Jatrofos (Jatropha) augalų aliejaus biodegalų mišinių su D tyrimuose (Nasim *et al.* 2010) buvo panaudotos Diesel-RK programos galimybės uždavus skirtingus degalų temperatūros duomenis, nustatant indikatorinį slėgį, ŠIC, kt.

Austrų firmos AVL multizoninis programinis paketas, paremtas bedimensiniais ir kvazi-dimensiniais modeliais, gebančio modeliuoti vidinius ir išorinius DV parametrus, vienzonis AVL Boost modelis pademonstravo aukštą tikslumą Z. Ping dujinio DV DP tyrimuose (Ping *et al.* 2010). Pagrindinis tyrimo tikslas buvo išsiaiškinti šilumos kiekio, nuvedamo į cilindro sienelės, pokytį. Kaip teigė autoriai, šis, su eksperimentiniais rezultatais suderintas, aukštu tikslumu pasižymintis modelis taip pat buvo naudojamas DV cilindro galvutės temperatūrinių rodiklių tyrimų srityje.

Mokslininkas P. Pogorevc mišinių ir D išpurškimo charakteristikų palyginamuosiuose tyrimuose panaudojo AVL Fire MM paketą (Pogorevc 2008). Tyrimas buvo nukreiptas į degalų išpurškimo charakteristikų tyrimus bei į empirinių matematinių modelių sudarymo skirtingiems degalams tobulinimą. Multizoninio modelio panaudojimas davė artimus eksperimentiniams duomenims rezultatus, kurie parodė, kad biodyzelinų įpurškimo slėgis kaip ir fakelo bei skvarba greitis yra didesni.

KIVA MM programa, Los Alamos laboratorijos (JAV) sukurtas paketas, kuris remiasi fluidų modeliavimo platforma, modeliuoja užsiliepsnojimo, turbulentinio degimo, perėjimo nuo užsiliepsnojimo prie degimo procesus bei NO_x ir PM emisijas. Šia programa Y. Choi sukurtas multizoninis modelis buvo naudotas tiriant lokalinių temperatūrų formavimosi įtaką NO_x ir PM emisijoms mišinių panaudojimo atveju Choi *et al.* 1997). Tyrime buvo nustatyta, jog esant tokioms pat sąlygoms, dėl didesnio tankio ir klampio mišiniai degimo zoną degimo kameroje pasiekia greičiau nei D. Taip pat buvo nustatyta, jog mišinių atveju, esant geresnėms oro-degalų mišinio charakteristikoms, vyksta geresnis degimo procesas ir tuo pačiu atsiranda didesnis skaičius aukštų temperatūrų zonų cilindre. Ši ypatybė lemia didesnę NO_x emisiją bei dėl geresnio degimo proceso – sumažėjusią nepilno degimo produktų, šiuo atveju PM, emisiją.

Amerikiečių kompanijos ProRacing Sim, LLC MM programa Dynomation-5 yra labiau orientuota į karbiuratorinių aukštų n lenktynėms skirtų DV MM procesą. Programa leidžia atlikti P_e , M_t , slėgio įvairiuose DV taškuose modeliavimą bei atskirų DV dalių, sistemų, kt. reguliavimą ir optimizaciją.

GT Power (sudedamoji GT Suite dalis), amerikiečių firmos Gamma Technologies, jų teigimu taip pat gali skaičiuoti išorinius ir vidinius DV darbo parametrus (remiantis stūmoklio judėjimo, degimo proceso, dujų kompozicijos ir temperatūros parametrais), gali tiesiogiai perduoti informaciją tokioms MM programoms kaip openFOAM, StarCCM+, Ansys CFX. GT Power MM programa naudojama įvairiuose DV tyrimuose, tokiuose kaip vožtuvų reguliavimo (Sellnau and Rask 2003, Lancefield 2003), EGR privalumų ir trūkumų nustatymo (Reifarth and Angstrom 2010), DV (Park *et al.* 2010) ir benzininių (Shi and Feng 2010) VDV oro įsiurbimo sistemų optimizavimo. Kitų autorių atlikti tyrimai parodė, jog sudėtingesni programos modeliai gali apimti skirtingos cheminės sudėties degalus (Etheridge *et al.* 2009), o taip pat leidžia tirti akustinius bei garso slopintuvų parametrus (Shaohua *et al.* 2003).

Šio darbo MM tyrimų apimtyje panaudotas AVL kompanijos santykinai neseniai pasirodžiusios MM programos Boost Burn paketas, kuris orientuotas į ŠICh, temperatūros cilindre ir šilumos perdavimo procesų modeliavimą, remiantis eksperimentinių DV tyrimų rezultatais. Taip pat panaudota IMPULS MM programa, kuri modeliuoja DV darbo parametrus, šiame tyrime svarbios ŠICh analizė atliekama pagal pasiūlytą I. I. Vibe metodiką vienzoniniu matematiniu modeliu (Vibe 1962). Ši metodika taip pat įtraukta į tokių MM programų kaip AVL Boost, Ricardo, KIVA ir kt. sudėtį. I. I. Vibe išraiška skirta efektyviai ir santykinai aukšto tikslumo lygiu modeliuoti DV ŠI cilindre procesą, aprašomą specifiniu šilumos išsiskyrimo rodikliu, kuris nurodo ŠI (sudegusios degalų frakcijos) charakterį priklausomai nuo ŠI trukmės.

Vienzoniniai modeliai pasižymi paprastumu, šiuose modeliuose sudaroma pagrindinė balanso integralinė lygtis, darbinis kūnas suprantamas kaip turintis homogeninę struktūrą. Pagrindinės balanso lygties nariai kaip ir pačios lygties baigtinis rezultatas nustatomas integruojant. Kitaip tariant, gaunama matematinė išraiška, kuri aprašoma keliomis įprastinėmis integralinėmis lygtimis. Vienzoniame DV modelyje darbinis kūnas yra apribotas cilindro sienelių, vožtuvų, degimo kameros sienelėmis ir stūmokliu. Darbo kūnas suprantamas kaip idealiai susimaišęs visame tūryje, o šiluma išsiskyrusi degimo metu išreiškiama pasitelkiant šilumos išsiskyrimo santykinį rodiklį, kuriuo remiantis atliekami KK susidarymo cilindre matematiniai skaičiavimai.

Multizoniniai modeliai pasižymi kaip santykinai sudėtingi, analizuojama eilė zonų. Darbinio kūno tūris fiziškai suskirstytas į itin mažus tūrius, dėl to šie modeliai formuojami diferencialinių lygčių pavidalu su dalinėmis išvestinėmis. Šiuo būdu atliekant MM veiksmus naudojami galingi kompiuteriai. Praktikoje sutinkami dvizoniai DV cilindre vykstančių procesų matematinių modelių, kuriuose degimo kamera suskirstoma į dvi zonas, kurios savo ruožtu įvardinamos kaip 1-oji nesudegusio degalų-oros mišinio zona ir 2-oji – sudegusio mišinio zona. Šis metodas taikomas modeliuojant ne tik ŠI procesą DV cilindre,

bet ir KK susidarymo procesus. Multizoniniai modeliai dažnai sudaromi susiejant tarpusavyje vienzonius matematinius modelius, siekiant plėtoti proceso išbaigtumo skaičiavimus.

1.5. Pirmo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Energijos taupymas efektyviau ją naudojant aktualus kiekvienam regionui, ypač kai didžioji jos dalis yra importuojama. O taip pat klimato pokyčiai, pasireiškiantys kaip stichijos ir yra didžiąja dalimi sąlygoti OT, yra itin svarbūs žmonijai. OT gali būti sumažinta kompleksinėmis priemonėmis, kurių viena – biologinės kilmės degalų panaudojimas viename didžiausių oro teršėjų – TS.
2. Kaip mineralinių degalų priedas DV gali būti panaudoti standartus atitinkantys įvairios rūšies aliejaus RRME, o taip pat ir A. Labiausiai paplitęs ES RRME – RME, o kaip priedas benziniui – E. Biokomponentas mineraliniuose degaluose mažina variklių nepilno degimo produktų (CO, CH, PM) emisijas.
3. ES EK 2013 m. paskelbtame komunikate „Energetikos technologijos ir inovacijos“ pateikė naujus reikalavimus bei strategijas dėl II ir III kartos nemaistinės kilmės biodegalų panaudojimo plėtros. Dėl naujumo ir dėl santykinai aukšto RRME gamybos potencialo ypač aktualūs vandens dumblių metilesteriai, kurių panaudojimo DV tyrimų rezultatų yra itin mažai.
4. II kartos RRME savybės yra artimos I kartos RME ir taip pat efektyviai gali būti panaudoti DV. II kartos alkoholio – B, panaudojimo DV atžvilgiu, savybės yra geresnės lyginant su M ir E, o taip pat, be papildomų priedų, artimomis proporcijomis gali būti maišomi su D. O taip pat gali būti naudojami butilesterių (RRBE) gamyboje.
5. Panaudojant DM galima praplėsti biodegalų žaliavinę bazę, o taip pat dalinai pašalinti tokias neigiamas mišinių savybes kaip blogos žematemperatūrinės savybės, tankio padidėjimas, jodo skaičiaus padidėjimas ir kt. 3 komponentų mišinių D-B-RBE tyrimų sutinkama labai mažai, o taip pat D ir II kartos *Camelina sativa* su kiaulienos riebalų mišiniais.
6. Sandėliuojami RRME yra veikiami oksidacijos proceso linkę degraduoti, šio proceso metu kinta biodegalų fizikinės ir cheminės savybės, kurios sąlygoja DV darbo parametrus. Šios srities tyrimai atliekami tiriant tik cheminių pokyčius, tačiau įtaka DV parametrams, dirbant I ir II kartos RRME su antioksidatoriumi ir be jo, nėra tiriama.
7. DV tyrimuose plačiai naudojamos MM programos, tačiau pagrindinė problema – pradinių duomenų bloko formavimas, kuriame vienas svarbiausių rodiklių yra ŠICH arba slėgio cilindre pokyčio charakteristika, kurios nustatymas įprastos eksploatacijos sąlygomis yra sudėtingas, o būna atvejų kai neįmanomas.

Šiai problemai spręsti galima panaudoti esančias metodikas su papildomais jų pakeitimais.

Atsižvelgiant į skyriaus išvadas, formuojami esminiai disertacijos tyrimų uždaviniai:

1. Atlikti II kartos RRME ir alkoholio mišiniais dirbančių dyzelinių variklių energetinių ir aplinkosauginių darbo rodiklių palyginamuosius tyrimus.
2. Atlikti dyzelinių variklių, dirbančių mišiniais, patikimumo rodiklių tyrimus.
3. Ištirti daugiakomponenčių RRME biodegalų oksidacijos stabilumo įtaką dyzelinių variklių eksploataciniams energetiniams ir aplinkosauginiams parametrams.
4. Parengti metodiką, kuri padidintų dyzelinių variklių eksploatacinių charakteristikų matematinio modeliavimo adekvatumą.
5. Eksperimentų rezultatais paremtais skaičiavimais įvertinti mišinių panaudojimo transporto sektoriuje energetinį ir aplinkosauginį efektyvumą.

2

Degalų mišinių tyrimų metodika

Ruošiant degalų mišinių tyrimų metodiką publikuoti 2 straipsniai recenzuojamoje tarptautinės konferencijos medžiagoje ir mokslo žurnale (Lebedevas *et al.* 2012b, Melaika *et al.* 2013).

Disertacijos tyrimai atlikti 2009–2014 m. autoriui vykdant Klaipėdos universiteto tyrimus, susijusius su įvairių biodegalų efektyviu panaudojimu DV, kurie buvo atliekami dalyvaujant tarptautiniuose projektuose:

- ✓ 2004–2006 EUREKA E! 3234 Biowastefuel, „Tausojantis riebalinių atliekų perdirbimas į energijos šaltinius smulkiose ir vidutinėse įmonėse“;
- ✓ 2008–2012 EUREKA E! 4018 Camelina-Biofuel, „Biodegalų gamybos technologijų tobulinimas naudojant judros aliejų kaip naują žaliavų bazę“.

Projektuose dalyvavo Lenkijos ir Lietuvos partneriai, pastarieji:

- ✓ Lietuvos žemdirbystės instituto Vėžaičių filialo mokslininkai ir tyrėjai tyrė biodegalų auginimo Lietuvos sąlygomis ypatybes;
- ✓ Aleksandro Stulginskio universiteto (ASU) Aplinkos technologijos cheminių ir biocheminių tyrimų laboratorijos mokslininkai ir tyrėjai tyrė biodegalų ir jų mišinių chemines, fizikines savybes bei užtikrino jų atitikimą galiojančių standartų reikalavimams;
- ✓ UAB „Mestilla“ – juridinis verslo atstovas, kuris atliko pramoninės biodegalų gamybos galimybių vertinimą;

- ✓ Klaipėdos universiteto Jūreivystės instituto mokslininkai ir tyrėjai tyrė: DV energetinius parametrus ir aplinkosauginius parametrus, darbo proceso parametrus, eksploatacines biodegalų savybes (oksidacijos įtaką biodegalų variklinėms charakteristikoms), kt.

Kartu su variklinių tyrimų (kuriuose dalyvavo autorius) duomenimis, kaip papildoma informacija pateikiama biodegalų ir jų mišinių fizikinių bei cheminių savybių duomenys, kuriuos ištyrė ASU Aplinkos technologijos cheminių ir biocheminių tyrimų laboratorijos mokslininkai ir tyrėjai.

Tyrimų rezultatų pagrindimui bei traktavimui taip pat panaudoti KU mokslinio kolektyvo anksčiau atliktų DV, dirbančių mišiniais, tyrimų rezultatai.

2.1. Eksperimentinių tyrimų metodika

Disertacijos tyrimų rezultatų adekvatumas užtikrintas strategiškai planuojant eksperimentinius tyrimus, naudojant sertifikuotą mokslinę matavimo įrangą, eksperimentinius duomenis apdorojant matematinės statistikos metodais, panaudojant šiuolaikines MM programas, interpoliuojant rezultatus kartu pritraukiant daugelio kitų tyrėjų ir mokslininkų tyrimų rezultatus.

Varikliniai tyrimai atlikti bendradarbiaujant su LK KJP, VGTU TIF ATK bei BME MI DEE.

Atlikus problematikos analizę pasirenkami dviejų tipų (3 vnt.) aukštų n tiesioginio degalų įpurškimo transporto paskirties DV:

- ✓ D varomų lengvųjų automobilių DV parko pagrindą sudaro senos ir senesnės kartos DV. Todėl, siekiant įvertinti DM aplinkosauginį ir energetinį efektą šalies mastu, tyrimams pasirinkti 2 vnt. (1992 m. ir 1994 m.) Audi 1,9 TDI 1Z tipo DV su EVS, kuri lygiagrečiai leidžia įvertinti būtinumą keisti reguliavimo parametrus. Taip pat šio tipo DV aprūpintas turbokompresorine pripūtimo sistema ir EGR sistema;
- ✓ universalios paskirties DV VALMET 320 DMG (be: TK, EGR, EVS) sumontuotas laive, yra pritaikytas dirbti įvairiais RRME ir mišiniais, tai leidžia objektyviai įvertinti naujų biodegalų privalumus ir trūkumus lyginant su standartizuotu RME biodyzelinu;
- ✓ dviejų identiškos konstrukcijos DV 1,9 TDI 1Z (VGTU TIF ATK ir BME MI DEE) pasirinkimas leido aprobuoti darbe sukurtą ŠI rodiklio $dx/d\varphi$ nustatymo metodiką, o taip pat atlikti DP charakteristikų MM tyrimus realizuojant vieną iš disertacijos uždavinių.

Bandymai atlikti stendo ir eksploatacijos sąlygomis:

- ✓ bandymai stendo sąlygomis susiję su energetinių, aplinkosauginių parametru bei DP charakteristikų tyrimais;

- ✓ bandymai eksploatacijos sąlygomis apima 2 punktus:
 - energetinių ir aplinkosauginių parametrų tyrimai realios eksploatacijos sąlygomis;
 - RRME eksploatacinių savybių tyrimai – ilgalaikės RRME oksidacijos įtakos DV energetiniams ir aplinkosauginiams parametrams.

Tyrimuose panaudota šiuolaikinė sertifikuota įranga, kurios klasė užtikrina DV parametrų matavimo tikslumo atitikimą standartų reikalavimams (LST ISO 3929, 1998; LST ISO 3930, 1998). Panaudota nešiojama degalų sunaudojimo nustatymo, KK ID matavimo įranga ir įvairaus profilio jutiklių moduliai ir kt.

2.1.1. Dyzelinių variklių aprašas

Išbandytuose DV realizuojamas tiesioginis degalų įpurškimas į cilindrą. Degimo kameros konstrukcija atvira, DV – aukštų sūkių dažnio: 1,9 TDI – $n_{max} = 5500 \text{ min}^{-1}$, 320 DMG – $n_{pe\ nom} = 1500/1800 \text{ min}^{-1}$.

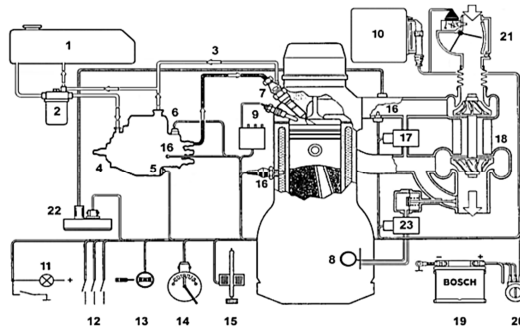
Audi 80 1,9 TDI keturių cilindrų 1Z tipo DV su atvira degimo kamera, esančia stūmoklyje, turintis turbokompresorių, EGR sistema ir EVS. DV pagrindiniai techniniai duomenys pateikti 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Variklio Audi 1,9 TDI 1Z pagrindiniai duomenys
Table 2.1. The main parameters of Audi engine 1,9 TDI 1Z

Parametras	Reikšmė
DV darbinis tūris, cm^3	1896
Cilindrų skaičius	4
Suspaudimo laipsnis	19,5
Maksimali galia, kW	66 (4000 min^{-1})
Maks. Sukimo momentas*, Nm	180 ($2000\text{--}2500 \text{ min}^{-1}$); 202 (1900 min^{-1})
Cilindro skersmuo, mm	79,5
Stūmoklio eiga, mm	95,5

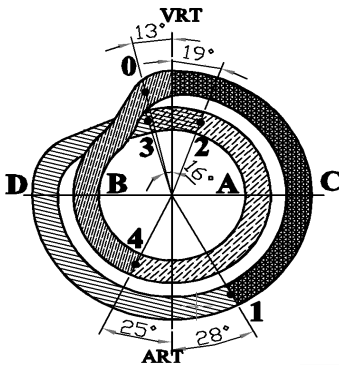
* – VGTU ir BME laboratorijų atstovų pateikiama skirtinga informacija.

1,9 TDI DV sistemų (2.1 pav.) specifikacija: 1 – degalų bakas; 2 – degalų filtras; 3 – grįžtamoji degalų magistralė; 4 – aukšto slėgio degalų siurblys; 5 – įpurškimo fazės korektorius; 6 – degalų elektromagnetinis vožtuvas; 7 – purkštukas su įpurškimo traukės davikliu; 8 – vakuuminis siurblys; 9 – šildymo žvakė; 10 – EVS; 11 – diagnostinė lemputė; 12 – sankabos, stabdžių ir DV stabdžio jungikliai; 13 – n ir VRT daviklis; 14 – akseleratoriaus potenciometras; 15 – greičio daviklis; 16 – temperatūros davikliai; 17 – elektropneumatinis EGR vožtuvas; 18 – TK; 19 – akumuliatorių baterija; 20 – užvedimo jungiklis; 21 – oro debito matuoklis; 22 – slėgio siurbimo kolektoriuje daviklis; 23 – TK valdymo vožtuvas.



2.1 pav. Audi 1,9 TDI 1Z variklio bei valdymo sistemų schema
Fig. 2.1. Scheme of Audi engine 1.9 TDI 1Z and control system

1,9 TDI DV žiedinė diagrama (nominalaus režimo) pateikta 2.2 paveiksle, esant EVS dalinės apkrovos režimuose degalų įpurškimo kampas kinta.



2.2. pav. 1,9 TDI 1Z variklio principinė žiedinė dujų paskirstymo diagrama

Fig. 2.2. Engine 1.9 TDI 1Z timing diagram

- 0 – Degalų įpurškimas 13° (regul.) a.v.p.k. prieš ART.
- 1 – Išmetimo vožtuvai atsидaro 28° a.v.p.k. prieš ART;
- 2 – Išmetimo vožtuvai užsидaro 19° a.v.p.k. po VRT;
- 3 – Įsiurbimo vožtuvai atsидaro 16° a.v.p.k. prieš VRT;
- 4 – Įsiurbimo vožtuvai užsидaro 25° a.v.p.k. po ART.
- A – Įsiurbimo taktas;
- B – Suspaudimo taktas;
- C – Išsiplėtimo taktas;
- D – Išmetimo taktas.

DV VALMET 320 DMG aprašas. Bandymuose naudotas – nedidelio galingumo dyzelinių generatorių klasėje, 2003 m. gamybos DG VALMET 320 DMG, gamintojas AGCO SISU POWER, kuris su kintamosios srovės generatoriumi STAMFORD UC.M224C2 28 sudaro laivo H21 energijos aprūpinimo vienetą. DV skirtas dirbti įvairiais degalais, taip pat ir grynu biodyzelinu, ši ypatybė užtikrina optimalias DV eksploatacines charakteristikas, vengiant keisti reguliavimo parametrus D pakeičiant DM.

Bandymo ciklas – skirtingai degalų mišinio rūšiai, matuojami parametrai esant skirtingai DG galiai: 5–10 % $P_{e\ nom}$, ~25% $P_{e\ nom}$, ~55 % $P_{e\ nom}$, 65–70 % $P_{e\ nom}$ ir 80–85 % $P_{e\ nom}$. DG pritaikytas naudoti tiek D tiek ir grynus biodyzelinus bei jų mišinius. B priedo P.B.1 paveiksle pateiktas bendras DG vaizdas,

pagrindiniai parametrai pateikti 2.2 lentelėje, struktūra kartu su detalizacija pateikta B priedo P.B.2 paveiksle ir P.B.1 lentelėje.

2.2 lentelė. Valmet 320 DMG variklio pagrindiniai techniniai duomenys

Table 2.2. The main parameters of Valmet engine 320 DMG

Parametras	Reikšmė	Parametras	Reikšmė
Cilindrų skaičius	3	Degalų padavimo būdas	Tiesioginis įp.
Darbinis tūris, dm ³	3,3	Aukšto slėgio siurblys	Sekcinis
Cilindro diametras, mm	108	Degalų įp. pradžios slėgis, MPa	23,5±0,5
Stūmoklio eiga, mm	120	Užsiliepsnojimo eiliškumas	1-2-3
Suspaudimo laipsnis	16,5/18,5	Nominali galia, kW	30/35

2.1.2. Dyzelinių variklių bandomieji režimai

Atliktų DV eksperimentinių tyrimų n ir apkrovos režimai pateikti žemiau esančioje 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Bandymuose panaudotų variklių tiriamieji sūkių dažnio ir aprovos režimai

Table 2.3. Speed and load regimes of tested engines

DV	n , min ⁻¹	P_e , kW	p_{me} , MPa
320 DMG	1500	TE~25,0	–
1,9 TDI <i>VGTU</i>	1900	9,15–18,11	0,304–0,602
	2000	4,2–20,1	0,133–0,663
	2500	5,23–26,2	0,133–0,663
		2,6–30,9	0,0663–0,7755
1,9 TDI <i>BME</i>	2000	9,07–36,1	0,287–1,1426
	2500	11,86–47,5	0,30025–1,1996
	3000	12,47–50,755	0,2631–1,071
	3500	13,08–52,54	0,2366–0,94997

DV, dirbančių skirtingais degalais, bandymai buvo atlikti atsižvelgiant į šias, rezultatų tikslumą ir adekvatumą didinančias ypatybes:

- tyrimai atlikti DV dirbant nusistovėjusiais darbo režimais;
- kiekviename bandymų režime DV rodikliai buvo matuojami stabilizavus DV šiluminę būklę, prieš matavimą nustatytame režime dirbant 7–10 min.;
- visuose DV bandymų režimuose matavimai buvo atliekami mažiausiai 3 kartus su tolesniu pagal gautas reikšmes vidurkio skaičiavimu;
- siekiant kontroliuoti bandomojo DV techninę būklę (ypatingai svarbu vykdant palyginamuosius eksperimentinius tyrimus), bandymų metu

2–3 kartus (bandymų pradžioje, eigoje ir pabaigoje) buvo registruojami DV rodikliai dirbant D.

Kartu su DV energetinių ir aplinkosauginių parametrų rodiklių eksperimentiniais tyrimais, jiems dirbant charakteringų eksploatacinių charakteristikų režimais, taip pat buvo nustatomi vidutiniai cikliniai bandymo režimai – Laivo paskirties nekintančių sūkių pagalbiniais DV – ISO 8178 standarto nusistovėjusio darbo režimo bandymų ciklas D2.

Laivo paskirties nekintančių sūkių pagalbiniais DV taikomas standarto ISO 8178 nusistovėjusio darbo režimo bandymų ciklas D2 (European Union emission standards). ISO 8178 yra tarptautinis standartas, skirtas ne kelio paskirties DV emisijų matavimui, sertifikavimui, ir patvirtintas daugelyje šalių: ES, JAV, Japonijoje, kt. Standarto ISO 8178 bandymų ciklo D2 detalizacija pateikta 2.4 lentelėje.

2.4 lentelė. Standarto ISO 8178 bandymų ciklo D2 detalizacija
Table 2.4. The details of standard ISO 8178 test cycle D2

Sūkių dažnis, %	100	100	100	100	100
Apkrova, %	100	75	50	25	10
Svorio koeficientas.	0,05	0,25	0,30	0,30	0,1

Energetinių ir aplinkosauginių rodiklių įvertinimas eksploatacijoje vykdomas remiantis matuojamo parametro reikšmėmis charakteringuose DV apkrovos režimuose. Vidutinių eksploatacinių matuojamų rodiklių reikšmių pokyčiai apskaičiuojami pagal 2.1 formulę:

$$\Delta X_{eks} = \frac{\sum_{i=1}^n X_{iB_i} \times w_i}{\sum_{i=1}^n X_{iD} \times w_i} - 1. \quad (2.1)$$

Čia ΔX_{eks} – vidutinis skaičiuojamojo parametro pokytis eksploatacijos metu; X_{iB_i} – parametro reikšmė i-tame apkrovos režime, DV dirbant i-tais biodegalais; X_{iD} – parametro reikšmė i-tame apkrovos režime, DV dirbant D; w_i – svorio koeficientas i-tame apkrovos režime.

2.1.4. Tiesioginių parametrų nustatymo tikslumas, diapazonas, įrangos išdėstymo schemas

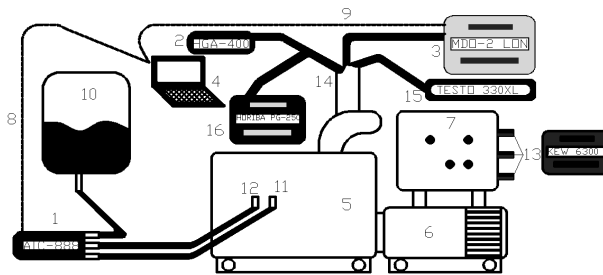
Eksploatacijos sąlygose (320 DMG) atliekant bandymus buvo panaudota nešiojama šiuolaikiška, sertifikuota matavimo įranga. ID analizei – dujų analizatoriai: HORIBA PG-250, TESTO 330 XL, Herman HGA 400, dūmamatis MAHA MDO-2 LON. DV sukamo generatoriaus vartotojams atiduodamos

elektros srovės parametrai (t. y. galia) gnybtų pagalba buvo nustatoma prietaisu KYORITSU KEW 6300. Degalų srauto matuoklis AIC-888 degalų sunaudojimą leido stebėti realiu laiku bei įrašyti į PC atmintį. Žemiau pateikta informacija apie įrangos tikslumą ir parametrų matavimo ribas 320 DMG DV bandymų atveju (2.5 lent.), aprašas ir smulkesnė informacija apie panaudotą įrangą pateikta B priede (P.B.3– P.B.23 pav. ir P.B.1– P.B.13 lent.).

2.5 lentelė. 320 DMG variklio tyrimuose panaudotos įrangos matavimo duomenys

Table 2.5. The data of measurement equipment used in 320 DMG engine tests

Par.	Prietaisas	320 DMG											
		2009-10-16		2010-06-07		2010-11-18		2011-05-05		2012-05-22		2013-04-24	
		B, RBE, RME		RME, SCME, WCME				RME				RME, DME	
	Tiksl.	Diapaz.	Tiksl.	Diapaz.	Tiksl.	Diapaz.	Tiksl.	Diapaz.	Tiksl.	Diapaz.	Tiksl.	Diapaz.	
B_H	AIC-888	±1,5 %, iki 200 l/h											
P_e	KEW 6300	iki 600 V / ± 0,3 %, iki 500 A / ± 0,3 % (0,42 %)											
NO _x	PG-250	–											
	HGA 400	±1 ppm, 0–5000 ppm											
CO	PG-250	–											
	330 XL	±5% 0–20000 ppm	–		±5 %, 0–20000 ppm				<1ppm/0,5 %		0–5000ppm		
CH	HGA 400	±5 %, 0–20000 ppm											
SM	MDO-2 LON	± 2 %, K = 0–9,99 m ¹ , 0–100%											



2.6 pav. Variklio VAMET 320 DMG matavimo prietaisų išdėstymo schema

Fig. 2.6. Scheme of measurement devices for engine VAMET 320 DMG

DV VAMET 320 DMG matavimo prietaisų išdėstymo schemas specifikacija: 1 – degalų srauto matuoklis AIC-888, 2 – dujų analizatorius HGA 400, 3 – dūmamatis MDO-2 LON, 4 – PC, 5 – DV, 6 – generatorius, 7 – valdymo skydas, 8 – AIC-888 duomenų perdavimo kabelis, 9 – MDO-2 LON duomenų perdavimo kabelis, 10 – degalų tankas, 11 – degalų įėjimo į DV atvamzdis, 12 – DV grįžtamasis degalų atvamzdis, 13 – el. galios matavimo prietaisas KEW 6300, 14 – ID vamzdis, 15 – dujų analizatorius TESTO 330 XL, 16 – dujų analizatorius Horiba PG-250.

Prietaisų jungimo į darniai veikiančią eksperimento vienetą schema pavaizduota 2.6 paveiksle. Jungimas pavaizduotas schematiškai, laivo sąlygomis: vieni prietaisai išdėstomi mašinų skyriuje, kiti – laivo denyje ar tiltelyje. Degalų suvartojimo matuoklis AIC-888 (nr. 2) išdėstomas mašinų skyriuje, dėl matavimo tikslumo – kuo arčiau ir kuo trumpesnėmis žarnos sujungtas su DV (nr. 5) degalų įėjimo atvamzdžiu (nr. 11), grįžtamuju degalų atvamzdžiu (nr. 12) bei degalų tanku (nr. 10). Duomenų perdavimo kabeliu (nr. 8) matuoklis sujungtas su tiltelyje esančiu PC (nr. 4), į kurį duomenų kabeliu (nr. 9) ateina duomenys iš denyje esančio dūmamačio MDO-2 LON (nr. 3), kuris taip pat dėl matavimo tikslumo trumpa žarna sujungtas su laivo kaminu (nr. 14), prie kurio prijungti tiltelyje išdėstyti dujų analizatoriai HGA 400 (nr. 2) ir TESTO 330 XL, rezultatai fiksuojami KK koncentracijoms nusistovėjus.

DG paleidžiamas valdymo skydo (nr. 7) pagalba, DV suka generatorių (nr. 6), kuris el. energiją vartotojams tiekia el. kabeliais. Srovės parametrai matuojami prietaisu KEW 6300 (nr. 13) prie skirtingų generatoriaus apkrovų, kurios keičiamos keičiant vartojančių įrenginių skaičių.

Dalis tyrimų atlikti panaudojant automatizuotą variklinį VGTU TIF ATK standą KH-5543 (B priedas P.B.24 pav. ir P.B.14 lent.) su svarstykliniu dinamometru, DV sukuriama M_t nustatyti.

Stende kaip DV stabdis naudojamas elektrinis asinchroninis variklis su faziniu rotoriumi, skystiniu reostatu ir dinamometru. Stendas yra universalus: DV n esant 600–1400 min^{-1} stendas veikia elektros variklio sūkiams, o sūkiams esant 1600–3000 min^{-1} – kaip stabdis veikia elektros generatoriaus režime. Stendo M_t , veikiant tiek variklio, tiek generatoriaus režimu, reguliuojamas elektromechaninės pavaros skystiniu reostatu. Maksimalus stendo stabdymo momentas siekia 186 Nm, maksimalus matuojamas M_t – 440 Nm. M_t matavimo paklaida sudaro 0,8 % nuo maksimalios momento reikšmės. DV su stendu sujungtas tiesiogiai (be pavarų dėžės), velenu, kurio abiejuose galuose yra lygių kampinių greičių lankstai. Stendo techniniai duomenys yra pateikti 2.4 lentelėje.

BME MI DEE atliktuose bandymuose panaudotas FE 350 S DV apkrovos stendas (B priedas P.B.25 pav.) su elektromagnetiniu stabdžiu, n diapazonas 100–8000 min^{-1} , maksimali stabdymo galia – 257 kW, maksimalus stabdymo M_t : 1400 Nm Inercijos momentas: 0,681 kg/m^2 , tikslumas: $\pm 0,94$ Nm.

Atliekant 1,9 TDI DV bandymus buvo panaudota nešiojama matavimo įranga: multifunkciniai (kitų DV parametrų matavimas) dujų analizatoriai AVL DiCom 4000, MAHA MET 6.3; ID temperatūriniai rodikliai nustatyti panaudota K tipo termopora, matavimo modulis DataLogger DL 2000, IR termometras EMIRTEST IR 8839; slėgio rodikliai nustatyti – matavimo modulis Delta OHM HD 23040.0 su jutikliu Delta OHM TP704 2BAI, jutiklis DATCON DT-720, slėgio cilindre nustatymui panaudotas srovės stiprintuvo KIAG 5001 ir kvarcinio slėgio jutiklio KIAG 6031 junginys; a.v.p.k. nustatymui

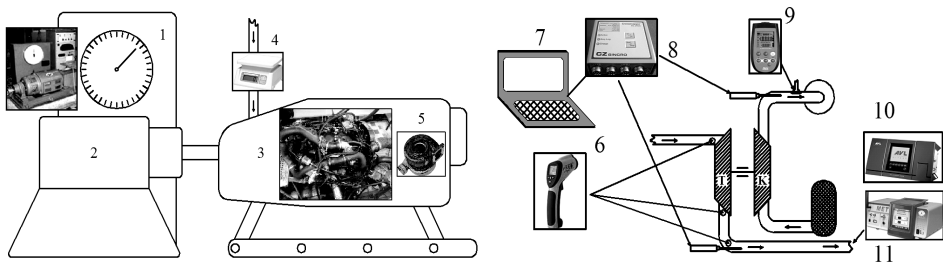
panaudotas sensorius Hengstler RI32-O/50ER.11KB. Taip pat buvo panaudota stacionarus gravimetrinis degalų sunaudojimo matuoklis AVL-7030, dujų analizatorius Horiba MEXA-8120 F, o taip pat FE 350S, КИ-5543 apkrovos standai, kurių, kaip ir kitos tyrimuose panaudotos matavimo įrangos tikslumas bei matavimo diapazonas pateiktas 2.6 lentelėje, smulkesnė informacija apie įrangą pateikta B priede (P.B.3–P.B.23 pav. ir P.B.1–P.B.13 lent.).

2.6 lentelė. 1,9 TDI variklyje tyrimuose panaudotos įrangos matavimo duomenys

Table 2.6. The data of measurement equipment used in 1.9 TDI engine tests

Par.	Prietaisas	1,9 TDI ^{VGTV}				1,9 TDI ^{BME}		
		2011-05-27	2012-05-25		2012-11-15		2013-08-09	
		RME, SCME, WCME	RME		RME		RME, M	
	Tiksl. Diapaz.	Tiksl.	Diapaz.	Tiksl. Diapaz.	Tiksl.	Diapaz.		
B_d	SK-5000	0,5 %, 0–5000 g						
	AVL-7030					< 0,12 %	0–150 kg/h	
M_f	КИ-5543	± 1,23 Nm, 0–186 Nm						
	FE 350 S					±0,94 Nm	0–480 Nm	
P_K	OHM HD 23040.0	0,25 %, 1–5 MPa						
	DT-720					0,0002 MPa	0–2,5 MPa	
T_{ID}	DL 2000	± 2,5%, 0–650 °C						
	K					±0,0075xt	330–1200°C	
T_{det}	IR 8839	–	± 1,5 %	–50–1000 °C	–			
p_i	KIAG 6031					±0,1 MPa	0–25 MPa	
a.v.p.k.	RI32-O/ 50ER					± 0,176	100–6000 min ⁻¹	
NO _x	DiCom 4000	1 ppm, 0–5000 ppm						
	MET 6.3		32–120 ppm (tūr.)	0–5000 ppm (tūr.)				
	MEXA-8120 F					±2%	0–5000 ppm	
CO	DiCom 4000	0,1 % (tūr.), 0–10 % (tūr.)						
	MET 6.3	–	0,03 % (tūr.)	0–15,0 % (tūr.)	–			
	MEXA-8120 F					±2%	0–0,5 % (tūrio)	
CH	DiCom 4000	2 ppm (tūr.), 0–20 000 ppm (tūr.)						
	MET 6.3	–	10 ppm	0–4000 ppm	–			
	MEXA-8120 F						0–5000 ppm	
SM	DiCom 4000	0,1 %, 0–100 %						
	AVL 415					0,02 mg/m ³	0–10 mg/m ³	
PM	MET 6.3	–	0,01 mg/m ³	0,01–700 mg/m ³	–			
CO ₂	DiCom 4000	0,1 % (tūr.), 0–20 % (tūr.)						
	MET 6.3	–	0,05 % (tūr.)	0–20,0 % (tūr.)	–			
	MEXA-8120 F					±2 %	0–8 ir 0–16% (tūrio)	
O ₂	DiCom 4000	0,1 % (tūr.), 0–25 % (tūr.)						
	MET 6.3	–	0,1 % (tūr.)	0–25 % (tūr.)	–			
	MEXA-8120 F					±0,125%	0–25 % (tūrio)	

Žemiau pateiktų bandymų schemų pagrindas yra panašus, tačiau reikėtų paminėti keletą ypatumų, dėl kurių šiuose stenduose atliekamų tyrimų profilis iš esmės skiriasi. VGTU stende atliekami tyrimai buvo orientuoti ne vien tik į DM variklių savybių tyrimus, bet apėmė ir temperatūrinių rodiklių tyrimus. VGTU bandymų ypatumai pateikti 2.7 paveikslo detalizuotoje schemoje (kairėje), joje matoma atvaizduota T_{ID} matavimui skirta termopora su matavimo moduliu Datalogger DL 2000 bei ID linijos matavimo taškai IR termometru, šiais prietaisais buvo analizuojama T_{ID} ir T_{det} pokyčio priklausomybė. Šių matavimų ir tyrimų rezultatų indėlis buvo itin svarbus sprendžiant metodikos pakeitimo ir sukūrimo uždavinį (vienas iš darbo uždavinių).

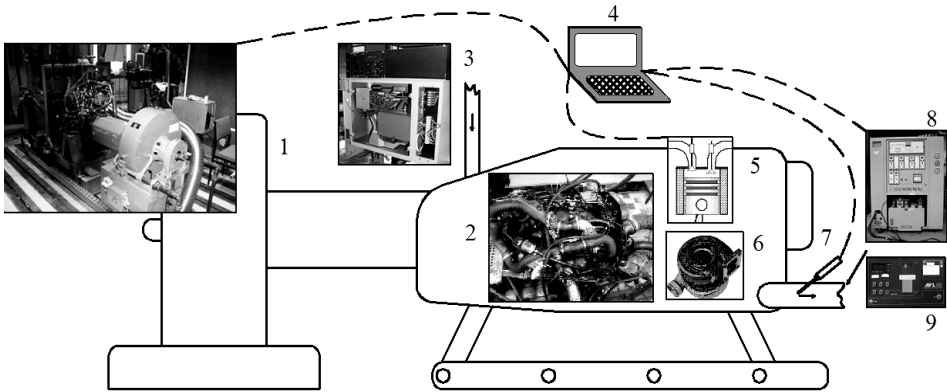


2.7 pav. Variklio 1,9 TDI 1Z matavimo prietaisų išdėstymo schema VGTU laboratorijoje
Fig. 2.7. Engine 1.9 TDI 1Z measurement device scheme in VGTU laboratory

Specifikacija: 1 – svarstyklinis dinamometras, 2 – apkrovos mechanizmas, 3 – DV 1,9 TDI 1Z, 4 – SK-5000 svarstyklės, 5 – TK, 6 – Emsitest IR 8839 IR, 7 – PC, 8 – Data Logger DL 2000, 9 – Delta OHM HD 23040.0 modulis, 10 – AVL DiCom 4000 dujų analizatorius, 11 – MAHA MET 6.3 dujų analizatorius

BME MI DEE atlikti tyrimai buvo orientuoti į M priedo įtakos B30 (RME) variklinėms savybėms tyrimus. Kiti šio tyrimo rezultatai, tokie kaip indikatorinės diagramos, T_{ID} priklausomybės nuo p_{max} duomenys ir kt., buvo neišvengiamai būtini DV matematinio modelio formavime bei su tolimesniu jo apdorojimu sprendžiant disertacijos iškeltus uždavinius. Principinis skirtumas lyginant su VGTU stendu – sumontuotas slėgio jutiklis kaitinimo žvakės lizde bei su juo suderintas a.v.p.k. jutiklis, matuojantis slėgio duomenis 0,352 °a.v.p.k. žingsniu. Prietaisų jungimo schema pateikta 2.8 paveiksle.

1 – Borghy & Saveri FE 350 S DV stendas, 2 – DV 1,9 TDI 1Z, 3 – AVL-7030 gravimetrinis degalų sunaudojimo matuoklis, 4 – PC, 5 – kvarcinis slėgio jutiklis KIAG 6031, 6 – TK sistema, 7 – „K“ tipo termopora; 8 – HORIBA MEXA-8120 F dujų analizatorius, 9 – AVL 415 SM matavimo prietaisais.



2.8 pav. Variklio 1,9 TDI 1Z matavimo prietaisų išdėstymo schema BME MI DEE
 Fig. 2.8. Engine 1.9 TDI 1Z measurement device scheme in BME MI DEE

2.2. Netiesioginių dyzelinio variklio darbo rodiklių nustatymo metodika

Netiesioginiai DV parametrai nustatomi pagal klasikinės formules, kurios pateiktos B priedo P.B.16 lentelėje.

Viena iš šilumos išsiskyrimo charakteristikos arba ŠI greičio dQ/dt ($dQ/d\varphi$ arba santykinė jos forma (dx/dt)) nustatymo formų MM programoje Burn realizuojama pagal klasikinį vienzonio DV DP matematinio modelio algoritmą (Kavtaradze 2008, Lebedevas *et al.* 2007):

$$\begin{cases} \frac{dT}{d\varphi} = \frac{1}{c_v M} \left(H_U \frac{dg_x}{d\varphi} + \frac{dQ_W}{d\varphi} - c_v T \frac{dM}{d\varphi} - \frac{\pi V_h}{360} p b + i_n \frac{dM_n}{d\varphi} - i_m \frac{dM_m}{d\varphi} \right); \\ \frac{dM}{d\varphi} = g_c \frac{dx}{d\varphi} + \frac{dM_n}{d\varphi} - \frac{dM_m}{d\varphi}; \\ pV = MRT. \end{cases} \quad (2.1)$$

Čia $H_U \frac{dg_x}{d\varphi}$ – absoliutus ŠI rodiklis; $\frac{dQ_W}{d\varphi}$ – šilumos kiekis nuvestas į cilindro sienes; $i_n \frac{dM_n}{d\varphi}$ ir $i_m \frac{dM_m}{d\varphi}$ – įvestos į cilindrą ir išsiskyrusios šilumos kiekis dujų mainų proceso metu; dM_n, dM_m – šviežio oro ir ID elementarios masės pokytis; M – dujų masė cilindre.

Taip pat ŠICh $dx/d\varphi$ ($x = f(\varphi)$) apdorojama nustatant I. I. Vibe modelio (2.2 formulė) (Vibe 1962) parametrus m ir φ_z Burn programos pagalba pagal slėgio cilindre duomenis (2.3 formulė) (Heywood 1988):

$$\frac{dx}{d\left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)} = 6,908(m+1) \left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)^m e^{-6,908\left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)^{m+1}}; \quad (2.2)$$

$$\frac{dQ}{d\varphi} = \frac{\gamma}{\gamma-1} p \frac{dV}{d\varphi} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dp}{d\varphi}; \quad (2.3)$$

Čia γ rodiklis yra specifinių šilumų santykis c_p/c_v . DV ŠI analizės praktikoje taikomas γ dydžio diapazonas yra 1,3–1,35. Slėgio cilindre pokytis, atsižvelgiant į a.v.p.k. pokytį, paskaičiuojamas pagal 2.4 formulę. Analogiškai apskaičiuojamas tūrio pokytis $\frac{dV}{d\varphi}$.

$$\frac{\Delta p}{d\varphi} = \frac{p_n - p_{n-1}}{\varphi_n - \varphi_{n-1}}; \quad (2.4)$$

Cilindro tūris, priklausomai nuo a.v.p.k., apskaičiuojamas pagal gerai žinomą cilindro tūrio priklausomybės nuo stūmoklio padėties išraišką:

$$V_z(\varphi) = z_K(\varphi) \times \pi \times \frac{D^2}{4}. \quad (2.5)$$

Čia $z_K = r \times f(\varphi)$ stūmoklio judėjimo dėsnis, čia r alkūnės spindulys, $f(\varphi) = 1 - \cos\varphi + \frac{\lambda_{PL}}{4} \times \sin^2\varphi$ – skriejiko momentinė pozicija, $\lambda_{PL} = \frac{r}{l}$ – alkūnės ir švaistiklio ilgių santykis.

Nesvarbu, koks parametras būtų matuojamas, kokia matavimo įranga naudojama, matavimai atliekami su tam tikra paklaida, kuri gali būti išskaidyta į subpaklaidų grupes: grubios, kurios padaromos dėl tyrėjų neapdairumo, nekompetencijos, prielaidų; sisteminės klaidos yra susietos su prietaisų, įrangos netobulumu, skaitinių reikšmių apvalinimu; atsitiktinių paklaidų priežastis yra eksperimento metu nebevaldomų ir neįskaitytų faktorių (aplinkos oro slėgio, temperatūros, klimatinų sąlygų pasikeitimas ir kt.) įtaka.

Grubias paklaidas galima sumažinti keliant personalo kvalifikaciją, gerinant bandymų sąlygas. Sisteminės paklaidos mažinamos atnaujinant matavimo įrangą, naudojant sertifikuotą įrangą ir atliekant periodinę diagnostiką. Atsitiktines paklaidas būtina įvertinti atskirai kiekvienam matavimo atvejui.

