

Benzininio variklio purkštukų parametrų tyrimas

Research on the Parameters of Gasoline Engine Injectors

Giedrius Brunius

Šiaulių valstybinė kolegija, Transporto inžinerijos katedra
E. p. giedrius.brunius@gmail.com

Artūras Sabaliauskas

Šiaulių valstybinė kolegija, Transporto inžinerijos katedra
E. p. a.sabaliauskas@svako.lt

Santrauka. Automobilių varikliams vis tobulėjant, keičiasi juos sudarančios sistemos – ne išimtis ir kuro purkštukai. Iš purkštuko išpurškiamo kuro kokybė turi atitikti tam tikrus reikalavimus: išpurškiamo kuro kiekis, išpurkštų lašelių dydis, kuro fakelo ilgis. Pasitelkus mokslinės literatūros šaltinių analizės ir sintezės metodą, šiame darbe apskaičiuoti pagrindiniai benzininių purkštukų parametrai. Tyrimo rezultatai palyginti su iš purkštukų bandymo stendo gautais parametrais.

Darbas parengtas G. Bruniaus magistrinio darbo pagrindu.

Prasminiai žodžiai: benzininiai purkštukai, išpurškiamo kuro kiekis, lašelių dydis.

Summary. Automotive engines are getting more and more advanced. This causes the change in the development of injectors. The nozzle spray fuel quality has to meet certain requirements, such as sprayed droplet size, flare length, and sprayed fuel. Using the method of analysis and synthesis of scientific literature sources, the main parameters of gasoline injectors were calculated in this work. The results of the research have been compared with calculated parameters obtained from the injectors test stand.

The paper has been prepared on the basis of G. Brunius' Master Thesis.

Keywords: gasoline injectors, droplet size, mass flow rate.

Įvadas

Pastaruoju metu labai daug kalbama apie šiltnamio reiškinį, teigiama, jog didžiausia problema yra mineraliniai degalai, tad Europos Sąjunga diegia naujus standartus automobilių išmetamųjų dujų kiekio normoms. Šiuolaikiniai automobiliai yra aukšto techninio lygio ir puikios kokybės, tenkinantys net gana įnoringų vairuotojų poreikius. Gamintojai, norėdami kuo mažesnėmis degalų sąnaudomis išgauti didesnę variklio naudingumą

Received: 2020-11-30. Accepted: 2020-12-18

Copyright © 2021 Giedrius Brunius, Artūras Sabaliauskas. Published by Vilnius University Press. This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution Licence](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

koeficientą, ieško variklio gerinimo technologijų. Viena iš svarbiausių tyrimo kryptių, siekiant mažinti kuro kiekį tiesioginio įpurškimo sistemoje, yra purkštukų veikimo tobulinimas. Kuo smulkesniais lašeliais išpurškiamas kuras, tuo jis geriau susimaišo su oru, sudarydamas tinkamesnę degimo mišinį.

Tyrimo tikslas – ištirti, koks yra benzininio kuro purkštuko išpurškiamų lašelių ir kuro kiekio dydis benzininiame variklyje, esant skirtingiems kuro slėgio parametrams.

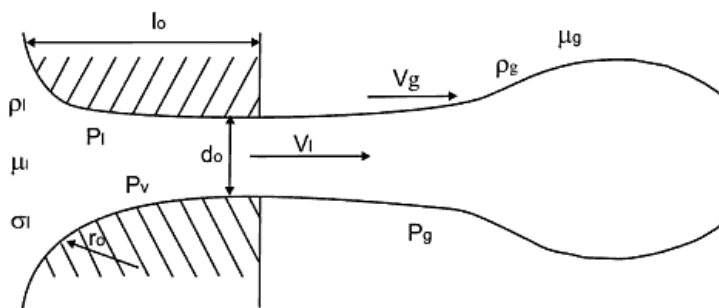
Darbas parengtas G. Bruniaus magistrinio darbo pagrindu [4].

Benzininio kuro purkštuko skaičiavimo metodai ir charakteristikos

Benzininių purkštukų paskirtis yra benzino išskaidymas į kuo mažesnius lašelius. Benzino lašų garavimo greitis priklauso nuo bendro jų paviršiaus ploto. Esant vienodam įpurškto benzino tūriui, didesnių benzino lašų bendras paviršiaus plotas yra mažesnis nei mažesnių lašelių bendras paviršiaus plotas. Dėl šios priežasties mažesni lašeliai išgaruoja greičiau, todėl padidėja galimybė išgarinti visą įpurškto benzino kiekį.