Atsitiktinė absoliuti suminė paklaida susideda iš absoliučios paklaidos ir sisteminės, išraiška pateikiama 2.6 formulės pavidalu:

$$\rho_{\Sigma} = \sqrt{\rho_A^2 + \rho_S^2}. \quad (2.6)$$

Sisteminė paklaida q_s , paprastai santykinė, nurodoma dokumentacijoje, q_A atsitiktinė absoliuti paklaida, priimant, kad tikimybė $P = 0,95$ (95 %), yra lygi $q_A = 2\sigma_A$. Absoliuti vidutinė kvadratinė vidurkio paklaida σ_A :

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{(\bar{X} - x_1)^2 + (\bar{X} - x_2)^2 + \dots + (\bar{X} - x_n)^2}{n(n-1)}}. \quad (2.7)$$

Santykinė matavimų paklaida suteikia galimybę lyginti skirtingos fizikinės prigimties parametrų matavimo tikslumus:

$$\delta_A = \pm \frac{\rho_\Sigma}{\bar{X}} \text{ arba } \pm \frac{\rho_\Sigma}{\bar{X}} \times 100\%. \quad (2.8)$$

Eksplotacijos bandymuose (320 DMG DV) elektros galios prietaisas Kew 6300 informaciją rodė realiu laiku (reikšmės buvo registruojamos nusistovėjus režimui) todėl galios parametro matavimo paklaida priskiriama prie vienkartinio parametro matavimo paklaidos ir siekia 0,424 % nuo matuojamosios reikšmės. B_d nustatomas prietaisu AIC-888, kurio sisteminė paklaida matuojamame degalų srauto diapazone – ~ ±1,0 % nuo matuojamos parametro reikšmės, o atsitiktinė suminė paklaida skaičiuojama pagal anksčiau pateiktą algoritmą. Iš bandymų praktikos žinoma, jog apkrovai didėjant stabilizuojasi degalų sistemos darbas tuo pačiu degalų sunaudojimo matavimo prietaisų parodymai. Paklaida svyravo 1,25–2,6 % (B priedas P.B.16 pav.). Skaičių duomenys pateikti B priede (B priedas P.B.17, P.B.18, P.B.19, P.B.20 lent.).

Temperatūros matavimo paklaidų masyvai, priklausomai nuo naudojamų termoporų tikslumo, pasiskirsto į dvi grupes: didesnėmis matavimo paklaidomis (~2,5 %) pasižymi Data Logger matavimo modulio panaudojimo atvejis, mažesnėmis (~0,7–1,1) – K termoporos panaudojimas BME MI DEE stende.

Netiesioginiai parametrai vertinami pagal šią metodiką (pvz. M_t išraiška):

$$P_e = M_t \times \omega = M_t \times 2 \times \pi \times n. \quad (2.9)$$

Analitinė M_t išraiška logaritmuojama:

$$\ln P_e = \pm \ln(M_t \times 2 \times \pi \times n) = \pm (\ln M_t + \ln 2 + \ln \pi + \ln n); \quad (2.10)$$

Nustatomi abiejų lygties pusių diferencialai:

$$\frac{dP_e}{P_e} = \pm \frac{dM_t}{M_t} + \frac{d\pi}{\pi} + \frac{dn}{n}. \quad (2.11)$$

Diferencialai pakeičiami absoliučia parametro paklaida ρ_{M_t} , ρ_π , ρ_n :

$$\frac{\rho_{P_e}}{P_e} = \pm \frac{\rho_{M_t}}{M_t} + \frac{\rho_\pi}{\pi} + \frac{\rho_n}{n}; \quad (2.12)$$

$$\delta_{P_e} = \pm (\delta_{M_t} \times \delta_\pi \times \delta_n). \quad (2.13)$$

Apskaičiuota santykinė paklaida yra lygi išmatuotų parametrų santykinų paklaidų sumai.

$$\delta_{P_e} = \pm(\delta_{M_t} \times \delta_{\pi} \times \delta_n); \quad (2.14)$$

$$\frac{\rho_{P_e}}{P_e} = \pm \sqrt{\left(\frac{\rho_{M_t}}{M_t}\right)^2 + \left(\frac{\rho_{\pi}}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{\rho_n}{n}\right)^2}. \quad (2.15)$$

2.7 lentelė. Netiesioginių parametrų vertinimo rezultatai
Table 2.7. The results of integral parameters assessment

Parametras	Dyzelinis variklis						
	320 DMG	1,9 TDI ^{VG TU}			1,9 TDI ^{BME}		
n, min^{-1}	1500	1900	2000	2500	2000	2500	3000
n tikslumas, %	–	–	–	–	±0,049 %		
$\Delta n, \text{min}^{-1}$	–	–	–	–	0,98	1,225	1,47
M_t, Nm	–	91	100	100	179	181	161
$\Delta M_t, \text{Nm}$	–	1,23			±0,94		
P_e, kW	25	18,11	21	27	36	47	50
P_e tikslumas	±0,42 %	–	–	–	–	–	–
$\Delta P_e, \text{kW}$	±0,105	±0,416	±0,479	±0,513	±0,218	±0,289	±0,3125
$B_d, \text{kg/h}$	5,475	4,39	5,0	6,55	8,41	10,49	11,49
B_d tikslumas	±1,1 %	–	–	–	±0,12 %	±0,12 %	±0,12 %
$\Delta B_d, \text{kg/h}$	±0,0825	±0,031	±0,034	±0,038	±0,0101	±0,0126	±0,0138
$b_e, \text{g/kWh}$	219,0	233,0	235,0	254,0	224,0	220,0	227,0
$\Delta b_e, \text{g/kWh}$	± 1,94	±9,782	±8,719	±7,9	±5,622	±5,192	±5,061
$\Delta b_e, \%$	0,89	4,2	3,71	3,11	2,51	2,36	2,23
η_e	0,363	0,358	0,360	0,319	0,375	0,381	0,372
$\Delta \eta_e$	0,004	0,017	0,015	0,012	±0,010	±0,009	±0,009
$\Delta \eta_e, \%$	1,01	4,87	4,21	3,65	2,66	2,47	2,29

2.3. Dyzelinio variklio matematinio modeliavimo priemonių aprašas

Tyrimuose lygiagrečiai naudoti 2, pagal MM struktūrą panašūs, paketai siekiant padidinti skaičiavimų MM metodais adekvatumą, nes modeliai realizuoja skirtingus algoritmus, o taip pat turi skirtingas technines galimybes.

DV DP ir energetinių rodiklių MM atliktas panaudojant 2 programas:

programa AVL Boost (panaudotas Burn paketas) yra Austrijos firmos programa, paremta bedimensiniais ir kvazi-dimensiniais modeliais. Ji apima viso DV MM tiek nusistovėjusiuose, tiek ir pereinamuose režimuose. Taip pat leidžia modeliuoti atskirų DV sistemų darbo parametrus ir kt. ŠP aprašomas pagal Woschni, Hohenberg ir kt., ŠI aprašomas pagal 1 ir 2 Vibe funkcijų ir kt.

metodikas. Turint eksperimentinius duomenis, tame tarpe ir indikatorinę diagramą, Burn suteikia galimybę skaičiuoti ŠICH bei vienos Vibe funkcijos rodiklius (formos parametras m ir ŠI trukmę φ_z). ŠICH bei jos rodiklių skaičiavimams atlikti, remiantis eksperimento rezultatais, Burn reikalauja nedidelio pradinių duomenų kiekio, tačiau neišvengiamai reikalinga indikatorinė diagrama. Prieduose pateikta Burn pradinių duomenų bloko sandara (B priedas P.B.21 lent.);

programa Impuls. CNIDI sukurtas DV MM paketas. Programa skirta modeliuoti 2 ir 4 taktų stūmoklinių DV darbo parametrus. Impuls turi galimybę modeliuoti darbo bei dujų mainų procesus DV: be TK; su impulsine ir pastovaus slėgio turbina; su laisvu pripūtimu ir mechanine jungtimi tarp DV alkūninio ir TK velenų; su vienos ir dviejų pakopų laisvo pripūtimo turbina; su jėgos turbina; su pripūtimo agregatu. Impuls DV DP programa pateikiama kaip atskirų matematinių modelių sąveikos modelis, kurį galima būtų suskirstyti į tris modelius: darbo cilindre proceso, išmetimo kolektoriaus, oro aprūpinimo įrenginio. Impuls pradinių duomenų blokas užrašomas kaip matrica. Prieduose pateikta pradinių duomenų bloko, kuris pritaikytas DV su vienos pakopos pripūtimo sistema darbo parametrų MM, sandara ir specifikacija (B priedas P.B.22 lent.).

Disertacijos tyrimuose panaudotų Burn ir Impuls MM programų pagrindą sudaro vienzonis DV indikatorinio proceso parametrų modeliavimo matematinis modelis. Vienzoniai matematiniai modeliai plačiai naudojami DV tyrimuose ir esant jų suderinamumui su tyrimų objekto parametrais (dirbant nominaliu darbo režimu) užtikrina priimtina adekvatumą modeliuojant DV darbo parametrus jam dirbant nepilnos apkrovos režimais. Tuo pat metu šių modelių duomenų masyvas yra nepalyginamai mažesnis lyginant su daugiazoniniais (multizoniniais). Šis ypatumas yra itin svarbus atliekant tyrimus eksploatacijos sąlygomis ir tiriant skirtingos paskirties DV. Būtent šiuo pagrindu, o taip pat atsižvelgiant į darbe iškeltus uždavinius, visų pirmą į metodologinį uždavinį, pasirinkti Burn ir Impuls vienzoniniai MM programiniai paketai.

ŠICH šių programų modeliuose gali būti realizuojama I. I. Vibe formule (Vibe 1962), kurią praktiškai sudaro 2 kintamieji (m ir φ_z):

$$\frac{dx}{d\varphi} = 6,908(m + 1) \left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)^m e^{-6,908\left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)^{m+1}}. \quad (2.16)$$

Būtent šis $dx/d\varphi$ išraiškos „valdomumas“, realizuojant variacinius DV DP skaičiavimus, sudaro pagrindą disertacijos metodologiniams uždaviniams ir jų sprendimui (detaliau 4 skyrių).

2.4. Antro skyriaus išvados

1. Tyrimams pasirinktas 320 DMG DV apkrovos diapazonas suteikia pagrindą atlikti energetinių ir aplinkosauginių parametrų pasikeitimo veritinimą pagal standarto ISO 8178 bandymo ciklą D2.
2. 1,9 TDI (BME) ir 320 DMG DV panaudojimo avejais nustatytų energetinių ir aplinkosauginių parametrų nustatymo paklaidų dydžiai leidžia vertinti realų parametrų pokytį vienus degalus pakeičiant kitais.
3. Atlikus kitų mokslininkų metodikų bei matematinių modelių, suformuotų pasirinktomis programomis (Boost ir Impuls) analizę, nustatyta, jog jų tarpusavio kombinavimas leidžia spręsti atvirkščią indikatorinės diagramos duomenų nustatymo iš šilumos išsiskyrimo charakteristikos uždavinį, kuris sudaro disertacijoje kuriamos metodikos pagrindą.

Degalų mišinių eksperimentinių tyrimų rezultatų analizė

Dalis šių tyrimų rezultatų yra publikuoti (kartu su kitais bendraautoriais) tarptautiniuose mokslo žurnaluose su citavimo indeksu (Lebedevas *et al.* 2010, Lebedevas *et al.* 2012a, Lebedevas *et al.* 2013b, Makarevičienė *et al.* 2013), taip pat tyrimų medžiaga pristatyta 5 mokslinėse tarptautinėse ir respublikinėse konferencijose.

Biodegalų ir mineralinio dyzelino mišinių bandymai pradėti vykdyti dar iki doktorantūros studijų pradžios. Per pastaruosius 5 metus atlikta 10 variklinių bandymų. Biodegalų ir D mišiniai išbandyti 3-juose tiesioginio įpurškimo DV (1 vnt. Valmet 320 DMG – laivo eksploatacijos sąlygomis ir 2 vnt. automobilio Audi 1,9 TDI – laboratorijos stendo sąlygomis), kuriuose panaudoti I ir II kartos biodegalų mišiniai, kurie buvo pagaminti panaudojant atliekas, augalinį aliejų bei gyvulinės kilmės riebalus. Chronologinė skirtingų mišinių bandymų seka, atsižvelgiant į bandymų vietą, pateikta 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Atliktų variklinių bandymų chronologinė seka

Table 3.1. The chronological sequence of engine tests

Data	Atlikimo vieta	Tiriami biodegalai	Pastabos
2009-10-16	KJP	B, RBE, RME	Padidintos biokomp. dalies DM tyrimai
2010-06-07		RME, SCME, WCME	Oksidacinio stabilumo tyrimai
2010-11-18		RME, SCME, WCME	
2011-05-05		RME, SCME, WCME	
2011-05-27	VGTU	RME, SCME, WCME	Optimizacijos poreikio tyrimas
2012-05-22	KJP	RME	Oksidacinio stabilumo tyrimai
2012-05-25	VGTU	RME	Temperatūrinių rodiklių tyrimai
2012-11-15		RME	Degalų įpurškimo reguliavimo poreikio tyrimas
2013-04-24	KJP	RME, DME	-
2013-08-09	BME	RME, RME+M	Indikatorinio DP tyrimai

3.1. Tiriamųjų biodegalų mišinių aprašas

DV išbandytų 2 ir 3 komponentų mišinių pateiktos fizikinės ir cheminės savybės panaudotos kaip informacinis šaltinis siekiant papildomai ir pagrįstai ištirti eksperimente ištirtas mišinių variklines savybes.

Kartu su kitais mokslininkais ir tyrėjais 2009–2014 m. laikotarpiu buvo atlikta eilė variklinių bandymų, kuriuose buvo kompleksiškai tiriami RRME, RRBE ir A mišinių variklinės savybės. Tyrimuose panaudoti butanolio, metanolio, rapso butilesterio ir metilesterio, Sėjamosios judros, jūros dumblių, gyvulinės kilmės metilesterių mišiniai. Alternatyvių biodegalų panaudojimas tyrimuose siejamas su jų ir D bei standartizuotų riebiųjų rūgščių metilesterių variklinių (aplinkosauginių ir energetinių) charakteristikų palyginimo tikslu.

Rapso metilesteris (RME) pagamintas (atitinkantis standartą EN 14214 „*Automobiliniai degalai. Riebalų rūgščių metilesteriai (RRME), skirti dyzeliniams varikliams. Reikalavimai ir tyrimų metodai*“) Lietuvos biodegalų gamykloje UAB „Mestilla“, D su 5 % biokomponento priedu įsigytas Lietuvos degalinėse (atitinkantis standartą EN 590 „*Automobiliniai degalai. Dyzelinas. Reikalavimai ir tyrimo metodai*“).

Tyrimuose panaudoti alternatyvūs biodegalai (B, RBE, *Camelina sativa* ME, *Chlorella protothecoides* ME) pagaminti ir ištirti (cheminės, fizikinės savybės ir kt.) Aleksandro Stulginskio universiteto (ASU) Aplinkos technologijos cheminių ir biocheminių tyrimų laboratorijoje dirbančių mokslininkų kartu vykdant tarptautinius projektus Eureka: Biowastefuel E!3234, Camelina-Biofuel E!4018 ir kt.

Ištirti 2 ir 3 komponentų RRME/RRBE bei A pagrindo mišiniai:

- rapso metilesterio (RME) ir D mišinys B30 (RME) – RRME ir D dvikomponentis mišinys, kurio tūrinis santykis D70/RME30
- butanolio (B) ir D mišinys B30 (B) – A ir D dvikomponentis mišinys, kurio tūrinis santykis D70/B30;
- butanolio (B), rapso metilesterio (RME) ir D mišiniai B30 (RME/B) ir B50 (RME/B) – A ir RRME trikomponentis mišinys, kurio tūrinis santykis D70/RME15/B15 ir D50/RME25/B25;
- sintetinio rapso butilesterio (RBE), rapso metilesterio (RME) ir D mišinys B30 (RBE/RME) ir B50 (RBE/RME) – RRBE, RRME, ir D trikomponentis mišinys, kurio tūrinis santykis D70/RBE15/B15 ir D50/RBE25/B25;
- žeminių *Camelina sativa* aliejaus, kiaulienos riebalų metilesterių ir D mišinys B30 (WCME) – RRME ir D trikomponentis mišinys, kurio tūrinis santykis D70/WCME30.
- vasarinių *Camelina sativa* aliejaus, kiaulienos riebalų metilesterių ir D mišinys B30 (SCME) – RRME ir D trikomponentis mišinys, kurio tūrinis santykis D70/SCME30;
- jūros dumblių metilesterio ir D mišinys B30 (DME) – RRME ir D dvikomponentis mišinys, kurio tūrinis santykis D70/DME30.
- metanolio (M) ir B30 (RME) mišinys B30 (RME+10M) – RRME, D ir M 3 komponentų mišinys, kurio tūrinis santykis (D70/RME30)90/M10.

Butanolis. Tikslu praraplėsti biodegalų gamybos žaliavinę bazę tyrimuose panaudotas B, kuris gali būti panaudotas kaip gryni degalai ar degalų priedas DV nedarant konstrukcinių pakeitimų. B kilmė gali būti dvejopa: naftinės kilmės ir iš atsinaujinančių energijos šaltinių (Szwaja and Naber 2010). DV B gali būti įvestas tiesiogiai į degalų sudėtį arba kaip riebiųjų rūgščių butilesteris (RRBE). B iš atsinaujinančių energijos šaltinių (biobutanolis), pritaikant įvairias technologijas, išgaunamas šiais būdais (Szwaja and Naber 2010):

- taikant fermentavimo metodus biobutanolis yra išgaunamas iš substratų, kurių sudėtyje yra cukraus (tiesiogiai gautas ar pagamintas iš krakmolo);
- celiuliozės hidrolizės technologijos, kurios metu panaudojant mineralines rūgštis, fermentus ir kitas medžiagas, fermentacijos būdu cukrus verčiamas į biobutanolį;
- bioetanolio dehidratacija išgaunant biobutanolį, panaudojant *Sangi* hidroksiapatitinę (fosfatų mineralus, šiuo atveju kalcio mineralai) katalizę (*Sangi hydroxyapatite*);
- išgaunant biobutanolį, biomasę paverčiant dujomis.

ASU mokslininkų įprastos 2 pakopų transesterifikacijos metodu susintetintas (šarminis katalizatorius – kalio hidroksidas) rapso butilesteris

(RBE) buvo pateiktas varikliniams tyrimams. Palyginamieji duomenys pateikti C priedo P.C.1 lentelėje.

Lyginant su B, E pasižymi prastesnėmis maišymosi su D savybėmis, o taip pat B mišiniai su D yra mažiau jautrūs vandens patekimo atveju (Szwaja and Naber 2010). Dėl B mažesnės specifinės garavimo šilumos reikšmės, lyginant su E ar M, yra gerinamos DV šalto užvedimo savybės. B pasižymi santykinai geromis žematemperatūrinėmis charakteristikomis lyginant su įprastais RME biodegalais, tai pagrindžiama RFT (ribinio filtruojamumo temperatūra) rodikliu.

Bandymuose panaudoti 2 ir 3 komponentų mišiniai, kuriuose biokomponento dalis siekė 30 % ir 50 %. C priedo P.C.2 lentelėje pateikti bandymuose panaudotų alternatyvių biodyzelinų pagrindinių charakteristikų duomenys, be viso to, buvo atlikti varikliniai bandymai panaudojant dvikomponentį standartizuotų biodegalų mišinį D70/RME30.

Maišant skirtingus degalų mišinius, jų elementinė sudėtis pakinta – atsiranda persiskirstymas (lyginant su etaloniniu D) tarp C ir H kiekio bei atsiranda papildomas elementas – O₂. C priedo P.C.3 lentelėje pateikta ASU mokslininkų nustatyta mišinių elementinė sudėtis.

Analizuojant C priedo P.C.3 lentelėje duomenis matyti, jog kai kurie alternatyvūs mišiniai elementinėje sudėtyje turi daugiau H nei D. Taip pat mišiniuose mažesnis C kiekis, kuris lemia ŠD emisijos ir SM sumažėjimą.

Kitas plėtrą ribojantis aspektas, su kuriuo susiduriama gaminant RME, tai, kad jo gamybai reikalinga žaliava yra maistinės kilmės, tuo tarpu B gamybos žaliava gali būti ne maistinės kilmės antrinės medžiagos, t. y. atliekos, likusios po tam tikrų technologinių procesų (medienos atliekos, javų šiaudai, kt.).

B turi keletą pranašumų prieš kitus biodegalus. B, lyginant su E, degalų vamzdinams ir visai degalų sistemai yra mažiau agresyvi aplinka korozijos atžvilgiu, B turi gerokai didesnę energetinę vertę. Žemesnis B garų slėgis nei D, palengvina jų maišymą, t. y. papildomai nereikia mažinti garų slėgio (Laza *et al.* 2006). B mišiniuose su D vyksta lėtesnė separacija nei mišiniuose su etanolium. Vienu iš svarbių eksploatacinių trikomponentio D-RBE-B privalumų yra jų geros žematemperatūrinės charakteristikos – esant 30 % biokomponentų koncentracijai jie galėtų būti naudojami DV prie temperatūros iki –33 °C. Išvardinti pranašumai B panaudojimą daro lengvesniu ir patrauklesniu.

Sėjamosios judros (*Camelina sativa*) RRME. Siekiant sumažinti neigiamą biodegalų gamybos poveikį maisto sektoriui, pravartu naudoti alternatyvias riebiąsias žaliavas. Vienas iš tokių aliejingųjų augalų – *Camelina sativa* (Zubr 1997, Vollmann *et al.* 2007), kuri savo savybėmis yra artima rapsui.

CS biodyzelinai pagaminti ASU mokslininkų, kurie panaudojo įprastus 2 pakopų transesterifikacijos M ir kalio šarmo (KOH) katalizės metodus. Dėl didelio nesočiųjų riebiųjų rūgščių kiekio CS aliejus priklauso greitai džiūvančių aliejų grupei, ir dėl riebalų rūgščių sudėties (Peiretti and Meineri 2010), toks

biodyzelinas neatitinka standarto EN 14214 reikalavimų pagal jodo skaičių, kuris siekia 165–175 g I₂/100 g, o standartas reikalauja ne daugiau kaip 120 g I₂/100 g. Siekiant naudoti CS biodyzelino gamyboje, būtina ieškoti galimybių naudoti biodegalų mišinius, kurie juos atitiktų. Žemą jodo skaičių turi kiaulienos riebalai (apie 45 g I₂/100 g). ASU mokslininkų nustatyta optimali biodegalų mišinio sudėtis pagal tūrį: 68 % CS aliejaus 32 % kiaulienos RRME; bei parinktos kompozicijos su D (Lebedevas *et al.* 2010). C priedo P.C.4 lentelėje pateikti CS metilesterio (CSME) ir kiaulienos riebalų metilesterio (KME) pagrindiniai duomenys bei palyginimas RME ir D savybėmis.

Tyrimuose panaudota žieminių ir vasarinių CS aliejaus su kiaulienos RRME (atitinkamai WCME ir SCME) ir D mišiniai: žieminių – B30 (WCME); vasarinių – B30 (SCME), kurių pagrindinės charakteristikos buvo nustatytos ASU pagal standartus: tankis ISO 12185:1996; klampis – ISO 3104:1994; cetaninis skaičius – ISO 5165:1998; pliūpsnio taškas – ISO 3679:2004; sieros kiekis – ISO 20846:2004. C priedo P.C.5 lentelėje pateikti CS aliejaus ir kaulinių RRME charakteristikos ir atitikimas keliamo standarto reikalavimams.

2 metus trukę CS mišinių energetinių ir aplinkosauginių savybių tyrimai buvo orientuoti į biodegalų oksidacijos stabilumo ir jo įtakos biodegalų variklinėms savybėms tyrimus. Tyrimų laikotarpiu alternatyvūs CS biodegalai buvo panaudoti be stabilizatoriaus lyginant juos su standartizuoto RME biodegalais, kurie savo sudėtyje turėjo stabilizatorių Ionol BS 200.

Mikro dumblių (*Chlorella protothecoides*) RRME. RRME gamyba iš maistinių aliejų gali konkuruoti su maisto produktų rinka (Turner *et al.* 2008), tai gali nulemti masišką augalų auginimą biodegalų pramonei, o tai gali kelti pavojų natūraliai gamtinei pusiausvyrai, ekosistemai, dirvožemiui, taip pat gali sąlygoti požeminio ir paviršinio vandens užteršimą (Turner *et al.* 2008, Groom *et al.* 2008, Hill 2007). Siekiant išvengti šių aukščiau išvardintų problemų tyrimams pasirinktas RRME, pagamintas iš jūros dumblių, ši žaliava nėra tinkama maisto pramonei. Mikrodumblių RRME cheminės, fizikinės ir variklinės savybės buvo ištirtos bendradarbiaujant su ASU mokslininkais, kurie teigia, kad kai kurios jūros dumblių rūšys gali generuoti santykinai didelius aliejau kiekius, kurie gali būti panaudoti RRME gamybai. Viena iš šių jūros dumblių rūšių yra mikrodumbliai *Chlorella protothecoides*, kuri auginama heterotrofinėmis sąlygomis. ASU mokslininkų tyrimai parodė, kad iš šios mikrodumblių rūšies pagamintų biodegalų savybės atitinka standarto EN 14214 („*Automobiliniai degalai. Riebalų rūgščių metilesteriai (RRME), skirti dyzeliniams varikliams. Reikalavimai ir tyrimų metodai*“) reikalavimus (C priedo P.C.6 lent.).

Atlikus bandymus laive, panaudotų mišinių mėginiai buvo išsiųsti į ASU Aplinkos technologijos cheminių ir biocheminių tyrimų laboratoriją tolimesniems fizikinių bei cheminių savybių tyrimams. C priedo P.C.7 lentelėje pateiktos bandymuose panaudotų mišinių pagrindinės charakteristikos.

Metanolis. M (CH_3OH) yra paprasčiausias A, pagrindinai gaminamas distilijuojant medienos atliekas. Keičiantis gamybos technologijoms, šiomis dienomis dideli M kiekiai generuojami gamtines dujas skaidant į CO_2 ir vandenilį, šiam procesui naudojant atitinkamą katalizatorių atitinkamose slėgio ir temperatūros sąlygose (Agarwal 2007).

BME MI DEE Jendrassik vidaus degimo variklių laboratorijoje atliktuose Audi 1,9 TDI 1Z DV bandymuose panaudotas B30 (RME) su 10 % pagal tūrį M priedu bei palygintos darbo charakteristikos DV dirbant B30 (RME) ir D. M ir B30 (RME) mišinio B30 (RME+10M) tūrinis santykis – $(D70/RME30)90/M10$. M pagamintas Baltarusijoje, įsigytas Lietuvoje. Cheminės ir fizikinės M savybės pateiktos C priedo P.C.8 lentelėje.

Mišinio B30 (RME+10M) cheminės ir fizikinės savybės nebuvo iširtos, šie tyrimai buvo koncentruoti į tyrimus, susijusius su A priedo įtaka DV, dirbančio mišiniu, variklinėms savybėms bei išsamiam DP parametru registravimui, kuris būtinas praplėsti disertacijos MM sritį.

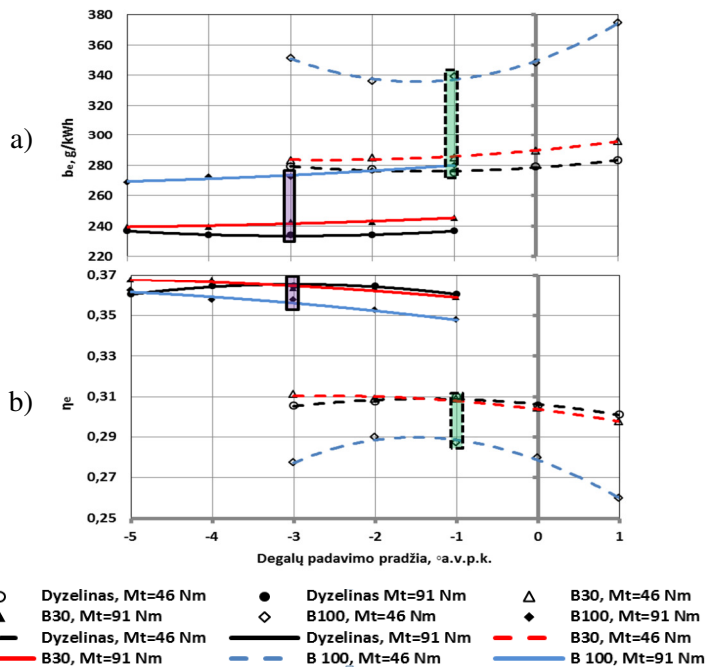
M ir D mišiniams būdingas separavimasis (heterogeniškumas), tam, kad išvengtų šio reiškinio, reikalingas tirpiklis, kurį šiuose bandymuose atstojė RME. Pirmame mišinio formavimo etape buvo maišomas M ir RME. Buvo suformuotas homogeninis M ir RME mišinys, toliau šis mišinys buvo maišomas su D. Prieš variklinius bandymus bei jų metu nebuvo pastebėta jokių heterogeninių B30 (RME+10M) mišinio požymių.

3.2. Degalų padavimo kampo reguliavimo įtakos variklio darbo parametrams tyrimai

Tyrimai atlikti tikslu iširti gryno I kartos RME variklines savybes, palyginti jas su D ir išsiaiškinti optimalios sudėties D ir RRME mišinio panaudojimo tikslingumą. Taip pat bandymai atlikti siekiant iširti DV, dirbančio skirtingais degalais, degalų padavimo sistemos reguliavimo įtaką darbo parametrams. Bandymai atlikti VGTU TIF ATK DV laboratorijoje, panaudojant 1,9 TDI 1Z DV. Bandymuose panaudoti grynas B100 RME, D, RME ir D mišinys B30. DV darbo sąlygos yra artimos miesto ir užmiesčio važiavimo sąlygoms (maksimalaus greičio). Bandymų metu, DV dirbant skirtingais degalais, $n = 1900 \text{ min}^{-1}$ režime buvo apkraunamas 46 ir 91 Nm (atitinkamai $p_{me} = 0,304$ ir 0,602 MPa), šie režimai imituoja automobilio važiavimą miesto ir užmiesčio ribinėmis sąlygomis t. y. $\sim 50 \text{ km/h}$ ir $\sim 90 \text{ km/h}$.

DV EVS kontroliuoja degalų padavimo parametrus keičiantis apkrovos ir n charakteristikoms. Buvo nustatytas sąlyginis pradinis degalų padavimo kampas ($\varphi_{deg.pad.}$) 46 Nm apkrovos režimui $-1^\circ \text{ a.v.p.k.}$ ir 91 Nm režimui $-3^\circ \text{ a.v.p.k.}$, kurie buvo ankstinami ir vėlinami 2° a.v.p.k. , 1° a.v.p.k. žingsniu.

Vertinant b_e ir η_e pastebimi abiemis M_t režimams būdingi parametru pokyčio bruožai. Vėlinant $\varphi_{deg.ip}$, pastebimas dominuojantis nežymus b_e padidėjimo efektas (3.1 pav.), duomenų reikšmių svyravimas visame $\varphi_{deg.ip}$ diapazone siekia: DV dirbant žemesnės apkrovos režimu D ir B30 atveju – 3–4 %, B100 – 10 %; aukštesnės apkrovos režime D ir B30 atveju praktiškai nekinta (~1 %), o B100 atveju – ~3 % ribose. Degalų sunaudojimo rezultatai gerai koreliuojasi su kitu mokslininkų atliktais tyrimais (Ganapathy *et al.* 2011, Padian *et al.* 2011).



3.1 pav. b_e , η_e priklausomybė [atitinkamai a), b)] nuo $\varphi_{deg.pad}$, $M_t = 46; 91$ Nm, $n = 1900 \text{ min}^{-1}$

Fig. 3.1. b_e , η_e dependence [respectively a), b)] on $\varphi_{deg.pad}$, $M_t = 46; 91$ Nm, $n = 1900 \text{ min}^{-1}$

B100 stiprų b_e išaugimą (23–32 % [$M_t = 46$ Nm], 13–18 % [$M_t = 91$ Nm]), lyginant su D, sąlygoja 13 % mažesnis H_U esant toms pačioms DV apkrovos sąlygoms, o taip pat degalų tankio skirtumai, dėl didesnio RME tankio, esant tai pačiai tūrinei ciklinei degalų porcijai, masinė išeiga yra didesnė.

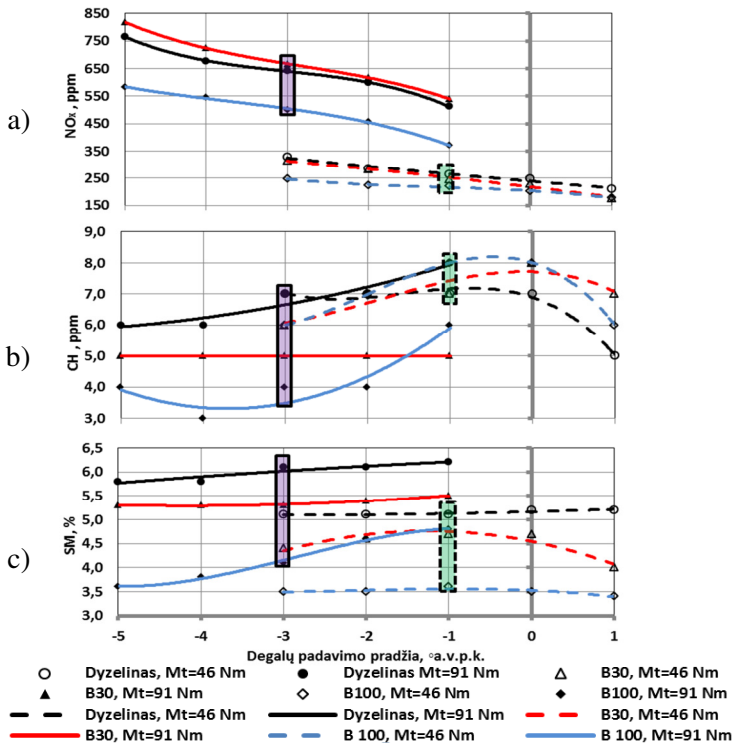
Ankstinant $\varphi_{deg.ip}$ (nuo bazinio), b_e praktiškai išlieka nepakitęs D ir B30, o B100 atveju, $M_t = 46$ Nm režime, stebimas neigiamas efektas (3,5 % išaugimas), $M_t = 91$ Nm – b_e sumažėjimas siekia 1,6 %. Visame bandomajame $\varphi_{deg.ip}$

diapazone B30 degalai, $M_t = 46$ Nm ir $M_t = 91$ Nm režimuose, atitinkamai pasižymi iki 4,5 % ir 3,5 % didesniu b_e lyginant su D.

η_e rezultatai adekvatūs b_e . Lyginant su D ir B30, dėl mažesnio H_U , B100 atotrūkis šiek tiek sumažėja (3.1 pav.). Vėlinant $\varphi_{deg.ip}$ pastebima η_e kritimo tendencija, kuri tiesiogiai susijusi su b_e augimu, kurį sąlygoja DV EVS. Esant trumpesniam degiojo mišinio formavimosi laikui bei žemesniam H_U , siekiant užtikrinti tas pačias apkrovos ir n režimo sąlygas, DV EVS didina ciklinę degalų porciją. η_e rezultatai puikiai pagrindžia pasirinkto ir plačiai literatūroje sutinkamo kaip optimalaus santykio biodegalų ir D mišinio B30 panaudojimą. η_e rezultatai visame pokyčio diapazone išlieka santykinai stabilūs D ir B30 panaudojimo atveju (DV dirbant 46 Nm ir 91 Nm apkrovos režimais): atitinkamai D – 1–3 % ir B30 1–3,5 % ($M_t = 46$ Nm), ± 1 % ($M_t = 91$ Nm) ribose, lyginant su pradinio $\varphi_{deg.ip}$ sąlygomis. B100 panaudojimo atveju stebimas ryškesnis pokytis: 3,5–10 % ($M_t = 46$ Nm), 1,5–3 % ($M_t = 91$ Nm) diapazone, lyginant su pradinio $\varphi_{deg.ip}$ sąlygomis. Aukštesniame DV apkrovos režime, ankstinant $\varphi_{deg.ip}$ grynas RME ir B30 mišiniai pasižymi augančiu energijos panaudojimo efektyvumu ir b_e , tuo tarpu D atveju $\varphi_{deg.ip}$ keitimas praktiškai neturi įtakos. 46 Nm DV apkrovos režime $\varphi_{deg.ip}$ keitimas, bandomųjų degalų atžvilgiu, teigiamo efekto neatneša. Bendru atveju, η_e atžvilgiu, B30 ir D pasižymi artimais rezultatais, o B100 pasižymi ryškiu sumažėjimu – santykinis pokytis (lyginant su D) $M_t = 46$ Nm režime siekia 6–14 %, $M_t = 91$ Nm – iki 3,5 %.

NO_x susidarymui reikalingos pagrindinės sąlygos – oras (N_2 šaltinis), aukšta temperatūra ir laikas (Tschoeke and Mollenhauer 2010). Vėluojant degalų įpurškimui trumpėja indukcijos periodas, per kurį formuojamas prastinės kokybės degalų ir oro degusis mišinys, dėl ko degimo proceso metu cilindro lokalinės ir termodinaminės temperatūros krenta. Bendru atveju, D ir B30 pasižymi santykinai artimais NO_x rodikliais, o pokytis svyruoja: $M_t = 46$ Nm diapazone 4–15 % (dominuojantis 4–7 %) ir $M_t = 91$ Nm – diapazone 5–7 % (3.2 pav.). Analizuojant B30 ir D NO_x emisijos rezultatus, pastebima, jog esant žemesnei DV apkrovai B30 pasižymi žemesniais NO_x rodikliais. B100 panaudojimo atveju stebima stipriai žemesnė NO_x emisija, lyginant su D, visame $\varphi_{deg.ip}$ diapazone sumažėja: $M_t = 46$ Nm diapazone 16–24 % ir $M_t = 91$ Nm diapazone 24–28 %. NO_x emisija priklauso nuo eilės faktorių, tokių kaip: DV tipo, bandymo sąlygų, degalų rūšies fizikinių ir cheminių savybių, degimo proceso savybių ir t. t. Šiuo atveju stiprus B100 degalų NO_x sumažėjimas gali būti paaiškintas tuo, kad pagrindinis NO_x kiekis susidaro KDF, esant liesam mišiniui, o RME pasižymi ilgesniu indukcijos periodu bei degimo trukme (Shahabuddin *et al.* 2013, Kowalewicz 2004), tai lemia pagrindinio degimo proceso persikėlimą į DDF, o taip pat, atsižvelgiant į degalų sunaudojimą, galima teigti, kad degimas vyksta riebaus mišinio aplinkoje.

Vėlinant (nuo bazinio) $\varphi_{deg.ip}$ apkrovos režimuose $M_t = 46$ Nm ir $M_t = 91$ Nm atitinkamai galima pasiekti NO_x emisijos sumažėjimo: D – 20 % ir 19 %, B30 – 28 % ir 19 %, B100 – 20 % ir 26 %.



3.2 pav. NO_x , CH, SM priklausomybė [atitinkamai a), b), c)] nuo $\varphi_{deg.pad.}$, $M_t = 46$ ir 91 Nm, $n = 1900$ min⁻¹

Fig. 3.2. NO_x , CH, SM dependence [respectively a), b), c)] on $\varphi_{deg.pad.}$, $M_t = 46$ and 91 Nm, $n = 1900$ min⁻¹

CH emisijos pokytį (3.2 pav.) sunku vertinti, nes skirtingų degalų panaudojimo atveju tiek žemesnės, tiek ir aukštesnės p_{me} režimuose koncentracija svyruoja 3–5 ppm diapazone ir siekia atitinkamai 5–8 ppm ir 3–8 ppm, atsižvelgiant ir į tai, kad CH koncentracijos nustatymo prietaiso tikslumas ± 2 ppm. Remiantis tuo, galima teigti, jog pasirinktame diapazone $\varphi_{deg.ip}$ pokytis, DV dirbant bandomaisiais degalais, ryškios įtakos neturi. Esant aukštesnei apkrovai, fiksuojamas B30 ir B100 pranašumas CH koncentracijos atžvilgiu.

Bandyuose gautas SM pokytis (3.2 pav.), skirtingų degalų panaudojimo atžvilgiu, adekvatus kitų, šiame darbe pateiktų tyrimų rezultatams bei kitų

mokslininkų atliktuose darbuose. SM duomenų išsibarstymas, abiejų apkrovų atveju, svyruoja 3,5–6,5 % SM skalėje. $M_t = 46$ Nm apkrovos režime $\varphi_{deg.ip}$ pokytis praktiškai nedaro įtakos SM (priklausomai $\varphi_{deg.ip}$ svyruoja 1 % SM skalės ribose), $M_t = 91$ Nm atveju pastebimas šiek tiek ryškesnis pokytis, vėluojant $\varphi_{deg.ip}$ B100 ir D pasižymi augančia SM tendencija, atitinkamai 3–6 % ir 6–8 % SM skalės ribose. Skirtingų degalų panaudojimo atveju B100 $M_t = 46$ Nm režime pasižymi ~1,5 %, $M_t = 91$ Nm – 1,5–2,7 %, atitinkamai B30 – 0,5–1,2 % sumažėjimu pagal SM skalę.

Sumuojant rezultatus, galima teigti, jog priverstinis $\varphi_{deg.ip}$ nukrypimas nuo bazinės, EVS numatytos reikšmės, kompleksinio DV eksploatacijos parametru pagerėjimo efekto neduoda. Tai rodo, kad DV degalų padavimo parametru reguliavimas B100 (RME) ir B30 (RME) yra netikslingas ir nebūtinai, o tai didina biodegalų panaudojimo galimybes. Kita tyrimo dalis atskleidžia mišinių su 30 % biodyzelino kiekiu panaudojimo tikslingumą, tai pagrindžia artimi B30 (RME) ir D variklinių savybių tyrimu rezultatai.

3.3. Butanolio mišinių variklinių savybių tyrimai

B panaudojimo DV tyrimai orientuoti į 2 ir 3 komponentų II kartos A mišinių privalumų ir trūkumų analizę bei jų išryškirimą.

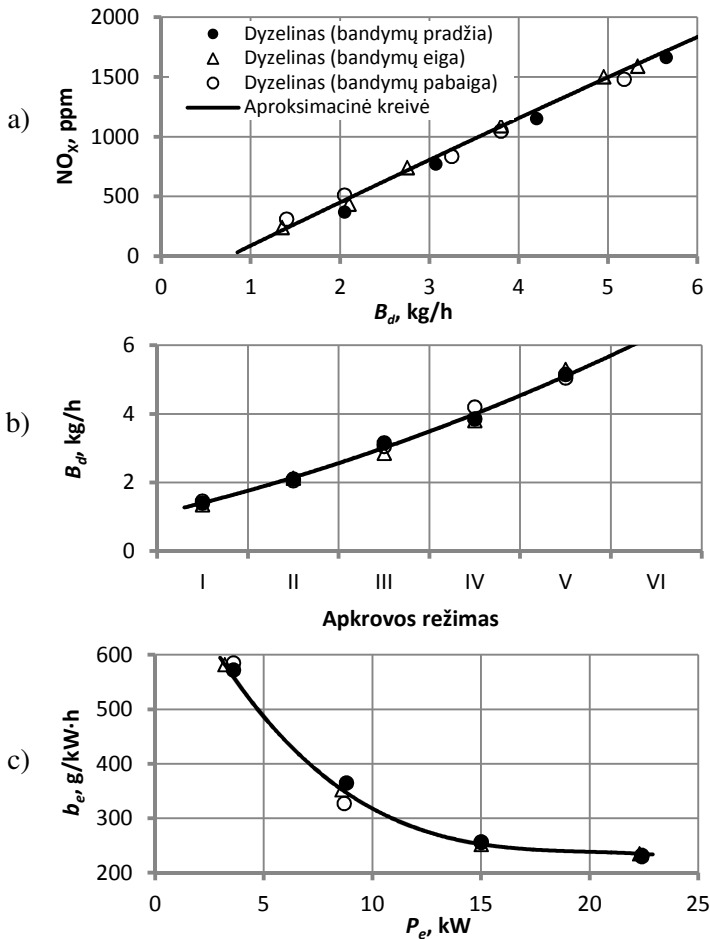
Variklinių bandymų metu siekiant ištirti DV techninės būklės stabilumą bandymų pradžioje, eigoje ir pabaigoje buvo registruojami DV parametrai jam dirbant D (3.3 pav.) eksploatacinės P_e charakteristikos režimuose.

DV parametrai bandymų metu išlieka stabilūs visame eksploatacinės P_e charakteristikos režimų diapazone:

- ✓ NO_x , vieno jautriausių DV DP nukrypimams parametro, koncentracijų reikšmės aproksimuojamos viena kreive (3.3 pav.), o nukrypimai nuo aproksimacinės kreivės neviršija NO_x matavimo paklaidos;
- ✓ B_d ir b_e duomenų nukrypimai nuo jų aproksimuojančių kreivių taip pat neviršija jų registravimo paklaidos (3.3 pav.).

Remiantis stabilumo analize galima teigti, kad eksperimento duomenys yra patikimi ir atvaizduoja tikrą DV eksploatacinių parametru pakitimą, kurį gali lemti bandomųjų degalų variklinės savybės.

λ , kuris vertinamas pagal degalų elementinę sudėtį, reikšmės DV dirbant išbandytais degalais pateiktos 3.4 paveiksle Gauti rezultatai liudija, kad D pakeitus mišiniais neturi neigiamos įtakos darbiniam oro-degalų mišinio susidarymui bei jo degimui. B30 mišiniais visame DV P_e diapazone λ sumažėjimas nepastebimas, o vidutinės ir mažos P_e režimuose λ charakteringa 2–4 % padidėjimo tendencija (3.4 pav.).

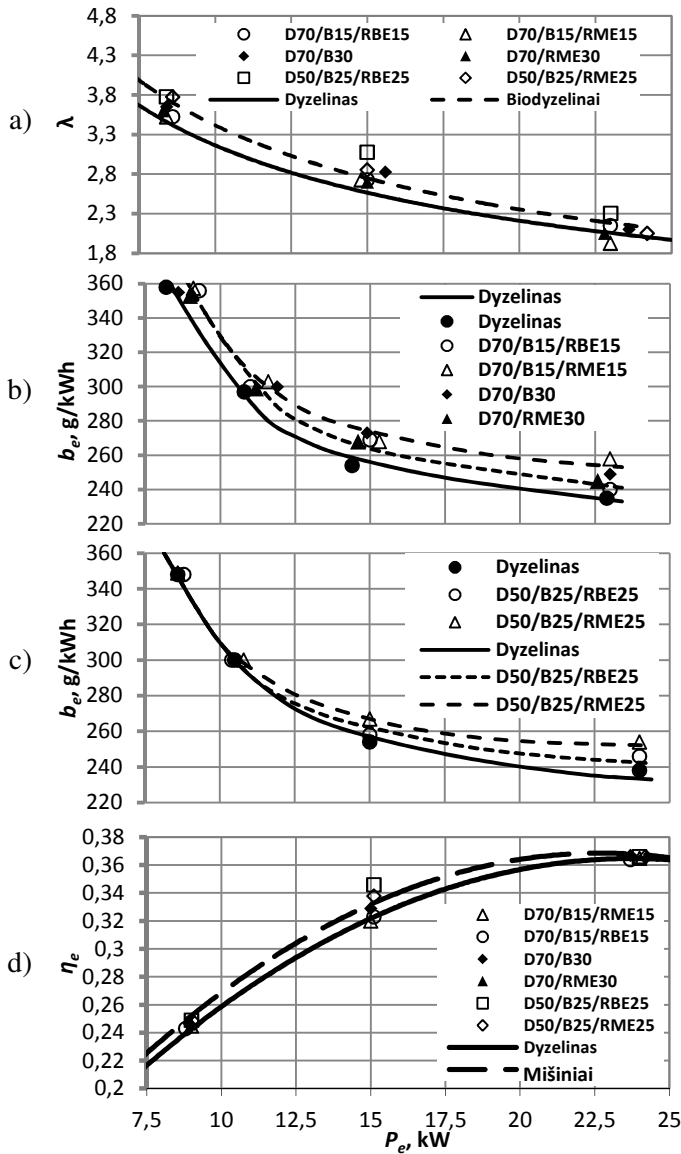


3.3 pav. Variklio 320 DMG NO_x , B_{d1} , b_e pokytis [atitinkamai a), b), c)], pagrindžiantis variklio techninės būklės stabilumą

Fig. 3.3. The change of diesel engine 320 DMG NO_x , B_{d1} , b_e [respectively a), b), c)] which justify the stability of technical condition

Pateikti (3.4 pav.) ekonomiškumo rodiklių palyginamųjų tyrimų rezultatai rodo, kad DV, dirbančio tiriamaisiais DM, palyginti su D padidėja b_e .

λ -idemp sąlygomis b_e padidėjimą lemia mažesnis (palyginus su D) biodegalų (tuo pačiu ir mišinių) H_U . Tačiau vidutinės ir mažos P_e režimuose H_U sumažėjimą kompensuoja efektyvesnis degalų degimo procesas, pagrįstas didesniais λ reikšmėmis (3.4 pav.).



3.4 pav. Bandomaisiais degalais dirbančio 320 DMG DV λ ir energetinių parametru (b_e , η_e) priklausomybė [atitinkamai a), b), c), d)] nuo P_e
Fig. 3.4. The dependence of λ and energy parameters (b_e , η_e) on P_e [respectively a), b), c), d)] while diesel engine 320 DMG running on tested fuels

Išskyrus D70/B15/RME15, visiems išbandytiems mišiniams, į kurių sudėtį įėjo 30 % biodegalų, b_e padidėjimas sudaro 3–4 % (didesnis b_e pasikeitimas stebimas artimuose $P_{e\ nom}$ režimuose (3.4 pav.). Didelės P_e režimuose naudojant D70/B15/RME15 mišinį b_e padidėjo 8 %.

Padidinus biodegalų dalį iki 50 % mišinyje su D, maksimalus b_e padidėjimas neviršija 3–3,5 % D50/B25/RBE25 mišiniui, o D50/B25/RME25 atveju pasiekia 8 %. Mažos ir vidutinės P_e režimuose principinio skirtumo tarp b_e , dirbant mišiniais ir D, nėra. Tikėtina sulaukti adekvataus 3 % ir 8 % traukos charakteristikos sumažėjimo atitinkamai naudojant RBE ir RME mišinius (Lebedevas et al. 2007).

Apibendrinant gautus duomenis galima teigti, kad RBE panaudojimas nagrinėjamo tipo DM gamyboje vietoje RME yra patrauklesnis tuo aspektu, kad naudojant bet kurios sudėties tirtus degalus, į kuriuos įėjo RBE, b_e padidėjo tik apie 3–4 % net didelės P_e režimuose, kai tuo tarpu naudojant mišinius, kurių sudėtyje buvo RME, didelės P_e režimuose pastebėtas net 8 % b_e padidėjimas.

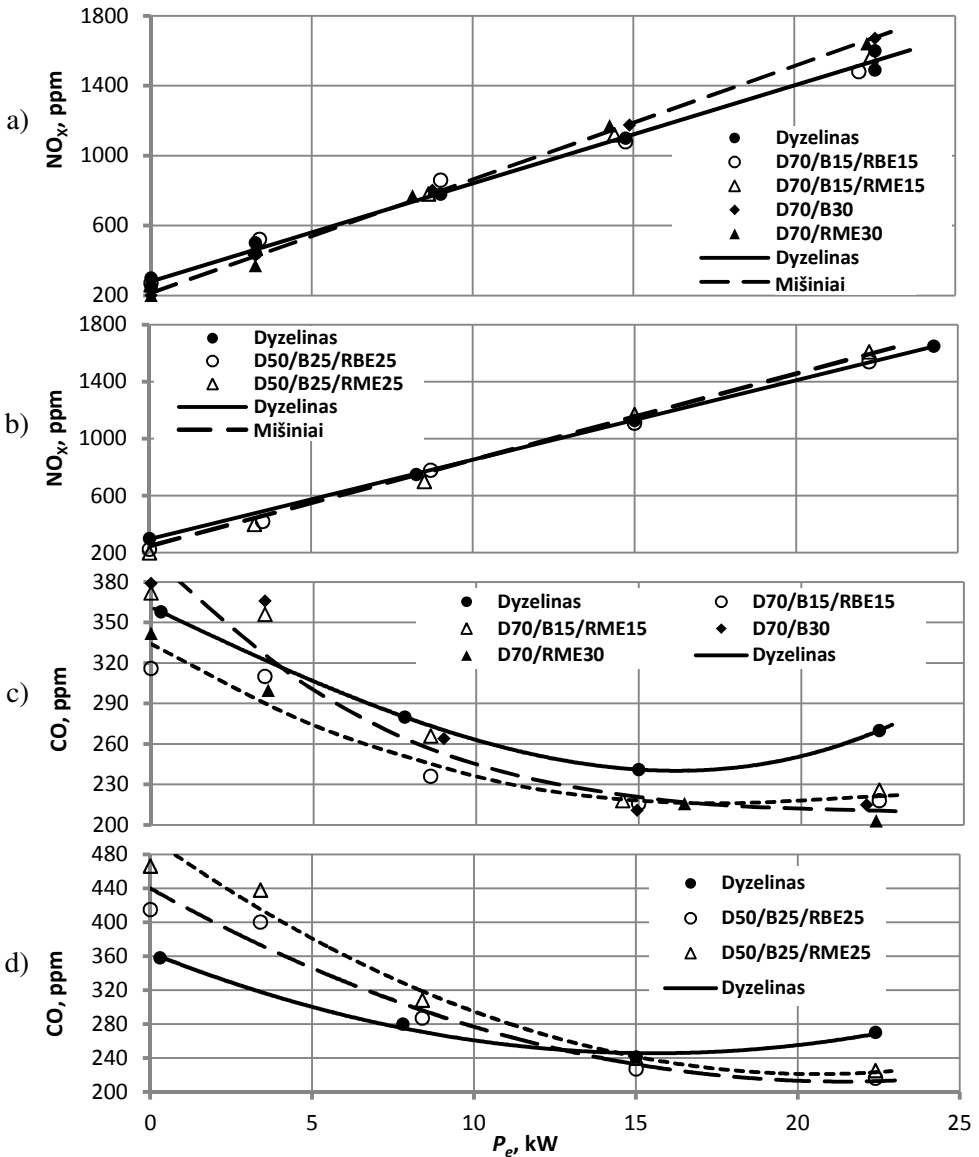
Gauta akivaizdi η_e padidėjimo tendencija DV dirbant mišiniais (3.4 pav.). η_e padidėjimo efektas DV dirbant RBE, palyginus su RME, yra šiek tiek didesnis, o palyginus su D siekia iki 4 %.

Siekiant įvertinti ir palyginti biodegalų poveikį aplinkai buvo ištirtos kenksmingų komponentų koncentracijos DV ID, jam dirbant tiriamaisiais mišiniais ir D. Matuotos NO_x , CH, CO koncentracijos bei ID SM. Šių komponentų koncentracijų analizė ir palyginimas DV dirbant tiriamaisiais degalais leidžia įvertinti atskirų degalų rūšių naudojimo aplinkosauginį efektą.

NO_x koncentracijos DV dirbant tiriamaisiais degalais priklausomybė nuo P_e pateikta 3.5 paveiksle. Kaip matyti, NO_x koncentracijos funkcinė priklausomybė nuo P_e visiems išbandytiems degalams, tame tarpe ir D, turi linijinį charakterį. DV dirbant D70/B15/RME15 ir D70/B15/RBE15 degalais gauti praktiškai identiški rezultatai kaip ir DV dirbant D.

Dirbant degalais D70/B15/RME15 ir D70/B15/RBE15 bei D70/B30 $P_{e\ nom}$ režimuose charakteringas apie 8–10 % NO_x koncentracijos padidėjimas, o esant mažai P_e stebimas nedidelis sumažėjimas.

DV dirbant tiriamaisiais B50 mišiniais, NO_x koncentracija visame P_e diapazone mažai (apie 3–4 %, tai artima NO_x matavimo tikslumui) skiriasi nuo D, o taip pat NO_x koncentracija ID yra mažesnė nei DV dirbant B30 mišiniais (D70/B15/RME15 ir D70/B15/RBE15). Šis faktas gali būti pagrįstas didesniu biodegalų cetaniniu skaičiumi: RBE CN vertė yra 58–59 vnt., RME – 54 vnt., D – 51 vnt. Ši savybė tiesiogiai sąlygoja degimo intensyvumo sumažėjimą KDF ir atitinkamai NO_x susidarymo intensyvumo sumažėjimą.



3.5 pav. Bandomaisiais degalais dirbančio 320 DMG variklio ir aplinkosauginių parametru [NO_x (a ir b), CO (c ir d)] priklausomybė nuo P_e

Fig. 3.5. The dependence of environmental parameters [NO_x (a and b), CO (c and d)] on P_e while diesel engine 320 DMG running on tested fuels

CO koncentracijos ID, DV dirbant tiriamaisiais degalais, priklausomybė nuo P_e pateikta 3.5 paveiksle. Nesunku pastebėti, kad mažos P_e režimuose CO koncentracija DV ID mažai priklauso nuo degalų rūšies.

Padidinus apkrovą, DV dirbant tiriamaisiais degalų mišiniais, užfiksuotas CO koncentracijos sumažėjimas palyginti su tuo atveju, kai DV dirbo D. CO sumažėjimo efektas sudarė iki 30 %.

Degalų, kurių sudėtyje yra RBE, rodikliai šiek tiek geresni nei degalų su RME. Tai ypač pastebima esant mažai DV P_e : CO koncentracijos sumažėjimas siekia iki 15 % (3.5 pav.). CO koncentracijos DV ID pokyčio charakteris, dirbant D70/B15/RBE15, yra panašus kaip ir D70/RME30. Dvikomponenčiai degalai, kuriuos sudarė D ir B, pasižymėjo blogesnėmis savybėmis nei degalai, kurių sudėtyje buvo RME ar RBE.

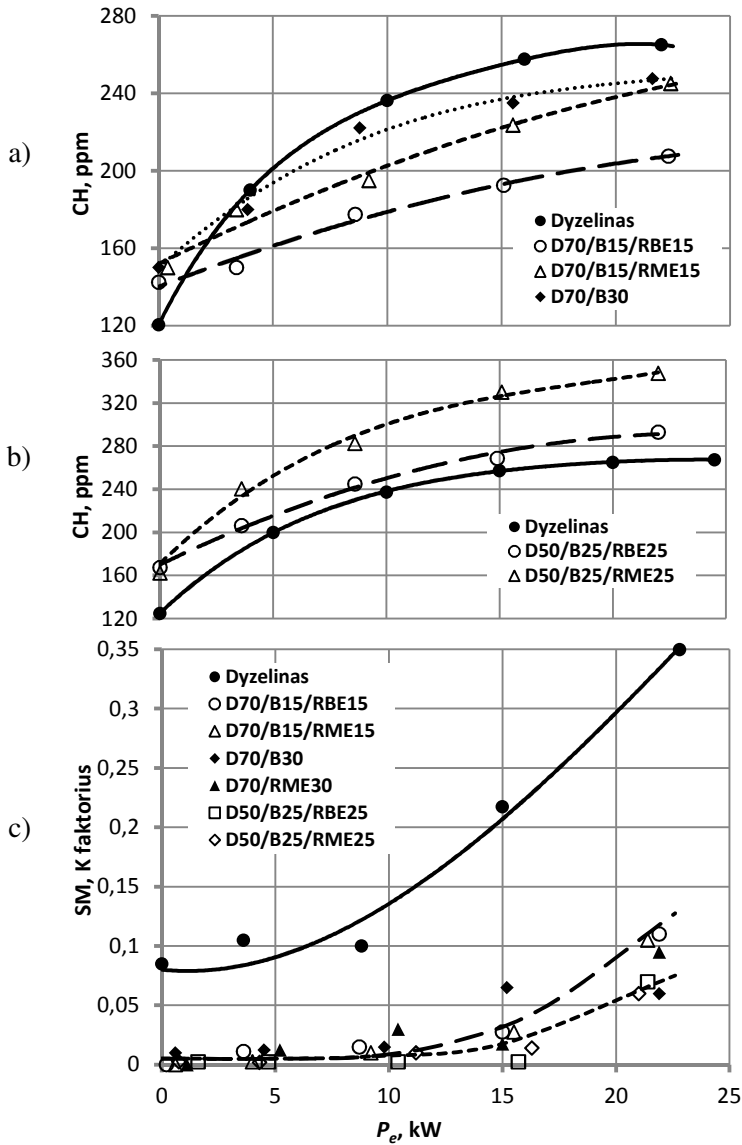
CO koncentracijos sumažėjimą deginiuose galima būtų paaiškinti didesniu O_2 kiekiu degaluose (ypač, kai yra A priedas). Esantis O_2 teigiamai veikia degimo procesą, todėl ID mažėja nepilno degimo produktų kiekis.

DV CH koncentracijos matavimo ID rezultatai pateikti 3.6 paveiksle. Pastebima, kad naudojant B30, visais atvejais pasiekiamas teigiamas CH sumažėjimo efektas, lyginant su D (3.6 pav.). Daugiausiai (iki 16 %) CH koncentracija sumažėja DV dirbant D70/B15/RBE15. Tačiau pastebėta, kad prasčiausiomis savybėmis pasižymi 2 komponentų B ir D mišinys.

Atvirkščias efektas pastebėtas, kai tiriamuose mišiniuose buvo didesnis biodegalų kiekis (50 %). DV dirbant D50/B25/RME ir D50/B25/RBE25 CH koncentracija ID ne sumažėjo, bet padidėjo iki 40 % lyginant su D.

ID SM priklausomybė nuo naudotų degalų rūšies ir DV apkrovos pateikta 3.6 paveiksle. Gauti rezultatai akivaizdžiai įrodo naujų rūšių mišinių naudojimo efektyvumą jais pakeičiant D.

Žymus SM sumažėjimas pastebimas visame tirtame P_e intervale. Tiriamieji mišiniai savo savybėmis nenusileidžia D70/RME30 degalams. Diapazone nuo TE iki 60 % nuo $P_{e\text{ nom}}$, SM, dirbant mišiniais, artimas nuliui ir siekia 0,02–0,06 vnt. K faktorius, tuo tarpu DV dirbant D, ši vertė siekia iki 0,2 vnt. Didinant DV P_e , SM skirtumai tapo dar ryškesni: DV dirbant D ir esant $P_e = \sim 23$ kW, pasiekta 0,35 vnt. vertė, tuo tarpu dirbant tiriamaisiais degalų mišiniais ši vertė siekė tik 0,05–0,1 vnt. Be to, pastebėta, kad mažesnės vertės yra charakteringos dirbant B50 mišiniais. Ir šiuo atveju pastebima tendencija, kad degalai, kurių sudėtyje yra RBE, pasižymi geresniu aplinkosauginiu efektu nei RME degalai. Be to, degalai D70/B30 pasižymi prastesnėmis variklinėmis savybėmis nei kiti mišiniai.



3.6 pav. Bandomaisiais degalais dirbančio 320 DMG variklio ir aplinkosauginių parametŕų [CH (a ir b), SM (c)] priklausomybė nuo P_e

Fig. 3.6. The dependence of environmental parameters [CH (a and b), SM (c)] on P_e while diesel engine 320 DMG running on tested fuels

B30 mišinių panaudojimo atveju η_e nenusileidžia D panaudojimui, tuo pat metu pasiekiamas kompleksinis tirtų KK (CO, CH, NO_x, SM), o taip pat ir CO₂ koncentracijos sumažėjimas. Biodegalų padidėjimas iki 50 % daro įtaką η_e padidėjimą iki 4 % palyginus su D, jaučiamai mažėja CO koncentracija ir SM esant artimam NO_x ir CH koncentracijos lygiui.

Trikomponenčiai D-RBE-B ir dvikomponenčiai D-B mišiniai dėl geresnių, lyginant su D-RME mišiniais, energetinių bei aplinkosauginių savybių charakterizuojami geromis praktinio panaudojimo perspektyvomis.

3.4. *Camelina sativa* biodyzelino mišinių variklinių savybių tyrimai

D pakeitimo į II kartos RRME trikomponenčius B30 CS mišinius tyrimuose buvo analizuojami du pagrindiniai aspektai:

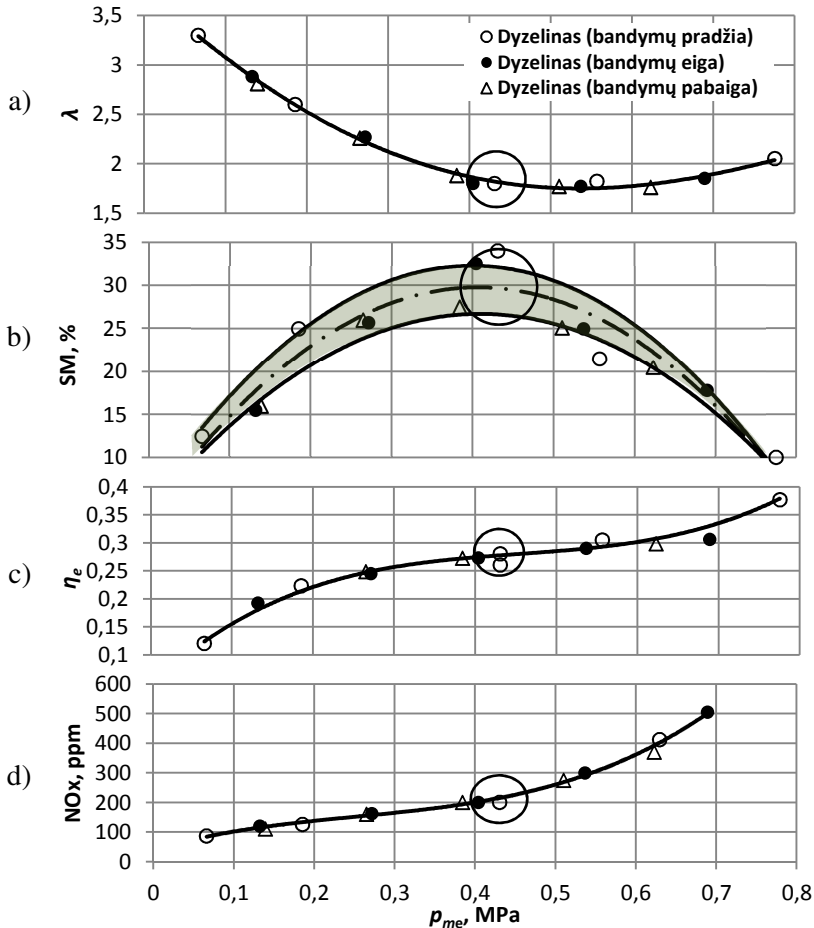
- DV reguliavimo, visų pirma EVS kontroliuojamų charakteristikų stabilumas;
- DV energetinių bei aplinkosauginių parametru pasikeitimas, pagal kurį įvertinama būtinybė optimizuoti DV parametrus darbui RRME mišiniais.

Stendinių 1,9 TDI DV bandymų metu DV techninė būklė vertinama kaip stabili (3.7 pav.). Eksperimentinių oro pertekliaus koeficiento λ , η_e , SM ir NO_x koncentracijos duomenų išsibarstymas nuo aproksimacinių kreivių yra artimas šių parametru matavimo tikslumui.

Bandymų rezultatai taip pat patvirtina EVS funkcionavimo stabilumą DV dirbant visais išbandytais degalais. EVS suveikimo momentas pagal p_{me} 3.7 paveiksle pažymėtas apskritimu. DV parametru pasikeitimo grafines priklausomybės (3.7 pav.) liudija, kad λ yra pagrindinis EVS reguliuojamas parametras, kuris nusako tiek energetinius (η_i , b_i), tiek ir DV aplinkosauginius rodiklius (NO_x, CO, SM, CH) (Tschoeke and Mollenhauer 2010, Lebedevas *et al.* 2007, Portnov 1963).

λ pasikeitimo funkcija nuo DV p_{me} yra artima hiperbolinės funkcijos formai. Toks λ pasikeitimo pobūdis pastebimas tiek DV be TK, tiek ir su TK. Mažos p_{me} režimuose didėjant p_{me} intensyviai mažėja λ , o nuo vidutinių ir didesnių p_{me} reikšmių λ pasikeitimas jaučiamai lėtėja.

Skirtingai nei DV be EVS, minimalios λ reikšmės 1,9 TDI DV pasiekiamos ne $p_{me \max}$ režimuose, o p_{me} siekiant apie $p_{me} \approx 0,4 p_{me \max}$. Būtent prie šios apkrovos EVS įsijungia, o λ pradeda didėti ir esant $p_{me} \approx 0,6-0,7 p_{me \max}$ ir pasiekia 2,05 vnt. arba nuo minimalios reikšmės išauga ~20 % (3.7 pav.).



3.7 pav. Variklio 1,9 TDI λ , SM, η_e , NO_x pokytis [atitinkamai a), b), c), d)], pagrindžiantis DV techninės būklės stabilumą

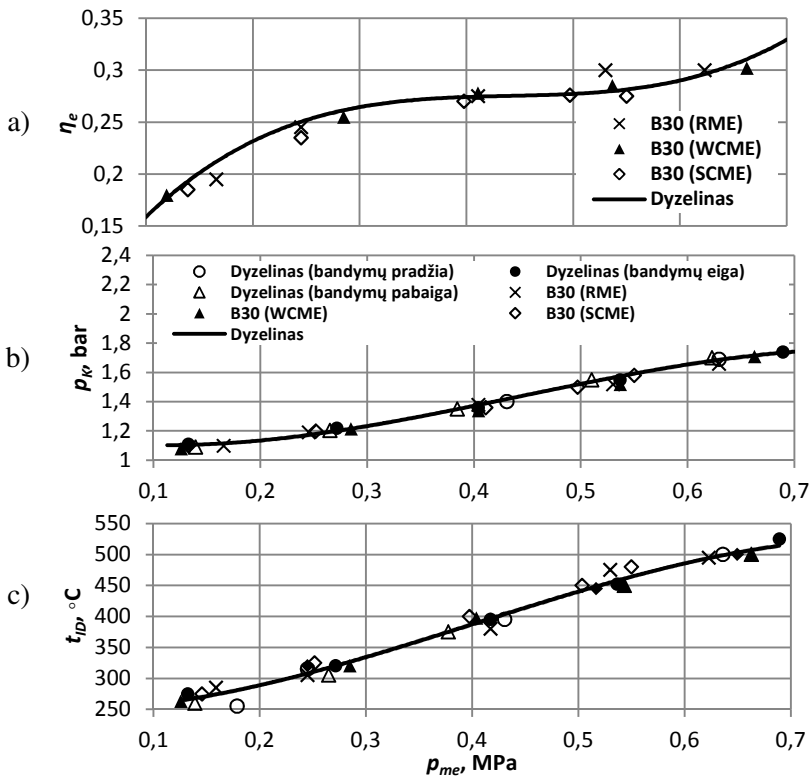
Fig. 3.7. The change of diesel engine 1.9 TDI λ , SM, η_e , NO_x [respectively a), b), c), d)] which justify the stability of technical condition

Funkcijos nuo p_{me} pasikeitimai būdingi η_e , SM ir NO_x koncentracijai (3.7 pav.). p_{me} diapazone TE–0,35 $p_{me\ max}$ ($p_{me} = 0,45$ MPa) η_e turi eksponentinį didėjimo charakterį (3.7 pav.). Didesnių p_{me} reikšmių diapazone ($p_{me} \approx 0,65$ – $0,70$ $p_{me\ max}$), pagal artimą parabolę priklausomybę, η_e didėja iki 0,38. EVS didina λ , tuo pačiu gerina DV cilindro aprūpinimą oru, mažina nepilno degimo produktų (SM, CO, CH) kiekį, nes padidėjus O_2 koncentracijai degimo zonoje gerėja degalų degimo sąlygos (Demirbas 2008, Kavtaradze 2008).

Bandymų metu esant $0,35 p_{me \max}$ pasiekiamas ID SM maksimumas $\sim 30 \pm 5\%$ HS, didėjant λ , diapazone $0,4\text{--}0,65 p_{me \max}$ SM intensyviai krenta iki $\sim 10\%$ HS (3.7 pav.).

CH koncentracija maksimalias reikšmes taip pat pasiekia esant $\sim 0,35 p_{me \max}$, o didesnių p_{me} reikšmių diapazone stabilizuojasi.

Kita vertus, λ padidėjimas ($p_{me} \geq 0,35 p_{me \max}$) sąlygoja degalų degimo intensyvumą, tuo pačiu didina NO_x susidarymą DV cilindre ir atitinkamai NO_x koncentraciją ID (3.7 pav.). Prie $p_{me} \approx 0,35 p_{me \max}$ NO_x koncentracija pasiekia ~ 180 ppm, didėjant p_{me} NO_x intensyviai didėja ir pasiekia 500 ppm ($p_{me} \approx 0,6 p_{me \max}$) (Demirbas 2008, Kavtgradze 2008).



3.8 pav. Bandomaisiais degalais dirbančio 1,9 TDI variklio η_e , p_K , t_{ID} priklausomybė [atitinkamai a), b), c)] nuo p_{me}

Fig. 3.8. The dependence [respectively a), b), c)] of η_e , p_K , t_{ID} on p_{me} while diesel engine 1.9 TDI running on tested fuels

D pakeitimas į B30 (RME), B30 (WCME), B30 (SCME) neturėjo įtakos EVS funkcionavimo parametrų. Bandant visas degalų rūšis gautos praktiškai vienodos aproksimacinės grafinės priklausomybės $p_K = f(p_{me})$ ir $T_{ID} = f(p_{me})$. Šis faktas (3.8 pav.), kartu su pateikta DV energetinių ir aplinkosauginių rodiklių pasikeitimo analize, liudija, kad EVS nėra būtinas reguliavimo parametru optimizavimas D pakeičiant B30 mišiniais.

Vienas iš pagrindinių DV rodiklių – η_e visame p_{me} diapazone, lyginant su D, liko nepakitęs (3.8 pav.). Atsižvelgiant į EP vykdomos politikos dėl energijos panaudojimo efektyvumo didinimo, šis faktas vertinamas kaip labai reikšmingas (Directive of the European Parliament and The Council COM 739 final, 2003). Biodegalų panaudojimo TP technologijos neturėtų sumažinti energijos panaudojimo efektyvumo. Standartizuotas RME ir nauji WCME bei SCME biodegalai pagal DV η_e vertinami apytiksliai vienodai (3.8 pav.).

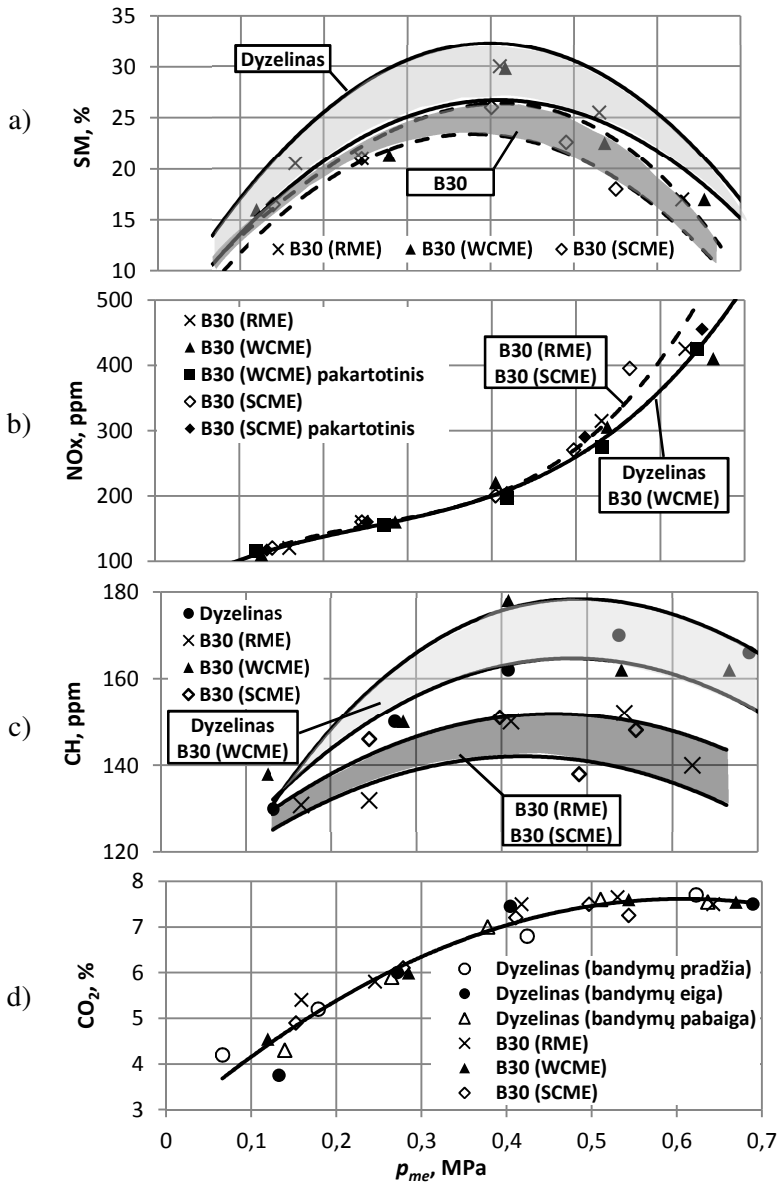
Pagal DV aplinkosauginius rodiklius, akivaizdus pranašumo neturi nei vieni iš bandytų mišinių: B30 (RME), B30 (WCME), B30 (SCME). Vertinant ID SM, visų išbandytų B30 mišinių gautieji rezultatai yra artimi (3.9 pav.), lyginant su D panaudojimu SM yra 20–25 % žemesnis visame p_{me} diapazone.

Atsižvelgiant į NO_x ir CH koncentracijos ID duomenis, RME ir CS mišinių variklinės savybės pasiskirsto nevienodai. NO_x koncentracijos atžvilgiu mišiniai nusileidžia D. Naudojant B30 (WCME) NO_x koncentracija, palyginus su D, praktiškai nesikeičia, o panaudojus B30 (RME) bei B30 (SCME) esant $p_{me} \geq 0,35 p_{me \max}$ – stebimas NO_x išaugimas, kuris prie $p_{me} \approx 0,5–0,6 p_{me \max}$ pasiekia maksimalias reikšmes – ~15 % (3.9 pav.). Panaudojus B30 (WCME) CH koncentracija, lyginant su D, išlieka nepakitusi. DV dirbant B30 (RME) ir B30 (SCME) – CH mažėja 15–18 % esant $p_{me} \geq 0,35 p_{me \max}$ (3.9 pav.).

CO_2 koncentracija visame ištirtame p_{me} diapazone nepriklauso nuo bandomųjų mišinių rūšių (3.9 pav.). Mažos apkrovos diapazone iki $p_{me} \leq 0,35 p_{me \max}$ aproksimacinės kreivės priklausomybė p_{me} artima linijinei. Didėjant apkrovai, EVS stabilizuoja CO_2 reikšmes. EVS didina λ , tuo pačiu didina perteklinio oro santykinį kiekį ID. Dėl šios priežasties mažėja CO_2 koncentracija, išreikšta ID tūrio procentais. Atlikus D, RME, WCME ir SCME variklinius tyrimus, CO_2 koncentracija, esant $p_{me} \sim 0,5–0,6 p_{me \max}$, siekė ~7,7 %.

CO_2 koncentracijos atžvilgiu, korektiškesni D ir B30 palyginimą būtina vykdyti atsižvelgiant į biodyzelinų viso „gyvavimo ciklo“ parametrus. Remiantis tyrimų duomenimis (Thamsiriroj and Murphy 2011, Krohn and Fripp 2012) per visą RRME biodegalų „gyvavimo ciklą“ (augimas-gamyba-transportavimas-vartojimas) CO_2 emisija yra apie 20 % mažesnė esant vienodai emisijai ID.

Bandymuose gautas aplinkosauginių rodiklių pasikeitimas, D pakeitus B30 (RME) ir B30 (WCME ir SCME) mišiniais, gerai koreliuoja su tų pačių degalų palyginamaisiais tyrimais VALMET DMG 320 DV (Lebedevas *et al.* 2010).



3.9 pav. Bandomaisiais degalais dirbančio 1,9 TDI variklio aplinkosauginių parametru SM, NO_x, CH, CO₂ priklausomybė [atitinkamai a), b), c), d)] nuo p_{me}

Fig. 3.9. The dependence of environmental parameters SM, NO_x, CH, CO₂ [respectively a), b), c), d)] on p_{me} while diesel engine 1.9 TDI running on tested fuels

TS energijos panaudojimo efektyvumo didinimui 1,9 TDI variklyje D pakeitus B30 (RME, WCME, SCME) mišiniais vertinamas teigiamai, nes, remiantis atliktų tyrimų rezultatais, nustatyta, kad DV η_e tirtame p_{me} diapazone išlieka artimas D, ir tuo pačiu yra gerinami aplinkosauginiai rodikliai.

WCME ir SCME variklinėmis savybėmis (B30 sudėtyje) nenusileidžia standartizuotam RME. DV η_e išbandytame p_{me} diapazone praktiškai yra vienodi. B30 (RME), B30 (WCME) charakterizuojami ~15 % žemesne NO_x koncentracija ID p_{me} esant ~65–70 % nuo $p_{me\ max}$. B30 (RME), B30 (WCME) ir B30 (SCME) būdingas vienodas ID SM, kuris visame ištirtame p_{me} diapazone yra apie 20 % mažesnis lyginant su D. Lyginant su D panaudojimu, DV ID CO₂ koncentracija išlieka nepakitusi.

Remiantis atliktų tyrimų rezultatais teigiama, kad 1,9 TDI 1Z varikliuose ir jam pagal konstrukciją artimuose modeliuose su EVS bei EGR, atsižvelgiant tiek į aplinkosauginius, tiek į energetinius parametrus, D pakeitimas B30 RRME mišiniais nėra susijęs su būtinybe keisti DV reguliavimo parametrus.

3.5. Mikro dumblių biodyzelino mišinių variklinių savybių tyrimai

Šio tyrimo tikslas – eksploatacijos sąlygomis ištirti II kartos biodegalams priskiriamų jūros mikro dumblių (*Chlorella protothecoides*) RRME ir D mišinio B30 (DME) energetines ir aplinkosaugines savybes, o taip pat palyginti jas su D ir standartizuoto RME bei D mišinio B30 (RME) savybėmis.

D pakeitimas į RRME, charakterizuojamas b_e padidėjimu, kuris dirbant grynu RME siekia 12 % ir 3–4 % dirbant B30 (RME) mišiniu (Lin *et al.* 2008, Lebedevas *et al.* 2006). Šis rezultatas yra sąlygojamas mažesnio RRME H_U , kuris 10–12 % yra mažesnis lyginant su D. Tai sąlygoja mažesnis energijos nešėjo – elementinės C kiekis, kuris skirtingiems degalams siekia: RME – 76,9 %, B30 (RME) – 76,7 %, B30 (DME) – 75,6 %, ir D – 86,5 %.

Nustatyta, kad visame ištirtame DV P_e diapazone dirbant B30 (RME) ir B30 (DME), b_e yra ~3–3,5 % didesnis lyginant su D (3.10 pav.). DV dirbant B30 (RME) ir B30 (DME) jaučiamo skirtumo tarp b_e nebuvo pastebėta.

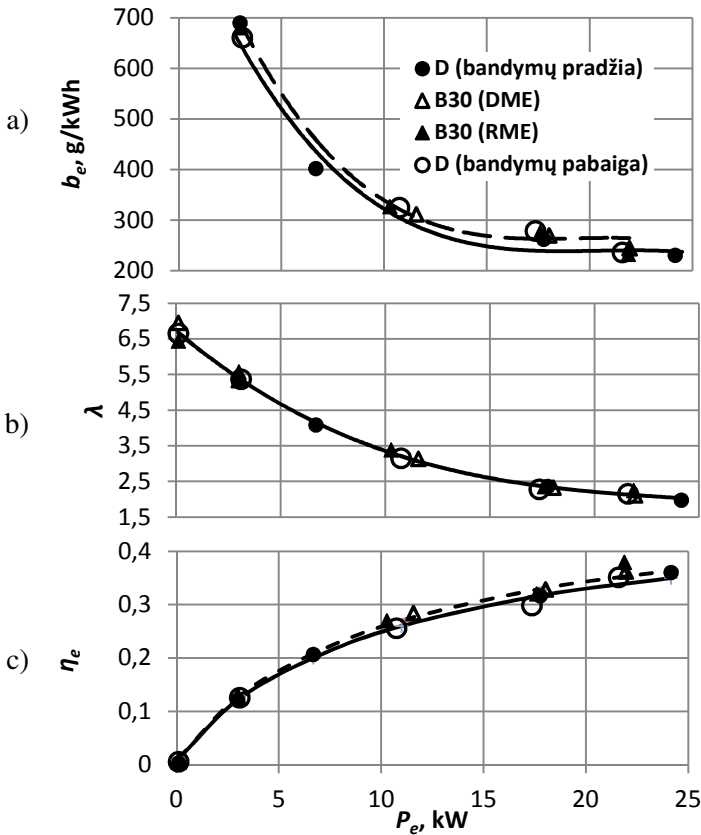
η_e priklauso nuo degalų degimo DV cilindre dinamikos (ŠICH, jos išsidėstymo cikle arti VRT) bei šilumos nuostolių į aušinimo sistemą.

Nesant slėgio indikavimo cilindre [kaip atliktuose tyrimuose (Lin *et al.* 2008, Lebedevas *et al.* 2006, Lebedevas *et al.* 2007) apie η_e (η_i) pasikeitimus galima spręsti pagal jo priklausomybę nuo integralinių darbo ciklo parametrų, kurių vienas iš pagrindinių DV be pripūtimo yra λ . λ DV dirbant D ir biodegalais pateiktas 3.10 paveiksle. λ reikšmę lemia DV B_{oro} , L_0 , B_d . Atliktuose tyrimuose,

DV dirbant visais išbandytais degalais, lemia B_{oro} . B_{oro} ir L_0 pasikeitimai kompensuoja vienas kitą ir λ išlieka nepakitęs.

L_0 , DV dirbant B30 mišiniais, dėl pasikeitusios degalų elementinės sudėties sumažėja 3–3,5 % nuo 14,24 $\text{kg}_{oro}/\text{kg}_{degalų}$ (D) iki 13,83 $\text{kg}_{oro}/\text{kg}_{degalų}$ (B30 (RME)) ir iki 13,7 $\text{kg}_{oro}/\text{kg}_{degalų}$ (B30 (DME)).

η_e išreiškiamas formule $\eta_e = 3600/(H_u \cdot b_e)$. Mišinių H_u yra žemesnis – 43855 kJ/kg (B30 (RME)) ir 44065 kJ/kg (B30 (DME)), tuo tarpu D – 45100 kJ/kg) η_e formulėje yra kompensuojamas 3–3,5 % didesniu b_e esant P_e -idem. Dėl to η_e kaip ir λ reikšmė lieka nepakitę (3.10 pav.).



3.10 pav. Bandomaisiais degalais dirbančio 320 DMG variklio λ (a) ir energetinių parametrų [b_e (a), η_e (c)] priklausomybė nuo P_e

Fig. 3.10. The dependence of λ (a) and energy parameters (b_e (a), η_e (c)) on P_e while diesel engine 320 DMG running on tested fuels

Remiantis gautais rezultatais konstatuojama, kad DV η_e dirbant B30 (DME) yra 2,5–3 % didesnis nei D ir yra praktiškai lygus sertifikuoto RME mišiniui B30 (RME). Kaip buvo paaiškinta aukščiau, biodegalų L_0 yra mažesnė lyginant su D dėl cheminės sudėties skirtumų. Tačiau parametras $H_{UL} = H_U/(L_0+1)$ – degalų mišinio H_U yra informatyvesnis ir svarbesnis analizuojant D pakeitimo į mišinius atvejais. Mišinių H_{UL} svyruoja diapazone 2998–2957 kJ/kg_{oro-degalų}, kurios yra artimos D reikšmėms ($H_{UL} = 2959$ kJ/kg_{oro-degalų}). Tai parodo, jog nėra būtinybės keisti DV darbo reguliavimo parametru ar sumažinti λ , o tai padidintų degalų ciklinę porciją.

Suminė NO ir NO₂ emisija – NO_x, emisija e_{NO_x} DV ID praktiškai nesiskiria D, B30 (RME) ir B30 (DME) panaudojimo atveju (3.11 pav.).

Didėjant DV P_e , auganti NO_x koncentracijos priklausomybė (3.11 pav.) didesnės P_e režimuose lemia didesnius NO_x absoliučius išmetimus (g/h), NO_x išmetimai 0,75–0,8 $P_{e\ max}$ režimuose (~380 g/h) 5 kartus viršija išmetimus TE režime (~75 g/h). Tačiau e_{NO_x} , paskaičiuota vienam DV atliktam darbo vienetui g/kWh, kaip tai reglamentuojama standartais, turi atvirkštinę priklausomybę nuo P_e – didėjant DV P_e , e_{NO_x} mažėja (3.11 pav.).

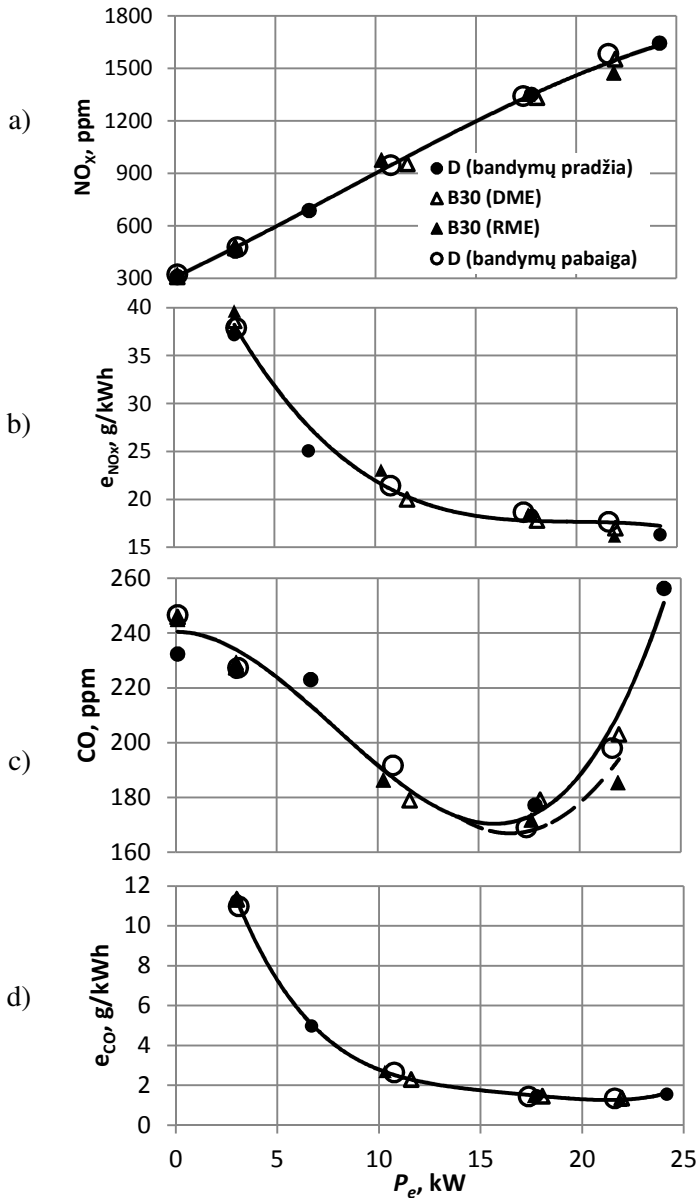
Pagal literatūros šaltinių duomenis, daugeliu atvejų D pakeitus RRME mišiniais buvo nustatytas ~10–12 % NO_x emisijos padidėjimas $P_{e\ max}$ režimuose (Lebedevas *et al.* 2007, Buyukkaya 2010, Roy *et al.* 2013). Atlikus matavimus dviem prietaisais HGA 400 ir Horiba PG-250 šis faktas nepasitvirtino. Spėjama, kad bandomojo DV konstrukcija ir reguliavimas optimizuoti darbu plačia degalų gama, užtikrinant minimalius NO_x išmetimus.

CO fiziniai susidarymo DV cilindre procesai yra priešingi NO_x susidarymo procesams. Didėjant NO_x mažėja CO išmetimai ir atvirkščiai. DV 320 DMG CO emisija dirbant visais išbandytais degalais išlieka artima. CO koncentracijos ir emisijos ID mažos ir vidutinės P_e (nuo tuščios iki ~0,75 $P_{e\ max}$) režimuose grafinė išraiška pateikta 3.11 paveiksle. Artėjant prie $P_{e\ max}$ (~80 % $P_{e\ max}$) pastebima CO sumažėjimo tendencija D pakeičiant B30 mišiniais.