Tam, kad benzinas būtų sudegintas ir iš jo išgautas maksimalus naudingumas, jo lašeliai turi būti išgarinti, nes skysčio pavidalu benzinas nesudega. Tik benzino garai, sumaišyti su oru, sudaro degųjį mišinį. Degusis mišinys yra tiekiamas į variklio galvutėje arba pačiame cilindre esančią degimo kamerą, kur jis užsidega nuo žvakės kibirkšties. Mišinys privalo sudegti degimo kameroje, bet yra ir tokių variklių, kuriuose darbo režimai reikalauja, jog dalis degiojo mišinio būtų sudeginta kataliziniame konverteryje, kad būtų pakelta variklio temperatūra.

Vienas iš svarbiausių kriterijų, apibūdinančių benzininio variklio purkštuką, – jo skylučių kiekis bei jų skersmuo, todėl tyrimu siekta išsiaiškinti, koks skylučių kiekis ir jų skersmuo yra pats optimaliausias, išpurškiant kurą į variklio cilindrą, kad jame susimaišytų tinkamos konsistencijos degusis mišinys. Tai užtikrina, jog sumažės CO₂ emisija taupant degalus ir išgaunant maksimalią variklio galią.



1 pav. Svarbiausi kintamieji, apibūdinantys išpurškimo procesą

Norint išsamiai suprasti, kaip purkštuke vyksta išpurškimo procesas, reikia tiksliai išanalizuoti purkštuko antgalį sudarančius fizikinius parametrus. Autorių [1] sudarytoje schemeje, kuri pateikiama 1 paveiksle, pavaizduoti esminiai kintamieji, apibūdinantys išpurškimo procesą.

Pagal 1 paveikslą pateiktus išpurškimo procesą apibūdinančius kintamuosius 1 lentelėje pristatomi purkštuko veikimui įtaką darantys kintamieji, suskirstyti į grupes, – skylių geometrija, išpurškimo sąlygos, išpurškiamo skysčio parametrai, darbinio skysčio ypatybės.

1 lentelė. Kintamieji, turintys įtakos purkštuko veikimui

Skylės geometrija	Išpurškimo sąlygos	Išpurškiamo skysčio parametrai	Dujų, į kurias išpurškiamas skystis, parametrai
Angos skersmuo (d_0)	Išpurškiamo skysčio slėgis (P_1)	Tankis (ρ , kg/m ³)	Tankis (ρ_g , kg/m ³)
Angos ilgis (l_0)	Aplinkos dujų slėgis (P_2)	Skysčio kinematinis klampumo koeficientas (μ)	Kinematinis klampumas (μ_2)
Angos išėjimo spindulio ilgis (r_0)	Slėgio pokytis ($\Delta P = P_1 - P_2$) Vidutinis išpurškiamo skysčio greitis (V_s)	Paviršiaus įtempio koeficientas (σ , mN/m)	

Visi šie kintamieji gali būti pritaikomi bedimensinėse formose. Tai leidžia supaprastinti skaičiavimus ir susieti ryšius. Šie bedimensiniai kintamieji, atliekant skaičiavimus, naudojami daugeliu atvejų: Reinoldso skaičius (ryšys tarp inercinių ir klampos jėgų) Re ; Weberio skaičius (ryšys tarp paviršinio įtempimo ir inercijos jėgų) We ; Teiloro klampos parametras Ta ; Ohnesordžo skaičius Oh ; skylės pralaidumo koeficientas Cd ; kavitacijos parametrai K . Be šių, naudojami ir kiti parametrai: skysčio greitis V_s , skylės skersmuo A , pratekėjimo debetas Q , skysčio pralaidumas μ_f [1].

Autorių teigimu [3, 8], dėl trinties efekto skysčio kinetinė energija yra palaipsniui verčiama į darbinį dujų kinetinę energiją. Ši energija nuolat tolygiai mažėja iki to momento, kol lašelių judėjimas tampa priklausomas nuo judančių dujų cilindre. Išanalizavus mokslinę literatūrą, buvo pastebėta, jog kitų autorių tyrimuose išpurškiamų skysčio lašelių srauto skverbtis priklauso nuo iš purkštuko išpurškiamų lašelių pagreičio. Pirmieji iš purkštuko išpurkšti lašeliai patiria didesnį aerodinaminį pasipriešinimą, todėl jie plačiau pasiskirsto. Lašeliai, išpurkšti vėliau, lekia tiesesne trajektorija. Dėl šios priežasties, reikia pabrėžti, benzino kuro lašeliai yra kompaktiško tipo, ir tai leidžia jiems turėti didelę skverbtį.