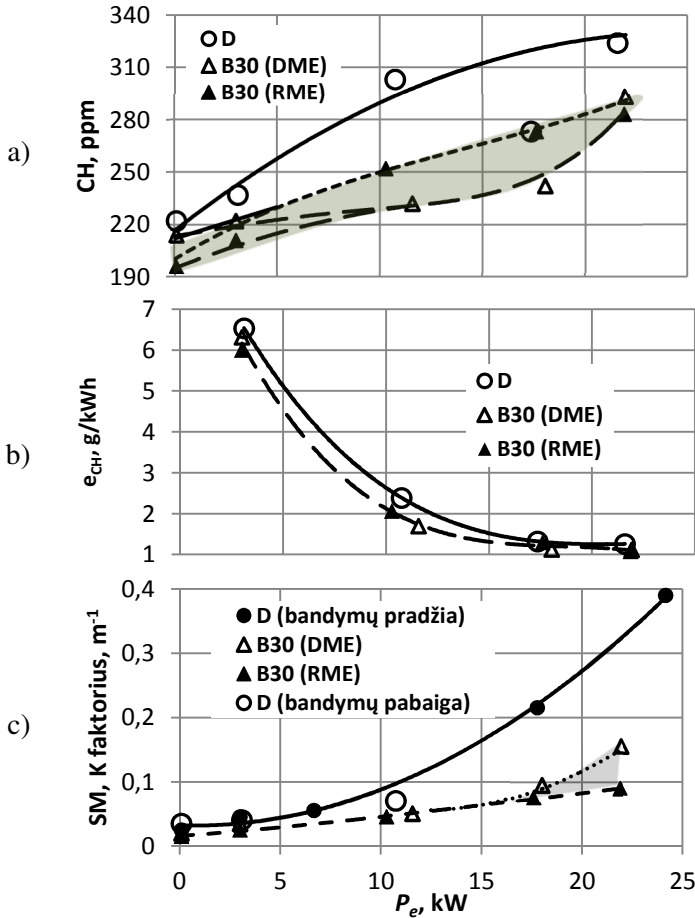
Aplinkosauginiu atžvilgiu, D pakeitimas B30 mišiniais, teigiamai veikia CH emisiją: dirbant B30 (DME) mišiniu – apie 5 % TE, iki 25 % vidutinės P_e režimuose, artimuose $P_{e\ max}$ režimuose – 15 %. CH išmetimai dirbant B30 (RME) palyginus su D sumažėja 12–15 % (3.12 pav.).

ID SM, dirbant RRME, palyginus su D, sumažėja vidutiniškai ir nuo 10 % TE, 40–45 % vidutinės P_e režimuose ir iki 75 % artimuose $P_{e\ max}$ režimuose. Kaip ir iš CO emisijos sumažėjimo artimos $P_{e\ max}$ režimuose pastebėta didesnio laipsnio K faktoriaus sumažėjimo tendencija: dirbant B30 (RME) – 75 %, B30 (DME) – 55 % (3.12 pav.).

D pakeitimas B30 (DME) mišiniu mažina DV ID SM nuo 10 iki 55 %, o CH nuo 5 iki 25 % (didėjančiai didėjant P_e).



3.11 pav. Bandomaisiais degalais dirbančio 320 DMG variklio ir aplinkosauginių parametų NO_x , e_{NO_x} [a), b)] ir CO, e_{CO} [c), d)] priklausomybė nuo P_e
Fig. 3.11. The dependence of environmental parameters NO_x , e_{NO_x} [a), b)] and CO, e_{CO} [c), d)] on P_e while diesel engine 320 DMG running on tested fuels



3.12 pav. Bandomaisiais degalais dirbančio 320 DMG variklio ir aplinkosauginių parametų CH , e_{CH} , SM priklausomybė [atitinkamai a), b), c)] nuo P_e
Fig. 3.12. The dependence of environmental parameters CH , e_{CH} , SM [respectively a), b), c)] on P_e while diesel engine 320 DMG running on tested fuels

B30 (DME) variklinėmis savybės nenusileidžia standartizuoto RME mišinio B30 (RME) savybėms, NO_x ir CO emisija lieka nepakitusi visame P_e diapazone, nors artimuose $P_{e\ max}$ režimuose pastebėta ~10 % CO sumažėjimo tendencija. Aplinkosauginių rodiklių atžvilgiu, B30 (DME) ne tik nenusileidžia B30 (RME), bet ir didesniu laipsniu mažina CH , CO (artimos $P_{e\ max}$ režimuose) bei ID SM .

3.6. Metanolio priedo degalų mišiniuose variklinių savybių tyrimai

Paprastai M priedas mišiniuose naudojamas sumažinti degalų klampą ir tuo pagerinti degalų išpurškimo kokybę bei priartinti ją prie D. Tačiau, kaip parodė bandymų rezultatai, 10 % M priedas B30 (RME) daugeliu atvejų suteikė neigiamą efektą, bet tyrimų praktikoje M priedas dažnai naudojamas grynų RRME, aliejų ar didelę dalį biokomponento turinčių mišinių klampai sumažinti. Šie tyrimai turėjo 2 tikslus:

- ištirti 10 % M priedo įtaką B30 (RME) mišinio variklinėms savybėms;
- surinkti kuo daugiau informacijos apie DV, dirbančio skirtingais degalais ir n bei p_{me} režimais darbo parametrus, kuriuos būtų galima sėkmingai panaudoti formuojant matematinį modelį.

M priedo įtakos B30 (RME) variklinėms savybėms tyrimai atlikti BME MI DEE laboratorijoje. Buvo suformuotas homogeninis M ir RME mišinys, toliau mišinys buvo maišomas su D. Prieš bandymus bei eigoje nebuvo pastebėta jokių heterogeninių mišinio požymių. DV 1,9 TDI panaudotas B30 (RME) mišinys su 10 % M priedu, mišinio variklinės savybės palygintos su B30 (RME) ir D.

Darbo parametrai buvo registruojami skirtinguose DV p_{me} (nuo 25% iki artimos maksimaliai P_e) ir n (2000–3500 min^{-1}) režimuose. Bandymų metu buvo registruojami aplinkosauginiai parametrai (CO, NOx, CH, SM), išoriniai darbo parametrai (M_t , B_d , p_K , T_{ID} , kt.) bei slėgis cilindre, kuris yra būtinas ŠI DV cilindre analizei.

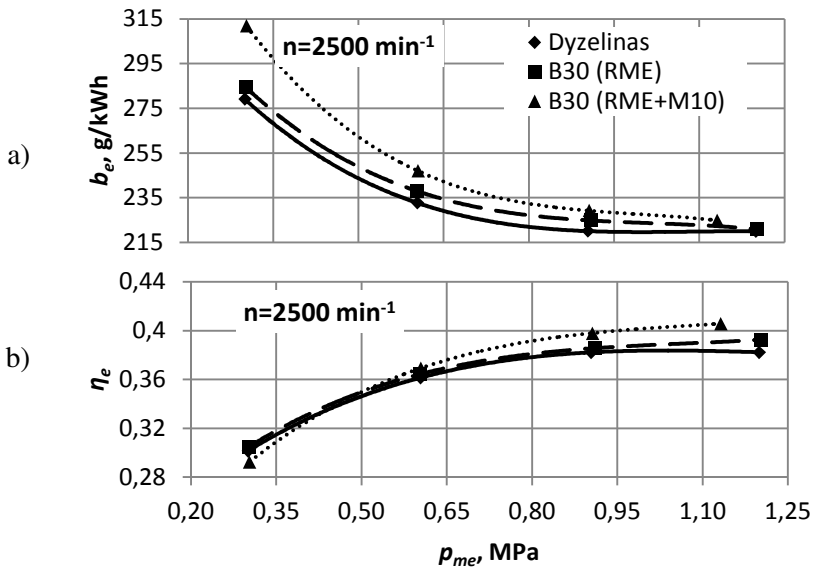
Bandymų gale atliktas kontrolinis DV DP nuokrypiams jautrių darbo parametrų matavimas DV dirbant D parodė, jog praktiškai bandymų metu DV techninė būklė išliko nepakitusi (C priedo P.C.1 ir P.C.2 pav.). Žymesnis rezultatų nesutapimas buvo pastebėtas b_e atveju, kuris siekė 1–1,5 %.

Slėgis cilindre ar jo pokytis yra vienas iš geriausiai DV techninį stabilumą atspindinčių rodiklių. Analizuojant vidutines (100 ciklų) slėgio cilindre reikšmes, nepastebėta ryškesnių nukrypimų, o aukšto slėgio zonoje bandymų pradžios ir pabaigos rodmenys praktiškai sutapo (C priedo P.C.3 pav.) DV dirbant $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ režimu.

Bandymai atlikti DV dirbant skirtingais n režimais (2000, 2500, 3000, 3500 min^{-1}), kiekviename n režime parametrai buvo registruojami 4 p_{me} taškuose. Stebint kitų tiek energetinių, tiek aplinkosauginių parametrų pokytį, nebuvo pastebėta tokių stiprių pasikeitimų kaip CH atveju. Atlikus didelio kiekio eksperimentinių duomenų apdorojimą, pastebėti charakteringi DV darbo parametrų pasikeitimai (C priedo P.C.5–P.C.36 pav.) atitinkamuose apkrovos ir greičių režimuose skirtingų degalų panaudojimo atvejais. Dėl šių priežasčių pasirenkamas vienas n režimas ($n = 2500 \text{ min}^{-1}$), kuris pagal DV techninę dokumentaciją, nusakomas kaip vienas iš $M_{t,max}$ n režimų.

Aukštų apkrovų režimuose DV dirbant skirtingais degalais, dėl tos pačios tūrinės ciklinės degalų porcijos ir skirtingo degalų H_U nėra užtikrinami artimi P_e parametrai. Tai parodo DV slėgio cilindre charakteristika (C priedo P.C.4 pav.), esant 100 % akseleratoriaus nuspaudimui, prie $p_{me\ max}$ DV dirbant D ir B30 (RME) p_{max} yra artimas, tačiau dirbant B30 (RME+M10) p_{max} krenta apie 2,5 %. Analogiški rezultatai pastebimi kituose skirtingų n $p_{me\ max}$ režimuose. Ši savybė vertinama teigiamai, nes eksploatuojant A degalus, pasitaiko atvejų kai p_{max} išauga, tuo pačiu išauga konstrukcijų mechaninės apkrovos, galinčios pažeisti konstrukcijas.

Lyginant su D ir B30 (RME), nepriklausomai nuo n režimo, B30 (RME+M10) mišinys pasižymi didesniu b_e visame p_{me} diapazone (3.13 pav.). Lyginant su D, $M_{t\ max}$ n režime dirbant: B30 (RME) – visame p_{me} diapazone išaugimas siekia ~2 %; B30 (RME+M10), b_e išaugimas siekia 2–6 % vidutinių ir aukštų apkrovų režimuose ir ~11 % esant žemoms apkrovoms. η_e pokytis (3.13 pav.) išauga vidutinėse ir aukštose apkrovos režimuose: 2,5–6,5 % naudojant B30 (RME+M10); iki 3 % – B30 (RME). Tai sąlygoja ~3,5 % B30 (RME) ir ~5 % B30 (RME+M10) mažesnis H_U lyginant su D.



3.13 pav. Bandomaisiais degalais dirbančio 1,9 TDI variklio energetinių parametru b_e , η_e priklausomybė [atitinkamai a), b)] nuo p_{me}

Fig. 3.13. The dependence of energy parameters b_e , η_e on p_{me} [respectively a), b)] while diesel engine 1,9 TDI running on tested fuels

Skirtinguose n režimuose išlieka tendencingi parametru pokyčiai, skirtingų degalų panaudojimo atžvilgiu. Analizuojant aplinkosauginius parametrus pastebėta, jog M priedas B30 (RME) mišinio variklinėms savybėms daugeliu atvejų nesuteikia ryškaus teigiamo efekto. Vienas iš pastebimiausių teigiamų efektų yra SM sumažėjimas, kuris, lyginant su D, svyruoja 14–18 % diapazone B30 (RME), o esant M priedui 28–38 % (3.14 pav.). M priedo pranašumą SM sumažėjimo atžvilgiu galima paaiškinti dvejopai. Pirmasis – didėja biokomponento, savo sudėtyje turinčio O_2 , kiekis mišinyje, tai sąlygoja mažesnį degimo procese dalyvaujančios C kiekį. Antra – A dėl aukštesnės specifinės garavimo šilumos užsiliepsnoja vėliau, pagrindinis M degimas vyksta DDF, kurios metu susidaro pagrindinis SM kiekis. M didina degimo intensyvumą DDF, tai sąlygoja mažesnę nepilno degimo produktų, ypač kurių pagrindinis formavimasis vyksta DDF, koncentraciją.

CO koncentracija vidutinių p_{me} diapazone yra artima visais DV n režimų atvejais. Šiuo atveju (3.14 pav.) B30 (RME) CO koncentracijos sumažėjimas svyruoja 5 % visame p_{me} diapazone, o B30 RME+10M vidutinėse apkrovose sumažėjimas siekia 2–6 % palyginus su D. Tačiau žemo ir aukšto p_{me} režimuose stebimas charakteringas visiems n režimams atitinkamai išaugimas (šiuo atveju apie 20 %) ir sumažėjimas (šiuo atveju apie 27 %).

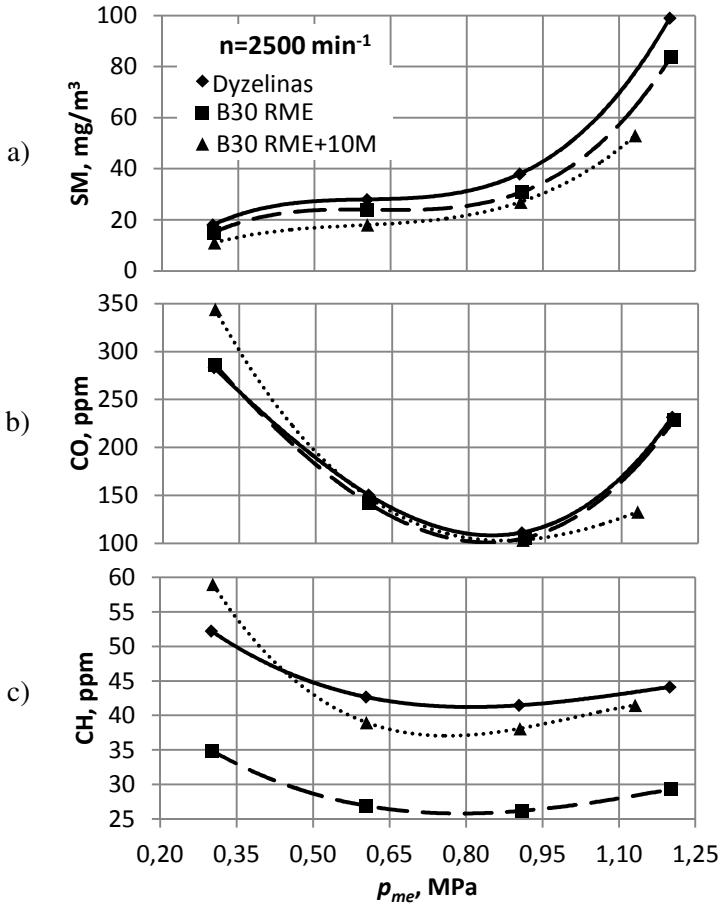
CH ir CO koncentracija yra degimo proceso kokybinis rodiklis, t. y. kuo mažesnė CH ir CO koncentracija ID, tuo degimo procesas yra kokybiškesnis. Viena vertus, B30 (RME) savo sudėtyje turi didesnę O_2 kiekį, kuris gerina degimo procesą ir mažina CO ir CH koncentraciją. Kita vertus, M dėl aukštesnės specifinės garavimo šilumos gali sumažinti cilindre esančių dujų temperatūrą (Zhu *et al.* 2010), o tai gali padidinti CO ir CH koncentraciją ID. Toks cilindre esančių dujų temperatūros sumažinimas dominuoja žemos p_{me} režime.

Skirtinguose DV n režimuose, CH koncentracijos atžvilgiu, akivaizdžiai pastebimas degalų B30 (RME) pranašumas lyginant su D ir B30 (RME+M10), kurių rezultatų išsibarstymas yra santykinai artimas. Vidutinės ir aukštos p_{me} režimuose, naudojant B30 (RME+M10), matomas 5–8 % pagerėjimo efektas, žemose p_{me} – apie 12 % pablogėjimas, tuo tarpu naudojant B30 (RME), visame p_{me} diapazone pastebimas 33–36 % pagerėjimas (3.14 pav.).

Bendru atveju buvo pastebėtas ryškus CH koncentracijos pokytis (3.15 pav.). CH koncentracijos padidėjimas B30 (RME+M10) ir D atveju vidutiniškai siekia: žemos ir aukštos p_{me} režime – ~55 %, vidutinės – ~60 % lyginant su B30 (RME). Analogiškas pobūdis stebimas ankstesniuose tyrimuose DV 320 DMG panaudojant B.

Analizuojant CH ir CO koncentracijos pokyčių charakterį, galima daryti išvadą, kad B30 (RME) pranašumą sąlygoja O_2 , o B30 (RME+ M10) išaugusią CH ir CO koncentraciją sąlygoja M priedas, kurio 10 % kiekis veikia kaip cilindro dujų temperatūrą mažinantis faktorius, dėl ko pastebimas pablogėjimas.

Tai pagrindžia objektyviai degimo procesą apibūdinantis rodiklis – ID temperatūra, kuri visame p_{me} diapazone yra žemesnė (C priedo P.C.13 pav.) lyginant su B30 (RME) ir D.

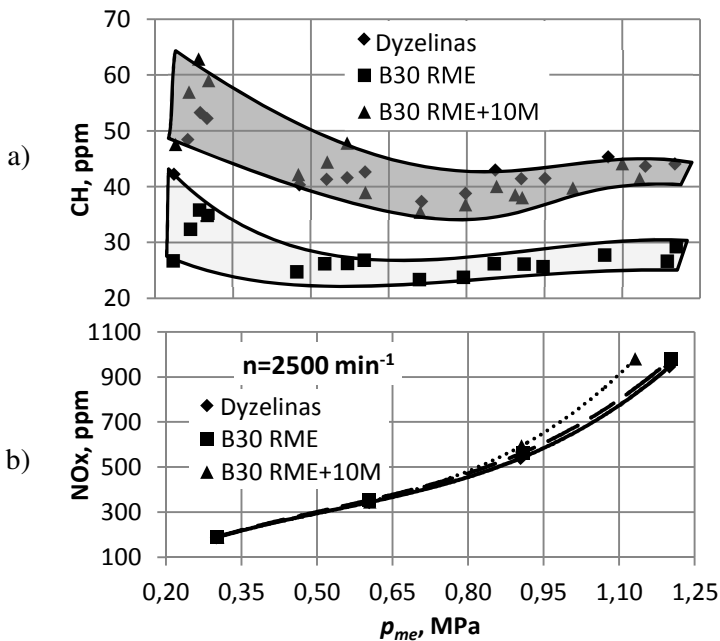


3.14 pav. Bandomaisiais degalais dirbančio 1,9 TDI variklio aplinkosauginių parametru SM , CO , CH priklausomybė [atitinkamai a), b), c)] nuo p_{me}

Fig. 3.14. The dependence of environmental parameters SM , CO , CH on p_{me} [respectively a), b), c)] while diesel engine 1,9 TDI running on tested fuels

NO_x koncentracijos pokytis (3.15 pav.) B30 (RME) panaudojimo atveju, vidutinių ir aukštų p_{me} režimuose išauga 3–4 % lyginant su D, tuo tarpu tuose pačiuose p_{me} režimuose B30 (RME+10M) išaugimas siekia 5–12 %. Žemesnių apkrovų režimuose rezultatai praktiškai identiški visų tiriamųjų degalų atžvilgiu.

B30 (RME+10M) pasižymi žemesnėmis ID temperatūromis, tai leistų daryti prielaidą, kad NO_x koncentracijos lygis turėtų būti žemesnis, tačiau matomas atvirkščias efektas, kuris gali būti paaiškinamas didesniu O_2 kiekiu mišinyje, kuris įtakoja NO_x susidarymo procesą.



3.15 pav. Bandomaisiais degalais dirbančio 1,9 TDI variklio aplinkosauginių parametru CH (a), NO_x (b) priklausomybė nuo p_{me}

Fig. 3.15. The dependence of environmental parameters CH (a), NO_x (b) on p_{me} while diesel engine 1.9 TDI running on tested fuels

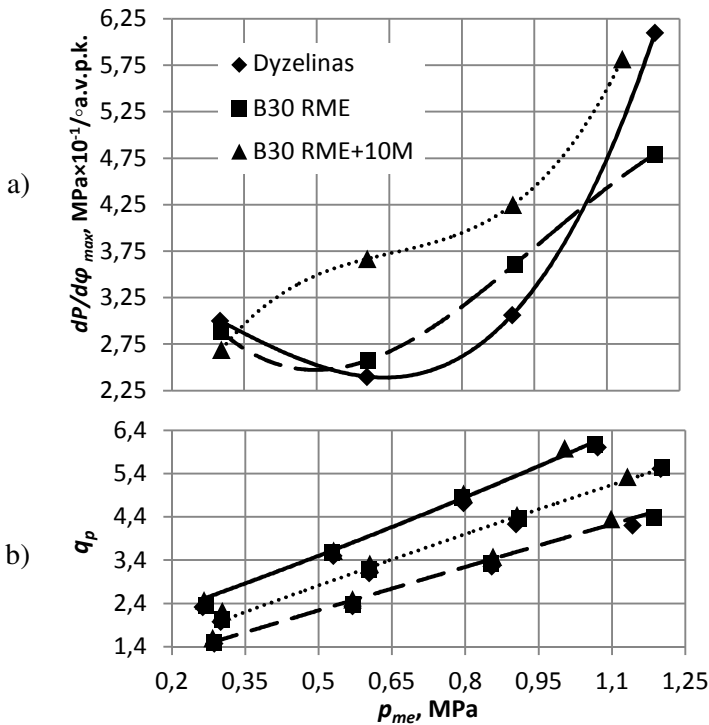
A degalų panaudojimo praktikoje susiduriama su degimo proceso kinetikos padidėjimu, ypač panaudojant žemu CN pasižyminčius A kaip M. Padidėjusi degimo proceso kinetika gali padidinti DV detalių mechanines apkrovas ir terminius įtempimus, visų pirma stūmoklio–švaistiklinės grupės. Todėl, eksploatuojant DV, dirbančius savo sudėtyje turinčiais A degalais verta įvertinti kriterijus, kurie indikuoja mechaninių ir terminių apkrovų rodiklius lyginant su įprastais degalais dirbančių DV rodikliais.

Terminių ir mechaninių apkrovų vertinimui pasirinkti šie būdai:

- mechaninėms apkrovoms pasirinktas p_{max} pokyčio greičio charakteristikos $dP/d\varphi_{max}$, kurių maksimalių reikšmių priklausomybė nuo p_{me} pateikta 3.16 paveiksle, o charakteristikos $dP/d\varphi$ pateiktos prieduose (C priedas P.C.37,

P.C.38, P.C.39 pav.). Analizuojant $dP/d\varphi_{max}$ matyti, jog B30 (RME+10M) pasižymi aukštesne degimo proceso kinetika beveik visame p_{me} diapazone, tačiau tiriamos $p_{me,max}$ taške reikšmės neviršija reikšmių DV dirbant D;

- terminiams įtempimams įvertinti panaudota plačiai naudojama (Lebedevas *et al.* 2007) prof. A. Kostin metodika, kurioje vienas iš vertinamųjų kriterijų yra $q_p = 2,34c_m \left(\frac{D}{\eta_{vPK}}\right)^{0,38} \left(p_{me} b_e \frac{T_K}{T_0}\right)^{0,88}$. Po atlikto vertinimo (3.16 pav.) matoma, jog praktiškai q_p kriterijaus reikšmės išsidėsto vienoje tiesėje ir jokių nukrypimų nepastebima visais bandomųjų degalų atvejais.



3.16 pav. Bandomaisiais degalais dirbančio 1,9 TDI variklio patikimumo kriterijų $dP/d\varphi_{max}$ (a) ir q_p (b) priklausomybė nuo p_{me}

Fig. 3.16. The dependence of reliability criteria $dP/d\varphi_{max}$ (a) and q_p (b) on p_{me} while diesel engine 1.9 TDI running on tested fuels

10 % M priedas mišiniui B30 (RME) suteikia pranašumą tik dviem aspektais. Lyginant su D, vidutinėse ir aukštosiose apkrovose η_e išauga 2,5–6,5 %

naudojant B30 (RME+10M), o B30 (RME) – iki 3 %. SM sumažėja 28–38 % B30 (RME+10M), tuo tarpu B30 (RME) 14–18 % lyginant su D.

B30 (RME+10M) daugeliu atvejų pasižymi prastesnėmis savybėmis. b_e išauga 2–6 % vidutinių ir aukštų apkrovų režimuose ir apie 11 % esant mažoms apkrovoms, B30 (RME) – visame apkrovos diapazone išauga ~2 %. CO koncentracijos atžvilgiu, M priedas ribotame apkrovos diapazone duoda 2–6 % pagerėjimo efektą, o žemų ir aukštų p_{me} režimuose stebimas atitinkamai išaugimas apie 20 % ir sumažėjimas apie 27 %. Mišinio be M pranašumas visame p_{me} diapazone svyruoja 5 % ribose. Naudojant B30 (RME+10M) matomas 5–8 % CH koncentracijos pagerėjimas, žemos apkrovos taškuose – ~12 % pablogėjimas, B30 (RME) – visame apkrovos diapazone pastebimas 33–36 % pagerėjimas. B30 (RME) atveju, vidutinių ir aukštų apkrovų režimuose NO_x koncentracija išauga 3–4 % lyginant su D, tuo tarpu tuose pačiuose p_{me} režimuose B30 (RME+10M) išaugimas siekia 5–12 %.

q_p pokyčio, dirbant skirtingais degalais, vertinimo atveju pokyčių nepastebėta. Išanalizavus $dP/d\varphi_{max}$ duomenis – B30 (RME+10M) pasižymi išaugusia slėgio padidėjimo kinetika praktiškai visame p_{me} diapazone, tačiau tiriamos $p_{me\ max}$ taške reikšmės neviršija reikšmių DV dirbant D ir B30 (RME). Slėgio cilindre diagramos analizė rodo, jog prie maksimalios akseleratoriaus padėties, naudojant B30 (RME+10M) pasiekiamas 2,5 % žemesnis p_{max} .

3.7. Biodyzelino oksidacijos stabilumo įtakos variklio darbo parametrams tyrimas

Šioje kompleksinio biodyzelinų savybių tyrimo dalyje pateikti sandėliuojamų biodegalų, pagamintų iš *Camelina sativa* augalų rūšies, fizikinių, cheminių bei variklinių savybių palyginamųjų tyrimų įvertinimai. CS biodegalų savybės buvo lyginamos su D bei standartizuoto RME mišinių savybėmis. Tam, kad būtų užtikrinti standarto LST EN 14214:2009 RRME keliama reikalavimai, CSME buvo sumaišyti su gyvulinės kilmės RRME. Varikliniai tyrimai buvo atlikti DV VALMET 320 DMG, panaudojant biodegalų mišinius, kuriuos pagal tūrį sudarė 30 % CSME ir 70 % D. Aplinkosauginiai ir energetiniai rodikliai buvo lyginami su standartizuoto RME bei D rodikliais. ES biodyzelinai dažniausiai gaminami iš rapsų aliejaus. Šis aliejus kaip ir kiti augaliniai aliejai yra sudarytas iš trigliceridų, kurių molekulėje glicerolis sujungtas su įvairiomis riebalų rūgštimis, tarp kurių yra įvairūs kiekis nesočių ir polinesočiųjų riebalų rūgščių, dėl kurių buvimo tiek aliejus, tiek iš jo pagaminti biodegalai ilgiau sandėliuojami yra linkę oksiduotis (Lebedevas *et al.* 2013).

Literatūroje mažai duomenų ir apie įprastinio RME mišinių su D sandėliavimo trukmės įtaką DV energetiniams ir aplinkosauginiams

parametrams, todėl darbo tikslas buvo įvertinti ir palyginti sandėliavimo trukmės įtaką degalų kokybei bei DV energetiniams bei aplinkosauginiams rodikliams jam dirbant 30 % RME ir D mišiniais bei D mišiniais su RRME, pagamintais iš greičiau linkusio oksiduotis CS aliejaus ir gyvūninių riebalų.

Atliktų biodyzelinų oksidacijos įtakos DV varikliniams parametrams tyrimų uždavinius galima būtų suskirstyti į šiuos:

1. Ištirti RRME (CSME bei RME) sandėliavimo trukmės įtaką DV energetiniams rodikliams (b_e , η_e) ir aplinkosauginiams rodikliams (CO, CH, NO_x, SM).
2. Įvertinti RRME panaudojimo DV energetinį ir aplinkosauginį efektyvumą eksploatacijos sąlygomis (lyginant su D) priklausomai nuo RRME sandėliavimo trukmės.

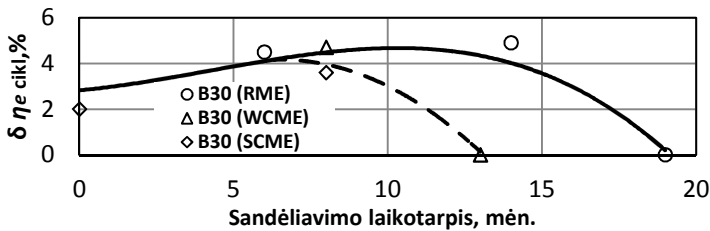
DV, dirbančio D, energetinių bei aplinkosauginių rodiklių išsibarstymas (vykdant bandymus skirtingu laikotarpiu) charakteringuose tyrimų etapuose liudija apie DV techninės būklės stabilumą, o tai yra ypatingai svarbu vykdant šios krypties tyrimus (C priedas P.C.40, P.C.41, P.C.42 pav.).

Įvertinti jautriausi bet kuriam DV DP nukrypimui (dėl reguliavimo parametrų pasikeitimo ar kitų priežasčių) nuo etaloninės būklės parametrai: b_e , NO_x ir CO koncentracijos (C priedas P.C.40, P.C.41, P.C.42 pav.). Apie stabilų DV darbą liudija b_e nuokrypis nuo apibendrintos kreivės, kuris visų bandymų laikotarpiu neviršija vidutiniškai $\pm 2-3$ % tai sudaro $\pm 4-6$ g/kWh (C priedas P.C.40 pav.). Šios ribos yra artimos b_e nustatymo eksperimento metu tikslumui. Analogiški rezultatai stebimi fiksuojant NO_x (C priedas P.C.41 pav.) ir CO (C priedas P.C.42 pav.) rodiklius. Nuokrypis neviršija nustatymo tikslumo ribų. Visame p_{me} diapazone CO koncentracijos nuokrypis nuo aproksimacinės kreivės siekia $\pm 4,5-6$ %, toks nuokrypis leidžia daryti prielaidą apie stabilų DV darbą ir stabilią techninę būklę.

D pakeitimas B30 (RME) ir B30 (CSME) yra susijęs su b_e padidėjimu: panaudojant RRME B100 – apie 12 %; B30 – 3–4 % (Lebedevas *et al.* 2007). Tam įtakos turi 10–12 % mažesnis RRME H_U , kuri sąlygoja mažesnis, vieno iš energijos nešėjo – C, kurios kiekis siekia: RME – 76,9 %, WCME – 76,7 %, SCME – 75,6 %, D – 86,5 %.

Energijos panaudojimo efektyvumo požiūriu, informatyvesnis rodiklis yra DV η_i arba, vykdant parametrų palyginimą identiškuose darbo režimuose, η_e . η_e biodegalų sandėliavimo laikotarpiu pasikeitimas $\Delta\eta_e$ pateiktas 3.17 paveiksle.

Pakeičiant D į B30 (RME), pastebimas $\sim 2-3$ % $\eta_{e\text{ cikl}}$ pagerėjimas. Atliekant tyrimus pastebima tendencija – ilgėjant biodegalų sandėliavimo laikotarpiui iki tam tikros ribos η_e pagerėjimo efektas didėja. Esant sandėliavimo trukmei 6–14 mėn. – $\Delta\eta_e$ pagerėjimo efektas sudaro 4–4,5 %. DV dirbant D ir B30 (RME) η_e reikšmių susilyginimas įvyksta sandėliavimo laikotarpiui pasiekus 19 mėn. (3.17 pav.).



3.17 pav. Biodyzelino oksidacijos įtaka DV 320 DMG η_e sandėliavimo laikotarpiu
Fig. 3.17. The impact of oxidation to engine's 320 DMG η_e during biodiesel storage

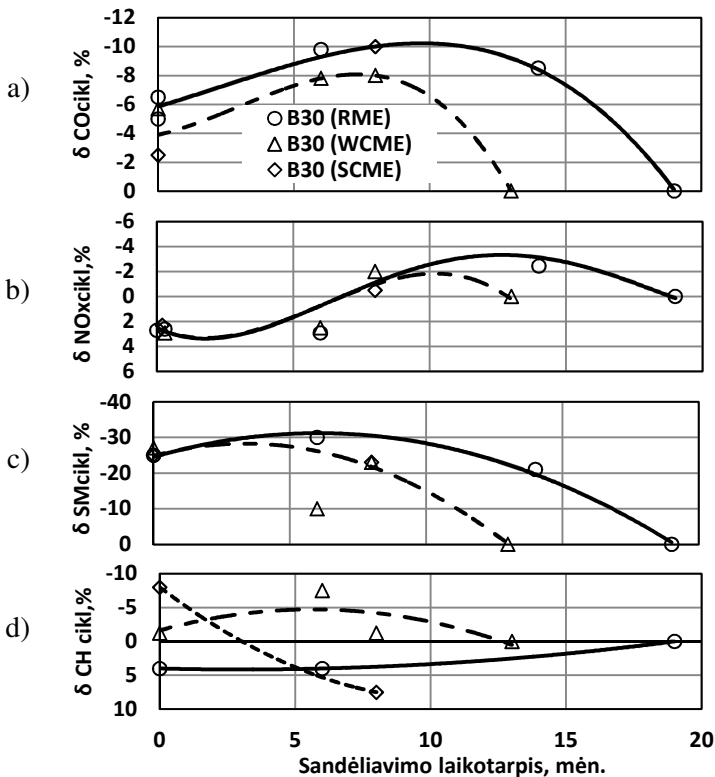
Viena iš η_e padidėjimo priežasčių galėtų būti susijusi su peroksidų kiekiu padidėjimu RRME, tai gerina degalų savaiminio užsiliepsnojimo cilindre savybes ir trumpina užsiliepsnojimo indukcijos periodą. Ši hipotezė pateisinama kitų tyrėjų eksperimentiniais duomenimis. Atliekant tyrimus su RME ir REE buvo pastebėta, jog saugojimo laikotarpiui pasiekus 24 mėn. CN išauga 12 % (Thompson *et al.* 1998). Po ilgo saugojimo buvo pastebėti reikšmingi pokyčiai degalų CN atžvilgiu, ypač degalų, kurie buvo distiliuoti rafinavimo būdu. Distiliavimo metu natūralūs antioksidantai, tokie kaip tokoferoliai, yra pašalinami, dėl ko degalai yra mažiau atsparūs oksidacijai. Pats distiliavimo etapas neturi jokio poveikio CN. Teigiama, kad CN pokyčiui įtaką turi RRE oksidacijos metu susidarantys hidroperoksidai, nes peroksido junginiai įvardijami kaip gerinantys CN. RRME yra ypatingai linkę į savaiminės oksidacijos procesus, o tai reiškia, kad šviežiai pagamintas RRME pasižymi palyginamai žemu CN, o sandėliavimo metu CN išauga (Thompson *et al.* 1998).

Kaip žinia, indukcijos periodo trukmės sumažėjimas atitinkamai mažina ŠI pirmoje – KDF, ir dauguma atvejų, didina ŠI intensyvumą antroje – DDF (Lebedevas *et al.* 2007). Dėl to η_i (η_e) didėja, o degalų nepilnos oksidacijos medžiagų koncentracija (CO, CH, SM) mažėja.

η_e pasikeitimo charakteris naudojant B30 (WCME) ir B30 (SCME) yra analogiškas B30 (RME) panaudojimo atvejui. Maksimalus η_e padidėjimo efektas ~4 % pastebimas esant 8 mėn. sandėliavimo trukmei, susilyginimas su D η_e duomenimis įvyko pasiekus 13 mėn.

D pakeitimas į ką tik pagamintus B30 (RME) mažina CO_{cikl} ~6 %; esant sandėliavimo trukmei 4–14 mėn., CO_{cikl} sumažėjimas išauga ir pasiekia 7,5–10 %. Pakeičiant D į B30 (WCME ir SCME), CO_{cikl} sumažėjo apie 5 % palyginus su D, o didėjant sandėliavimo trukmei – CO_{cikl} sumažėjimo efektas atitinkamai padidėjo iki 7–8 %. CO_{cikl} susilyginimas su D pastebėtas esant 13 mėn. sandėliavimo trukmei (3.18 pav.). Kitų aplinkosauginių rodiklių (CH, SM, NO_x), kaip ir CO, reikšmių susilyginimas su D rodikliais įvyksta: pasiekus 19 mėn. sandėliavimo laikotarpį – B30 (RME); 13 mėn. – naudojant CS B30

mišinius. NO_{cikl} koncentracijos pokyčiai ištirtame sandėliavimo laikotarpyje yra artimi NO_x matavimo tikslumui. Pastebėta, jog esant sandėliavimo trukmei iki 7 mėn., NO_{cikl} išaugo apie 4 %, o po 7 mėn. sandėliavimo atvirkščiai – apie 4 % sumažėjo lyginant su D (3.18 pav.). NO_{cikl} pasikeitimo charakteris, naudojant CS B30 mišinius, yra analogiškas B30 (RME) panaudojimo atvejui. Panaudojant mišinius didžiausias efektas pasiekiamas ID SM atžvilgiu. SM_{cikl} sumažėjimas, D pakeičiant į B30, pasiekiamas iki 20–25 % B30 (RME) esant 14 mėn. sandėliavimo trukmei ir CS B30 – 8 mėn. (3.18 pav.). CH_{cikl} pasikeitimo tendencijos nėra ryškios: panaudojant B30 (RME) CH_{cikl} padidėjimas siekia 3–4 %; B30 (WCME) – sumažėja 2–5 %, o B30 (SCME) pasikeičia diapazone nuo –8 % iki +8 % lyginant su D (3.18 pav.).



3.18 pav. Biodyzelinų oksidacijos įtaka variklio 320 DMG aplinkosauginiam parametrui sandėliavimo laikotarpiu

Fig. 3.18. The impact of oxidation to the engine's 320 DMG environmental parameters during biodiesel storage

B30 RME su 0,02 g/kg_{RME} Ionol BS 200 antioksidatoriaus kiekiu per 14 mėn. trukusį sandėliavimą įprastomis sąlygomis (sandariose 30 l talpose, aplinkos temperatūra nuo +12±3 °C iki +20±3 °C) neprarado variklinių savybių. Palyginus su D, B30 η_e padidėjimas 4–4,5 % išlaikomas 6–14 mėn. RME sandėliavimo laikotarpyje ir iki 8 mėn. sandėliuojant WCME ir SCME. Lyginant su D, B30 sudėtyje panadojus iki 14 mėn. sandėliuotus RME ir iki 8 mėn. CS mišinius, maksimalus CO sumažėjimas pasiekia 8–10 %, ID SM sumažėja 20–25 %, CH ir NO_x koncentracijos pokytis nėra ryškus.

Daroma išvada, kad ištirtuose RME ir CS biodegalų mišiniuose (WCME ir SCME) 19 ir 13 mėn. sandėliavimo laikotarpiu vykstantys oksidacijos (degradacijos) procesai neturi neigiamos įtakos DV energetiniams ir aplinkosauginiams rodikliams.

3.8. Energetinio ir aplinkosauginio efekto vertinimas

Norint įvertinti energetinį ir aplinkosauginį D pakeitimo į mišinius eksploatuojamų DV parke efektą, tai galima įgyvendinti šiais žemiau išvardintais būdais:

- eksperimento keliu nustčius atitinkamus eksploatacinius vidutinius parametrus ($\overline{NO_x}$, \overline{CO} , \overline{HC} , \overline{SM} , $\overline{b_e}$, $\overline{\eta_e}$) DV dirbant standarto reikalaujama apkrovos ir n režimais. Vienas iš būdų vertinti CO₂ emisijos pokytį pasirinktame TS – panaudoti degalų sunaudojimo statistinius duomenis bei suminės P_e matematinę išraišką;
- eksperimentinių tyrimų praktikoje pasitaiko atvejų, kad dėl įvairių techninių priežasčių DV bandomųjų standartų ciklų reikalavimus sunku užtikrinti arba tai neįmanoma padaryti. Tokiu atveju galima panaudoti MM programą, kuri, remiantis vienais suderintais n ir p_{me} režimais geba modeliuoti kitus, bandomo standarto ciklus.

CO₂ emisijos pokyčio apskaičiavimas nesudėtingas, užtenka eksperimento keliu nustatyti vidutinės eksploatacines tiriamų rodiklių reikšmes ir panaudoti statistinius parko ar regiono mineralinių degalų sunaudojimo duomenis. Tam gali būti panaudota suminės P_e išraiška:

$$P_e^D = \frac{\overline{\eta_e^D} \times V_t^D \times \rho^D \times H_U^D}{3,6}; \quad (3.1)$$

Atitinkamai biodyzelino ir D mišinio:

$$P_e^{Biod} = \frac{\overline{\eta_e^{Biod}} \times V_t^{Biod} \times \rho^{Biod} \times H_U^{Biod}}{3,6}; \quad (3.2)$$

Čia p_e^D – suminė galia pagal sunaudotą D kiekį; p_e^{Biod} – suminė galia pagal sunaudotą biodyzelino mišinio kiekį; $\overline{\eta_e^D}$ – vidutinė η_e reikšmė DV eksploatacijoje dirbant D; $\overline{\eta_e^{Biod}}$ – vidutinė η_e reikšmė DV eksploatacijoje dirbant biodyzelino mišiniu; V_t^D – suminis D tūris per eksploatacijos laiką; V_t^{Biod} – suminis biodyzelino mišinio tūris per eksploatacijos laiką; ρ^D – D tankis; ρ^{Biod} – biodyzelino mišinio tankis; H_U^D – D H_U ; H_U^{Biod} – biodyzelino mišinio H_U .

Priimama sąlyga, kad tiek mišinių, tiek ir D panaudojimo atveju būtina užtikrinti identišką suminę P_e :

$$p_e^D = p_e^{Biod};$$

išraiška išskleidžiama:

$$\frac{\overline{\eta_e^D} \times V_t^D \times \rho^D \times H_U^D}{3,6} = \frac{\overline{\eta_e^{Biod}} \times V_t^{Biod} \times \rho^{Biod} \times H_U^{Biod}}{3,6};$$

tada mišinio masė per laiko vienetą:

$$V_t^{Biod} \times \rho^{Biod} = m_t^{Biod} = \frac{\overline{\eta_e^D} \times V_t^D \times \rho^D \times H_U^D}{\overline{\eta_e^{Biod}} \times H_U^{Biod}}.$$

Nustatomas mišinio masės padidėjimo koeficientas:

$$K = \frac{m_t^{Biod}}{m_t^D}. \quad (3.3)$$

Turint cheminę degalų sudėtį nesunku apskaičiuoti CO_2 emisijos pasikeitimą prie tam tikro degalų sunaudojimo. Sudegus 1 kg C susidaro 3,67 kg CO_2 , atitinkamai skaičiuojami CO_2 kiekiai D ir mišinio 1 kg panaudojimo atveju:

$$\begin{aligned} m_{1\text{kg}}^C + O_2 &= m_{1\text{kgCO}_2}^C = 3,67 \text{ kg CO}_2; \\ m_{1\text{kg}}^D + O_2 &= m_{1\text{kgCO}_2}^D = C_D \times 3,67 \text{ kg CO}_2; \\ m_{1\text{kg}}^{Biod} + O_2 &= m_{1\text{kgCO}_2}^{Biod} = C_{Biod} \times 3,67 \text{ kg CO}_2. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Čia $m_{1\text{kg}}^C$ – 1 kg C; $m_{1\text{kg}}^D$ – 1 kg D; $m_{1\text{kg}}^{Biod}$ – 1 kg biodyzelino mišinio; $m_{1\text{kgCO}_2}^C$ – CO_2 masė sudegus 1 kg C; $m_{1\text{kgCO}_2}^D$ – CO_2 masė sudegus 1 kg D; $m_{1\text{kgCO}_2}^{Biod}$ – CO_2 masė sudegus 1 kg biodyzelino mišinio; C_D – elementinės anglies kiekis D; C_{Biod} – elementinės anglies kiekis biodyzelino mišinyje.

Atitinkamai apskaičiuojama CO₂ emisijos masė per laiko vienetą:

$$\begin{aligned} m_{t\text{CO}_2}^D &= m_t^D \times m_{1\text{kgCO}_2}^D; \\ m_{t\text{CO}_2}^{\text{Biod}} &= m_t^{\text{Biod}} \times m_{1\text{kgCO}_2}^{\text{Biod}}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Čia $m_{t\text{CO}_2}^D$ – CO₂ masė sudegus m_t^D ; $m_{t\text{CO}_2}^{\text{Biod}}$ – CO₂ masė sudegus m_t^{Biod} .

Santykinė palyginimo išraiška:

$$\delta_{\text{CO}_2}^{D \rightarrow \text{biod}} = \left(1 - \frac{m_{t\text{CO}_2}^{\text{Biod}}}{m_{t\text{CO}_2}^D} \right) \times 100 \%. \quad (3.6)$$

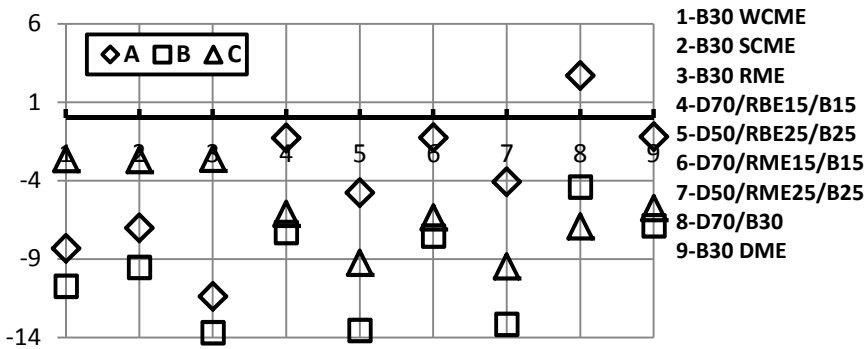
Į Klaipėdos uostą įplaukiančių tarptautinių laivų degalų sunaudojimas itin sunkiai nustatomas. Tačiau galima pasirinkti vieną iš Lietuvos vandens transporto TS – žvejybą (Baltijos jūroje ir vidaus vandenų komercinė žvejyba), kurioje sunaudotas degalų kiekis yra statistiškai apskaitomas, o duomenys pateikiami Lietuvos statistikos departamentui.

2012 m. žvejyboje buvo sunaudota 200 tonų kelių transporto D su RME priedu (Kuro energijos balansas 2012), kurio kiekis bendrame kiekyje atitinkamai sudarė 5,353 % (10,71 t). Vertinant pokytį būtina atsižvelgti į biodegalų priedą D sudėtyje. Priimama, jog biodyzelinas yra RME.

Pagal atliktus eksperimentinių tyrimų rezultatus ir pateiktą suminės galios metodiką atliekamas žvejybos segmento CO₂ emisijos pokyčio vertinimas D pakeičiant išbandytais mišiniais. Taip pat priimama, jog visų žvejybinių laivų DV vidutinės eksploatacinių rodiklių reikšmės nustatomos pagal ISO 8178 D2 ciklą. 3.19 paveiksle pavaizduotas degalų kiekio, kuriuo užtikrinama suminė galia, santykinis pokytis (A) lyginant su D. Beveik visais atvejais stebimas suminis sunaudojamų degalų sumažėjimas 1–11 %, tačiau D70/B30 atveju stebimas ~2,7 % padidėjimas.

Suminės CO₂ emisijos santykinis pokytis (B), sudeginus atitinkamą mišinio kiekį, užtikrinantį suminę galią, pasiskirsto ~ 4–13 % ribose, šis sumažėjimas vertinamas kaip tvirtas pagrindas biodegalų panaudojimui siekiant sumažinti ŠD emisiją ~2,5–9,5 % ribose pasiskirsto CO₂ rodiklio (sudeginus 1 kg degalų) santykinis pokytis (C) lyginant su D.

Siekiant įvertinti transporto segmentų, pasižyminčių sudėtingesne bandymo ciklo sandara, eksploatacinius rodiklius galima panaudoti MM programą Impuls ir pagal maksimalios apkrovos (esant atitinkamoms n) režimo duomenis modeliuoti kitus n ir P_e režimus. Modeliuojant bandymo ciklus nustatomas vidutinis eksploatacinis η_e , kurį panaudojant gali būti vertinamas santykinis CO₂ pokytis eksploatuojamame parke pakeičiant D į mišinius.



3.19 pav. D pakeitimo mišiniais vertinimo rodiklių santykinio pokyčio pasiskirstymas
Fig. 3.19. The distribution of evaluation indicators relative change during blends replacement instead diesel fuel

KK DV ID emisijų perskaičiavimas į matavimo vienetus, kuriais šios emisijos yra normuojamos pagal veikiančių standartų reikalavimus, vykdomas pagal žemiau esančias formules.

Sausų degimo produktų kiekis m_g^d [kmol/kg kuro] yra skaičiuojamas pagal formulę:

$$m_g^d = \frac{C}{12} + \frac{S}{32} + \frac{O}{32} + \frac{N}{28} + (\alpha - 0,21)l_o. \quad (3.7)$$

Skaičiuojant m_g^d priimame, kad a_g^d [kmol/kg degalų]:

$$a_g^d = \frac{C}{12} + \frac{S}{32} + \frac{O}{32} + \frac{N}{28}; \quad (3.8)$$

tuomet:

$$m_g^d = a_g^d + (\alpha - 0,21)l_o; \quad (3.9)$$

Sausų ID bendras kiekis M_g^d [kmol/h] yra skaičiuojamas pagal formulę:

$$M_g^d = m_g^d G_f; \quad (3.10)$$

Sausų ID tūris Q_g^d [nm³/h] yra skaičiuojamas pagal formulę:

$$Q_g^d = 224 M_g^d; \quad (3.11)$$

KK m emisija e_m [g/h], išmatuota ppm, apskaičiuojama pagal formulę:

$$e_m = \mu_m \times \frac{1}{22,4} \times m_{ppm} \times Q_g^d \times 10^{-3}; \quad (3.12)$$

Čia μ_m – m komponento molinė masė, kg/kmol; m_{ppm} – m komponento koncentracija išmetamosiose dujose, ppm.

KK m emisija e_m [g/h], išmatuota %, apskaičiuojama pagal formulę:

$$e_m = \mu_m \times \frac{1}{22,4} \times (m_{\%} \times 10^4) \times Q_g^d \times 10^{-3}; \quad (3.13)$$

Čia $m_{\%}$ – KK m koncentracija išmetamosiose dujose, %.

KK emisijos e_m [g/h] apskaičiuojamos pagal formules:

$$e_{NO_x} = \frac{46}{22,4} \times NO_x \times Q_g^d \times 10^{-3} = 2,05 \times 10^{-3} \times NO_x \times Q_g^d;$$

$$e_{CO} = \frac{28}{22,4} \times CO \times Q_g^d \times 10^{-3} = 1,25 \times 10^{-3} \times CO \times Q_g^d;$$

$$e_{CO_2} = \frac{44}{22,4} \times CO_2 \times 10^4 \times Q_g^d \times 10^{-3} = 19,6 \times 10^{-3} \times CO_2 \times Q_g^d;$$

$$e_{CH} = \frac{16}{22,4} \times CH \times Q_g^d \times 10^{-3} = 0,714 \times 10^{-3} \times CH \times Q_g^d.$$

KK emisijos e_m^p 1 kWh galiai [g/kWh] yra perskaičiuojamos pagal formules:

$$e_m^p = e_m / P_e;$$

$$e_{NO_x}^p = e_{NO_x} / P_e;$$

$$e_{CO}^p = e_{CO} / P_e;$$

$$e_{CH}^p = e_{CH} / P_e.$$

(3.14)

Skaičiavimų rezultatai pateikti 3.2 lentelėje, žinant suminę vertinamojo segmento P_e , pagal apskaičiuotas vidutines eksploatacines KK emisijas, vertinamuoju laikotarpiu įmanoma nustatyti suminę emisiją.

3.2 lentelė. Specifinių emisijų skaičiavimų rezultatai**Table 3.2.** The results of specific emission calculation

Degalai	NO _x , g/kWh	CH, g/kWh	CO, g/kWh	δ_{NO_x} , %	δ_{CH} , %	δ_{CO} , %
D	29,3	6,5	6,375	–	–	–
B30 DME	29,3	2,895	6,15	0,00	–55,46	–3,53
B30 RME	29,3	2,935	6,375	0,00	–54,85	0,00
B30 WCME	35	2,875	6,075	19,45	–55,77	–4,71
B30 SCME	29,3	2,765	6,375	0,00	–57,46	0,00
D70/RBE15/B15	29,5	3,4	6,0	0,68	–47,69	–5,88
D50/RBE25/B25	30	7,1	5,8	2,39	9,23	–9,02
D70/RME15/B15	29,4	3,1	6,2	0,34	–52,31	–2,75
D50/RME25/B25	29,9	6,8	5,8	2,05	4,62	–9,02
D70/B30	32	3,3	6,1	9,22	–49,23	–4,31

Panaudojus bandomuosius mišinius galima pasiekti CH pokytį nuo –55 iki +9 % vidutinių eksploatacinių ciklinių rodiklių pokytį lyginant su D, taip pat galima sulaukti CO ciklinio rodiklio sumažėjimo iki ~9 %. Tuo tarpu NO_x cikliniai rodikliai gali išaugti iki ~9 %, pavieniu atveju iki ~20 %.

3.9. Tiriamųjų degalų mišinių apibendrintas palyginimas

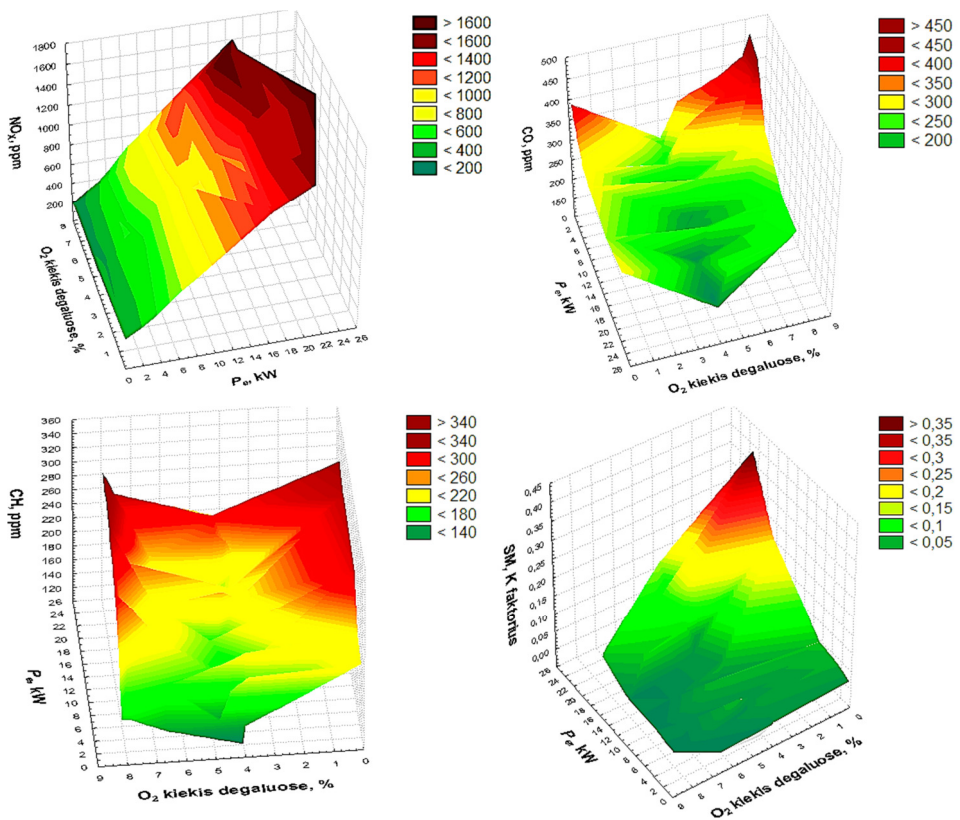
Neskaitant D, 320 DMG DV buvo išbandyti 9 skirtingų degalų mišiniai. Jų apibendrintam įvertinimui pagal CN ir O₂ kiekį degaluose informacijos pakanka. Apibendrinimas CN rodikliu nedavė jokių apčiuopiamų rezultatų, todėl buvo pasirinktas O₂ kiekio degaluose rodiklis.

Degalai:	D	D70/B30	D70/RME15/B15	D50/RME25/B25	D70/RBE15/B15
O ₂ , %	~0,1	6,7	4,9	8,2	4,7
Degalai:	D50/RBE25/B25	D70/RME30	D70/DME30	D70/WCME30	D70/SCME30
O ₂ , %	7,9	4,5	3,9	4,1	4

Atlikus DV 320 DMG energetinių rodiklių analizę pagal O₂ kiekį degaluose, nepastebėta jokių tendencingų pokyčių. Apdorojant KK koncentracijų ID duomenis (3.20 pav.) galima išskirti keletą tendencingų požymių:

- ✓ didėjant O₂ kiekiui degaluose, NO_x koncentracijai būdingas augantis charakteris. Matoma, jog daugiau savo sudėtyje O₂ turintys B50 mišiniai, esant identiškams DV P_e režimams, pasižymi didesne NO_x koncentracija ID;

- ✓ CO ir CH koncentracijų pobūdis panašus, D ($O_2 = \sim 0,1\%$) ir didelės B koncentracijos mišinių (B50, $O_2 = \sim 8\%$) panaudojimo atveju koncentracijos išauga. Vienas iš prieštaringų B50 mišinių rezultatų paaiškinimų galėtų būti didelis mišinyje esančio B kiekis, kurio didesnė savitoji garavimo šiluma, dėl kurios blogėja degimo procesas, tuo pačiu auga nepilno degimo produktų koncentracija ID. Stebint rezultatus, galima vienareikšmiškai teigti, jog tirtieji B30 mišiniai yra pranašesni už tirtuosius B50 ir D;
- ✓ SM atveju didėjant $P_e - K$ faktorius auga, o taip pat didinant biodyzelino dalį (tuo pačiu O_2) mišinyje SM mažėja, B50 atveju SM augimo dinamikai P_e praktiškai nebeturi įtakos. Santykinai aukštu SM rodikliu pasižymi D.



3.20 pav. DV 320 DMG kenksmingų komponentų koncentracijos priklausomybė nuo deguonies kiekio degaluose

Fig. 3.20. The dependence of 320 DMG engine harmful components concentration on oxygen amount in fuel

Apibendrinti tyrimų rezultatai pagrindžia disertacijoje pasirinktų įvairių (I, II kartos A ir RRME) biodegalų mišinių B30, kurie pasižymi žemesnėmis KK koncentracijomis lyginant su B50, kompleksinių tyrimų tikslingumą ir apimtį.

3.10. Trečio skyriaus išvados

1. Panaudojus bandomuosius degalų mišinius, nustatyta jog:
 - aplinkosauginiai parametrai NO_x padidėja 2–5 %, maksimalus dominuojantis CO ir SM sumažėjimas siekia atitinkamai iki 16 % ir iki 30 %, CH pokytis svyruoja nuo –15 % iki +7 %;
 - energetiniai rodikliai b_e pablogėja 3–8 %, η_e išauga 2–4 %.
2. 2 metus trukusią RRME oksidacijos įtakos DV VALMET 320 DMG parametrų tyrimų rezultatai rodo, jog B30 (RME) su antioksidatoriumi per 14 mėn. trukusį sandėliavimą neprarado variklinių savybių tiek DV energetinių (η_e), tiek ir aplinkosauginių (CH, SM, NO_x , CO) parametrų atžvilgiu. Palyginus su D, η_e 3–4,5 % padidėjimas išlaikomas 0–14 mėn. RME sandėliavimo laikotarpiu ir iki 0–8 mėn. sandėliuojant WCME ir SCME. Lyginant su D, B30 sudėtyje panaudojus iki 14 mėn. sandėliuotą RME ir iki 8 mėn. CS biodyzelinų mišinius, maksimalus CO sumažėjimas pasiekia 8–10 %, ID SM sumažėja 20–25 %, CH ir NO_x koncentracijos pokytis nėra ryškus.
3. Komercinės žvejybos laivų segmente panaudojus tiriamuosius mišinius pasiekama:
 - praktiškai visais atvejais, suminio sunaudojamų degalų sumažėjimo, siekiančio 1–11 %, tačiau D70/B30 atveju stebimas ~2,7 % padidėjimas;
 - 4–13 % CO_2 emisijos sumažėjimo visais tiriamųjų mišinių atvejais;
 - energijos panaudojimo efektyvumo – η_e 3–5 % padidėjimo;
 - vidutinių eksploatacinių ciklinių rodiklių pasikeitimo, lyginant su D: CH diapazone –5–+9 %; CO – sumažėjimo iki ~9 %; NO_x ciklinių rodiklių išaugimo iki ~9 %, pavieniu atveju iki ~20 %.

Apibendrinti visų, DV 320 DMG išbandytų, mišinių rezultatai rodo, jog nepilno degimo produktų koncentracijos atžvilgiu B30 mišiniai yra pranašesni lyginant su D ir B50. Pastarųjų mišinių trūkumai siejami su santykinai didelio A kiekio, keičiančio degimo kinetiką, panaudojimu mišinyje.

Šilumos išsiskyrimo charakteristikos parametrų nustatymo metodikos kūrimas

Dalis šio skyriaus medžiagos yra publikuota mokslo žurnale (Žaglinskis *et al.* 2014) ir pristatyta tarptautinėje konferencijoje.

Kuriamos metodikos tikslas pagrindžiamas šiais punktais:

- DV tyrimų metu dažnai nėra techninės galimybės registruoti DP slėgio cilindre charakteristikos – indikatorinės diagramos duomenų, kurios pagalba vertinami, nustatomi ir tiriami kiti DP rodikliai, parametrai, charakteristikos;
- DP tyrimo aspektas, kaip rodo daugelis šios problematikos tyrimų, ypatingai svarbus tiriant biodegalų efektyvaus panaudojimo technologijas DV.

Siekiant biodegalus pritaikyti praktiniam panaudojimui būtina ištirti ir pagrįsti indikatorinio proceso pasikeitimus, lemiančius DV aplinkosauginius ir energetinius rodiklius D pakeitimo į biodegalus atveju. Taip pat DV DP tyrimai sudaro pagrindą tyrimams, kurių tikslas vertinti tam tikros rūšies biodyzelinų panaudojimo eksploatuojamuose DV parkuose efektą plačiam DV tipažui.

Šiuo atveju DV parametrų MM technologijos yra pagrindinis tyrimų įrankis. Kita vertus, modeliuojant tam tikro objekto (DV) parametrus, ypatingai eksploatuojamo DV, trūksta duomenų adekvačiai užduoti ŠICH parametrus, nuo

kurių adekvatumo, kaip žinia, didžiąja dalimi priklauso viso MM proceso rezultatų adekvatumas (Merker *et al.* 2006).

Šiame tyrimų etape taip pat ne mažiau svarbus eksploatuojamo DV faktinės būklės nukrypimas nuo etaloninės, DV gamintojo reglamente pateikiamos būklės. Dėl šios priežasties atliekant MM būtina remtis faktine technine DV būkle bei ją atitinkančiomis DP charakteristikomis.

Atsižvelgiant į anksčiau išdėstytus punktus, disertacijoje iškeltas uždavinys – sukurti metodiką, kurios pagrindu, esant ribotam duomenų kiekiui – nesant indikatorinės diagramos duomenų, adekvačiai būtų nustatoma ŠICH, kurios pagrindu būtų modeliuojami DV DP ir energetiniai rodikliai.

Siekiant tikslo, susijusio su metodikos kūrimu, sprendžiami šie uždaviniai:

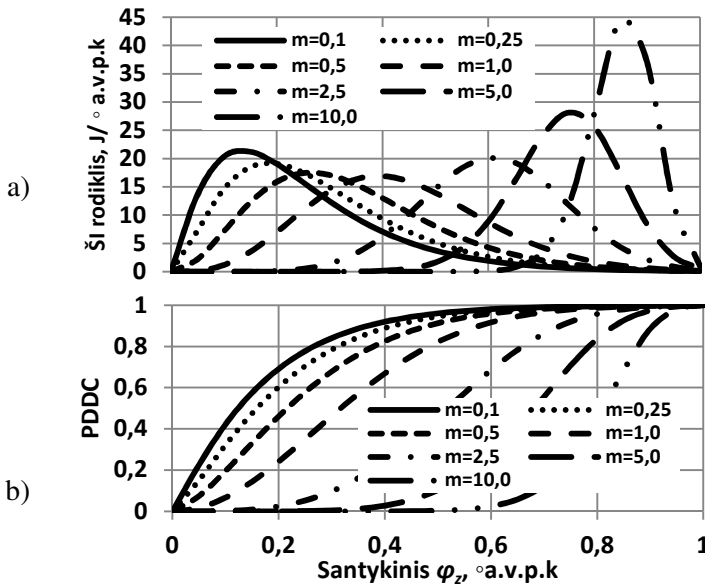
- ŠI modelio, atitinkančio iškeltas ribines sąlygas, parinkimas;
- pasirinktų ŠI modelių aprobavimas remiantis eksperimentiniais duomenimis;
- metodikos algoritmo formavimas ir pagrindimas;
- praktinis metodikos pritaikymas, remiantis atliktais ir kitų tyrėjų eksperimentiniais duomenimis.

4.1. Šilumos išsiskyrimo modelio, atitinkančio iškeltas ribines sąlygas, parinkimas

Transporto paskirties DV MM procesas realizuojamas dviem būdais, kurių vienas – vienzonio, kitas – daugiazoninio matematinio modelio panaudojimas (Diesel RK, KIVA, kt.). Pastarasis būdas apima degalų įpurškimo, garavimo, aktyvių radikalų susidarymo ir kt. MM procesus. Tačiau daugiazoninio matematinio modelio skaičiuojamų parametrų suderinimas su eksperimentinio objekto parametrais dėl plačios apimties yra itin sudėtingas bei reikalaujantis didelio pradinių duomenų bloko. Dėl šios priežasties vienzoniniai matematiniai modeliai yra paprastesni (Vibe, Gončar, kt.). Vibe ŠI modelis, kuris akcentuotas į cheminę degalų degimo kinetiką ir yra lengvai suprantamas, pasirenkamas pagrįstai dėl šių priežasčių:

1. $\frac{dx}{d\left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)} = 6,908(m+1) \left(\frac{\varphi_E - \varphi_1}{\varphi_z}\right)^m e^{-6,908\left(\frac{\varphi_E - \varphi_1}{\varphi_z}\right)^{m+1}}$ yra lengvai suprantama ir santykinai tiksliai aprašo DV ŠI procesą (Vibe lygtis, dviguba Vibe lygtis), tai pagrindžia iki šių dienų plačiai pasaulyje naudojama jau daugiau nei prieš 50 m. mokslininko I. I. Vibe ŠI matematinė išraiška, kuri charakterizuojama praktiškai m ir φ_z parametrais, o tai suteikia ŠI išraiškai geras valdomumo galimybes, tai yra būtina metodikos realizavimui.

ŠI rodiklis m – tai parametras, apibūdinantis aktyviųjų centrų santykinio ploto pasikeitimo charakterį ŠI metu. Šiuo rodikliu nusakoma ŠI proceso eiga. Mokslininkas R. Z. Kavtaradze (2008) teigia, kad ŠI charakterio rodiklis m vienareikšmiškai nustato maksimumo padėtį ŠI greičio charakteristikoje. Integralinio ir diferencialinio Vibe dėšnių kitimas priklausomai nuo ŠI charakterio rodiklio pavaizduotas 4.1 paveiksle. Aišku, kad kuo mažesnė m reikšmė, tuo ŠI greičio maksimumas arčiau ŠI pradžios. Taip pat m vienareikšmiškai parodo dalį degalų, sudegusių ŠI greičio augimo ir lėtėjimo periodais.



4.1 pav. Šilumos išsiskyrimo rodiklio $dx/d\phi$ greičio maksimumo pasiskirstymas (a) šilumos išsiskyrimo metu priklausomai nuo m parametro reikšmės ir pilnutinio degalų degimo charakteristika (b)

Fig. 4.1. Distribution (a) of velocity peak of heat release rate $dx/d\phi$ (during HR) depending on parameter m value and total combustion characteristic (b)

Dalinės DV apkrovos režimuose ŠICh pasižymi dviem maksimumais (KDF ir DDF), viena Vibe funkcija gali aprašyti vieną maksimumą turinčią charakteristiką. Taigi DV ŠI aprašymas dalinės apkrovos režimuose viena Vibe funkcija tampa netikslinga (D priedas P.D.1 pav.). Paprastai tariant, vienos Vibe funkcijos panaudojimas esant dvifaziui ŠI, kada ryškiai yra išreikštos KDF ir DDF, nėra tikslus. Dviejų fazių ŠICh gali būti aprašyta panaudojant dvi Vibe

funkcijas arba taip vadinamą dvigubą Vibe funkciją, kuri leidžia priimtinu tikslumu aprašyti dvifazį ŠI procesą. ŠICh KDF (indeksas „1“) ir DDF (indeksas „2“) aprašomos atitinkamai pagal išraiškas:

$$\frac{dx_1}{d\left(\frac{\varphi_1}{\varphi_{z1}}\right)} = \sigma_g \times 6,908(m_1 + 1) \left(\frac{\varphi_1}{\varphi_{z1}}\right)^{m_1} e^{-6,908\left(\frac{\varphi_1}{\varphi_{z1}}\right)^{m_1+1}}; \quad (4.1)$$

$$\frac{dx_2}{d\left(\frac{\varphi_2}{\varphi_{z2}}\right)} = (1 - \sigma_g) \times 6,908(m_2 + 1) \left(\frac{\varphi_2}{\varphi_{z2}}\right)^{m_2} e^{-6,908\left(\frac{\varphi_2}{\varphi_{z2}}\right)^{m_2+1}}. \quad (4.2)$$

Čia m_1, m_2 – ŠICh formos rodiklis KDF ir DDF; φ_1, φ_2 – einamasis kampas KDF ir DDF; $\varphi_{z1}, \varphi_{z2}$ – ŠI trukmė KDF ir DDF; σ_g – degalų dalis, sudegusi KDF; $1 - \sigma_g$ – degalų dalis, sudegusi DDF.

Panaudojant dvigubą Vibe funkciją buvo aproksimuoti ŠICh duomenys DV dirbant dalinės apkrovos režime. BME MI DEE laboratorijoje atliktų bandymų ŠI tyrimo rezultatų fragmente (D priedas P.D.2 pav.) puikiai matomos dvigubos Vibe funkcijos galimybės aprašyti dvizonį ŠI procesą. Šiuo atveju, rankinio duomenų apdorojimo metu buvo nustatyti dvigubos Vibe funkcijos parametrai: $m_1 = 4, m_2 = 0,15, \varphi_{z1} = 6$ °a.v.p.k., $\varphi_{z2} = 45$ °a.v.p.k., $\sigma_g = 0,115$;

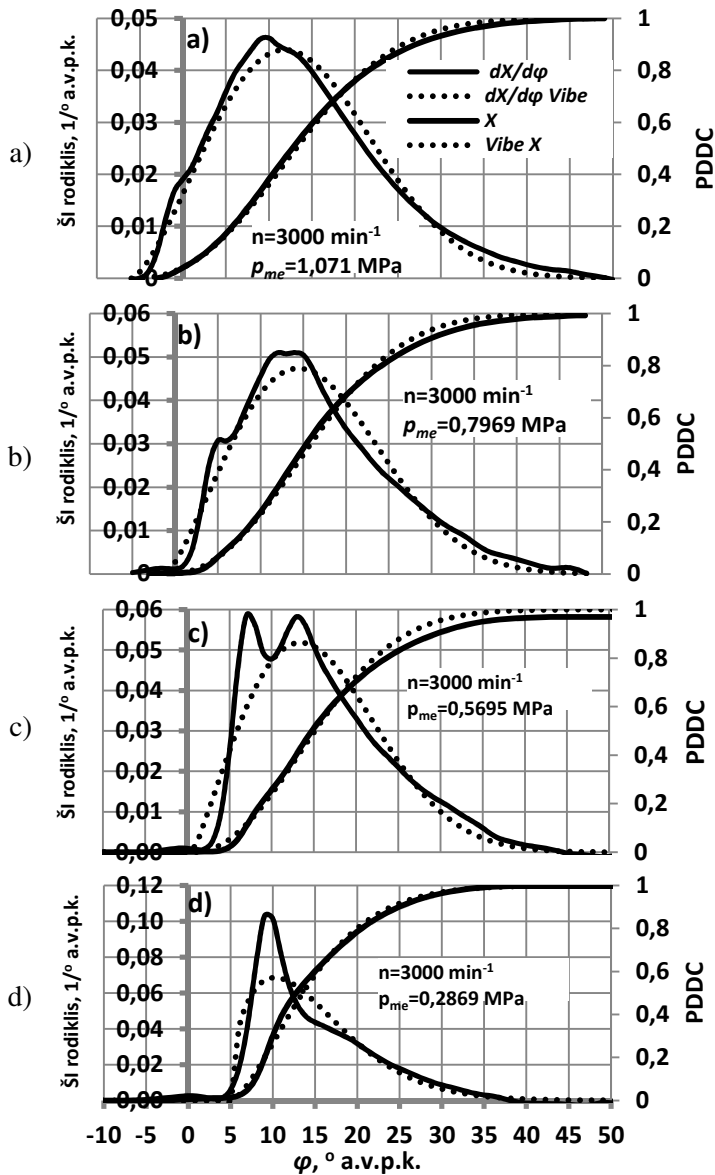
2. praktikoje Vibe modelis plačiai ir sėkmingai pritaikytas tiek skystais, tiek ir dujiniais degalais dirbančių DV ŠICh modeliavimui;

3. dar vienas privalumas ir ypač svarbus aspektas šiame darbe pristatomos metodikos kūrimo procese yra tai, jog turint eksperimentinius duomenis DV dirbant nominalios apkrovos režimu, pasitelkus Woschni santykinės m ir φ_z pokyčio išraiškas, galima nustatyti absoliučias šių parametru reikšmes dirbant dalinės apkrovos režimais.

4.2. Pasirinktų šilumos išsiskyrimo modelių aprobavimas pagal eksperimentinius duomenis

Metodikos kūrimo etape pagal slėgio cilindre duomenis ŠICh skaičiuojama (bei vykdoma jos analizė) panaudojant AVL Boost Burn MM paketą.

Burn MM programa, pagal BME MI DEE laboratorijoje atliktų 1,9 TDI 1Z DV tyrimų rezultatus modeliuojama ŠICh ir nustatomi Vibe ŠI parametrai m ir φ_z . Žemiau pateikti MM normalizuoto ŠI rodiklio ($dX/d\varphi$) pagal slėgio cilindre duomenis ir Vibe metodiką rezultatai bei pilnutinė degalų degimo charakteristika, kurių skaičiavimo pradinis duomenų blokas sudarytas remiantis DV dirbančio 4 skirtinguose p_{me} režimuose eksperimentiniais rezultatais. Maksimalios tiriamos apkrovos $n = const$ režime stebima gera normalizuoto ŠI ir Vibe ŠI rodiklio pokyčio koreliacija degimo proceso metu (4.2a pav.).



4.2 pav. 1,9 TDI 1Z variklio šilumos išsiskyrimo charakteristika ir pilnutinio degalų degimo charakteristikos pagal slėgį cilindre ir pagal Vibe metodiką
Fig. 4.2. The characteristics (according in-cylinder pressure and Vibe methodology) of heat release and total fuel combustion of engine 1.9 TDI 1Z

Aukštų n ir apkrovų režimais dirbančiam DV su TK ŠICH būdinga viena dominuojanti DF, t. y. DDF, o KDF sunku arba neįmanoma atskirti (4.2a pav.). Daroma prielaida, kad vyksta vienfazis, DDF išreikštas, ŠI, kuris dažnai su priimtiniu tikslumu gali būti aprašomas viena Vibe ŠI funkcija. Tačiau krentant DV apkrovai stebimas KDF atsiradimas (4.2 b, c pav.), esant mažai apkrovai KDF tampa dominuojančia (4.2 d pav.), o ŠICH tampa panaši į bazinio (be TK, vidutinių n) DV ŠICH. Su analogiškais pastebėjimais susidurta atliekant DV ŠI MM n režimuose 2000, 2500 min⁻¹.

ŠICH įgavus dvizonį profilį (I pikas ir II pikas), sudarytą iš KDF ir DDF, tolimesnis vienos Vibe funkcijos panaudojimas duoda santykinai didelę paklaidą (4.2 b, c, d pav.) ir praktiškai tampa beverčiu. Tada dalinių DV apkrovos režimų ŠICH aprašymui galima panaudoti dvigubą Vibe funkciją, kuri atskirai aprašo kiekvieną DF, bei naudoti DP parametrų MM programą, kuri remiasi dviguba Vibe funkcija ir pasižymi santykinai aukštesniu sudėtingumo lygiu. Arba galima panaudoti viengubą Vibe funkciją, aprašant artimos maksimaliai apkrovai režimo ŠICH, ir panaudoti MM programą, kuri, dalinių DV apkrovų režimų darbo proceso parametrų MM atliktų remdamasi nominalaus (arba artimo maksimalios apkrovos) režimo duomenimis tame tarpe ir ŠICH. Tam tikslui pasirenkamas artimos nominaliai apkrovai režimo taškas skirtinguose $n = const$ režimuose ($n = 2000, 2500, 3000$ min⁻¹) ir panaudojama MM programa Impuls, kurios sudėtyje santykinis m ir φ_z pokytis DV dirbant dalinės apkrovos režimais yra aprašomas pagal Woschni ir Anisits metodiką (Woschni and Anisits 1973):

$$\frac{m_i}{m_0} = \left(\frac{\varphi_{\tau i 0}}{\varphi_{\tau i}}\right)^{a_2} \cdot \frac{P_i \cdot T_0}{P_0 \cdot T_i} \cdot \left(\frac{n_0}{n_i}\right)^{a_1};$$

$$\frac{\varphi_{z i}}{\varphi_{z 0}} = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_i}\right)^{a_3} \cdot \left(\frac{n_i}{n_0}\right)^{a_4}.$$
(4.3)

Čia a_1, a_2, a_3, a_4 – pastovūs koeficientai; T_0 ir T_i – atitinkamai T_K [°K] nom. ir i-tame apkrovos režime; P_0 ir P_i – atitinkamai p_K [Pa] nom. ir i-tame apkrovos režime; $\varphi_{\tau i}$ ir $\varphi_{\tau i 0}$ – atitinkamai indukcijos periodas [°a.v.p.k.] nom. ir i-tame apkrovos režime.

Indukcijos periodas nustatomas pagal J. T. Jeriominio metodiką:

$$\varphi_{\tau i} = 6 \cdot n \cdot \tau_i; \quad (4.4)$$

$$\tau_i = K_{\tau} \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{T}{P}\right)^{0.5} \cdot \exp\left(\frac{E}{R_M \cdot T}\right);$$

$$\frac{1}{6 \cdot n} \int_0^{\varphi_{\tau i}} \frac{d\varphi}{\tau_i} = 1. \quad (4.5)$$

Čia $\frac{E}{R_M}$ – aktyvacijos energijos santykis su dujų pastoviąja (moline) energija; $K\tau$

– konstanta; T – pripučiamo oro temperatūra, K; P – pripučiamo oro slėgis, Pa.

Didėjant n , mažėja M_I , o tai daro įtaką p_{me} kritimą, o šis veiksnys sąlygoja KDF atsiradimą tuo pačiu ir ŠICH skaičiavimo rezultatų ryškesnį nesutapimą (D priedas P.D.3 pav.). Tačiau, kaip rodo tolimesni šios disertacijos tyrimai, II piko (DDF) atsiradimas ir jo įtaka DV energetiniams rodikliams nėra reikšminga bei gali būti taikoma DV, dirbančiam $p_{me} = 0,4-0,5 p_{me\ nom}$ režimu.

Atlikus MM programa Burn gautos ŠI pradžios kampo φ_1 , φ_z ir m reikšmės skirtinguose n režimuose prie maksimalios tiriamos apkrovos (4.1 lent.).

4.1 lentelė. MM programa Burn apskaičiuoti Vibe ŠI parametrai

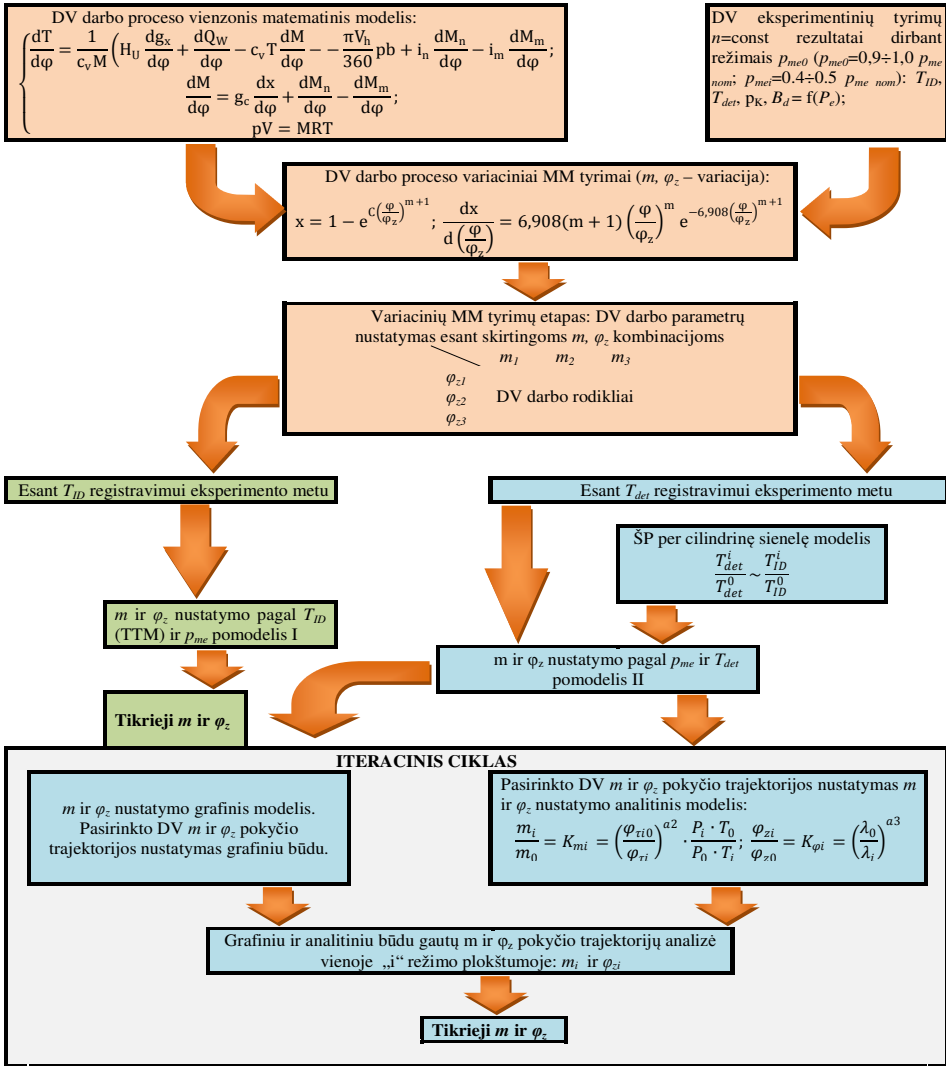
Table 4.1. The Vibe HR parameters calculated using Burn

Parametras	DV darbo režimas		
	$n = 2000 \text{ min}^{-1}$ $p_{me} = 1,143 \text{ MPa}$	$n = 2500 \text{ min}^{-1}$ $p_{me} = 1,199 \text{ MPa}$	$n = 3000 \text{ min}^{-1}$ $p_{me} = 1,017 \text{ MPa}$
φ_1 , °a.v.p.k.	-5,92	-7,53	-7,85
φ_z , °a.v.p.k.	49,8	56,4	59,7
m	1,4	1,33	1,28

MM programa Burn, turint slėgio pokyčio cilindre eksperimentinius duomenis, be didesnių sunkumų leidžia nustatyti preliminarius Vibe ŠI parametrus: φ_1 , φ_z , m . Vibe modelio pasirinkimas pagrindžiamas gera koreliacija su normalizuoto ŠI rodiklio charakteristika. Nustatyti parametrai metodikos kūrimo etapuose naudojami kaip orientaciniai.

4.3. Metodikos algoritmo formavimas ir pagrindimas

Praktiškai, metodikos sudarymas susideda iš keleto pagrindinių etapų: DV eksperimentinių tyrimų, matematinio modelio pritaikymo, variacinių DV parametrų skaičiavimų, pomodelių sudarymo ir iteracijos proceso. Šiuos etapus apjungiant į logišką seką – algoritmą, taip pat neišvengiamai reikalingi tarpiniai etapai, kurie bei principinė suformuotos metodikos schema pateikti žemiau.



4.3.1. Variacinių skaičiavimų realizavimas

Variaciniuose m ir φ_z skaičiavimuose bei tikrųjų jų reikšmių nustatymui panaudotas T. Bulaty ir W. Glanzman grafinis metodas (Bulaty and Glanzman 1985). T. Bulaty ir W. Glanzman pasiūlė grafinį metodą, kuriuo remiantis galima santykinai tiksliai apskaičiuoti DP parametrus: b_{e2}, P_e, p_{me} , kt.

Pateikta T. Bulatti ir W. Glanzman Vibe ŠI išraiškos parametrų m ir φ_z nustatymo metodika remiasi p_{max}, p_{mi} rodikliais. Šiai metodikai pateikti T. Bulaty

ir W. Glanzman pasitelkė idealizuotos indikatorinės diagramos duomenis. Padarę prielaidą, kad atliekant DP skaičiavimus keturtakčio DV įsiurbimo-išmetimo takto diagramos parametrai nekinta, todėl papildomi skaičiavimai neatliekami. Siekiant apskaičiuoti suspaudimo takto diagramos ruožą (nepriklausomai nuo įsiurbimo-išmetimo takto) remiantis idealizuotu procesu, reikia nustatyti susikirtimo taškus *ac* ir *ex*, kaip tai pateikta įsiurbimo taktų diagramoje (D priedas P.D.4 pav.).

T.Bulatti ir W.Glanzman m ir φ_z nustatymo metodo grafinė forma kartu su paaiškinimais pateikta prieduose (D priedas P.D.5 pav.)

Daugelio DV darbo parametrų MM programų pradinių duomenų masyvai reikalauja indikatorinės diagramos arba atskirų jos duomenų, arba ŠICH, kuri savo ruožtu nustatoma pagal indikatorinės diagramos duomenis arba aprašoma Vibe funkcija. p_{mi} nustatymas yra vienas iš svarbiausių parametrų (visų pirma ŠICH ir jos parametrų nustatymo atžvilgiu) DV tyrimų srityje, tačiau šio parametro nustatymo prietaisai ir įranga yra santykinai brangūs, o atskiros dalys turi naudojimo resurso limitą. O taip pat, skirtingai nei stendo sąlygomis, eksploatacijoje sudėtinga atlikti slėgio pokyčio cilindre indikavimą.

Vienas būdų supaprastinti DV tyrimus, o taip pat sumažinti išlaidas – panaudoti vienzonį Impuls matematinį modelį, kuriam svarbūs ŠI rodikliai m ir φ_z būtų nustatomi panaudojant pakeistą Bulaty ir Glanzman metodiką. Taip pat būtina argumentuotai parinkti objektyvų ir jautrų DP pokyčiams cilindre parametrą, kuriuo būtų galima pakeisti p_{max} nustatant ŠI rodiklius m ir φ_z pagal pakeistą Bulaty ir Glanzman metodiką.

Atsižvelgiant į anksčiau iškeltus tikslus ir išvardintas priežastis – p_{max} ir p_{mi} matavimo eksploatacijos sąlygose yra atsisakoma, o taip pat šiuolaikinės technikos, tokios kaip lokomotyvų, traktorių, laivų DV, sistemos leidžia matuoti p_{me} arba jo nustatymui galėtų būti panaudota techninė dokumentacija, kurioje reglamentuojami efektingi rodikliai. Todėl būtina:

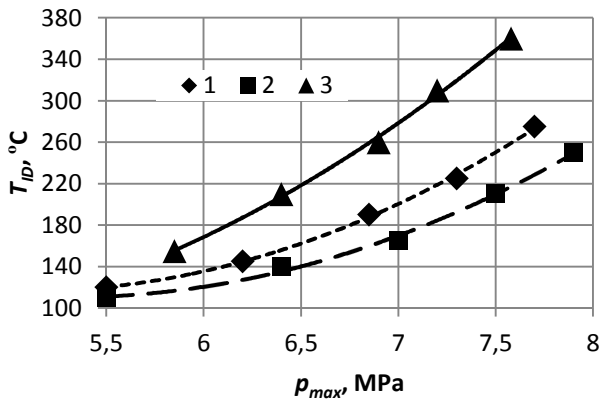
- pagrįsti kito, fizikiniais ryšiais su cilindre vykstančiais procesais susieto rodiklio panaudojimą vietoje p_{max} rodiklio;
- apriboti metodiką taip, kad būtų galima vietoje p_{mi} panaudoti p_{me} .

Atlikus DV parametrų analizę pasirenkamas objektyviai cilindre vykstančių procesų pokytį apibūdinantis parametras – T_{ID} .

4.3.2. Išmetamųjų deginių temperatūros pasirinkimo pagrindimas

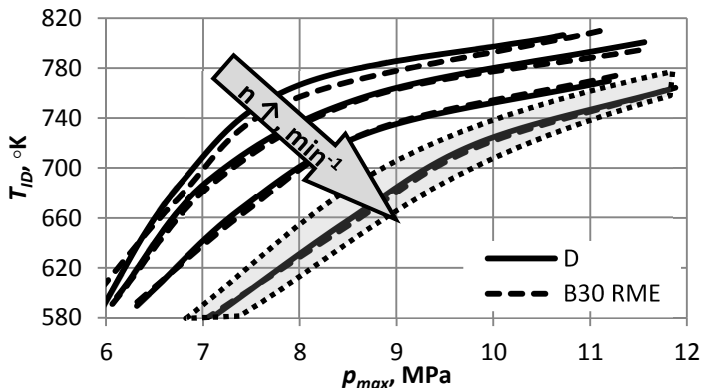
T_{ID} pasirinkimą pagrindžia šio rodiklio su ŠI rodikliu $dx/d\varphi$ ir m ir φ_z parametrais (tame tarpe aprašant ŠICH Vibe modeliu): didėjant m ir φ_z vienareikšmiškai didėja T_{ID} ir atvirkščiai; T_{ID} mažėja kai degimo procesas tampa trumpu pagal φ_z bei dominuoja KDF tai parametras m mažėja.

4.3 ir 4.4 paveiksluose pavaizduota T_{ID} priklausomybė nuo p_{max} . 4.3 paveiksle parodyta šių dviejų rodiklių priklausomybė, kuri būdinga DV (Kirloskar TAF 1) be EVS (Prakash *et al.* 2014, Behera and Murugan 2013, Sakthivel *et al.* 2014). 4.4 pav. – su EVS, pastaroji nustatyta 1,9 TDI DV bandymų metu.



4.3 pav. T_{ID} priklausomybė nuo p_{max} pagal: Prakash *et al.* – 1, Behera and Murugan – 2, Sakthivel *et al.* – 3.

Fig. 4.3. T_{ID} dependence on p_{max} according Prakash *et al.* – 1, Behera and Murugan – 2, Sakthivel *et al.* – 3.



4.4 pav. T_{ID} priklausomybė nuo p_{max} (dirbant $n = 2000, 2500, 3000, 3500 \text{ min}^{-1}$).

Fig. 4.4. T_{ID} dependence on p_{max} (rpm regimes: 2000, 2500, 3000, 3500 min^{-1}).

DV dirbant $n = 2000, 2500 \text{ min}^{-1}$ režimais ši priklausomybė, skirtingai nei DV be EVS, nėra visiškai tiesinė, tačiau didėjant n priklausomybių kreivės „tiesinasi“ ir panašėja į tiesinę priklausomybę (4.4 pav. pažymėtas sektorius). Tai vyksta dėl paprastos priežasties – degimo procese dalyvaujančio degalų ciklinio kiekio. Galima teigti, jog DV dirbant aukštos n režimais p_{max} ir T_{ID} tarpusavio priklausomybė įgauna tiesinės kreivės pobūdį. Šių priklausomybių pobūdis leidžia daryti išvadą, jog T_{ID} yra objektyvus rodiklis, galintis tinkamai identifikuoti degimo proceso pokyčius.

Palyginti su kitais DV darbo rodikliais, T_{ID} matavimas su priimtinu tikslumu sąlyginai lengvai įgyvendinamas, o jos nustatymas nesant tiesioginio matavimo temperatūrinio jutikliu, gali būti skaičiuojamas netiesioginiu būdu – remiantis termodinamikos teoriniais skaičiavimais pasitelkiant ŠP per sienelę modelį.

4.3.3. Išmetamųjų deginių temperatūros nustatymas netiesioginiais metodais

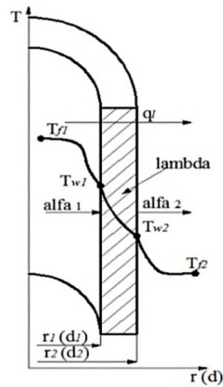
Pakeistai DV parametru MM metodikai reikalingos T_{ID} nustatymas naudojant termoporą reikalauja papildomų paruošiamųjų darbų, o taip pat natūraliai susiduriama su konstrukciniais DV ID sistemos pakeitimais. Kiekvienas metodikos taikymo atvejis reikalauja intervencijos, t. y. termoporos įvedimo į ID sistemą, kuris neišvengiamai susietas su gręžimo procesu, o taip pat termoporos tvirtinimas gali pareikalauti virinimo ir sandarinimo darbų. Be viso to, termoporos panaudojimas reikalauja prietaiso, sugebančio termoporos signalą konvertuoti į skaitmeninius duomenis, taip pat reikalingas PC.

Dėl išvardintų priežasčių pakeistos DV tyrimų metodikos taikymas yra sąlyginai apsunkintas. Viena iš galimybių supaprastinti DV ID temperatūros nustatymo procesą – panaudoti paviršių temperatūros nustatymo prietaisą ir suderintą ŠP per vienasluoksnę sienelę matematinį modelį (4.5 pav.). Šiam tikslui pasiekti būtina nustatyti ID (T_{ID}) ir detalės paviršiaus (T_{det}) temperatūrų santykį K , kuris leistų išmatavus T_{det} per koeficientą K nustatyti T_{ID} .