Atlikus išpurškimo srauto skaičiavimus [9], pastebėta nemažai sąsajų, leidžiančių nustatyti esminius kintamuosius, kurie veikia kuro purkštukų išpurškimo indeksą.

Tyrimas atliktas naudojant bandymų standą (2 pav.), kurio darbinis spaudimas 0–12 barų [2].



2 pav. Benzininių purkštukų testavimo stendas su ultragarsiniu valdymu GS2

Benzininių purkštukų išpurškimo parametrų apskaičiavimas

Pirmiausiai, siekiant išsiaiškinti, kokio tipo yra kuro tekėjimo savybės purkštuko viduje, būtina apskaičiuoti Reinoldso skaičių. Šis skaičius yra bedimensė konstanta, kuri parodo skysčių inercinių ir klampos jėgų santykį.

$$Re = \frac{\rho V_s L}{\mu}, \quad (1)$$

čia L – charakteringas sistemos ilgis, m; $V_s = \sqrt{2 \cdot \Delta P^2 / \rho}$ – kuro srauto greitis m/s.

Weberio skaičius parodo, kokia yra įpurškiamo skysčio sąveika su darbinėmis dujomis: ar ji gera ir ar ji padeda išsisklaidyti įpurškiamiems lašeliams visame cilindro tūryje. Kuo gaunamas skaičius yra didesnis, tuo maišymasis yra geresnis. Pagal [7] šis skaičius turi būti didesnis už 1 000, kitaip maišymasis cilindre neįvyks:

$$We = \frac{\rho V_s^2 L}{\sigma}. \quad (2)$$

Teilorio skaičiumi išvedamas bedimensis dydis, kuris, panašiai kaip ir Weberio skaičius, nusako dviejų skirtingų fizikinių kūnų maišymąsi:

$$Ta = \frac{Re}{We} = \frac{\sigma}{\mu \cdot V_s}. \quad (3)$$

Ohnesordžo skaičius nusako santykį tarp tamprumo jėgos, inercijos bei įtempimo jėgų [6]. Reikia nepamiršti, kad Ohnesordžo skaičius yra naudojamas tik atliekant skysčių ir dujų įpurškimo technologinius skaičiavimus:

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re}. \quad (4)$$

Purkštuko skylių pralaidumo koeficientas [10] padės išsiaiškinti, koks kuro kiekis gali pratekėti esant skirtingiems kuro tekėjimo greičiams ir slėgiams. Kuo gautas skaičius yra didesnis, tuo daugiau kuro gali pratekėti. Skaičiuojamas skylės pralaidumo koeficientas Cd :

$$Cd = \frac{V_s L}{\sqrt{2 \cdot \Delta P / \rho}}. \quad (5)$$

Kaip ir bet kuriame hidrauliniame prietaise, taip ir kuro purkštuke kavitacijos atsiradimas yra nepageidaujamas. Apskaičiavus kavitaciją, sužinome, kokiam minimaliam slėgiui esant išsiskiria oro burbuliukai.

$$K = \frac{2 \cdot \Delta P}{\rho \cdot V_s^2}. \quad (6)$$

Purkštuko pralaidumas pagal pasirinktą slėgį ir skylių skersmenį:

$$f = \frac{V_s \cdot A}{\sqrt{2 \cdot \Delta P / \rho}}, \quad (7)$$

čia A – skylės skerspjūvio plotas, mm^2 .

Svarbus parametras, apibūdinantis kuro purkštuką, yra jo išpurškiamų kuro lašelių dydis. Kuo mažesni lašeliai, tuo jie veikiami darbinių dujų srovių lengviau išsimaišo cilindre ar degimo kameroje:

$$SMD = 8,7(Re \cdot We)^{-0,28} \cdot d_0. \quad (8)$$

Taip pat reikšmingas rodiklis yra purkštuko išpurkšto fakelo ilgis. Jei minėtas ilgis yra per didelis, tai kuro lašeliai nuskrenda per toli ir atsitrenkia į variklio cilindro sienelės, nuo jų atšoka arba prikimba, taip susijungdami su kitais lašeliais, o tai daro neigiamą įtaką uždegimo procesui. Tokiu atveju kuro mišinys variklio cilindre tampa „per riebus“ (maža kuro norma), tad krenta variklio galia, nes išsiskiria per mažai šiluminės energijos. To pasekmė – neefektyviai naudojamas kuras ir labiau teršiama aplinka. Taigi toliau skaičiuojamas išpurškiamų kuro lašelių fakelo ilgis pagal pasirinktus parametrus:

$$L_b = C_f(d_0)We^{-0,1} \cdot Re^{-0,3}(\rho/\rho_g), \quad (9)$$

čia C_f – koregavimo konstanta, ρ_g – cilindre esančių dujų tankis, kg/m^3 .