Šie ŠP skaičiavimai reikalauja šilumos laidumo λ_{det} ir ŠP koeficientų α_1 ir α_2 . λ_{det} duomenys įvairiuose šaltiniuose lengvai prieinami, tačiau tai nepalengvina skaičiavimo proceso dėl charakteringų konstrukcinių medžiagų λ_{det} pasiskirstymo plačiame diapazone. Tai ypač aktualu praktikoje, kai sudėtinga sužinoti konstrukcinės medžiagos, konkrečiai šiuo atveju plieno, tipą, elementinę sudėtį ir t. t. Tačiau žinant koeficientus (gautus eksperimento keliu), šio modelio panaudojimas gali būti taikomas praktiniuose skaičiavimuose.

q_1 perduotas per cilindrinę sienelę priklauso nuo fluidų temperatūros skirtumo ($T_{f_1} - T_{f_2}$) ir šilumos perdavimo koeficiento k_l , o jis savo ruožtu nuo koeficientų α_1 ir α_2 , λ_{det} ir sienelės storio, vamzdžio vidinio ir išorinio diametru.

α ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) parodo, koks šilumos kiekis yra atiduodamas paviršiaus ploto vienetui arba paimamas nuo paviršiaus ploto vienetu per laiko vienetą, kai paviršiaus ir fluideo temperatūrų skirtumas lygus vienam $^{\circ}\text{K}$. α priklauso nuo daugelio kintamųjų, tokių kaip Φ , l_1 , l_2 , l_3 , T_f , T_p , W , μ , ρ , λ , β , g : Φ – paviršiaus formos; l_1 , l_2 , l_3 – paviršiaus matmenų; fluidų temperatūrų T_{f1} ir T_{f2} ; μ fluideo dinaminio klampumo koeficiento ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$); β – fluideo terminio plėtimosi koeficiento ($1/^{\circ}\text{K}$); g – laisvojo kritimo pagreičio (m/s^2); λ_l šilumos laidumo koeficiento ($\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{K}$). Paprastai α nustatoma eksperimento keliu.



4.5 pav. Šilumos perdavimo per vienasluoksnę cilindrinę sienelę schema

Fig. 4.5. The scheme of heat transfer through single-layer wall

λ_l (arba λ_{det}) – šilumos laidumo koeficientas, rodantis kokį šilumos kiekį sugeba praleisti medžiaga, iš kurios pagaminta sienelė per laiko ir ploto vienetą. Šilumos laidumo koeficiento matavimo vienetas ($\text{J}/\text{s}\cdot\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{K}/\text{m}$), ($\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{K}$).

Priimant sąlygą, kad ŠP yra stacionarus (nekintantis) režimas, tai šilumos srautas, perduotas nuo šilumą nešančio fluideo vidiniam sienelės paviršiumi $q_{l\alpha_1}$ bus lygus šilumos srautui $q_{l\lambda}$ sklindančiam per sienelę ir srautui $q_{l\alpha_2}$, perduotam nuo išorinio sienelės paviršiaus šilumą gaunančiam fluidei.

$$q_l = q_{l\alpha_1} = q_{l\lambda} = q_{l\alpha_2}. \quad (4.6)$$

Šie šilumos srautai paskaičiuojami pagal plačiai (Drobavičius *et al.* 1974, Martinaitis *et al.* 2005, Moran *et al.* 2010) termodinamikos srityje naudojamas išraiškas (W/m):

$$q_{l\alpha_1} = \alpha_1 \pi d_1 (T_{f1} - T_{w1}); \quad (4.7)$$

$$q_{l\lambda} = \frac{\pi(T_{w_1} - T_{w_2})}{\frac{1}{2} \lambda \ln \frac{d_2}{d_1}}; \quad (4.8)$$

$$q_{l\alpha_2} = \alpha_2 \pi d_2 (T_{w_2} - T_{f_2}); \quad (4.9)$$

$$q_l = k_l \pi (T_{f_1} - T_{f_2}). \quad (4.10)$$

Išreiškiamas fluidų temperatūrų skirtumas (°K):

$$T_{f_1} - T_{f_2} = \frac{q_l}{\pi} \left(\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{\frac{1}{2} \lambda \ln \frac{d_2}{d_1}} + \frac{1}{\alpha_2 d_2} \right). \quad (4.11)$$

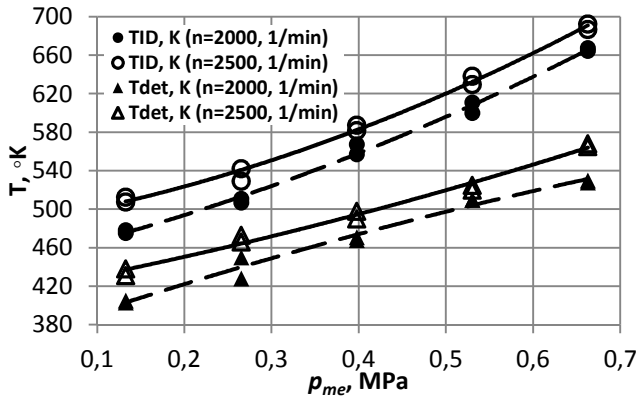
Tuomet ŠP koeficiento k_l išraiška (W/m °K):

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{\frac{1}{2} \lambda \ln \frac{d_2}{d_1}} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}. \quad (4.12)$$

Išnagrinėjus kitų tyrėjų atliktų bandymų statistinius duomenis (Bordukov *et al.* 1975, Kostin *et al.* 1979), išsiaiškinta, jog ŠP koeficientai nerūdijantiems plienams: α_1 turi tiesinę priklausomybę nuo T_{ID} , o α_2 priimama kaip konstanta. Tokiu atveju pasitelkiant termodinaminius ŠP skaičiavimus per vienasluoksnę sienelę nustatyta, jog konstrukcijos paviršiaus temperatūra turi tiesinę priklausomybę nuo ID temperatūros (D priedas P.D.6 pav.). Šiame paveiksle nerūdijančio plieno konstrukcijos (ŠP vyksta tarp ID ir aplinkos oro) bei aušinamos aliuminio konstrukcijos (ŠP vyksta tarp ID ir vandens), pastarasis pavyzdys susietas su šios metodikos plėtra siekiant pritaikyti įvairios konstrukcijos ID kolektorių matavimams ir analizei. Plieniniui D priedo P.D.6 paveiksle pateikiamos keletas priklausomybių kreivių (tiesių), kurios sudaromos pasirenkant skirtingą α_1 pokytį priklausomai nuo ID temperatūros.

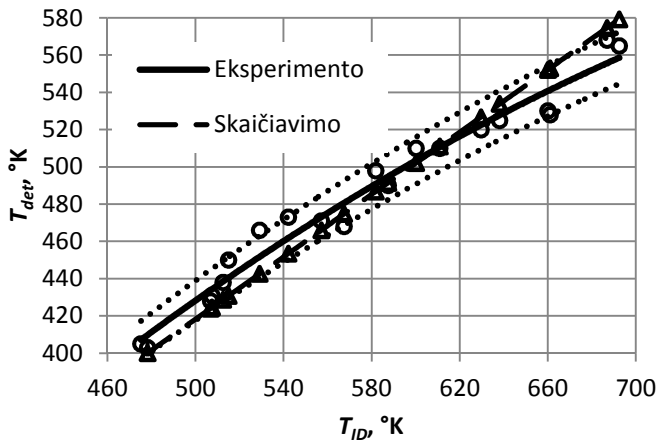
Atliktame bandyme (VGTU TIF ATK laboratorijoje) DV (p_{me} diapazone $p_{me} = 0,133\text{--}0,663$ MPa) ID temperatūra svyravo apie 450–700 °K. Buvo matuojamos temperatūros ID ir vamzdžio sienelės (4.6 pav.), kurios buvo žinomas storis ir pagaminimo medžiaga – nerūdijantis plienas. Pagal nerūdijančių plienų lydinių šilumos laidumo priklausomybę (matuojamajame temperatūrų diapazone) nuo temperatūros (D priedas P.D.7 pav.), koeficientas λ_{det} prilygintas nekintamam dydžiui. Tikslas buvo nustatyti šilumos perdavimo koeficientą K tarp T_{ID} (T_{f1}) ir T_{det} (T_{w2}), $K = T_{det}/T_{ID}$. Atliktuose T_{ID} ir T_{det} matavimuose buvo nustatyta, jog didėjant T_{ID} temperatūrų santykis T_{ID}/T_{det} šiek

tiesiogiai didėja. Tačiau atlikta T_{ID} ir T_{det} tarpusavio priklausomybės analizė (4.7 pav.) rodo, jog matuojamajame diapazone, įvertinant T_{ID} nustatymo paklaidos ($\pm 2,5\%$) ribas, galima taikyti nekintantį T_{det}/T_{ID} santykio koeficientą, kuris šiuo atveju $K = 0,8365$.



4.6 pav. Temperatūrinių rodiklių T_{ID} ir T_{det} priklausomybė nuo variklio p_{me} ($p_{me} = 0,133-0,663$ MPa)

Fig. 4.6. The dependence of temperature indicators T_{ID} and T_{det} on engine load ($p_{me} = 0,133-0,663$ MPa)



4.7 pav. Temperatūrinių rodiklių T_{ID} ir T_{det} priklausomybės vertinimas

Fig. 4.7. The assessment of exhaust gases and part's surface reciprocal dependence

Ši atitinkamame temperatūriniame diapazone nustatyta T_{det} ir T_{ID} tiesinė priklausomybė leidžia m ir φ_z nustatymo procese panaudoti iteracijos metodą. Metodo panaudojimo pritaikymas analizuojamas kitame skyriaus punkte.

Reziumuojant, atlikus metodikos rengimo analizę, teigiama, jog metodiką galima realizuoti dviem būdais:

- ✓ realizuojant I pomodelį, kuriame T_{ID} nustatoma tiesioginių matavimų keliu;
- ✓ realizuojant II pomodelį, nesant tiesioginio T_{ID} matavimo, panaudojant santykinį dydį T_{IDi}/T_{ID0} .

4.4. Praktinis metodikos pritaikymas remiantis atliktų bei kitų tyrėjų eksperimentiniais duomenimis

Analizuojant mišinių panaudojimo galimybes TS būtina įvertinti jų įtaką DV DP, t. y. pirmiausia įvertinti DP parametrų pokytį bei DV parametrų reguliavimo būtinumą D pakeičiant mišiniais. Viena iš išeičių, siekiant sumažinti tyrimų laiko sąnaudas, išlaidas bei supaprastinti eksperimentiniuose tyrimuose naudojamų prietaisų inventorių, būtų panaudoti MM metodus.

Kaip žinia, DV parametrų MM rezultatų tikslumas stipriai priklauso nuo užduotų pradinių duomenų tikslumo, kurių vieni iš svarbiausių – indikatorinės diagramos ir/ar ŠICH duomenys. Siekiant kompleksiskai supaprastinti variklinius tyrimus bei palengvinti esamuosiuose DV vienių degalų pakeitimo kitais efekto vertinimo procesą, tikslinga panaudoti MM metodus, kuriuose panaudota supaprastinta pradinių duomenų nustatymo metodika, suderinta su atlikto eksperimento duomenimis.

Metodikos formavimo proceso praktinis pritaikymas apima keletą tikslų:

- suformuoti atliktais eksperimentiniais tyrimais pagrįstą ir suderintą 1,9 TDI Z1 DV matematinį modelį, kuris gali būti naudojamas skirtingų degalų panaudojimo efekto energetiniuose tyrimuose;
- suformuoti metodiką, kuri, esant ribotam eksperimentinių duomenų kiekiui, leistų MM būdu skaičiuoti DV darbo parametrų absoliučias reikšmes bei jų pasikeitimą DV dirbant dalinių apkrovų režimais.

Išvardintiems tikslams pasiekti sprendžiami šie uždaviniai:

- atsižvelgiant į eksperimentinius duomenis, suformuoti 1,9 TDI Z1 DV matematinį modelį, kuris leistų nustatyti preliminarius ŠICH parametrus;
- atlikti Bulaty ir Glanzman metodikos pakeitimą. Sprendžiant atvirkštinį uždavinį pagrįsti šį pakeitimą DV dirbant artimais nominaliai P_e ir dalinės apkrovos režimais;
- atlikti MM DV dirbant mišiniais bei palyginti su eksperimentiniais rezultatais;

- sudaryti temperatūrinių rodiklių palengvinto nustatymo metodiką;
- atvirkštinės pakeistos Bulaty ir Glanzman metodikos bei iteracijos būdu suformuoti palengvinto ŠICH parametrų nustatymo metodiką ir pagrįsti ją 1,9 TDI ir 8V396TC4 DV skaičiavimais.

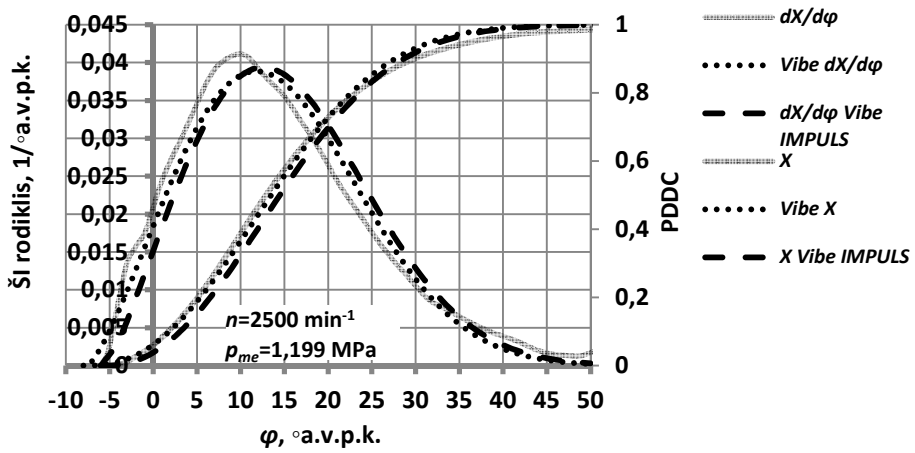
Šiame skyriuje pateikiama dviejų identišku 1,9 TDI 1Z DV darbo parametrų analizė ir skaičiavimai. VGTU TIF ATK DV stendo duomenų analizė apima ID temperatūrinių rodiklių nustatymą skirtingais būdais, kuriuo remiantis atliekami plačiai literatūroje sutinkami teoriniai ŠP per cilindrinę sienelę skaičiavimai. Likusi analizės dalis susijusi su bandymų rezultatais, kurie atlikti BME MI DEE. Tyrimo tikslams įvykdyti pasirinkti praktikoje žinomi metodai bei modeliavimo programos. Tyrimuose panaudoti AVL Boost Burn, kuris, panaudojant eksperimentinius duomenis, leidžia skaičiuoti ŠICH ir jos rodiklius. Taip pat, panaudota Sankt Peterburgo Centriniam DV mokslinių tyrimų institute (CNIDI) sukurta vienzoninio MM programa Impuls, kuri, remiantis ŠI rodikliais, leidžia skaičiuoti DV darbo parametrus.

4.4.1. 1,9 TDI variklio modelio sudarymas bei šilumos išsiskyrimo parametrų nustatymo metodikos pritaikymas

Pagal gautus eksperimentinius duomenis suformuojamas Impuls programos 1,9 TDI DV ($n = 2500 \text{ min}^{-1}$ $p_{me} = 1,199 \text{ MPa}$) darbinis pradinų duomenų blokas (D priedas P.D.1 lent.). Apatinė pradinio duomenų bloko dalis skirta Bulaty ir Glanzman metodikos (bei pakeistų metodikų) pritaikymui. Skaičiavimai atliekami su 3 skirtingomis m (šiuo atveju 1,2; 1,4; 1,6) reikšmėmis prie 3 skirtingų φ_z (šiuo atveju 50, 53, 56 °a.v.p.k.).

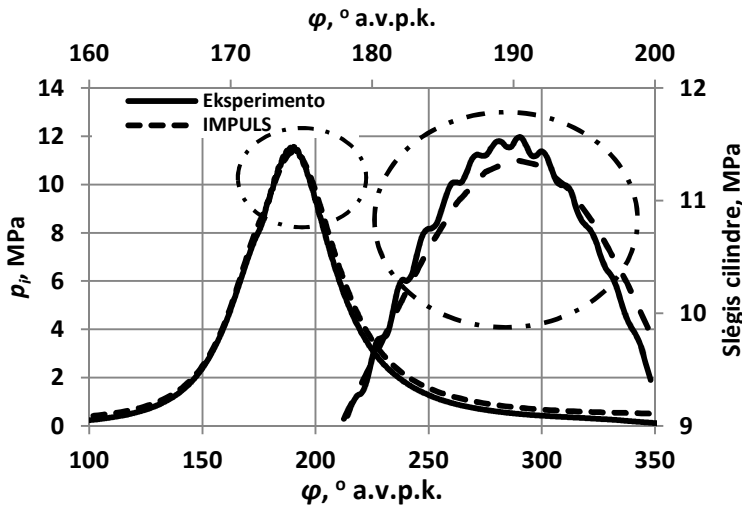
Suformavus 1,9 TDI DV matematinio modelio pradinų duomenų bloką bei atlikus jo paruošimą m ir φ_z nustatymo metodikos pritaikymui, atliekami variaciniai DV darbo proceso parametrų skaičiavimai, kurių rezultatai, siekiant nustatyti tiksliai m ir φ_z reikšmes, panaudojami Bulaty ir Glanzman metodikoje.

Panaudojant paruošto modelio variacinių skaičiavimų rezultatus, grafiškai nustatomos patikslintos m ir φ_z reikšmės ($m = 1,248$ ir $\varphi_z = 55,70$ °a.v.p.k.), jų grafinis nustatymas pateiktas D priedas P.D.8 paveiksle ($n = 2500 \text{ min}^{-1}$ $p_{me} = 1,199 \text{ MPa}$). Pagal šiuos nustatytus ŠICH parametrus, siekiant pagrįsti metodikos pasirinkimą, būtina palyginti apskaičiuotas ŠICH (4.8 pav.) bei sprendžiant atvirkštinį uždavinį, indikatorines diagramas (4.9 pav.).



4.8 pav. Burn (tikroji ir Vibe), Impuls (vibe) MM būdu gautų šilumos išsiskyrimo charakteristikos ir pilnutinio degalų degimo charakteristikos palyginimas ($n = 2500 \text{ min}^{-1}$, $p_{me} = 1,199 \text{ MPa}$)

Fig. 4.8. The comparison of heat release and total combustion characteristics calculated by Burn (real, Vibe) and Impuls (Vibe) ($n = 2500 \text{ min}^{-1}$, $p_{me} = 1,199 \text{ MPa}$)



4.9 pav. Eksperimento ir Impuls programa gautų indikatorinių diagramų palyginimas ($n = 2500 \text{ min}^{-1}$, $p_{me} = 1,199 \text{ MPa}$)

Fig. 4.9. The comparison of experimental and Impuls calculated indicated diagram ($n = 2500 \text{ min}^{-1}$, $p_{me} = 1,199 \text{ MPa}$)

Atlikus MM programa Impuls su nustatytais m ir φ_z , indikatorinės diagramos aukšto slėgio zona aprašoma santykinai aukštu tikslumu lyginant su eksperimentinės indikatorinės diagramos aukšto slėgio zona (4.9 pav.). Santykinai aukšto lygio tikslumas gautas maksimaliuose tiriamos apkrovos taškuose esant n režimams $n = 2000, n = 3000 \text{ min}^{-1}$ tiek indikatorinių diagramų, tiek ir ŠICH palyginimo atvejais.

Atlikus MM ir eksperimento ŠICH ir indikatorinės diagramos analizę, kuri parodo santykinai santykinai žemo lygio nesutapimą, galima teigti, jog 1,9 TDI DV maksimalios tiriamos apkrovos taške Impuls matematinis modelis yra suderintas su eksperimentiniais duomenimis ir leidžia, remiantis nustatytais ŠI parametrais, modeliuoti indikatorinę diagramą su priimtinu tikslumu. Tačiau, siekiant vykdyti MM tyrimus platesniame p_{me} diapazone, ne ką mažiau svarbesnis DV darbo parametrų suderinamumas dalinės apkrovos režimuose.

Reikia pažymėti, jog žemo slėgio zonoje MM ir eksperimento duomenų nesutapimas yra stipresnis, šis faktas gali būti paaiškintas, ne visiškai smulkiai išanalizuota oro aprūpinimo sistemos darbo charakteristika ir parametrais, o taip pat reikia nepamiršti, jog pasirinktas m ir φ_z metodas su priimtinu tikslumu leidžia atlikti atitinkamus skaičiavimo veiksmus aukšto slėgio zonoje.

Santykinai aukštu tikslumu pasižyminti ŠICH, kurios pagrindą sudaro pagal Bulaty ir Glanzman metodiką nustatyti m ir φ_z bei indikatorinė diagrama yra tvirtas pagrindas atlikti pirmąjį pakeitimo žingsnį, t. y. p_{mi} parametą pakeisti lengviau eksploatacijoje nustatomu p_{me} parametru.

4.4.2. Šilumos išsiskyrimo parametrų nustatymo metodikos pakeitimas: I etapas

Vykdamas eksperimentinius tyrimus bei atsižvelgiant į tiriamojo darbo tikslus, m ir φ_z nustatymo metodikos pakeitimo I etape panaudojamas p_{me} vietoje p_{mi} . Po pirmo pakeitimo nustatytos (D priedas P.D.9 pav.) artimos m ir φ_z reikšmės Bulaty ir Glanzman metodu nustatytoms reikšmėms: pagal p_{max}/p_{mi} ($m = 1,248$ ir $\varphi_z = 55,70$ °a.v.p.k); pagal p_{max}/p_{me} ($m = 1,240$ ir $\varphi_z = 55,85$ °a.v.p.k). Atlikus parametrų MM programa Impuls su skirtingomis m ir φ_z kombinacijomis, stebimas santykinai aukštas tikslumas (4.2 lent.).

Analizuojant DV darbo parametrų skaičiavimų, atliktų panaudojant nustatytas m ir φ_z (pagal p_{max}/p_{mi} ir p_{max}/p_{me}) reikšmes, rezultatus, stebimi artimi rezultatai, kurių maksimalus nuokrypis svyruoja $\pm 0,1$ % ribose. Esant santykinai nedidelei paklaidai, galima teigti, jog DV parametrai pagal pakeistą metodiką skaičiuojami priimtinu tikslumu. Tokio pobūdžio parametrų tikslumas maksimalios tiriamos apkrovos taške turi būti pagrįstas kituose n režimuose ir gauti rezultatai palyginti su eksperimento.

4.2 lentelė. Variklio darbo parametrų modeliavimo rezultatų (pagal skirtingas metodikas) palyginimas ($n = 2500 \text{ min}^{-1}$ $p_{me} = 1,199 \text{ MPa}$)

Table 4.2. The comparison of engine work parameter simulation results (according different methodology, $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ $p_{me} = 1,199 \text{ MPa}$)

Metodas	DV darbo parametrai						
	p_{max} , MPa	p_{me} , MPa	P_e , kW	b_e , g/kWh	η_e	T_{TM} , °C	λ
Pagal p_{mi}	11,559	1,1996	47,361	220,62	0,3816	887,18	1,4765
Pagal p_{me}	11,571	1,1995	47,36	220,6	0,3815	887,13	1,4766
Paklaida, %	-0,104	0,008	0,002	0,009	0,013	0,006	-0,007

MM būdu gautų DV darbo parametrų ($p_{me \text{ max}}$ taške) paklaida svyruoja $\pm 0,4 \%$ ribose lyginant su eksperimentiniais duomenimis (D priedas P.D.2 lent.). Dėl šios priežasties būtų galima teigti, jog 1,9 TDI DV maksimalios tiriamos apkrovos taškuose matematinis modelis yra suderintas ir galima atlikti tolimesnius skaičiavimus bei pasikliauti gautais rezultatais.

Dėl santykinai aukštu tikslumu pasižyminčių MM rezultatų $p_{me \text{ max}}$ taške, I etapo pakeitimas vertinamas kaip sėkmingas ir gali būti analogas Bulaty ir Glanzman metodikai bei sekančiuose pakeitimo ir skaičiavimų etapuose rezultatų palyginime priimama (ir pagal ją gauti MM rezultatai) kaip etaloninė.

Ne mažiau svarbus DV darbo parametrų nustatymas MM būdu, jam dirbant dalinės apkrovos režimais. Atsižvelgiant į Impuls programos suteikiamas galimybes, tikslinga atlikti skaičiuojamųjų parametrų pokytį DV dirbant dalinės apkrovos režimais ir palyginti juos su eksperimentiniais duomenimis, tuo pačiu įvertinti programos galimybes modeliuoti DV energetinius parametrus esant dalinių apkrovos ŠICH aprašymui viena Vibe funkcija.

4.4.3. Darbo parametrų modeliavimas varikliui dirbant dalinės apkrovos režimais

MM programa Impuls, kaip ir anksčiau buvo minėta, leidžia modeliuoti DV, dirbančio dalinės apkrovos režimais, darbo parametrus. Dalinių apkrovų režimuose MM atliekamas matematinį modelį suderinus su eksperimentiniais duomenimis (maksimalios tiriamos apkrovos atitinkamame n režime) priimtinių paklaidų ribose. MM dalinės apkrovos režimuose rezultatų adekvatumas pagrindžiamas modeliuojant DV darbo parametrus skirtinguose p_{me} taškuose kiekvienam n režimui atskirai.

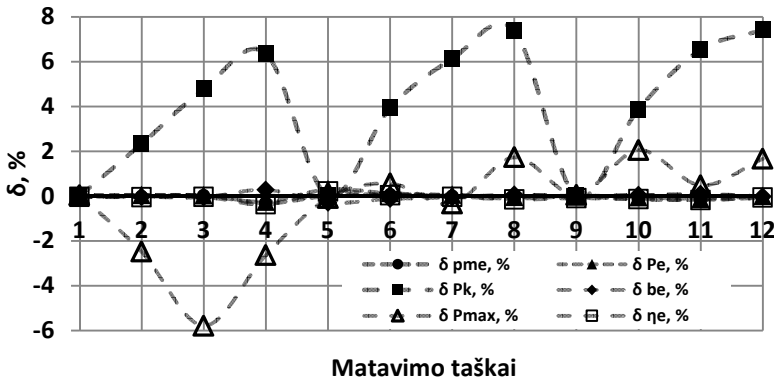
Dalinių apkrovų režimų (kiekvienam n režimui atskirai) MM realizuojamas programoje Impuls keičiant (pagal eksperimento duomenis) ciklinę degalų porciją, tenkančią 1 cilindriui. 1,9 TDI DV yra su EVS, tokiu atveju kintant

apkrovai reguliuojama eilė parametų, vienas iš svarbiausių – degalų įpurškimo kampas, kurio eksperimentinės reikšmės pateiktos žemiau (4.3 lent.).

4.3 lentelė. Dalinių variklio apkrovų režimų modeliavime keičiamų parametų reikšmės
Table 4.3. The changing parameters in the engine part-load simulation process

n, min^{-1}	Matav. taškas	p_{me}, MPa	$Q_{cikl.}, \text{kg/cyl.}$	$\varphi_{deg.ip.k.}, \text{°a.v.p.k}$
2000	1 (maks. tiriam. p_{me})	1,1426	0,00003291667	-7,3
	2	0,8545	0,00002483333	-2,5
	3	0,5696	0,00001716667	-1,4
	4	0,2870	0,00001008333	0
2500	5 (maks. tiriam. p_{me})	1,1997	0,00003483333	-9,9
	6	0,9043	0,00002620000	-4,5
	7	0,6038	0,00001850000	-2,1
	8	0,3002	0,00001103333	-0,3
3000	9 (maks. tiriam. p_{me})	1,0712	0,00003122222	-10,55
	10	0,7969	0,00002416667	-5,65
	11	0,5302	0,00001730556	-4,25
	12	0,2631	0,00001077778	-2,5

Pagal eksperimentinius duomenis sutvarkius pradinis Impuls duomenų blokus toliau atliekamas MM, kurio 12 matavimo taškų (atitinkamai 1–4 – $n = 2000 \text{ min}^{-1}$, 5–8 – $n = 2500 \text{ min}^{-1}$, 9–12 – $n = 3000 \text{ min}^{-1}$) palyginimo su eksperimentiniais duomenimis grafinė išraiška pateikta 4.10 paveiksle.



4.10 pav. Dalinių apkrovų režimų matematinio modeliavimo (m ir φ_z nustatyti pagal p_{max} ir p_{me}) rezultatų palyginimo su eksperimentiniais duomenimis grafinė išraiška
Fig. 4.10. The graphical expression of part-load regime simulation (m and φ_z) determined according p_{max} and p_{me}) comparison with experimental data

Su eksperimentiniais duomenimis suderintas Impuls modelis su m ir φ_z , nustatytais pagal p_{max}/p_{me} , DV daliniuose apkrovų režimuose (dirbant n režimais $n = 2000, 2500, 3000 \text{ min}^{-1}$) darbo parametrų MM leidžia atlikti:

- $p_{me}, P_e, b_e, \eta_e - \pm 0,4 \%$ paklaidų ribose. Aukštas tikslumas pasiekiamas nežymiai koreguojant trinties nuostolius;
- p_{max} – iki 5,8 % paklaidų ribose, dominuojanti paklaidų riba $\pm 3 \%$;
- p_K – iki 7,5 % paklaidų ribose. Tokia, santykinai aukšta, paklaida dalinių DV apkrovų režimuose, atliekant MM, buvo tikėtina. Šią paklaidą sąlygojo pradinių pripūtimo parametrų nurodymo sudėtingumas. Tokie parametrai, kaip įsiurbimo organų bei praeinamojo skerspjuvio plotas, daliniuose režimuose nekoreguojami TK NVK ir kt.

4.4.4. Šilumos išsiskyrimo parametrų nustatymo metodikos pakeitimas: II etapas

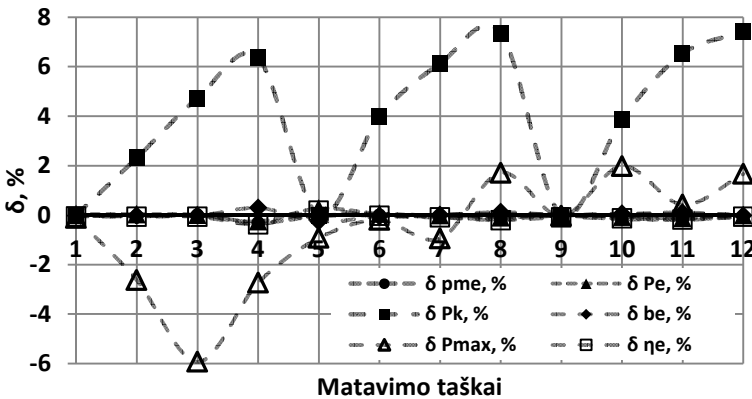
II etapo pakeitimo pagrindimui ir adekvatumo įrodymui n režimui ($n = 2000, 2500, 3000 \text{ min}^{-1}$) maksimalios tiriamos apkrovos taškuose atliekamas m ir φ_z nustatymas pagal ID temperatūros po turbinos (TTM) ir p_{me} duomenis. Grafiškai nustatytų pagal TTM/p_{me} ir p_{max}/p_{me} parametrų m ir φ_z reikšmės pateiktos 4.4 lentelėje.

4.4 lentelė. Grafiškai nustatytų pagal TTM/p_{me} ir p_{max}/p_{me} parametrų m ir φ_z reikšmės
Table 4.4. m and φ_z determined by graphical method according TTM/p_{me} and p_{max}/p_{me}

n režimas	$n = 2000 \text{ min}^{-1}$		$n = 2500 \text{ min}^{-1}$		$n = 3000 \text{ min}^{-1}$	
Nustatymo metodas	m	φ_z	m	φ_z	m	φ_z
p_{max} ir p_{me}	1,335	46,2	1,24	55,85	1,23	56,45
TTM ir p_{me}	1,335	46,1	1,212	56,0	1,227	56,47
$\delta, \%$	0	-0,216	-2,258	0,269	-0,244	0,035

Skirtingais būdais nustatytų m ir φ_z parametrų reikšmės svyruoja $-0,25-0,3 \%$ ribose, išsiskiria tik $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ režimas, kurio m paklaida siekia $\sim 2 \%$. Ši, santykinai ryški paklaida sąlygoja p_{max} , kuris yra jautrus m parametro pokyčiui, apie 1 % paklaidą (D priedas P.D.10 pav.).

Atlikus MM su m ir φ_z , nustatytais pagal TTM/p_{me} , galima teigti, jog DV darbo parametrų MM rezultatų tikslumas maksimalios apkrovos taškuose yra aukštas, o paklaidos svyruoja 1 % ribose lyginant su eksperimentiniais duomenimis. Dalinių apkrovų režimuose paklaidų skaičiavimo reikšmės yra artimos m ir φ_z nustatymo p_{max}/p_{me} metodikos rezultatams (4.11 pav.). Šis faktas pagrindžia II etapo pakeistos (p_{max} pakeitimas į TTM) metodikos panaudojimo adekvatumą.



4.11 pav. Dalinių apkrovų režimų modeliavimo (m ir φ_z nustatyti pagal TTM ir p_{me}) rezultatų palyginimo su eksperimentiniais duomenimis grafinė išraiška
Fig. 4.11. The graphical expression of part-load regimes simulation (m and φ_z determined according TTM and p_{me}) comparison with experimental data

Atlikto MM dalinių apkrovų režimuose 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} .

Su eksperimentiniais duomenimis suderintas Impuls matematinis modelis su m ir φ_z , nustatytais pagal TTM/ p_{me} , DV dalinių apkrovų režimuose ($n = 2000, 2500, 3000 \text{ min}^{-1}$) darbo parametrų MM leidžia atlikti:

* $p_{me}, P_e, b_e, \eta_e - \pm 0,35 \%$ paklaidų ribose. Aukštas tikslumas pasiekiamas nežymiai koreguojant trinties nuostolius;

* p_{max} – iki 6,0 % paklaidų ribose, dominuojanti paklaidų riba $\pm 2-2,5 \%$;

* p_K – iki 7,8 % paklaidų ribose. Tokia tikėtina santykinai aukšta paklaida dalinės DV apkrovos režimuose, atliekant MM, atsirado dėl tokių pat priežasčių, kurios nurodytos skaičiavimų pagal p_{max}/p_{me} metodiką rezultatų apibendrinime.

Atsižvelgiant į šiame poskyryje atliktą m ir φ_z nustatymo analizę ir MM rezultatų adekvatumą eksperimentiniams rezultatams, galima teigti, jog pasirinkta dviem etapais pakeista metodika priimtiniu tikslumu leidžia atlikti DV, dirbančio D, darbo proceso parametrų MM. Svarbu paminėti, jog tinkamai nustatčius ŠI parametrų m ir φ_z reikšmes ir žinant eksperimentinius DV duomenis galima modeliuoti vieno iš svarbiausių parametrų – slėgio cilindre absoliučias reikšmes prie norimo a.v.p.k.

Kitas svarbus metodikos pagrindimo aspektas – pritaikymas DV, dirbančio skirtingais degalais MM procese, tai leistų supaprastinti charakteringo tipo DV tyrimus, susijusius su mišinių panaudojimu, palengvintų pokyčio prognozavimą.

4.4.5. Šilumos išsiskyrimo parametrų nustatymas dyzeliniam varikliui dirbant mišiniais

Siekiant pagrįsti pasirinktos ir pakeistos metodikos universalumą skirtingų degalų atžvilgiu, atliekami analogiški veiksmai kaip ir DV, dirbančio D duomenų apdorojimo atveju. Tačiau dėl svarių priežasčių priimama keletas veiksnių, pagreitinančių metodikos pagrindimą DV dirbant mišiniais:

- pakeistos m ir φ_z metodikos (TTM/p_{me}) panaudojimas duoda adekvačius rezultatus nepakeistos metodikos (p_{max}/p_{mi}) rezultatams DV dirbant skirtingais degalais;
- dėl didelio duomenų kiekio pasirenkamas vienas n režimas, kuris charakterizuojamas kaip $M_{t,max} n$ režimu;
- skirtingų fizikinių ir cheminių savybių degalų degimo DV cilindre proceso metu ŠI (nominalios arba artimos jai galios režimuose) gali būti aprašyta pagal vienos Vibe funkcijos metodiką.

Analizuojami DV darbo proceso parametrai jam dirbant įprastu šiame darbe mišiniu B30 (RME) ir, siekiant praplėsti tyrimų profilį, mišiniu su M priedu B30 (RME+10M). Metodikos adekvatumo pagrindimas vykdomas $M_{t,max} n$ režime, tai leidžia santykinai aukštu tikslumu tikrąją ŠICH aprašyti viena Vibe funkcija (D priedas P.D.11, P.D.12 pav.).

Burn nustatomi preliminarūs ŠI parametrai, kurie bus naudojami orientaciniuose (pirminiuose) skaičiavimuose programa Impuls (4.5 lent.).

4.5 lentelė. Modeliavimo programa Burn apskaičiuotų Vibe šilumos išsiskyrimo parametrų reikšmės

Table 4.5. The values of calculated Vibe heat release parameters using Burn

Parametras	DV darbo režimas	
	B30 (RME)	B30 (RME+10M)
	$n = 2500 \text{ min}^{-1}; p_{me} = 1,143 \text{ MPa}$	$n = 2500 \text{ min}^{-1}; p_{me} = 1,199 \text{ MPa}$
$\varphi_1, ^\circ\text{a.v.p.k.}$	-7,53	-7,82
$\varphi_z, ^\circ\text{a.v.p.k.}$	53,7	52,7
m	1,39	1,42

Toliau, pagal nustatytą algoritmą vykdoma MM programa Impuls su Bulaty ir Glanzman metodikos papildymu, siekiant nustatyti patikslintus ŠI parametrus m ir φ_z , kurie bus naudojami tolimesniuose MM programa Impuls etapuose.

Panaudojami maksimalios tiriamos apkrovos režimo ($n = 2500 \text{ min}^{-1}$) parametrai, su kuriais sudaromi programos Impuls pradinių duomenų blokai,

kurie paremti B30 (RME) ir B30 (RME+10M) mišinių eksperimentinių bandymų rezultatais, ir atliekami patikslinti m ir φ_z skaičiavimai.

Atlikus patikslintą m ir φ_z reikšmių nustatymą (D priedas P.D.13, P.D.14 pav.) pastebėta, jog B30 (RME) atveju, m ir φ_z reikšmių persiskirstymas yra santykinai nedidelis, tačiau DV, dirbančio B30 (RME+10M) matematinis modelis (atsižvelgiant į eksperimentinius duomenis) pareikalavo ryškesnio φ_z parametro persiskirstymo, kuris tiesiogiai daro įtaką p_{max} pokyčiui.

Atlikto DV DP pagrindinių parametru MM rezultatai parodė, jog nukrypimas neviršijo 1 % ribų (B30 (RME) ir B30 (RME+10M)), tačiau p_{max} nukrypimas siekė apie 2,8 % B30 (RME+10M) atveju (D priedas P.D.3 lent.).

DV, dirbančio B30 (RME) ŠICH, apskaičiuota Impuls praktiškai identiška Burn skaičiavimams (D priedas P.D.15 pav.). Tačiau B30 (RME+10M) atveju, ŠICH Vibe funkcijos maksimume skiriasi (Impuls atveju išauga) ~9 % (D priedas P.D.16 pav.), ši reiškinį galima paaiškinti matematinio modelio pareikalautos trumpesnės φ_z , o taip pat dėl p_{max} ~2,8 % paklaidos.

DV, dirbančio B30 (RME+10), ŠICH duomenys (nuokrypis ~9 %) gali būti vertinami kaip nepatikimi. Tačiau pagal ŠICH modeliuojant slėgio cilindre duomenis, jų nuokrypis, didžiausių svyravimų diapazone (aukšto slėgio zonoje) svyruoja iki ~3,5 % (D priedas P.D.17 pav.). Slėgio cilindre nustatymo jutiklis ir a.v.p.k. nustatymo prietaisas, kiekvienas iš jų duoda 1 % paklaidą, atsižvelgiant į tai, ~3,5 % nuokrypis DV tyrimų praktikoje yra priimtinas.

DV, dirbančio B30 (RME) slėgio cilindre MM ir eksperimento duomenų svyravimas nėra stiprus (D priedas P.D.18 pav.), aukšto slėgio zonoje siekia iki ~1,4 %. Žemo slėgio zonoje matomas stipresnis nesutapimas, kuris paaiškinamas analogiškai kaip ir buvo paaiškintas DV dirbančio D atveju.

Pagal nustatytą algoritmą, toliau vykdomas dalinių apkrovų režimų MM su atitinkamais pradinio duomenų bloko pakeitimais (D priedas P.D.4 lent.).

Atlikus MM gauti rezultatai palyginami su eksperimentiniais DV duomenimis (p_K , p_{me} , P_e , η_e , b_e). DV dirbančio mišiniais, dalinių apkrovų režimų MM programa leidžia atlikti parametru skaičiavimus su santykinai aukštu tikslumu:

* b_e , p_{me} , P_e , η_e – \pm ~2 % paklaidų ribose. Aukštas tikslumas pasiekiamas nežymiai koreguojant trinties nuostolius;

* p_{max} – iki -4,0 % paklaidų ribose, dominuojanti paklaidų riba \pm 1–1,7 %;

* p_K – iki 5,3 % paklaidų ribose. Tokia, tikėtina santykinai aukšta paklaida dalinės DV apkrovos režimuose, atliekant MM, atsirado dėl anksčiau minėtų pripūtimo sistemos analizės išorinio apribojimo veiksnių.

Sudarytas 1,9 TDI DV, dirbančio dalinės apkrovos režimais, matematinis modelis, leidžia aukštu tikslumu atlikti DV darbo proceso parametru, ŠICH ir indikatorinės diagramos MM. Tačiau dėl pritaikytos ŠI parametru nustatymo metodikos ypatybių bei tokių veiksnių, kaip preciziško pripūtimo sistemos

aprašymo pradiniam MM programos duomenų bloke poreikio ir kt. bei šių veiksmų įtakos ŠI parametrų persiskirstyme eksperimento ir MM rezultatų derinimo procese, vykdant atvirkštinį skaičiavimą (iš ŠICh į indikatorinę diagramą) atsiranda pastebimi nuokrypiai žemo slėgio zonose. Tačiau tai netrukdo priimtina tikslumu atlikti DV darbo parametrų ir charakteristikų MM. Detaliai analizuojant DV ir jo sistemų geometrinius duomenis, papildomus darbo duomenis, turint gamyklos techninę dokumentaciją ar jos fragmentus, būtų galima išvengti šių slėgio cilindre svyravimų bei sumažinti DV darbo parametrų paklaidas.

4.5. Šilumos išsiskyrimo parametrų nustatymas iteracijos metodu

Atlikus m ir φ_z nustatymo analizę pagal 2 etapais pakeistą metodiką, kyla klausimas dėl tolimesnių šios metodikos supaprastinimo plėtros galimybių. Šio klausimo sprendimui siūlomas iteracinis būdas, kuris paremtas po eksperimentinių duomenų apdorojimo suformuota m ir φ_z kombinacijos kitimo trajektorijos grafine analize bei skirtingų DV darbo režimų santykinų temperatūrinių rodiklių pritaikymu.

Tolimesnio supaprastinimo analizė ir pagrindimas reikalauja pasirinktų n režimo nominalaus ar artimo jam p_{me} taško (atitinkamame n režime) bei dalinės apkrovos režimo taško duomenų. Laisvai pasirenkamas (D priedas P.D.19 pav.) vienas 1,9 TDI DV n režimas ($n = 2000 \text{ min}^{-1}$) bei du p_{me} taškai. Maksimalios apkrovos taškui ($n = 2000 \text{ min}^{-1}$ režimo) prilyginamas maksimalaus bandomojo $M_t = 172,4 \text{ Nm}$ taškas, kuriame $P_e = 36,1 \text{ kW}$, $p_{me} = 1,1426 \text{ MPa}$, jis vadinamas 100 % apkrovos. Dalinės apkrovos taškui prilyginamas apytiksliai 50 % mažesnio $M_t = 85,93 \text{ Nm}$ taškas, kuriame $P_e = 17,99 \text{ kW}$, $p_{me} = 0,5695 \text{ MPa}$, jis vadinamas 50 % p_{me} .

Pradiniam etape būtina pagal eksperimentinius duomenis suformuoti DV, dirbančio pasirinktu režimu, matematinį modelį ir pagal pakeistą metodiką nustatyti parametrus m ir φ_z . Po to, šiuos parametrus, naudoti kaip etaloninius ir lyginti su pasiūlytu būdu (iteracija) nustatytais m ir φ_z .

Analizėje ir skaičiavimuose figūruojantys parametrai su indeksu „0“ rodo, jog tai 100 % režimo parametras, indeksas „i“ indikuoja 50 %. Siūlomas būdas, kaip ir ankstesnysis, reikalauja p_{me} nustatymo, kuris, kaip ir buvo minėta, šiais laikais gali būti nesudėtingai nustatomas.

m ir φ_z nustatymo iteraciniu būdu procese panaudojama taip vadinama dviem etapais pakeista atvirkštinė m ir φ_z nustatymo metodika t. y. vietoje TTM/p_{me} panaudojama p_{me}/TTM metodika. O taip pat siūlomas būdas apima suformuotos parametrų m ir φ_z kitimo trajektorijos bei m ir φ_z skirtingų apkrovų

(DV) režimuose santykio nustatymo pagal Woschni ir Anisits analizę. Pakeistoje metodikoje m ir φ_z pokyčio trajektorija aprašoma 3 dimensijomis: m , φ_z ir T_{ID} (šiuo atveju TTM).

Šiame darbo etape pasiūlytos m ir φ_z nustatymo supaprastinimo metodikos (būdo) pagrindimui taip pat analizuojami ir kito, universalios paskirties (ne kelio paskirties TP, elektros energijos gamybos, kt.), DV – MTU 8V396TC4 (D priedas P.D.5 lent.) matematinio modelio duomenys, kurie priklauso CNIDI tyrimų archyvui. Pagal pakeistą (TTM/p_{me}) Bulaty ir Glanzman metodiką nustatomi etaloniniai parametrai: 1,9 TDI DV – $m_0 \varphi_{z0}$ (1,25 ir 47,5°) ir $m_i \varphi_{zi}$ (1,135 ir 37,95°), 8V396TC4 – $m_0 \varphi_{z0}$ (0,51 ir 94,3°) ir $m_i \varphi_{zi}$ (0,37 ir 83,4°).

Šis būdas reikalauja tikslios ir $m_i \varphi_{zi}$ kitimo trajektorijos nustatymo panaudojant p_{me} vietoje TTM (atvirkštinė pakeista metodika) ir tikslių m_i/m_0 (K_{mi}), $\varphi_{zi}/\varphi_{z0}$ ($K_{\varphi i}$) skaičiavimų. Reikia pažymėti, jog tiek TTM tiek ir p_{me} panaudojimo kaip pirmojo kriterijaus atvejais gautos artimos m ir φ_z reikšmės (atitinkamai: 1,9 TDI DV pagal TTM „0“ režimo 1,25 ir 47,5°, „i“ režimo 1,135 ir 37,95°; pagal p_{me} „0“ režimo 1,23 ir 48,0°, „i“ režimo 1,17 ir 37,4°; 8V396TC4 DV pagal TTM „0“ režimo 0,51 ir 94,3°, „i“ režimo 0,37 ir 83,4°; pagal p_{me} „0“ režimo 0,507 ir 94,8°, „i“ režimo 0,38 ir 82,8°).