Benzininių purkštukų analitinio tyrimo rezultatai

Benzininių purkštukų analitinio tyrimo duomenys surašyti į 2 lentelėje. Papildant tyrimą, buvo apskaičiuotas kuro purkštuko su 10 išpurškimo skylių (esant 15 barų išpurškiamam kuro slėgiui) išpurškiamo kuro lašelių dydis, kuro lašelių kiekis, išpurškiamo fakelo ilgis ir skylių pralaidumo koeficientas.

2 lentelė. Tyrimo rezultatų duomenys

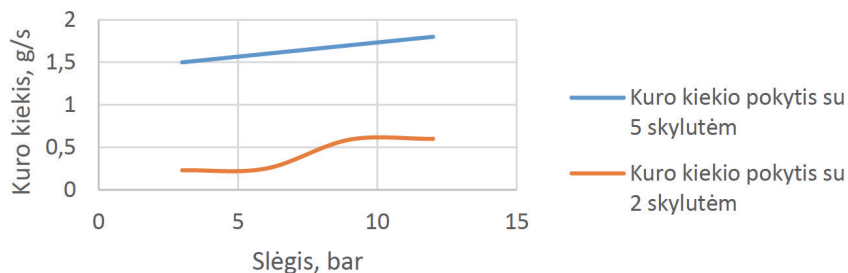
Išpurškimo slėgis, bar	Skylių skaičius, vnt.	Suminis skylių skersmuo, μm	Apskaičiuotas išpurškto kuro kiekis, g/s	Išpurškiamų lašelių dydis, μm	Skylių pralaidumo koeficientas, C_d	Išpurškiamų lašelių fakelo ilgis, mm
3	2	100	0,23	7,8	0,0041	9,7
3	3	150	0,6	6,91	0,0041	9,5
3	4	200	0,95	5,95	0,0041	9
3	5	250	1,5	4,85	0,0041	8,9
6	2	100	0,24	3,44	0,004	18,2
6	3	150	0,67	3,3	0,004	13,1
6	4	200	1	2,29	0,004	10,4
6	5	250	1,6	2,25	0,004	10
9	2	100	0,59	2,9	0,0038	24,3
9	3	150	0,6	2,6	0,0038	17,6
9	4	200	1,1	1,9	0,0038	13,9
9	5	250	1,7	1,67	0,0038	11,7
12	2	100	0,6	2,7	0,0025	41,9
12	3	150	0,65	2,1	0,0025	30,3
12	4	200	1,2	1,95	0,0025	25,8
12	5	250	1,8	1,75	0,0025	22
15	2	100	0,35	2,4	0,0022	20
15	3	150	0,85	1,95	0,0022	18
15	4	200	1,55	1,86	0,0022	16
15	5	250	2	1,8	0,0022	14
15	5	250	2	1,6	0,002	15

Iš 1 lentelėje iliustruojamų duomenų galima teigti, kad iš purkštuko išpurškto kuro kiekis priklauso nuo kuro slėgio – kuo kuro slėgis didesnis, tuo išpurškiamas kuro norma yra didesnė (3 pav.).

Purkštuko su penkiomis skylutėmis kuro kiekis žymiai skiriasi nuo purkštuko su dviem skylėmis. Išpurškiamo kuro kiekis esant 12 barų skiriasi 3 kartus, o esant trims barams – net 6,5 karto.

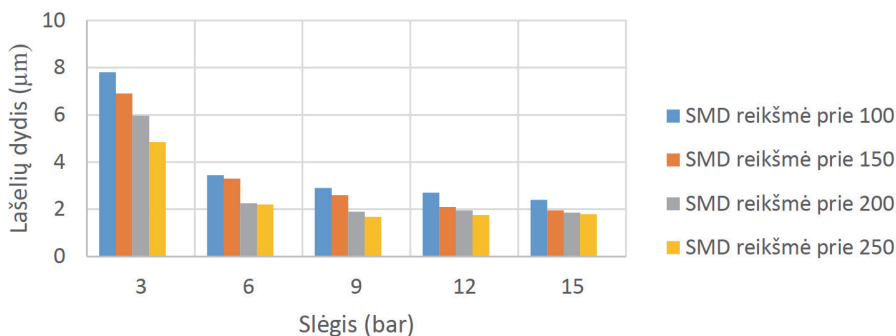
Norint gauti mažesnę išpurškto kuro kiekį, galima trumpinti kuro purkštuko darbo laiką (atidarymo laiką), nes kitos purkštuko savybės nenukenčia. Didinant kuro slėgį pagerėjo ir kiti purkštuko parametrai, ypač kuro lašelių dydis. Kaskart padidinus kuro slėgį, išpurškiamų lašelių dydis palaipsniui mažėjo. Padidinus slėgį iki 15 barų, pirmame purkštuke lašelių dydis sumažėjo 30 proc., antrajame – 28 proc., o trečiajame – 31 proc.

Didžiausias kuro lašelių sumažėjimas pastebimas paskutiniame purkštuke, kur lašelių diametrai sumažėjo net 37 proc.



3 pav. Kuro kiekio priklausomybė nuo slėgio

Iš rezultatų (4 pav.) galima teigti, kad kuo kuro slėgis yra didesnis, tuo išpurškiamų lašelių skersmuo yra mažesnis. Išpurškiamo fakelo ilgiui kuro slėgis didelės įtakos nedarė, dažniausiai padidėjo tik keliais procentiniais punktais. Tai patvirtina teiginį [5], kad kuo didesnis kuro slėgis purkštuke, tuo mažesni yra išpurškiami kuro lašeliai, kartu juos veikia didesnės aerodinaminės jėgos ir jie gali nuskristi mažesni atstuma, net jei ir didinant kuro slėgį išlekia iš purkštuko didesniu greičiu.



4 pav. Kuro lašelių pokytis nuo slėgio

Benzininių purkštukų išpurškiamo kuro kiekio nustatymas ir įvertinimas

Tyrimui atlikti buvo naudotas kompiuterizuotas benzininių purkštukų bandymo stendas (1 pav.), kuriame vienu metu galima tikrinti keturis purkštukus ir kur slėgis gali būti reguliuojamas nuo 0,5 barų iki maksimalių 12 barų. Kaip minėta anksčiau, tai yra maksimalus dydis, kurį leidžia pasiekti šis bandymų stendas. Jame galima nustatyti purkštukų darbo laiko režimą nuo vienos sekundės iki vienos minutės. Kuro temperatūra yra palaikoma automatiškai, apie 15°C. Bandymai kartoti tris kartus.

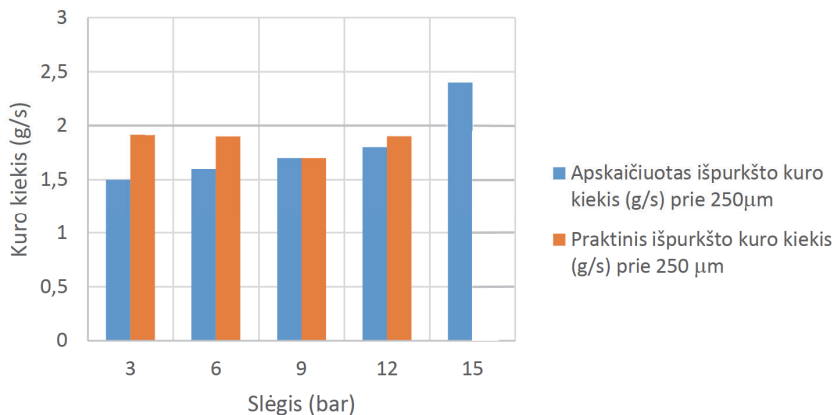
Į bandymų stendą vienu metu buvo įdėti keturi skirtingi purkštukai, kurių suminiai skylių skersmenys: 100, 150, 200, 250 μm . Kuro slėgis visiems purkštukams buvo sukeliamas po tris kartus, vienodo dydžio, atitinkamai 3, 6, 9, 12 barų.

Papildant tyrimą, buvo apskaičiuotas kuro purkštuko su 10 išpurškimo skylių (esant 15 barų išpurškiamam kuro slėgiui) išpurškiamas kuro lašelių dydis. Kuro lašelių kiekis apskaičiuotas teoriškai, nes stendo maksimalus slėgis yra 12 barų. Analitiniai ir eksperimentiniai kuro kiekio rezultatai pateikti 3 lentelėje.