Remiantis ŠP per sienelę analizės išvada, jog atitinkamame temperatūrų diapazone detalės (ID vamzdžio) temperatūra turi tiesinę priklausomybę nuo ID temperatūros, galima teigti, kad matuojamos detalės paviršiaus temperatūros santykinis (dirbant „0“ ir „i“ režimais) pokytis bus identiškas ID temperatūros santykiniam pokyčiui prieš turbiną (T_{ID}) ir po jos (TTM) (4.12 formulė). Tokiu atveju, panaudojant DV, dirbančio skirtingos apkrovos režimais ribotą eksperimentinių duomenų kiekį bei pagal juos nustatytus koeficientus K_T , K_{mi} , $K_{\varphi i}$ (4.13, 4.14, 4.15 formulės) galima panaudoti iteracijos metodą siekiant nustatyti nežinomą m , φ_z ir TTM kombinaciją.

$$\frac{T_{IDi}}{T_{ID0}} = \frac{T_{TTMi}}{T_{TTM0}} = \frac{T_{deti}}{T_{det0}} = K_T ; \quad (4.13)$$

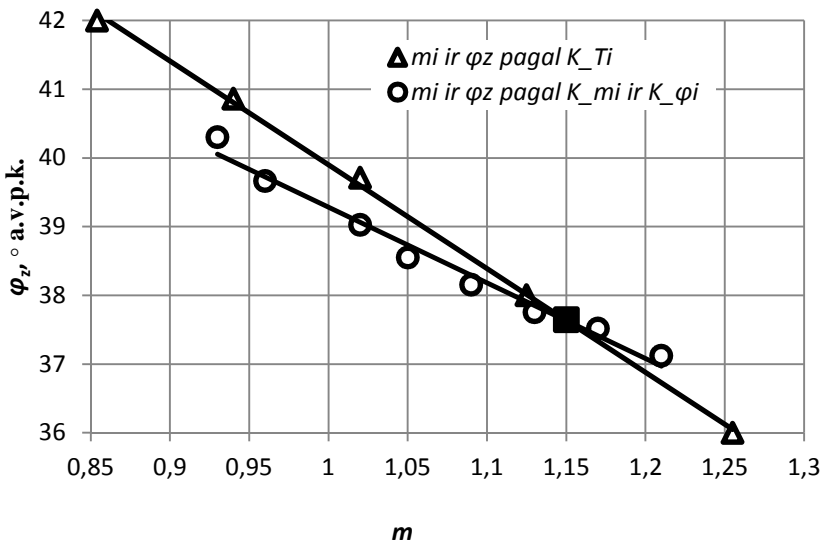
$$\frac{m_i}{m_0} = K_{mi} = \left(\frac{\varphi_{\tau i0}}{\varphi_{\tau i}} \right)^{a2} \cdot \frac{P_{Ki} \cdot T_0}{P_{K0} \cdot T_i} ; \quad (4.14)$$

$$\frac{\varphi_{zi}}{\varphi_{z0}} = K_{\varphi i} = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_i} \right)^{a3} ; \quad (4.15)$$

$$\lambda = \frac{V_h \times i \times \frac{P_K \times 10^5}{R_{oro} \times T_{oro}} \times \eta_v \times \frac{n \times 60}{\tau}}{L_0 \times G_f} . \quad (4.16)$$

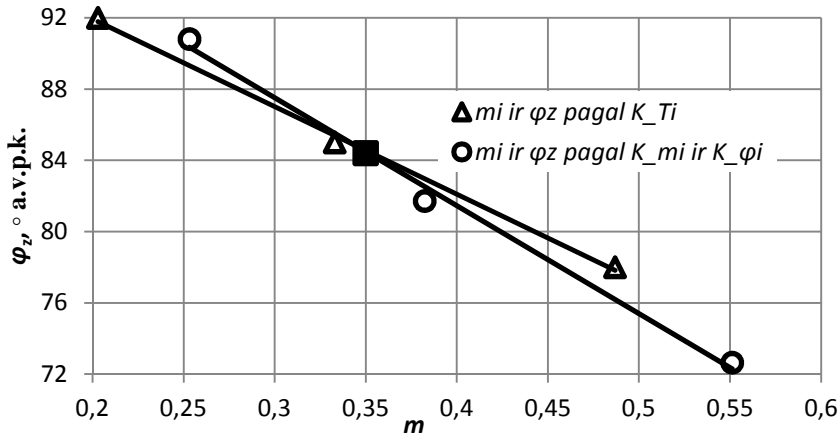
Grafinė šio metodo dalis pateikta prieduose (D priedas P.D.20, P.D.21 pav.). Pagal nustatytą K_T „0“ ir „i“ režimų trajektorijomis judama m didėjimo link, tuo pačiu metu analogiškas judėjimas „i“ režime vykdomas trajektorija pagal K_{mi} ir $K_{\phi i}$. Atitinkamame m_i ir ϕ_{zi} diapazone vyksta šių trajektorijų taškų suartėjimas, po to seka sutapimas ir prasideda nutolimas. Kitaip tariant, trajektorijų susikirtimo taškas duoda tikrąją m_i ir ϕ_{zi} kombinaciją, pagal kurią, panaudojant jau nustatytus K_{mi} ir $K_{\phi i}$, galima nustatyti tikrąją m_0 ir ϕ_{z0} kombinaciją. D priedas P.D.6 lentelėje pateikti 1,9 TDI skaičiavimo rezultatai.

Patikslintai, iteracijos būdu gautai, R_i taško reikšmei nustatyti 1,9 TDI DV atveju braižomas trajektorijų susikirtimo grafikas. Šis nustatytas R_i taškas duoda $m_i = 1,15$ ir $\phi_{zi} = 37,65^\circ$ kombinaciją (4.12 pav.), kuri savo ruožtu bendroje schemoje duoda $TTM_i = 681,87$ °K. Nustačius, jog tikroji m ir ϕ_z kombinacija gaunama trajektorijų, nustatytų pagal Woschni ir Anisits bei atvirkštinę pakeistą metodikas, susikirtimo taške, DV 8V396TC4 atveju nedaromi išsamūs priartėjimo skaičiavimai, ieškomas trajektorijų susikirtimo taškas $m_i = 0,35$ ir $\phi_{zi} = 84,4^\circ$ (4.13 pav.), bendroje schemoje (D priedas P.D.22, P.D.23 pav.) duodantis $TTM_i = 682,8$ °K.



4.12 pav. 1,9 TDI variklio m_i ir ϕ_{zi} parametų kombinacijos nustatymas trajektorijų susikirtimo metodu

Fig. 4.12. The evaluation of m_i and ϕ_{zi} parameters combination using trajectory crossing method (1.9 TDI engine)



4.13. pav. 8V396TC4 variklio m_i ir φ_{z_i} parametų kombinacijos nustatymas trajektorijų susikirtimo metodu

Fig. 4.13. The evaluation of m_i and φ_{z_i} parameters combination using trajectory crossing method (8V396TC4 engine)

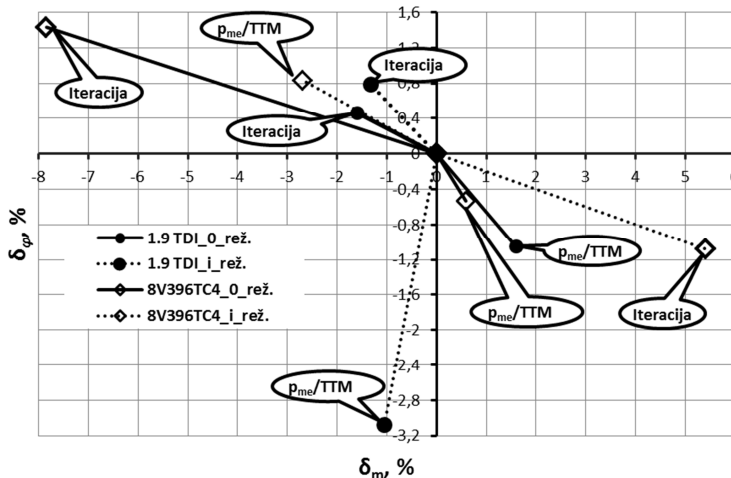
Pagal nustatytus koeficientus K_{mi} , K_{φ_i} ir K_T (1,9 TDI – D priedas P.D.6 lentelė, 8V396TC4 – $K_{mi} = 0,63$, $K_{\varphi_i} = 0,908$ ir $K_T = 0,902$) apskaičiuojamos „0“ režimo R_0 taško koordinatės (m_0 , φ_{z0} , TTM_0) bendroje schemoje 1,9 TDI – $m_0 = 1,27$ ir $\varphi_{z0} = 47,28^\circ$, ši kombinacija duoda $TTM_0 = 806,4$ °K, atitinkamai DV 8V396TC4 – $m_0 = 0,55$ ir $\varphi_{z0} = 92,95^\circ$, 759,8 °K (4.6 lent.).

4.6 lentelė. Parametų m , φ_z , TTM reikšmės DV 1,9 TDI ir 8V396TC4 dirbant skirtingais apkrovų režimais („0“ ir „i“)

Table 4.6. The values of parameters m , φ_z , TTM while 1.9 TDI and 8V396TC4 running on different load regimes („0“, „i“)

Metodas	1,9 TDI						8V396TC4					
	TTM/ p_{me}		p_{me} /TTM		Iteracija		TTM/ p_{me}		p_{me} /TTM		Iteracija	
Parametras	Režimas											
	„0“	„i“	„0“	„i“	„0“	„i“	„0“	„i“	„0“	„i“	„0“	„i“
m	1,25	1,135	1,23	1,17	1,27	1,15	0,51	0,37	0,507	0,38	0,55	0,35
φ_z , °a.v.p.k.	47,5	37,95	48,0	37,4	47,28	37,65	94,3	83,5	94,8	82,8	92,95	84,4
TTM, °K	806	682	806	682	806,4	681,9	757	683	757	683	759,8	682,8

Pasinaudojant skirtingomis metodikomis nustatytų m ir φ_z paklaidų, lyginant su etaloniškėmis pagal TTM/p_{me} (4.14 pav.).



4.14 pav. Nustatytų iteracijos ir atvirkštinės pakeistos metodikos metodu m , ir φ_z parametų palyginimas su etaloniniais (TTM/p_{me})

Fig. 4.14. The comparison of m and φ_z parameters evaluated using reverse modified and iteration methods with reference (TTM/p_{me})

Paklaidos svyruoja diapazone: $\delta_m = -7,8-5,5 \%$, $\delta_{\varphi} = -3,2-0,8 \%$; svarbu įvertinti šių paklaidų įtaką pagrindiniams 1,9 TDI ir 8V396TC4 DV darbo parametrams bei palyginti juos su etaloniniais (TTM/p_{me}) bei eksperimentiniais.

Darbo parametų santykinių paklaidų reikšmės dėl apsunkinto grafinio atvaizdavimo pateiktos prieduose (D priedas P.D.7 lent.). Maksimali 1,9 TDI ir 8V396TC4 DV nustatytų pagrindinių darbo parametų paklaida, dirbant pasirinktais darbo režimais, svyruoja $-1,8-1,5 \%$ diapazone. Toks žemo lygio DV pagrindinių parametų nuokrypis (ypač p_{max}) rodo, jog panaudotos skirtingos pasiūlytos m ir φ_z nustatymo metodikos duoda santykinai aukštą tikslumo lygį, o MM būdu gautaisiais rezultatais galima pasikliauti vykdant kitus tyrimų etapus.

Atlikus šią iteracijos metodo pritaikymo m ir φ_z parametų nustatymo supaprastinimui analizę prieinama išvados, jog m ir φ_z parametų nustatymui T_{ID} , TTM ar T_{det} nėra būtinos, tačiau bet kurio iš temperatūrinių dydžių panaudojimas (su atitinkamu apdorojimu) leidžia padidinti rezultatų tikslumą. Atsižvelgiant į tai, pakanka, panaudojant su eksperimentiniais duomenimis suderintą pasirinkto DV matematinį modelį, sudaryti m ir φ_z kombinacijos pokyčio trajektoriją pagal atvirkštinę pakeistą m ir φ_z nustatymo metodiką bei pagal eksperimentinius duomenis apskaičiuotą m ir φ_z santykinį pasikeitimą (pagal Woschni ir Anisits)

DV dirbant skirtingais režimais. Tačiau reikia skirti itin didelį dėmesį m ir φ_z santykinio pasikeitimo nustatymo tikslumui.

4.6. Ketvirto skyriaus išvados

1. Atliktas Bulaty ir Glanzman metodikos pritaikymas ir pakeitimas, lyginant su pagrindiniais eksperimentiniais DV, dirbančio D, darbo parametrais, duoda santykinai aukštą tikslumą: p_{me} , P_e , b_e , η_e – $\pm 0,35$ % paklaidų ribose. p_{max} – iki 6,0 % paklaidų ribose, dominuojančios paklaidų ribos $\pm 2-2,5$ %; p_K – iki 7,8 % paklaidų ribose.
2. DV dirbančio mišiniais, pasirinktų p_{me} režimų MM leidžia atlikti parametru skaičiavimus: b_e , p_{me} , P_e , η_e – $\pm \sim 2,0$ % paklaidų ribose; p_{max} – iki $-4,0$ % paklaidų ribose, dominuojančios paklaidų ribos $\pm 1-1,7$ %; p_K – iki 5,3 % paklaidų ribose.
3. Atitinkamame temperatūriniame diapazone nustatyta ir pagrįsta T_{det} nuo T_{ID} tiesinė priklausomybė $T_{det} = f(T_{ID})$, leidžianti m ir φ_z nustatymo procese panaudoti iteracijos metodą.
4. Panaudojus atvirkštinę pakeistą m ir φ_z parametru nustatymo, Woschni ir Anisits metodikas bei iteraciją, suformuota ir pagrįsta palengvinto ŠICH parametru nustatymo metodika 1,9 TDI ir 8V396TC4 DV MM atvejais.

Bendrosios išvados

1. Atlikti I ir II kartos 2 ir 3 komponentų RRME ir A mišiniais dirbančių DV (automobilių Audi 1,9 TDI 1Z [$n = 2000\text{--}3500 \text{ min}^{-1}$, $p_{me} = 0,236\text{--}1,199 \text{ MPa}$] ir laivo paskirties Valmet 320 DMG [$n = 2000\text{--}3500 \text{ min}^{-1}$, $P_e = 0\text{--}0,85 P_{e \text{ nom}}$]) energetinių ir aplinkosauginių darbo rodiklių palyginamieji tyrimai rodo, jog ištirti mišiniai variklinėmis savybėmis (NO_x , CO, CH, SM bei b_e , η_e) nenusileidžia sertifikuotam RME ir, lyginant su dyzelinu, energijos panaudojimo efektyvumas, plačiame apkrovos diapazone, vidutiniškai didėja 1–4 %; esant praktiškai nepakitusiai NO_x koncentracijai, nepilno degimo produktų (CO, CH) koncentracijos sumažėjimas siekia iki 20 %, o ID dūmingumas – 55–85 %.

2. Audi 1,9 TDI DV, dirbančio ($n = 2000\text{--}3500 \text{ min}^{-1}$, $p_{me} = 0,236\text{--}1,199 \text{ MPa}$) ištirtais B30 (RME), B30 (RME+10M) mišiniais patikimumo rodikliai nenusileidžia varikliui dirbant dyzelinu. B30 (RME+10M) mišinys pasižymi padidėjusiomis patikimumo kriterijų reikšmėmis praktiškai visame apkrovos diapazone, tačiau maksimalios tiriamos apkrovos taške neviršija reikšmių DV dirbant dyzelinu ir B30 (RME) mišiniu.

3. Buvo ištirti įprastomis sąlygomis sandėliuotų CSME ir RME biodyzelinų mišinių su mineraliniu dyzelinu varikliniai rodikliai. Tyrimai parodė, jog variklio, dirbančio mišiniais, aplinkosauginiai ir energetiniai rodikliai išlieka pranašesni (lyginant su dyzelinu) biodyzelinus sandėliuojant:

- RME (su antioksidatoriumi) iki 14 mėn.;
- CSME (be antioksidatoriaus) iki 8 mėn. sandėliuojant.

4. Įvertinta Lietuvos transporto segmente (komercinės žvejybos laivų) D pakeitimo riebiųjų rūgščių metilesterio ir alkoholio mišiniais energetinis ir aplinkosauginis efektas. CO₂ emisija mažėja 4–13 %, naudingo veikimo koeficientas didėja 3–5 %. Vidutinių eksploatacinių ciklinių rodiklių pasikeitimas, lyginant su D, siekia: CH –55–+10 %; CO – sumažėjimo iki ~9 %; NO_x ciklinių rodiklių išaugimo iki ~10 %, pavieniu atveju iki ~20 %.

5. Visų tirtų mišinių apibendrintam įvertinimui pasitelktas O₂ kiekio degaluose rodiklis, kuris parodė, jog nepilno degimo produktų (CO, CH) koncentracijų ID atžvilgiu, B30 mišiniai yra pranašesni lyginat su D ir B50 mišiniais.

6. Sukurta ir, panaudojant eksperimentinius rezultatus, apčiuota dyzelinio variklio cilindre šilumos išsiskyrimo charakteristikų Vibe parametrų nustatymo metodika remiantis ribotu eksperimento duomenų kiekiu. Panaudojus atvirkštinę pakeistą Vibe šilumos išsiskyrimo parametrų nustatymo, Woschni ir Anisits metodikas bei iteraciją, suformuota ir pagrįsta (1,9 TDI ir 8V396TC4 DV MM atvejais) palengvinto Vibe šilumos išsiskyrimo parametrų nustatymo metodika.

Literatūra ir šaltiniai

Agarwal, A. K. 2007. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines, *Progress in Energy and Combustion Science* 33:233–71.

Agarwal, A. K.; Das, L. M. 2001. Biodiesel development and characterization for use as a fuel in compression ignition engines *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 123(2). 440–447.

Alahmer, A.; Yamin, J.; Sakhrieh, A.; Hamdan, M. A. 2010. Engine performance using emulsified diesel fuel, *Energy Conversion and Management* 51: 1708–1713.

Al-Dawody, M. F.; Bhatti, S. K. 2013. Optimization strategies to reduce the biodiesel NOx effect in diesel engine with experimental verification, *Energy Conversion and Management* 68: 96–104.

Aliyu, B.; Shitanda, D.; Walker, S.; Agnew, B.; Masheiti, S.; Atan, R. 2011. Performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with Croton megalocarpus (musine) methyl ester, *Applied Thermal Engineering*, Volume 31(1): 36–41.

Altin, R.; Cetinkaya, S.; Yucesu, H. S. 2001. The potential of using vegetable oil fuels as fuel for Diesel engines, *Energy Conversion and Management*, 42(5): 529–538.

Antolin, G.; Tinaut, F. V.; Briceno, Y.; Castano, V.; Perez, C.; Ramirez, A. I. 2002. Optimisation of biodiesel production by sunflower oil transesterification, *Bioresource Technology* 83(2): 111–114.

Aplinka, energija ir transportas. Transporto mokomoji medžiaga 2003 m., 57 p.

Atabani, A. E.; Silitonga, A. S.; Ong, H. C.; Mahlia, T. M. I.; Masjuki, H. H.; Badruddin, I. A.; Fayaz, H. 2013. Non-edible vegetable oils: A critical evaluation of oil extraction, fatty acid compositions, biodiesel production, characteristics, engine performance and emissions production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 18: 211–245.

Aydin, H.; Ilkilic, C. 2010. Effect of ethanol blending with biodiesel on engine performance and exhaust Emissions in a CI engine, *Applied Thermal Engineering* 30: 1199–1204.

Bala, B. K. 2005. Studies on biodiesels from transformation of vegetable oils for diesel engines, *Energy Education Science and Technology* 5:1–45.

Beeckmann, J.; Cai, L.; Pitsch, H. 2014. Experimental investigation of the laminar burning velocities of methanol, ethanol, n-propanol, and n-butanol at high pressure, *Fuel*, 117(A): 340–350.

Behera, P.; Murugan, S. 2013. Combustion. performance and emission parameters of used transformer oil and its diesel blends in a DI diesel engine, *Fuel* 104: 147–154.

Bordukov, V. T.; Ivančenko, N. N.; Kosiak, A. F.; Levin, M. I.; Nikitin, M.D.; Nikitin, O. A. 1975. *Trudi Centralnovo naučno-issledovatelskovo dizelnovo instituta. Issledovanie teploperedaci v dizeliach*, Leningrad (Sankt Peterburg).

Bouaid, A.; Martinez, M.; Aracil, J. 2007. A comparative study of the production of ethyl esters from vegetable oils as a biodiesel fuel optimization by factorial design, *Chemical Engineering Journal* 134(1–3): 93–99.

Bulaty, T.; Glanzman, W. 1985. Opređenija parametrov teplovidelenija na osnove zakona sgoranija Vibe, *Ekspress-informacija. Porshnevije i gazoturbinnije dvigateli* (11): 14 – 24.

Butler, R. A. 2005. World's deforestation rates and forest cover statistics.

Buyukkaya, E. 2010. Effects of biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics Sakarya, *Fuel* 89: 3099–3105.

Canakci, M. 2007. Combustion characteristics of a turbocharged DI compression Ignition engine fuelled with petroleum diesel fuels and biodiesel, *Bioresource Technology*, 98: 1167–1175.

Canakci, M.; Ozsezen, A. N.; Turkcan, A. 2009. Combustion analysis of preheated crude sunflower oil in an IDI diesel engine, *Biomass and Bioenergy* 33(5): 760–767 .

Cheng, C. H.; Cheung, C. S.; Chan, T. L.; Lee, S. C.; Yao, C. D.; Tsang, K. S. 2008. Comparison of emissions of a direct injection diesel engine operating on biodiesel with emulsified and fumigated methanol, *Fuel* 87: 1870–1879.

Choi, C. Y.; Bower, G. R.; Retiz, R. D. 1997. Effects of Biodiesel Blended Fuels and Multiple Injections on D. I. Diesel Engines, *SAE Technical Paper*: 970218.

Coniglio, L.; Bennadji, H.; Glaude, P. A.; Herbinet, O.; Billaud, F. 2013. Combustion chemical kinetics of biodiesel and related compounds (methyl and ethyl esters):

Experiments and modeling – Advances and future refinements, *Progress in Energy and Combustion Science* 39(4): 340–382.

Das, B.; Chowdhuri, A. K.; Mandal, B. K. 2013. Experimental study on the performance of biodiesel fuelled ci engine using exhaust gas recirculation, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 3(3): 89–95.

Demirbas, A. 2008. *Biodiesel. A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines*, Springer-Verlag London Limited, 208 p., ISBN 978-1-84628-994-1.

Dinkov, R.; Hristov, G.; Stratiev, D.; Aldayri, V. B. 2009. Effect of commercially available antioxidants over biodiesel/diesel blends stability, *Fuel*, 88(4): Pags 732–737.

Directive of the European Parliament and The Council on energy end-use efficiency and energy services (and repealing Council Directive 93/76/EEC) COM (2003) 739 final, C6-0298/2005-2003/0300 (COD)).

Dogan, O. 2011. The influence of n-butanol/diesel fuel blends utilization on a small diesel engine performance and emissions, *Fuel* 90 (7): 2467–2472

Drobavičius, J.; Garbaravičius, G.; Gimbutis, S.; Kajutis, K.; Krukonis, V.; Liutnikas, N.; Milenskis, N.; Pranskūnas, A.; Rudokas, J. 1974. *Bendroji šiluminė technika*, Mintis, 570 p.

Etheridge, J.; Mosbach, S.; Kraft, M.; Wu, H.; Collings, N. 2009. A detailed chemistry multi-cycle simulation of a gasoline fueled HCCI engine operated with NVO. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants* 2(1): 13–27.

European Commission 2013. *EU energy in figures. Statistical pocket book*, 129 p., ISSN 1977–4559.

European Environmental Agency 2012. *GHG trends and projections in Lithuania*.

European Environmental Agency 2013. *Greenhouse gas emission trends*.

European Union emission standards.

Europos Komisija. Baltoji knyga. 2011. Bendros Europos transporto erdvės kūrimo planas. Konkurencingos efektyviu išteklių naudojimu grindžiamos transporto sistemos kūrimas. Briuselis: 28–31.

Europos Komisija. Pasiūlymas. Europos Parlamento ir tarybos direktyva dėl energijos vartojimo efektyvumo, kuria panaikinamos direktyvos 2004/8/EB ir 2006/32/EB“ KOM (2011) 370 galutinis.

Europos Komisijos Komunikatas Europos Parlamentui, Tarybai, Europos Ekonomikos ir Socialinių reikalų komitetui ir regionų komitetui „Energetikos technologijos ir inovacijos“, 2013 03 27, COM (2013) 175 galutinis.

Eurosat data. Online data code: tsdtr 250.

Fargione, J.; Hill, J.; Tilman, D.; Polasky, S.; Hawthorne, P. 2008. Land clearing and the biofuel carbon debt", *Science* 319: 1235 – 1238.

Fletcher, S. R. 2004. Global Climate Change: The Kyoto Protocol, *CRS Report for Congress*.

Ganapathy, T.; Gakkhar, R. P.; Murugesan, K. 2011. Influence of injection timing on performance, combustion and emission characteristics of Jatropha biodiesel engine, *Applied Energy* 88(12): 4376–4386.

Golubev, P. A.; Mironychev, M. A.; Nesterenkov, A. M. 2013. Application of the WAVE system at the initial stages of engine design, *Report*, OJSC “ZMZ”, Russia.

Groom, M. J.; Gray, E. M.; Townsend, P. A. 2008. Biofuels and biodiversity: principles for creating better policies for biofuel production, *Conservation Biology* 22: 602–609.

Gumus, M. A. 2010. Comprehensive experimental investigation of combustion and heat release characteristics of a biodiesel (hazelnut kernel oil methyl ester) fueled direct injection compression ignition engine, *Fuel* 89: 2802–2814.

Hansen, A. C.; Kyritsis, D. C.; Lee, C. F. 2009. Characteristics of biofuels and renewable fuel standards. *Biomass to biofuels – strategies for global industries*. Book chapter, John Wiley.

Hasan, A. R.; Pope, D.; Skurla, J.A. 2006. Alternatives to Petroleum Based Fuel for Marine Vessels, *Final Report*, Great Lakes Maritime Research Institute.

Heywood, J. B. 1988. *Internal combustion engine fundamentals*, McGraw-Hill Inc, 930 p., ISBN 0-07-028637-X.

Hill, J. 2007. Environmental costs and benefits of transportation biofuel production from food-and lignocellulose-based energy crops. A review, *Agronomy for Sustainable Development* 27: 1–12.

Islam, M. N.; Islam, M. N.; Beg, M. R. A. 2004. The fuel properties of pyrolysis liquid derived from urban solid wastes in Bangladesh, *Bioresource Technology* 92:181–186.

Kalam, M. A.; Husnawan, M.; Masjuki, H. H. 2003. Exhaust emission and combustion evaluation of coconut oil-powered indirect injection Diesel engine, *Renewable Energy* 28: 2405–2415.

Kalligeros, S.; Zannikos, F.; Stournas, S.; Lois, E.; Anastopoulos, G.; Teas C. H.; Sakellaropoulos, F. 2003. An investigation of using biodiesel/marine Diesel blends on the performance of a stationary Diesel engine, *Biomass Bioenergy*, 24(2): 141–149.

Kannan, G. R.; Karvembu, R.; Anand, R. 2011. Effect of metal based additive on performance emission and combustion characteristics of diesel engine fuelled with biodiesel, *Applied Energy* 88: 3694–3703.

Karavalakis, G.; Hilari, D.; Givalou, L.; Karonis, D.; Stournas, S. 2011. Storage stability and ageing effect of biodiesel blends treated with different antioxidants, *Energy*, 36(1): 369–374.

Karavalakis, G.; Stournas, S.; Karonis, D. 2010. Evaluation of the oxidation stability of diesel/biodiesel blends, *Fuel* 89: 2483–2489.

Kavtaradze R. Z. 2008. *Теория поршневых двигателей. специальные главы: учебник для вузов*, М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 720 p., ISBN 978-5-7038-3086-4.

Konstantinavičiūtė, I. Byčenkienė, S. Valatka, S. Juška, R. Beniušis, R. Jezukevičius, S. Mickevičius, K. Akmenskytė, J. Kuklytė, J. Merkelienė, J. Tijūnaitė, R. Kisielytė, N.

- Raginytė, G. Aukštinaitis T. 2013 National greenhouse gas emission inventory report 1990-2011 Republic of Lithuania, Report, 666 p.
- Kostin, A. K.; Larionov, V. V.; Michailov L. I. 1979. *Teplonapriazhennost dvigatelei vnutrennevo sgoranija*, Sankt Peterburg, 60 p.
- Kousoulidou, M.; Fontaras, G.; Ntziachristos, L.; Samaras, Z. 2010. Biodiesel blend effects on common-rail diesel combustion and emissions, *Fuel* 89 (11): 3442–3449.
- Kowalewicz, A. 2004. Emission characteristics of compression ignition engine fuelled with RME/DF and ethanol, *Journal of KONES* 11(1–2): 349–357.
- Krohn, B. J.; Fripp, M. 2012. A life cycle assessment of biodiesel derived from the ‘niche filling’ energy crop Camelina in the USA, *Applied Energy* 92: 92–98.
- Krohn, B. J.; Fripp, M.; 2012. A lifecycle assessment of biodiesel derived from the “niche filling” energy crop Camelina in the USA”, *Energy* 92: 92–98.
- Kruczynski, S. W. 2013. Performance and emission of CI engine fuelled with Camelina sativa oil, *Energy Conversion and Management* 65: 1–6.
- Labeckas, G.; Slavinskas, St. 2006. The effect of rapeseed oil methyl ester on direct injection Diesel engine performance and exhaust emissions, *Energy Conversion and Management* 47(13–14): 1954–1967.
- Lancefield, T. 2003. The influence of variable valve actuation on the part load fuel economy of a modern light-duty diesel engine. *SAE Paper*: 100028.
- Laza, T.; Kecskes, R.; Bereczky, A.; Penninger, A. 2006. Examination of burning processes of regenerative liquid fuel and alcohol mixtures in diesel engine. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 50(1):11–29.
- Lebedevas, S.; Lebedeva, G.; Makarevičienė, V.; Kazanceva, I.; Kazancev, K. 2010. Analysis of the Ecological Parameters of the Diesel Engine Powered with Biodiesel Fuel Containing Methyl Esters from Camelina Sativa Oil, *Transport* 25(1): 22–28.
- Lebedevas, S.; Lebedeva, G.; Žaglinskis, J. 2012. Research of usage of RRME and alcohol biofuel mixture in diesel engine, *Journal of KONES Powertrain and Transport* 19(2): 289–304.
- Lebedevas, S.; Makarevičienė, V.; Sendzikiene, E. Žaglinskis J. 2013. Oxidation stability of biofuel containing Camelina sativa oil methyl esters and its impact on energy and environmental indicators of diesel engine, *Energy Conversion and Management* 65: 33 – 40.
- Lebedevas, S.; Vaicekauskas, A.; Lebedeva, G.; Makarevičienė, V.; Janulis, P.; Kazancev, K. 2006. Use of Waste Fats of Animal and Vegetable Origin for the Production of Biodiesel Fuel: Quality, Motor Properties, and Emissions of Harmful Components, *Energy & Fuels* 20: 2274–2280.
- Lebedevas, S.; Vaicekauskas, A.; Lebedeva, G.; Makarevičienė, V.; Janulis, P. 2007. Change in Operational Characteristics of Diesel Engines Running on RME Biodiesel Fuel, *Energy & Fuels* 21: 3010–3016.

Lietuvos Respublikos atsinaujinančių išteklių energetikos įstatymas. 38 straipsnis. 2011-05-24.

Lietuvos statistikos departamentas 2012. *Kuro ir energijos balansas 2012*, 55 p., ISSN 2029-5944.

Lin, C. Y.; Huang, J. C. 2003. An oxygenating additive for improving the performance and emission characteristics of marine Diesel engines, *Ocean Engineering* 30: 1699–1715.

Lin, C.Y.; Chiu, C. C. 2010. Burning characteristics of palm-oil biodiesel under long-term storage conditions, *Energy Conversion and Management* 51(7): 1464–1467.

Lin, Y. C.; Tsai, C. H.; Yang, C. R.; Wu, C. H. J.; Wu, T. Y.; Chien, G. P. C. 2008. Effects on aerosol size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons from the heavy-duty diesel generator fueled with feedstock palm-biodiesel blends, *Atmospheric Environment* 42: 6679–6688.

Liu, Y.; Liu, H.; Huo, M.; Lee, C. F.; Li, J. 2012. Spray and Combustion Characteristics of Butanol-Biodiesel-Diesel in a Constant Volume Combustion Chamber, *International Journal of Green Energy*, online.

LST ISO 3929:1998. Kelių transporto priemonės. Išmetamosiose dujose teršalų matavimo metodai, taikomi per techninę apžiūrą ar priežiūrą (ISO 3929-76 Road vehicles. Determination of exhaust carbon monoxide concentration at idle speed);

LST ISO 3930:1998. Kelių transporto priemonės. Išmetamosiose dujose teršalų matavimo įranga, naudojama per techninę apžiūrą ar priežiūrą. Techniniai reikalavimai (ISO 3930-93. Road vehicles. Measurement equipment for exhaust gas emissions during inspection or maintenance. Technical specifications);

Lujaji, F.; Kristof, L.; Bereczky, A.; Mbarawa M. 2011. Experimental investigation of fuel properties, engine performance, combustion and emissions of blends containing croton oil, butanol, and diesel on a CI engine, *Fuel* 90(2): 505–510

Lujan, J. M.; Bermudez, V.; Tormos, B.; Pla, B. 2009. Comparative analysis of a DI diesel engine fuelled with biodiesel blends during the European MVEG-A cycle: performance and emissions (II), *Biomass and Bioenergy* 33(6–7): 948–956.

Ma, F.; Hanna, M. A. 1999. Biodiesel production: a review, *Bioresource Technology*, 70 (1): 1–15.

Makarevičienė, V.; Lebedevas, S.; Rapalis, P.; Gumbytė, M.; Skorupskaitė, V.; Žaglinskis, J. 2014. Performance and emission characteristics of diesel fuel containing microalgae oil methyl esters, *Fuel* 120: 233–239.

Makarevičienė, V.; Matijošius, J.; Pukalskas, S.; Vėgneris, R.; Kazanceva I.; Kazancev, K. 2013. The exploitation and environmental characteristics of diesel fuel containing rapeseed butyl esters, *Transport* 28(2): 158–165.

Martinaitis, V.; Vėgytė, N.; Paulauskaitė, S.; Šakmanas, A. 2005. *Techninė termodinamika ir šilumokaita. Aiškinamasis uždavinynas*, Vilnius: Technika, 426 p., ISBN 9986-05-908-9.

- Martinez, G.; Sanchez, N.; Encinar, J. M.; Gonzalez, J. F. 2014. Fuel properties of biodiesel from vegetable oils and oil mixtures. Influence of methyl esters distribution, *Biomass and Bioenergy* 63: 22–32.
- Mat Yasin, M. H.; Yusaf, T., Mamat, R., Yusop, A. F. 2014. Characterization of a diesel engine operating with a small proportion of methanol as a fuel additive in biodiesel blend, *Applied Energy* 114: 865–873.
- Mata, T. M.; Martins, A. A.; Caetano, N. S. 2010. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (1): 217–232.
- McCollum, D.L.; Thornton, M.J.; Taylor, J.D. 2004. Application of WAVE 1-D engine models with vehicle simulation tools to investigate efficiency, performance, and emission impacts of advanced engine operation. *Ricardo software annual international users conference (IX), Report*.
- Merker, G. P.; Schwarz, C.; Stiesch, G.; Otto F. 2006. *Simulating Combustion, Simulation of combustion and pollutant formation for engine-development*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 401 p., ISBN 3540251618.
- Merola, S. S.; Marchitto, L.; Tornatore C.; Valentino G. 2014. Spray-combustion process characterization in a common rail diesel engine fuelled with butanol-diesel blends by conventional methods and optical diagnostics, *AIMS Energy* 2 (2): 116–132.
- Mittelbach, M.; Enzelsberger, H. 1999. Transesterification of heated rapeseed oil for extending diesel fuel, *Journal of the American Oil Chemists Society* 76: 545–550.
- Mollenhauer, K.; Tschoeke H. 2010. *Handbook of Diesel engines*, Springer-Verlag, 636 p., ISBN 978-3-540-89082-6.
- Monyem, A.; Van Gerpen, J. H. 2001. The effect of biodiesel oxidation on engine performance and emissions, *Biomass and Bioenergy* 20: 317–325.
- Moran, M. J.; Shapiro H. N.; Boettner, D. D.; M. Bailey 2010. *Fundamentals of Engineering Thermodynamic. 7th, SI edition*, John Wiley & Sons, Inc., ISBN-13:978-0470495902.
- Mudge, St. M.; Pereira, G. 1999 Stimulating the Biodegradation of Crude Oil with Biodiesel Preliminary Results, *Spill Science & Technology Bulletin* 5(5–6): 353–355.
- Murillo, S.; Miguez, J. L.; Porteiro, J.; Granada, E.; Moran, J. C. 2007. Performance and exhaust emissions in the use of biodiesel in outboard diesel engines, *Fuel* 86: 1765–1771
- Nabi N. Md.; Akhter, Sh., Md.; Mhia, Md.; Shahadat, Z. 2006. Improvement of engine emissions with conventional diesel fuel and diesel – biodiesel blends, *Bioresource Technology* 97: 372–378.
- Nabi, N. Md.; Rahman, M. Md.; Akhter, S. Md. 2009. Biodiesel from cotton seed oil and its effect on engine performance and exhaust emissions, *Applied Thermal Engineering* 29: 2265–2270.

- Najafi, G.; Ghobadian, B.; Yusaf, T. F.; Rahimi, H.; Modares, T. 2007. Combustion analysis of a CI engine performance using waste cooking biodiesel fuel with an artificial neural network aid, *American Journal of Applied Sciences* 4 (10): 756–764.
- Nasim, M. N.; Yarasu, R. B.; Yamin J. 2010. Simulation of CI engine powered by neat vegetable oil under variable fuel inlet temperature, *Indian Journal of Science and Technology* 3 (4): 387–392.
- National Academy of Science, National Research Council Report 2012. *Advancing the Science of Climate Change*.
- Nwafor, O. M. I.; Rice, G.; Ogbonna, A. I. 2000. Effect of advanced injection timing on the performance of rapeseed oil in Diesel engines, *Renewable Energy*, 21: 433–444.
- Ozsezen, A. N.; Canakci, M.; Sayin, C. 2009. Effects of biodiesel from used frying palm oil on the performance, injection and combustion characteristics of an indirect injection diesel engine, *Energy Fuel* 22: 1297–1305.
- Padian, M.; Sivapirakasam, S.P.; Udayakumar, M. 2011. Investigation on the effect of injection system parameters on performance and emission characteristics of a twin cylinder compression ignition direct injection engine fuelled with pongamia biodiesel–diesel blend using response surface methodology, *Applied Energy* 88 (8): 2663–2676.
- Paligova, J.; Jorikova, L.; Cvengros, J. 2008. Study of FAME stability, *Energy Fuels* 22:1991–6.
- Park, J.; Lee, K.; Song, S.; Chun, K. 2010. Numerical study of a light-duty diesel engine with a dual-loop egr system under frequent engine operating conditions using the doe method, *International Journal of Automotive Technology* 11(5): 617–623.
- Peiretti, P. G.; Meineri, G. 2007. Fatty acids, chemical composition and organic matter digestibility of seeds and vegetative parts of false flax (*Camelina sativa* L.) after different lengths of growth, *Animal Feed Science and Technology* 133(3–4): 341–350.
- Ping, Z.; Guangyao, O. Y.; Lufeng, B. 2010. Simulation on Thermal Performance Parameters of Gas-fired in Cylinder Based on Boost Software, *Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE), 2010 International Conference on (CMCE)* 3:455–457.
- Pogorevc, P.; Kegl, B.; Skerget, L. 2008. Diesel and Biodiesel Fuel Spray Simulations, *Energy & Fuels* 22(2): 1266–1274.
- Portnov, D. A. 1963. *Быстроходные турбопоршневые двигатели с воспламенением от сжатия*, Маšgiz, 639 p.
- Prakash, R.; Singh, R. K.; Murugan, S. 2014. Experimental studies on combustion performance and emission characteristics of diesel engine using different biodiesel bio oil emulsions, *Journal of the Energy Institute*, in press proof.
- Pullen, J.; Saeed, K. 2014. Experimental study of the factors affecting the oxidation stability of biodiesel FAME fuels, *Fuel Processing Technology* 125: 223–235.

Qi, D. H.; Chen, H.; Geng, L. M.; Bian, Y. ZH. 2010. Experimental studies on the combustion characteristics and performance of a direct injection engine fueled with biodiesel/diesel blends, *Energy Conversion and Management* 51(12): 2985–2992.

Rahman, S. M. A.; Masjuki, H. H.; Kalam, M. A.; Abedin, M. J.; Sanjid, A.; Sajjad, H. 2013. Production of palm and Calophyllum inophyllum based biodiesel and investigation of blend performance and exhaust emission in an unmodified diesel engine at high idling conditions, *Energy Conversion and Management* 76: 362–367.

Rakopoulos, C. D.; Dimaratos, A. M.; Giakoumis, E. G.; Rakopoulos, D. C. 2011. Study of turbocharged diesel engine operation, pollutant emissions and combustion noise radiation during starting with bio-diesel or n-butanol diesel fuel blends, *Applied Energy* 88(11): 3905–3916.

Rakopoulos, D. C.; Rakopoulos, C. D.; Giakoumis, E. G.; Papagiannakis, R. G.; Kyritsis, D. C. 2014. Influence of properties of various common bio-fuels on the combustion and emission characteristics of high-speed DI (direct injection) diesel engine: Vegetable oil, bio-diesel, ethanol, n-butanol, diethyl ether, *Energy* 73(14): 354–366.

Rakopoulos, D. C.; Rakopoulos, C. D.; Giakoumis E. G.; Dimaratos A. M.; Kyritsis D. C. 2010. Effects of butanol–diesel fuel blends on the performance and emissions of a high-speed DI diesel engine. *Energy Conversion Management* 51:1989–97.

Rakopoulos, D. C.; Rakopoulos, C. D.; Hountalas, D. T.; Kakaras, E. C.; Giakoumis, E. G.; Papagiannakis, R. G. 2010. Investigation of the performance and emissions of a bus engine operating on butanol/diesel fuel blends, *Fuel* 89:2781–90.

Rakopoulos, D. C.; Rakopoulos, C. D.; Papagiannakis, R. G.; Kyritsis, D. C. 2011. Combustion heat release analysis of ethanol or n-butanol diesel fuel blends in heavy-duty DI diesel engine, *Fuel* 90(5):1855–1867.

Rakopoulos, D.C. 2013. Combustion and emissions of cottonseed oil and its bio-diesel in blends with either n-butanol or diethyl ether in HSDI diesel engine, *Fuel* 105: 603–613.

Reifarth, S.; Angstrom, H. E. 2010. Transient EGR in a high-speed DI diesel engine for a set of different EGR routings. *SAE International Journal of Engines* 3(1): 1071–1078.

Rosca, R.; Carlescu, P.; Rakosi, E.; Manolache, G. 2009. Fueling an D.I. agricultural diesel engine with waste oil biodiesel: Effects over injection, combustion and engine characteristics, *Energy Conversion and Management*, 50(9): 2158–2166.

Roskilly, A. P.; Nanda, S. K.; Wang, Y. D.; Chirkowski, J. 2008. The performance and the gaseous emissions of two small marine craft diesel engines fuelled with biodiesel, *School of Marine Science and Technology Applied Thermal Engineering*, 28: 872–880.

Roy, M. M.; Wang, W.; Bujold J. 2013. Biodiesel production and comparison of emissions of a DI diesel engine fueled by biodiesel–diesel and canola oil–diesel blends at high idling operations, *Applied Energy* 106:198–208.

- Sakai, S.; Liu, Y.; Yamaguchi, T.; Watanabe, R.; Kawabe, M.; Kawakami, K. 2010. Production of butyl-biodiesel using lipase physically-adsorbed onto electrospun polyacrylonitrile fibers, *Bioresource Technology*, 101(19): 7344–7349.
- Sakthivel, G.; Nagarajan, G.; Ilangkumaran, M.; Gaikwad, A. B. 2014. Comparative analysis of performance, emission and combustion parameters of diesel engine fuelled with ethyl ester of fish oil and its diesel blends, *Fuel* 132: 116–124.
- Schaerlaeckens, W. P. M.; Deckers, R. J. H. 2013. The application of WAVE in the Early stages of Engine Design. *NedCar Technology*, Report.
- Schober, S.; Mittelbach, M. 2004. The impact of antioxidants on biodiesel oxidation stability, *European Journal of Lipid Science and Technology* 106:382–9.
- Scholl, K. W.; Sorenson, S. C. 1993. Combustion of soybean oil methyl ester in a direct injection diesel engine. *SAE Paper* No. 930934.
- Searchinger, T.; Heimlich, R.; Houghton, R. A.; Dong, F.; Elobeid, A.; Fabiosa, J.; Tokgoz, S.; Hayes D.; Yu, T. H. 2008. Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change, *Science* 319: 1238–1240.
- Sellnau, M.; Rask, E. 2003. Two-step variable valve actuation for fuel economy, emissions, and performance. *SAE Technical Paper*: 010029.
- Sendzikiene, E.; Makareviciene, V.; Janulis, P. 2005. Oxidation Stability of Biodiesel Fuel Produced from Fatty Wastes, *Polish Journal of Environmental Studies* 14 (3): 335–339.
- Shahabuddin, M.; Liaquat, A. M.; Masjuki, H. H.; Kalam, M. A.; Mofijur, M. 2013. Ignition delay, combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with biodiesel, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 21: 623–632.
- Shaohua, Z.; Guodong, J.; Tianfeng, X. 2003. Design and analysis method for internal combustion engine mufflers based on gt-power software, *Automobile Technology* 7: 7–10.
- Shi, L. H.; Feng, R. H. 2010. Optimization of intake system for gasoline engine based on GT-Power model, *Diesel Locomotives* 7, 008.
- Silitonga, A. S.; Masjuki, H. H.; Mahlia, T. M. I.; Ong, H. C.; Atabani, A. E.; Chong, W. T. 2013. A global comparative review of biodiesel production from jatropha curcas using different homogeneous acid and alkaline catalysts: Study of physical and chemical properties, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24: 514–533.
- Siwale, L.; Kristóf, L.; Bereczky, A.; Mbarawa, M.; Kolesnikov, A. 2014. Performance, combustion and emission characteristics of n-butanol additive in methanol–gasoline blend fired in a naturally-aspirated spark ignition engine, *Fuel Processing Technology* 118: 318–326
- Siwale, L.; Lukacs, K.; Torok, A.; Bereczky, A.; Mbarawa, M.; Penninger, A.; Kolesnikov, A. 2013. Combustion and emission characteristics of n-butanol/diesel fuel blend in a turbo-charged compression ignition engine, *Fuel* 107: 409–418.