3 lentelė. Kuro kiekio rezultatai

Įpurškimo slėgis, bar	Skylių skaičius, vnt	Skylių skersmuo, μm	Apskaičiuotas išpurkšto kuro kiekis, g/s	Eksperimentinis išpurkšto kuro kiekis, g/s
3	2	50	0,23	0,5
3	3	50	0,6	0,8
3	4	50	0,95	1,5
3	5	50	1,5	1,9
6	2	50	0,24	0,4
6	3	50	0,67	0,8
6	4	50	1	1,2
6	5	50	1,6	1,9
9	2	50	0,59	0,8
9	3	50	0,6	0,9
9	4	50	1,1	1,5
9	5	50	1,7	1,7
12	2	50	0,29	0,5
12	3	50	0,65	0,7
12	4	50	1,2	1,3
12	5	50	1,8	1,9
15	2	50	0,35	
15	3	50	0,85	
15	4	50	1,55	
15	5	50	2	
15	10	25	2	

5 paveiksle pateikti teoriškai ir praktiškai įvertinti kuro kiekio rezultatai, esant 250 μm suminiam skylių skersmeniui. Skirtumas tarp analitinio ir eksperimentinio rezultato sudaro iki 60 %. Toks nesutapimas galėjo atsirasti dėl skaičiavimo rezultatų apvalinimo bei kuro tankio skirtumų, kuris svyruoja 720–770 kg/m^3 .



5 pav. Lašelių dydžio priklausomybė nuo slėgio, esant 250 µm suminiam skylių skersmeniui

Išvados

1. Ištyrus ir įvertinus benzininių purkštukų kokybės gerinimo galimybes, pastebėta, kad kuro lašeliai priklauso nuo kuro slėgio. Kuo didesnis kuro slėgis purkštuke, tuo mažesni išpurškiami kuro lašeliai.
2. Išpurškiamo fakelo ilgiui kuro slėgis didelės įtakos neturėjo, dažniausiai padidėjo tik keliais procentiniais punktais. Tai patvirtina, kad kuo didesnis kuro slėgis purkštuke, tuo mažesni yra išpurškiami kuro lašeliai, kartu juos veikia didesnės aerodinaminės jėgos ir jie gali nuskristi mažesnę atstumą, net jei ir didinant kuro slėgį išlekia iš purkštuko didesniu greičiu.

Literatūra

1. Bae Ch., Kang J., 2000, *Diesel Spray Characteristics of Common-Rail VCO Nozzle Injector*. Congreso THIESEL-2000. Valencia, Spain.
2. *Benzininių purkštukų testavimo stendas su ultragarsiniu valymu GS2*, 2021. Prieiga internete: <<https://bds.lt/purkstuku-stendai/benzininiu-purkstuku-tikrinimo-stendai/benzininiu-purkstuku-testavimo-stendas-su-ultragarsiniu-valymu-GS2>>.
3. Bruyère-Bergeron S., Seers P., 2014, Relative importance of fuel properties on gdi fuel spray tip penetration. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 347–358. DOI:10.1139/TCSME-2014-0025.
4. Brunius G., 2019, *Benzininio variklio purkštukų parametrų tyrimas*. Magistro darbas. Šiaulių universitetas.
5. Li H., 2013, *CFD Modelling study of sprays and combustion of gasoline and DMF in direct injection gasoline engines*: A thesis submitted to the The University of Birmingham for the degree of Doctor of Philosophy. The University of Birmingham School of Mechanical Engineering. Prieiga internete: <<https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/4491/1/Li13PhD.pdf>>.

6. Malaguti S. F., Fontanesi S., Cantore G., 2010, Numerical characterization of a new high-pressure multi-hole GDI injector. ILASS – Europe 2010, 23rd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Brno, Czech Republic.
7. Omimi F., Movahednejad E., Nekofar K., 2008, Study of injection parameters on performance and fuel consumption in a port-injected gasoline engine with experimental and theoretical methods. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara – Journal of Engineering*. Tome VI. Fascicule 2, 39–50.
8. *Orifice, Nozzle and Venturi Flow Rate Meters*, 2004. Prieiga internete: https://www.engineering-toolbox.com/orifice-nozzle-venturi-d_590.html.
9. Pirooz A., 2014, Effects of injector nozzle geometry on spray characteristics, an analysis. *Indian Journal of Scientific Research*, 5 (1), 354–361.
10. *Spray nozzles for industrial applications*, 2017. Prieiga internete: < <http://www.pnr.eu/> >.