Štreimikienė, D.; Konstantinavičiūtė, I. 2003. JT Bendrosios klimato kaitos konvencijos įsipareigojimų įgyvendinimo galimybės atžvelgiant į šiltnamio dujų emisijų Lietuvoje mažinimo priemonės, *Energetika* 1: 28–37.

Szwaja, S.; Naber J.D. 2010. Combustion of n-butanol in a spark-ignition IC engine. *Fuel* 89(7): 1573–1582

Tang, H.; Abunasser, N.; Wang, A.; Clark, B.R.; Wadumesthrige, K.; Zeng, S. 2008. Quality survey of biodiesel blends sold at retail stations, *Fuel* 87: 2951–5.

Tesfa, B.; Mishra, R.; Gu, F.; Ball, A. D. 2011. Combustion Characteristics of CI Engine Running with Biodiesel Blends, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*.

Tesfa, B.; Mishra, R.; Zhang, C.; Gu, F.; Ball, A. D. 2013. Combustion and performance characteristics of CI (compression ignition) engine running with biodiesel, *Energy* 51: 101–115.

TFS Green 2012. *An Introduction to the Kyoto Protocol*.

Thamsirirotj, T.; Murphy, J. D. 2011. The impact of the life cycle analysis methodology on whether biodiesel produced from residues can meet the EU sustainability criteria for biofuel facilities constructed after 2017, *Renewable Energy* 36(1): 50–63.

Thamsirirotj, T.; Murphy, J. D. 2011. The impact of the lifecycle analysis methodology on whether biodiesel produced from residues can meet the EU sustainability criteria for biofuel facilities constructed after 2017, *Renewable Energy* 36(1): 50–63.

The United Nations Ozone Secretariat 2008. *Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer. Stratospheric Ozone Protection*, Progress report 1987–2007.

Think Global Green 2013. *Deforestation facts*.

Thompson M. R.; Mu, B.; Ewaschuk, C. M.; Cai, Y.; Oxby, K. J.; Vlachopoulos, J. 2013. Long term storage of biodiesel/petrol diesel blends in polyethylene fuel tanks” *Fuel* 108: 771–779.

Thompson, J. C.; Peterson, C. L.; Reece, D. L.; Beck, S. M. 1998. Two-year storage study with methyl and ethyl esters of rapeseed oil, *Transactions of the ASAE* 41: 931–9.

Tormos, B.; Novella, R.; Garcia, A. Garger, K. 2010. Comprehensive study of biodiesel fuel for HSDI engines in conventional and low temperature combustion conditions, *Renewable Energy* 35: 368–378.

Tuccar, G.; Ozgur, T.; Aydin K. 2014. Effect of diesel–microalgae biodiesel–butanol blends on performance and emissions of diesel engine, *Fuel* 132 (15): 47–52.

Turner E. C.; Snaddon J. L.; Fayle T. M.; Foster, W. A. 2008. Oil Palm Research in Context: Identifying the Need for Biodiversity Assessment, *PLoS ONE* 3(2): e1572.

UN Conference on Environment and Development (UNCED), *The Earth Summit*, 3–14 June 1992, Rio de Janeiro.

United Nations General Assembly 1992. *Report of The United Nations Conference on Environment and Development*, A/CONF.151/26 Vol. I.

United States Environmental Protection Agency 2012. *Global Greenhouse Gas Emissions Data*.

Usta, N. 2005. An experimental study on performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with tobacco seed oil methyl ester, *Energy Conversion and Management* 46(15–16): 2373–2386.

Usta, N.; Ozturk, E.; Can, O.; Conkur, E. S.; Nas, S.; Con, A. H.; Can, A. C.; Topcu, M. 2005. Combustion of biodiesel fuel produced from hazelnut soapstock/waste sunflower oil mixture in a Diesel engine, *Energy Conversion and Management* 46 (5): 741–755.

Valente, O. S.; da Silva, M. J.; Pasa, V. M. D.; Belchior, C. R. P.; Sodre, J. R. 2010. Fuel consumption and emissions from a diesel power generator fuelled with castor oil and soybean biodiesel, *Fuel* 89(12): 3637–3642.

Vibe, I. I. 1962. *Новое о рабочем цикле двигателей*, 273 p.

Vollmann, J.; Moritz, T.; Kargl, C.; Baumgartnerb, S.; Wagentristla, H. 2007. Agronomic evaluation of camelina genotypes selected for seed quality characteristics, *Industrial Crops and Products* 26(3): 270–277.

Walsh, B. 2013. The Scariest Environmental Fact in the World, *Science & Space*.

Wardle, D. A. 2003. Global sale of green air travel supported using biodiesel, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 7(1): 1–64.

Waynick, A. J. 2005. Characterization of biodiesel oxidation and oxidation products, *CRC Project No. AVFL-2b Task 1 results*.

Worldometers. Real time world statistics.

Woschni, G.; Anisits, F. 1973. Eine Methode zur Vorausberechnung der Änderung des Brennverlaufs mittelschnellaufender Dieselmotoren bei geänderten Randbedingungen. *MTZ* (34)4: 106–115.

Žaglinskis, J.; Rapalis, P.; Daukšys, V. 2012. Daugiakomponenčių *Camelina sativa* ir rapso metilesterio biodegalų palyginamieji tyrimai, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 4(4): 391–396.

Zhang, Z.; Wang, T.; Jia, M.; Wei, Q.; Meng, X.; Shu G. 2014. Combustion and particle number emissions of a direct injection spark ignition engine operating on ethanol/gasoline and n-butanol/gasoline blends with exhaust gas recirculation *Fuel* 130: 177–188.

Zhou, N.; Fridley, D.; McNeil, M.; Zheng, N.; Jing, K.; and Levine, M. 2011. *China's Energy and Carbon Emissions Outlook to 2050*, Lawrence Berkeley National Laboratory, 66 p., LBNL-4472E.

Zhu, L.; Cheung, C. S.; Zhang, W. G.; Huang, Z. 2010. Emissions characteristics of a diesel engine operating on biodiesel and biodiesel blended with ethanol and methanol, *Science of The Total Environment* 408(4): 914–921.

Zubr J. 1997. Oil-seed crop: *Camelina sativa*, *Industrial Crops and Products* 6(2): 113–119.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose *ISI web of Science*

Lebedevas, S.; Pukalskas, S.; Žaglinskis, J.; Matijošius, J. 2012a. Comparative investigations into energetic and ecological parameters of camelina-based biofuel used in the 1Z diesel engine, *Transport* 27 (2): 171–177, ISSN 1648-4142 (print), ISSN 1648-3480 (online). DOI:10.3846/16484142.2012.694078.

Lebedevas, S.; Lebedeva, G.; Žaglinskis, J.; Rapalis, P.; Gudaitytė, I. 2013a. Research of characteristic of working cycle of high-speed diesel engine operating on biofuels RME-E and D-RME-E. Part 2. Indicators and characteristic of heat release in diesel cylinder, *Transport* 28 (3): 217–223, ISSN 1648-4142 (print), 1648-3480 (online). DOI:10.3846/16484142.2013.828652.

Lebedevas, S.; Makareviciene, V.; Sendzikiene, E.; J. Zaglinskis 2013b. Oxidation stability of biofuel containing *Camelina sativa* oil methyl esters and its impact on energy and environmental indicators of diesel engine, *Energy Conversion and Management* 65: 33–40. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.07.10.

Makarevičienė, V.; Lebedevas S; Rapalis P.; Gumbyte, M.; Skorupskaite, V.; Žaglinskis, J. 2014. Performance and emission characteristics of diesel fuel containing microalgae oil methyl esters, *Fuel* 120: 233–239. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.11.049.

Straipsniai kituose recenzuojamuose leidiniuose

Žaglinskis, J.; Lebedevas, S. 2010. Lietuvoje pagamintų naujų rūšių biodegalų motorinių savybių tyrimai dyzelio eksploatacijos sąlygomis, *14-osios tarptautinės konferencijos pranešimų medžiaga. Transport means –2014*: 80–85, IBSN 987-9955-25-866-7.

Žaglinskis, J.; Lebedevas S. 2011. Winter false flax and RME biofuels comparative research on diesel engine operating conditions, *Proceedings of the 15th international conference. Transport means – 2011*: 262–265, ISSN 1822 – 296X.

Lebedevas, S.; Žaglinskis, J.; Lebedeva, G. 2012b. 1Z 1.9 TDI dyzelio šilumos išsiskyrimo rodiklių eksperimentiniai ir matematinio modeliavimo tyrimai, *Aleksandro Stulginskio Universiteto mokslo darbai* 44 (1–3): 232–241. ISSN: 1392-1134.

Žaglinskis, J.; Rapalis, P.; Daukšys, V. 2012. Daugiakomponenčių *Camelina sativa* ir rapso metilesterio biodegalų palyginamieji tyrimai, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 4 (4): 391–396, ISSN 2029-2341 (print) ISSN 2029-2252 (online). doi:10.3846/mla.2012.63.

Lebedevas, S.; Lebedeva, G.; Žaglinskis, J. 2012c. Research of usage of RRME and alcohol biofuel mixture in diesel engine, *Journal of KONES Powertrain and Transport* 19 (2): 289–304, ISSN 1231-4005.

Lebedevas, S.; Žaglinskis, J.; Lebedeva, G. 2012d. RRME biodegalų motoriniai tyrimai dyzelinio variklio eksploatacijos sąlygomis, *Technologijos mokslo darbai Vakarų Lietuvoje* 57–63, ISSN 1822-4652.

Žaglinskis, J.; Vėgneris, R.; Rimkus, A.; Rapalis, P.; Melaika, M. 2013. Turbokompresorinės oro pripūtimo sistemos nesandarumo įtakos 1.9 TDI dyzelinio variklio išoriniams darbo parametrams tyrimai, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 5 (5): 546–551, ISSN 2029-2341 (print), ISSN 2029-2252 (online). DOI: 10.3846/577.

Melaika, M.; Rimkus, A.; Pukalskas, S.; Žaglinskis, J. 2013. Simulation of parameters of SI engine using H₂ and CH₄ fuel blends, *Transport Means – 2013*: 13–16. ISSN 1822-296X.

Žaglinskis J. 2014. Alternatyvių biodegalų panaudojimo dyzeliniuose varikliuose palyginamieji tyrimai, *Technologijos mokslo darbai Vakarų Lietuvoje* (9): 196–199, ISSN 1822-4652.

Summary in English

Introduction

Formulation of the Problem

The transport sector (TS) is one of the most important subjects leading to economic development of many regions also directly participates in the import and export processes what allows to remain competitive for different regions, and also ensures the social comfort of humanity and etc. TS is directly related to the changes of economic field development and the growing needs of humanity. In 1999 the number of new produced vehicles was around 40 million in the end of 2010 reached around 60 million (Worldometers 2013). Such growth in many advanced regions recognized as uncontrolled growth.

Along with the growth of TS the energy consumption grows. This can negatively affect region's economy and lead to political instability especially in regions such as the EU which the largest share (35%) of energy consumption in 2011 is oil products and its import from third countries reaches even ~83% (European Commission. EU energy in figures, 2013). An analogous situation is in Lithuania and the main share (one-third) of total energy (practically total imported) consumption goes to TS.

Along with the growth of TS and energy consumption the growing air pollution is found which influences the temperature change in the atmosphere at the same time natural disasters, harmful components of transport exhaust gas directly affects the organisms, and also forms the harmful phenomena such as smog, acid rain, etc.

Over time the old technologies are replaced with new ones thanks to their transport becomes that cleaner and more efficient for energy use. However, the present situation

shows that the old problems are not liquidated also more and more new problems are faced: economic security, uncontrolled growth of TS, the dependence on fossil oil fuels, inefficient use of energy and increasing environmental pollution.

After Lithuania's accession to the EU considering the needs of people and economic needs, resources and environmental limiting conditions, the number of documents relating to the improvement of efficiency in the TS was adopted gradually and ratified. One of the last long-term strategies is "White Paper" (European Commission. White Paper, 2011). It provides: optimization of logistics, transport and infrastructure efficiency increase using the use of IT systems, creation and use of new (sustainable) fuels, propulsion systems.

The criteria of sustainable fuel cover the protection of nature, greenhouse gas emissions reduction in the steps of fuel manufacture and realization in engine, not suitable for the food industry and other (Republic of Lithuania Law on Renewable Energy. Article 38, 2011). The new requirements of European Commission were published in Communication "Energy Technology and Innovation" (EC Communication. Energy technology and innovation, 2013). There was introduced that the half of aimed 10% amount of used biofuel in TS (up to 2020) have to be achieved using conventional biofuels while the other part – using 2nd and 3rd generation biofuels which raw material is unsuitable for food.

The assurance of these requirements is inevitably related with the research of advanced biofuels use in transport units. However in order to assess the environmental and energy effect of replacing mineral fuels with biofuels in diesel engine (DE) park level it is difficult to carry out experimental tests for each unit. It is much more appropriate to use the typical unit of transport fleet, carry out the test and use simulation methods. However some of simulation software initial data array requires the experimental data which is difficult record and in other cases can't be recorded at all. Based on this arises the need to create and use the methodologies that would allow to simulate the work process parameters of DE in the case of limited amount of experimental data.

A negative characteristic features can be found during use of biofuels. These are like a failure to ensure requirements of standard, physical properties deterioration in the normal range, the change of biofuels exploitation properties, etc. These disadvantages can be eliminated using multicomponent blends of biofuels and diesel fuel (D).

And also in the exploitation of biofuels takes place processes such as oxidation and thermal degradation which may impair their physical and chemical properties which can negatively affect the environmental and energy indicators of DE operation.

Topicality of the Thesis

Author conducted a number of DE tests of biofuel blends using different DEs with direct fuel injection system. In order to expand the raw material base of biofuels, to improve low-temperature characteristics of blends and keep the cetane number during research there were used the multicomponent FAME and alcohol blends with butyl alcohol (butanol) and butyl ester. Butanol and butyl ester as well as tested methanol additive, depending on the type of raw material can be classified as 1st or 2nd generation biofuels. In order to ensure the requirements of the standards (norms of iodine number) the 2nd gen. of FAME *Camelina sativa* was used with pork lard FAME. Obtained DE test results

of 2nd gen. micro algae FAME blends, these results are very relevant during period of 2nd gen. biofuel change instead 1st one. These test results are relevant for enforcement of European Commission Communication “Energy Technology and Innovation” requirements providing information about energy and environmental effect using of blends potential 2nd gen. RRME.

The research of energy and environmental parameters of DE running on oxidised *Camelina sativa* (CSME) and rape (RME) FAME (blends contain) is the one of few (such profile) individual cases and provides important information planning the change of parameters in the case of DE operating on oxidised biodiesel.

Considering to thesis problem that rises from the formation of investigation object parameters (limited experimental research) which are necessary for mathematical model the created methodology allows execute the simulation research with limited amount of experimental data. Developed methodology with acceptable accuracy and using simpler (compare to multi-zone model) single-zone model allows determine the characteristics $dx/d\phi$ of heat release in DE cylinder. Based on this characteristics further calculated the indicated diagram and energy parameters of work process.

Also the energy and environmental assessment of blends change instead D in exploitation of transport purpose DEs. This point important for assessment of air pollution and energy use efficiency in Klaipeda port waters and the waters of Lithuania.

The Object of Research

The energy and environmental parameters and their research methodological aspects of transport purpose DEs operating on 1st and 2nd gen. multicomponent biofuel blends.

The Aim of the Thesis

Using the analytical, statistical assessment, mathematical simulation methods and experimental data analysis to execute the complex assessment of the change of DE energy and environmental characteristics replacing blends of biodiesel and/or alcohol with diesel fuel instead pure diesel.

The Tasks of Thesis

1. To perform the comparative research of energy and environmental parameters of DEs operating on 2nd gen. FAME and alcohol blends.
2. To carry out the research of reliability indicators of DEs operating on blends.
3. To investigate the influence of FAME oxidation to energy and environmental parameters of DE exploitation.
4. To prepare methodology in order to increase the adequacy of DEs exploitation characteristics simulation.
5. To evaluate (based on experiments) the energy and environmental efficiency of blends use in Lithuanian transport sector.

The Research Methods

Experiments were carried out using DE stands (VGTU, BME) and exploitation conditions (Navy). Different type 3 DEs (transport purpose) were chosen as the objects of experimental research:

- vehicle purpose – Audi 1.9 TDI 1Z, Vilnius Gediminas Technical University;

- vehicle purpose – Audi 1.9 TDI 1Z, Budapest University of Technology and Economics;
- ship purpose – Agco Sisu Valmet 320 DMG with an electric generator Stamford UC.M224C2 28, Lithuanian Navy.

The adequacy of research results ensured using:

- devices which accuracy corresponds to the existing standards;
- the mathematical statistical methods for the treatment of results;
- in practice approved methodologies of DE research;
- the collated analysis of experimental and simulation results, etc.

The research of dissertation work is based on experimental studies and simulation methods. Fortran programming language designed model was used for the treatment of large experimental data array, AVL Boost software package Burn was used for approximate determination of heat release rates, using Impuls program developed DE model was used for DE work processes simulation.

The well-known (I. I. Vibe, G. Woschni, F. Anisits, T. Bulaty, W. Glanzman, etc.) mathematical models, methodologies were used in simulation and analytical research.

The modern certified stationary and portable equipment and hardware of DE energy and environmental parameters registration were used in research. Equipment and hardware meets the requirements of measuring standards.

Scientific Novelty

1. The methodology of DE work process and heat release characteristics $dx/d\varphi = f(\varphi)$ parameters determination was reasoned using analytical and simulation research.
2. The data of energy and environmental parameters of transport purpose direct fuel injection DEs running on multicomponent FAME and alcohol blends instead diesel fuel.
3. The data of 2nd generation FAME (rape and *Camelina sativa* oil) oxidation influence to energy and environmental parameters of direct fuel injection DE.

The Practical Significance of the Obtained Results

1. The use of developed methodology of DE work process characteristics determination allows to rise the adequacy of performance parameters simulation investigation in the case of limited amount of experimental data.
2. The energy and environmental parameters of direct injection DEs working on 2 and 3 components blends of FAME, alcohol and diesel fuel. Based on these parameters carried out the assessment of energy and environmental efficiency replacing investigational compounds instead diesel fuel.
3. The data of energy and environmental parameters change (due to biofuel oxidative instability) of DE working on rape, *Camelina sativa* methyl ester and diesel fuel blends. According this data the regulation of effective use of these biofuels in the transport sector structure can be formed.
4. Formed methodology, which is based on the normative acts, experimental research, and its practical adaptation carrying assessment of the environmental and energy efficiency in the case of replacing biofuel blends instead D in existing DEs parks.

Defended Propositions

1. The properties of direct injection DE running on 2nd gen. *Camelina sativa* and algae methyl ester blends are as good as properties of certificated rapeseed methyl ester blends. Comparing to the properties of D:
 - the efficiency of energy use increases up to ~4%;
 - the environmental indicators improved up to ~80%.Comparing with D the multicomponent alcohol blends characterized up to 4% increase of efficiency of energy use.
2. The reliability parameters of DE working on B30 (RME) FAME blend or with alcohol additive B30 (RME+10M) are not worse than working on D.
3. According to the energy (η_e) and environmental (CH, SM, NO_x, CO) parameters during the ordinary-condition storage the FAME remains advantageous (in comparison with diesel fuel) for:
 - 14 months – 1st generation RME (with 0.02 g/kg RME of Ionol BS 200 antioxidant);
 - 8 months – 2nd generation CSME (without antioxidant).
4. The research results of exploitation parameters of DE running on FAME and alcohol blends give the base for energy and environmental assessment of exploited diesel means (park-level). For example replacing B30 FAME instead D in vessel purpose DEs park there can be achieved up to ~4% increase of energy use efficiency, and decrease of CO₂ up to 13% and exploitation average cyclic indicators – up to ~50%.
5. The B30 FAME blends have the better rates of incomplete combustion product (CO, HC) emission than B50 blends which contains alcohol.
6. The method which based on temperature registration of exhaust gas or part's surface of exhaust gas system allows to simulate adequate the DE exploitation parameters and heat release characteristics in the case of limited amount of experimental data.

Approval of Research Results

13 scientific articles were published: 4 – in journals of Thomson ISI list ((Lebedevas *et al.* 2012, Lebedevas *et al.* 2013, Lebedevas *et al.* 2013, Makarevičienė *et al.* 2014); 4 – in periodical peer-reviewed science journals (Žaglinskis *et al.* 2012, Lebedevas *et al.* 2012, Lebedevas *et al.* 2012, Žaglinskis *et al.* 2013); 3 – in peer-reviewed proceedings of international conference (Žaglinskis ir Lebedevas 2010, Žaglinskis and Lebedevas 2011, Melaika *et al.* 2013); 2 – in peer-reviewed proceedings of national conference (Lebedevas *et al.* 2012, Žaglinskis 2014).

The research results were presented in eight scientific conferences:

- 14th, 15th international conference “Transport means”, Klaipėda 2010, 2011;
- international conference of Eureka project “E!4018 Camelina-Biofuel” “Investigations of Camelina sativa technology to manufacture and usage biofuels under Lithuania and Polish conditions”, Gargždai 2011;
- 15th, 16th, 17th Conference for Junior Researchers “Science – Future of Lithuania”, Vilnius 2012, 2013, 2014;
- 8th Conference “Research of Technology Sciences in West Lithuania”, Klaipėda 2012;
- national conference Marine Science and Technology – 2014, Klaipėda 2014.

The Structure of Dissertation

The dissertation consists of introduction, 4 chapters, the list of references, the list of author publications and 6 annexes.

The text volume is 159 pages (excluding annexes) including 46 numbered equations, 42 figures and 15 tables. 171 references were used in the dissertation.

Acknowledgements

Author thanks to scientific supervisor Prof. Dr Habil S. Lebedevas for a diverse help during the preparation of dissertation. Also thanks to academic staff of VGTU Faculty of Transport Engineering Department of Automobile Transport for the quality of cooperation. Author thanks to Navy commander fl. adm. K. Macijauskas and staff for the opportunity to use the current infrastructure. Also thanks to Assoc. Prof. of Budapest University of Technology and Economics Akos Bereczky and his team for warm welcome and good working conditions during Erasmus internship.

1. The Review of Biofuel Demand and Use and Analysis of Scientific Literature

Engines transform the heat energy of fossil fuel combustion products into mechanical energy as a secondary product the exhaust gas with some residual thermal energy are emitted to into atmosphere. The exhaust gas contains harmful and not harmful compounds of complete and incomplete oxidation (CO_2 , CO , NO_x , NH_3 , CH , SM , PM , SO_x , H_2O , O_2 , heavy metals, etc.) (UN Conference on Environment and Development, 1992; United Nations General Assembly, 1992; The United Nations Ozone Secretariat, 2008; Fletcher 2004). Due to the harmful components in the exhaust gas the various processes are caused such as acid rain, the greenhouse effect, and so on.

These process directly or indirectly harm the ecosystem, negatively influenced the flora, fauna and human health. Due to large fleet of transport means the land (road) transport characterised by the worst environmental indicators (United States Environmental Protection Agency, 2012; TFS Green, 2012; Searchinger 2008; Fargione 2008).

The aims of Kyoto Protocol requirements are confidently carried (and still carrying) by EU. In compare to 1990 the statistics of 2011 showed that decrease of greenhouse gas (GHG) emission was 18.4% (European Environmental Agency, 2013).

During this period the GHG generation rate declined in all sectors except for fluorine production and use, and TS. According to statistics of GHG emission the TS takes 2nd place and is continuously growing. Based on this the TS is the one of the main targets of the EU in order to reduce the GHG. In order to stabilize and reduce the negative impact of EU TS there was published a number of regulatory documents which cover a wide range of obligations, ways and technologies for help to reduce the GHG emission.

The EU is solving the problem of GHG using complex means i.e. improving infrastructure, optimizing traffic flows, improve transport means design, using sustainable fuels (advanced renewable fuels) and others.

The TS is practically only EU's sector characterised by growing mission of GHG.

In a brief review of the environmental sector it can be strongly said that a large number of scientists working in the field of harmful components emission reduction from engines and plants which use fuel oxidation reactions for power generation. In a field of engines the methods (excluding movement infrastructure) of harmful components and GHG emission reduction can be divided into 3 groups:

primary – this group is generally characterized by the optimization of engine work process adjusting parameters and low-medium level structural changes and technological solutions. It may be mentioned: the regulation of fuel injection parameters; indirect fuel injection chamber; the combined use of turbocharger and intercooled; water use (different ways) in the combustion process; exhaust gas recirculation; etc.

secondary – these methods directed to the exhaust gas after-treatment – cleaning area which covers the application of the external devices and technological solutions. It may be mentioned: scrubbers which are designed for SO_x removal; the selective catalytic reduction technology for NO_x elimination; filter equipment of various constructions for exhaust gas particle matter cleaning;

the use of alternative fuels is often classified as a primary reducing method of harmful components. In today's practice used biofuels characterized as a sustainable, low-sulphur, with a maximum reduction of heavy metal content of less elemental carbon content and made from renewable raw material, and etc.

Also the use of biofuels solves the problems of efficiency improvement for energy use. The EU like other developed regions of the world does not fully ensure its energy needs that is resulting the import of energy which prices is constantly rises. In the near future the availability of energy resources will become increasingly important and it can directly or indirectly influence the EU's economic growth, political and other kinds of decisions relating to foreign relations, etc. Therefore, energy saving and effective use in EU's economy is one of the most important aspects of the European Commission strategy published in 2011 – the „A resource-efficient Europe – Flagship initiative under the Europe 2020 Strategy”. There said (European Commission. Proposal, 2011) that the efficient use of energy is the most economical and fastest way to increase energy security and an effective way to reduce GHG emissions. Also this strategy will make automatically a positive contribution to assurance of stable economic growth which is related to energy saving and reduction of imports, as well as the environmental issues.

For the purpose to increase the efficiency of energy use in TS there can be used 2nd gen. biofuels which characterized by a higher level of sustainability. Biofuels in various cases has a higher energy efficiency index which a positive effect caused by the lower H_u and close fuel consumption compared with D (Lebedevas *et al.* 2012, Žaglinskis *et al.* 2012, Lebedevas *et al.* 2013, Tesfa *et al.* 2011, Makarevičienė *et al.* 2014, Das *et al.* 2013). This feature of biofuels depending on the type of raw material, manufacturing process, bio-component concentration in blends, chemical-physical characteristics, DE working conditions, etc.

Regarding to air pollution and energy consumption the road transport is the most problematic which itself forms a priority place in queue of TS segments for energy saving and emission reduction measures use. One of the measures could be the biofuels

but for wider applications in TS there is necessary to carry out the complex research some of which are presented in this thesis.

Based on analysis of the Lithuanian TS two relevant segments are attractive (according to their specificity) for the use of biofuels and were chosen (roads and water segments) for this thesis. There were selected two types of high-speed direct injection DEs: Water transport (also multipurpose) DE Valmet 320 DMG (installed on vessel board as a diesel generator) which is designed for operation on biofuels and their blends; road-purpose transport 2 units. – 1992/94 Audi 1.9 TDI (as a test bench component), not adapted for work on biofuels. On the base of DEs experimental data and calculation author carries the energy and environmental assessment of D and biofuel blends replacement instead D in one of selected Lithuanian transport (water transport) segment.

2. The Methodology of Biofuel Blends Research

The tests carried out in conditions of brake stand and real exploitation:

- the brake stand tests related to research of energy, environmental parameters and work process characteristics;
- tests under exploitation conditions covers 2 points: 1) The research of energy and environmental parameters in real exploitation conditions; 2) Research of FAME exploitation (use) characteristics – research of influence of long-term FAME oxidation to energy and environmental parameters of operating DE.

The certified and modern equipment was used in research. Equipment class ensures the accuracy of DE measurement requirements according LST ISO 3929, LST ISO 3930. The portable equipment was used for determination of fuel consumption, harmful components in exhaust gas, and modules of various profiles, etc.

The selected investigation object (-s) was 4 stroke 4-cylinder 1.9 TDI DE type 1Z of vehicle Audi-80. The DE with an open combustion chamber in direct injection, containing a turbo compressor, an exhaust gas recirculation system and electronic engine control unit was tested. The main technical data of the engine are presented in table S.2.1.

Table S.2.1. The main parameters of Audi engine 1.9 TDI 1Z

Parameter	Value
Engine displacement V_h , cm ³	1896
Compression ratio ε	19.5
Rated power P_e , kW	66
Rotation moment M_s , Nm	180 (2000–2500 min ⁻¹); 202 (1900 min ⁻¹)
Mean effective pressure P_{me} , MPa	1.19 (180 Nm)
Cylinder bore D , mm	79.5
Piston stroke S , mm	95.5

* – Different information given by stuff of VGTU and BME laboratories.

To approximate the results of tests of actual operating conditions, tests were performed in a VALMET 320 DMG diesel generator on board a ship.

DE VALMET 320 DMG (manufactured by AGCO SISU POWER, Finland), intended for running on a wide range of fuels, including pure (100%) biodiesel, which

by itself, ensures the optimal operating characteristics of the DE to prevent changing the adjustment parameters for running on biofuels. The main operating parameters for the DE are provided in table S.2.2.

Table S.2.2. Diesel engine VALMET 320 DMG main parameters

Parameter	Value
Number of cylinders	3
Cylinders volume, dm ³	3.3
Cylinder diameter, mm	108
Stroke, mm	120
Maximal power, kW	30
Rated speed, rpm	1500
Starting pressure of fuel injection, MPa	23.5 ± 0.5
Fuel injection	Direct
High pressure pump	Sectional Bosch

The experimental speed and load regimes of DE are shown in table S.2.3.

Table S.2.3. Speed and load regimes of tested diesel engines

Diesel engine	n , min ⁻¹	P_e , kW	p_{me} , MPa
320 DMG	1500	TE~ 25,0	–
1.9 TDI <i>VG TU</i>	1900	9,15–18,11	0,304–0,602
	2000	4,2–20,1	0,133 –0,663
	2500	5,23–26,2	0,133 –0,663
		2,6–30,9	0,0663–0,7755
1.9 TDI <i>BME</i>	2000	9,07–36,1	0,287–1,1426
	2500	11,86–47,5	0,30025–1,1996
	3000	12,47–50,755	0,2631–1,071
	3500	13,08–52,54	0,2366–0,94997

Tests of DEs operation on different fuel were carried out considering to features which increase the accuracy and adequacy of results:

- the research was carried out during steady state regimes of DE operating;
- the indicators of DE were measured after the stabilization of thermal conditions i.e. 7–10 minutes operation before measurement;
- the measurement was carried out not less than three times during DE tests and with further average calculation.
- in order to control the technical condition of tested DE (very important for execution of comparative experimental research) the indicators of DE operating on D were recorded for 2–3 times (test start, during and end).

The Avl Boost Burn and Impuls software was used for simulation research. The base of both programs is the single-zone model of DE indicated process parameters calculation. The single-zone models are widely used for DE research. In the case of coherence with research object's parameters (at operating nominal regime) the models ensure an acceptable adequacy of DE operating parameters in part-load regimes. At the

same time the data array of single-zone models is much smaller compared to multi-zone. This feature is very important in exploitation conditions research and during research of different DEs. Based on this also considering to thesis tasks in particular to methodological task the Burn and Impuls single-zone software was used. The heat release characteristics in these programs can be realized according I. I. Vibe (Vibe 1962) equation which practically consists of 2 variables (m and φ_z):

$$\frac{dx}{d\varphi} = 6,908(m + 1) \left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)^m e^{-6,908\left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)^{m+1}}. \quad (\text{S.2.1})$$

Precisely this "controllability" of $dx/d\varphi$ expression during variation calculations of DE work process gives base for methodological tasks of thesis and their solutions.

3. The Analysis of Blends Experimental Research Results

Tested biofuels (B, RBE and methyl esters of *Camelina sativa*, *Chlorella protothecoides*) were manufactured and analysed (chemical, physical properties and etc.) by staff of Aleksandras Stulginskis University Laboratory of Chemical and Biochemical Research for Environmental Technology during the cooperated implementation of the international projects: Eureka: Biowastefuel E!3234, Camelina-Biofuel E!4018 and etc.

Research was carried out using 2 and 3 components FAME, FABE and alcohol based blends:

- B30 (RME) blend of rape methyl ester (RME) and D – blend of 2 components which has volume rate D70/RME30;
- B30 (B) blend of butanol (B) and D – blend of 2 components which has volume rate is D70/B30;
- B30 (RME/B), B50 (RME/B) and D blends of rape methyl ester, butanol and D – blends of alcohol and FAME, volume rate are D70/RBE15/B15 and D50/RBE25/B25;
- B30 (RBE/RME) and B50 (RBE/RME) and D blends rape butyl (synthetic) ester butanol and D – blends of alcohol and FABE, volume rate are D70/RBE15/B15 and D50/RBE25/B25;
- B30 (WCME) blend of winter *Camelina sativa*, pork lard methyl esters and D – blend of 3 components which has volume rate is D70/WCME30;
- B30 (WCME) blend of spring *Camelina sativa*, pork lard methyl esters and D – blend of 3 components which has volume rate is D70/SCME30;
- B30 (DME) blend of micro algae methyl ester (DME) and D – blend of 2 components which has volume rate is D70/DME30;
- B30 (RME+10M) blend of methanol and B30 (RME) – blend of 3 components which has volume rate is (D70/RME30)90/M10;

The generalized results of all blends DE tests are shown in table S.3.1.

Table S.3.1. The summarized results of diesel engine tests

Parameter	δ from D			
	Positive		Negative	
	Dominant	Maximum	Dominant	Maximum
NO _x	0– –2%	–16– –28%	+3–+5%	+10–12%.
CO	–5– –16%	~ –20%	–	+5%
SM	–20– –30%	3,5–7 times	–	–0.5–0
HC	–8– –15%	–33– –36%	+ 4– +7%	+20–+40%
b_e	–	–	+3–+8%	+13–+32%
η_e	+2–+4%	~ +6,5%	–3–0%	–14%

Table S.3.2 shows the research results of biodiesels oxidation influence to DE parameters.

Table S.3.2. The research results of biodiesels oxidation influence to diesel engine parameters

Param.	Storage period of WSME/SCME, months				Storage period of RME, months			
	0	6	8	13	0	6	14	19
	δ from D, %							
NO _x	+2.95 / +2.4	+2.5 / –	–2.0 / –0.5	0 / –	+2.6–+2.7	+2.9	–2.5	0
CO	–5.5 / –2.5	–7.7 / –	–8.0 / –10.0	0 / –	–5.0– –6.5	–9.9	–8.5	0
CH	–1.2 / –8.0	–7.5 / –	–1.2 / +7.5	0 / –	+4.0	–	+4.0	0
SM	–27.0 / –25.0	–10.0 / –	–23.0 / –23.2	0 / –	–25.0	–30.0	–21.0	0
η_e	+3.0 / +2.0	– / –	+4.6 / +3.6	0 / –	+3.0	+4.6	+4.95	0

The research results of 2 year FAME oxidation influence to on the DE DMG Valmet 320 parameters shows (Table 3.2.S) that during 14 months of B30 (RME) (with antioxidant) storage didn't lose its advantage of DE properties (energy [η_e] and environmental [CH, SM, NO_x, CO]). Compared with D an increase of 3–4.5% is kept (since manufacture): 14 months of storage for RME; 8 months for WCME and SCME. Compared with D the use of B30 which contains oxidised RME up to 14 months and *Camelina sativa* FAME up to 8 months is characterized by: the maximal reduction of CO reaches 8–10%; exhaust gas smokiness reduced by 20–25%; the change of HC and NO_x concentration is not significant.

The energy and environmental assessment (according cycle D2 of standard ISO 8178) of commercial fishing vessel segment was carried out using the calculation method based on experimental data. Based on this calculation it can be said that the use of tested blends can bring:

- practically in all cases achieved the 1–11% reduction of total fuel consumption but in the case of D70/B30 use was observed increase of ~ 2.7%;
- 4–13% reduction of CO₂ emissions in all cases;
- 3–5% increase of energy utilization efficiency;

- the change of DE exploitation average cycle indicators. In comparison with D: HC varies -55 – $+9\%$; CO reduces up to $\sim 9\%$; NO_x increases up to $\sim 9\%$ in a single case to $\sim 20\%$.

The summarised results of tested blends in DE 320 DMG show that considering to the concentration of incomplete combustion products the B30 blends are more advantageous comparing to D and B50. The disadvantage of B50 associated with a use of relatively large amount of alcohol which changes the kinetics of combustion process.

4. The Creation of Methodology of Heat Release Characteristics Parameters Determination

During analysis of blends use in TS it is necessary to assess their impact to work process of DE. At first there is necessary to evaluate the change of work process indicators and the adjustment necessity of DE parameters in the case of blends replace instead D. One of the ways to save time, costs of research and to simplify the inventory experimental devices there can be used the simulation methods.

There is well known that the accuracy of DE simulation results heavily depends on accuracy of initial data which one of the most important – indicated diagram and/or heat release characteristics.

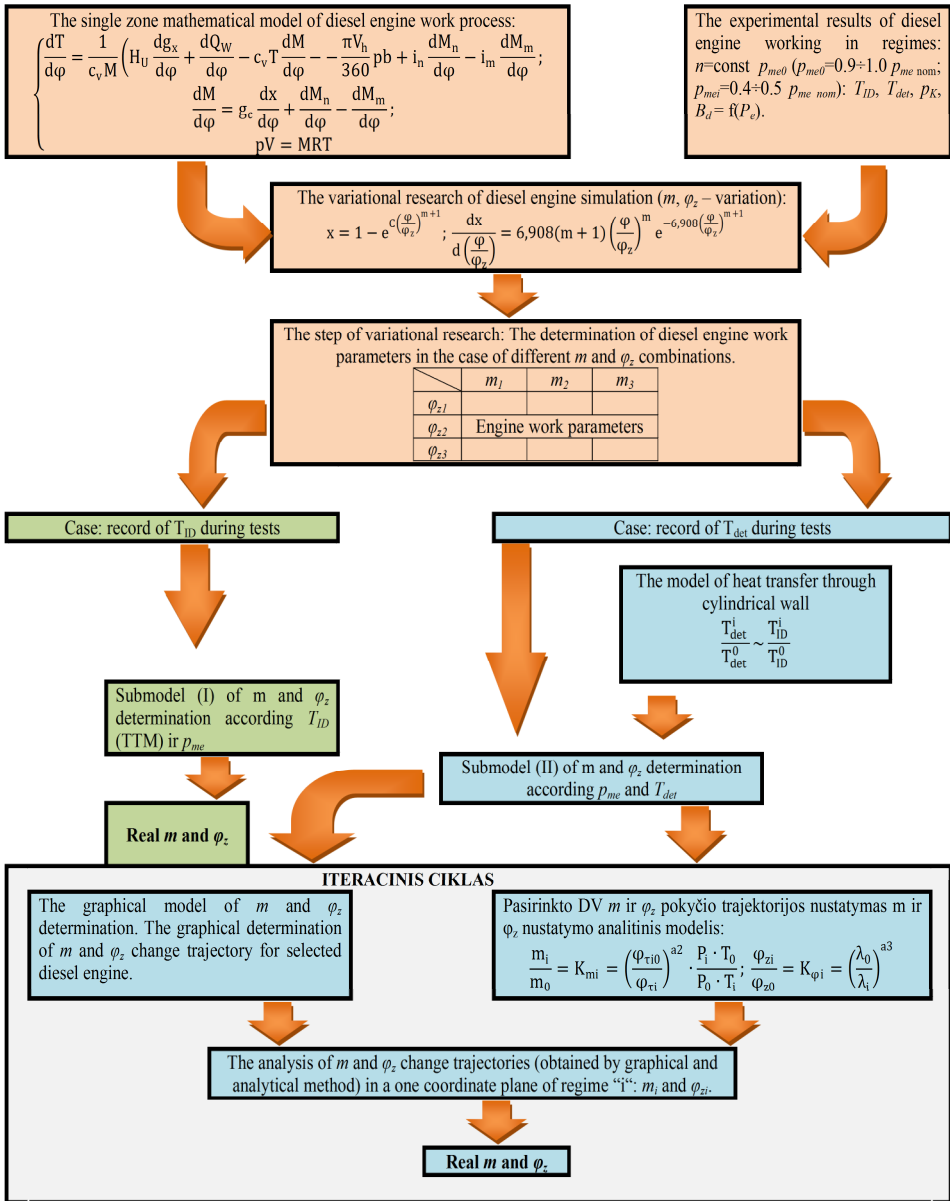
In order to make the complex simplification of experimental DE research and facilitate the assessment of fuel replacing effect in existing DEs there is appropriate to use the simulation methods which include the simplified methodology (considering results of experimental) of initial data determination.

The practical adaptation of methodology formulation process covers few aims:

- ✓ considering to experimental data there is necessary to form the mathematical model of DE 1.9 TDI which can be used for energy research of different fuel use;
- ✓ to develop a methodology that during the lack of experimental data would allow simulating the absolute values of DE work process parameters and their change in part load regimes.

For achieve these goals the following tasks are solved:

- ✓ according to experimental data to form the mathematical model of 1.9 TDI DE which would allow determine preliminary parameters of heat release characteristics;
- ✓ to perform the modification of Bulaty and Glanzman methodology. Solving the inverse task to prove this modification for close to the nominal P_e and partial load regimes of DE operation.
- ✓ to perform the simulation of DE working on blends and to compare with experimental data;
- ✓ to develop theoretical mechanism for temperature indicators facilitated determination;
- ✓ using the modified inverse Bulaty and Glanzman methodology and iteration, to form the theoretical mechanism of heat release characteristics parameters facilitated determination. Also to prove this methodology using calculation data of 1.9 TDI and 8V396TC4 DEs.



The Burn mathematical model of 1.9 TDI DE was formed, it allows to determine the preliminary. According to the experimental data the parameters of heat release characteristics were determined: $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ $p_{me} = 1.143 \text{ MPa}$, $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ $p_{me} = 1.199 \text{ MPa}$, $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ $p_{me} = 1.017 \text{ MPa}$ respectively (m and φ_z °CA): 1.4, 49.8; 1.33, 56.4; 1.28, 59.7.

The adaptation and modification of Bulaty and Glanzman methodology was carried out. Compared with the main experimental data of DE operating on D the modification of Bulaty and Glanzman methodology gives a relatively high level of accuracy: p_{me} , P_e , b_e , η_e – $\pm 0.35\%$ range; p_{max} up to 6.0% but dominant range is $\pm 2-2.5\%$; p_K up to 7.8%.

Compared with the main experimental data of DE operating on blends the accuracy of simulated results are: b_e , p_{me} , P_e , η_e are in the range of $\pm \sim 2.0\%$; p_{max} up to -4.0% but dominant range is $\pm 1-1.7\%$; p_K up to 5.3%.

The linear dependence of T_{det} and T_{ID} was determined and proven in selected temperature range. This allows to use the iteration method in the determination of parameters m and φ_z .

Using the methodologies of inverse m and φ_z parameter determination, Woschni and Anisits and iteration, the theoretical mechanism of heat release characteristics parameters determination was created for 1,9 TDI and 8V396TC4 DE calculation cases. Also there was established that the T_{ID} , TTM or T_{det} not necessary for determination of parameters m and φ_z but the use of temperature parameters allows to increase the accuracy of results.

General Conclusions

1. The 1st and 2nd gen. biodiesel's blends (2 and 3 components) of FAME, alcohol and D were tested on two types of DEs (vehicle's – Audi 1.9 TDI 1Z [$n = 2000-3500 \text{ min}^{-1}$, $p_{me} = 0.236-1.199 \text{ MPa}$] and ship's – Valmet 320 DMG [$n = 2000-3500 \text{ min}^{-1}$, $P_e = 0-0.85 P_{e \text{ nom}}$]). The results of DE energy and environmental parameters comparative research shows that DE properties (NO_x , CO, CH, SM and b_e , η_e) of tested blends are as well as properties of certificated RME blends and comparing with D the increase of efficiency energy use reaches 1-4%; at practically unchanged NO_x concentration the decrease of unburned products (CO, CH) concentration reaches up to 20% and exhaust gas smokiness – 55-85%.

2. The reliability parameters of Audi 1.9 TDI DE while working ($n = 2000-3500 \text{ min}^{-1}$, $p_{me} = 0.236-1.199 \text{ MPa}$) on tested blends B30 (RME), B30 (RME+10M) are not worse than working on D. B30 (RME+10M) shows higher values of reliability criteria practically in all DE load range but at maximal point of tested load values are not higher than B30 (RME) and D.

3. The engine parameters of ordinary-condition stored CSME and RME biodiesels and diesel blends were researched. The results shown that the environmental and energy parameters of engine fueled by blends remains advantageous (comparing with diesel fuel) during the term of biodiesel storage:

- 14 months RME (with antioxidant);
- 8 months CSME (without antioxidant).

4. In the case of FAME and alcohol blends use instead D the energy and environmental effect of Lithuanian transport segment was investigated.

In the commercial fishing vessel segment the CO_2 emission decreases 4-13%, coefficient of performance 3-5%. Comparing with D the change of exploitation average

cyclic indicators reaches: CH -55 – $+10\%$; CO – decrease $\sim 9\%$; NO_x increase $\sim 10\%$, individual cases up to $\sim 20\%$.

5. The generalized assessment of all tested blends result was made using rate of O₂ content in the fuel. It showed that in the case of unburned products the B30 blends are superior comparing with D and B50.

6. The methodology of heat release (in DE cylinder) characteristic parameters (Vibe) determination based on a limited amount of experimental data was developed (according Audi 1.9 TDI experimental data) and approved. The theoretical mechanism of heat release parameters easier determination was formed using reverse modified m and φ_z parameters determination methodology also Woschni and Anisits methodology and iteration. The proof of this methodology was made with DE 1.9 TDI and 8V396TC4 calculations.

Priedai¹

- A priedas.** Biodegalų poreikio ir panaudojimo apžvalga ir mokslinių tyrimų analizės medžiaga
- B priedas.** Biodegalų eksperimentinių tyrimų priemonių, įrangos, metodikos aprašas
- C priedas.** Eksperimentinių biodegalų mišinių tyrimų, rezultatų analizės medžiaga
- D priedas.** Šilumos išsiskyrimo parametrų nustatymo metodikos kūrimo pagalbinė medžiaga
- E priedas.** Bendraautorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą disertacijoje
- F priedas.** Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

¹ Priedų informacija pateikiama kompaktiniame diske

Justas ŽAGLINSKIS

DYZELINIŲ VARIKLIŲ, DIRBANČIŲ ANTROS KARTOS BIODEGALŲ MIŠINIAIS,
EKSPLOATACINIŲ CHARAKTERISTIŲ TYRIMAI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
transporto inžinerija (03T)

THE RESEARCH OF EXPLOITATION CHARACTERISTICS OF DIESEL ENGINES
RUNNING ON SECOND GENERATION BIOFUEL BLENDS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Transport Engineering (03T)

2014 11 07. 15,25 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Baltijos kopija“
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius