

---

# Paviršiaus parametru įtaka mazuto lašelio degimui

---

**Regina Kalpokaitė-Dičkuvienė**

Lietuvos energetikos institutas,  
Medžiagų tyrimų ir bandymų  
laboratorija,  
Breslaujos g. 3,  
LT-3035 Kaunas

**Anupras Šlančiauskas**

Lietuvos energetikos institutas,  
Degimo procesų laboratorija,  
Breslaujos g. 3,  
LT-3035 Kaunas

---

Darbe pateikti eksperimentiniai duomenys apie mazuto lašelio garavimą, skaidymąsi ir išdegimą ant skirtingo laidumo bei šiurkštumo paviršių. Nustatyta, kad paviršiaus savybės per  $\frac{\lambda}{\rho c_p}$  sąlygoja lakiųjų dalių garavimą, tam tikros formos anglies darinio susidarymą ir nusako lašelio dydžio bei šiurkštumo formos ryšį. Kai paviršiaus šiluminis laidumas yra pakankamai didelis, mazuto lašelis jau 600°C temperatūroje veikiamas išsiskiriančių garų skaidosi į smulkesnius, o kai kuriais atvejais – susprogs-ta. Paviršiaus šiurkštumas ir nuožulnumas dar labiau skatina lašo skaidymąsi, dėl to gerėja deguonies difuzijos sąlygos ir anglis išdega per trumpesnę laiką.

**Raktažodžiai:** mazutas, difuzija, degimas, paviršiaus šiluminis laidumas

---

## 1. ĮVADAS

Lašelių srauto sąveika su karštu paviršiumi stebima įvairiose pramonės srityse, mūsų aplinkoje. Tačiau šio reiškinio metu vykstantys procesai nėra galutinai suprasti ir teoriškai pagrįsti. Būdai, kuriais aprašomi lašelių šilumos mainai bei jų sąveika su karštu paviršiumi, dažniausiai yra empiriniai. Todėl siekiant suprasti bei teoriškai pagrįsti šiuos procesus, svarbu nustatyti individualių lašelių kaitą ir šilumos mainus.

Daugelyje darbų pateikti eksperimentiniai duomenys apie lašelio, dažniausiai žinomų savybių vienkomenčio skysčio, atsitrenkimo bei pasklidimo ant paviršiaus mechanizmą [1, 2]. Pavyzdžiui, literatūroje [2] nagrinėtas vandens lašelis, kuris metamas ant aukštinio horizontalaus paviršiaus. Pastarojo temperatūra kinta nuo 200 iki 400°C. Remdamiesi Vėberio skaičiumi  $We = \rho d v^2 / \sigma$ , jie suskirstė lašelio judėjimą į tris režimus. Kai  $We$  mažiau nei 30, lašas, atsitrenkęs į paviršių, pasklinda ant jo ir po to atšoka kaip vientisa masė. Esant  $We$  nuo 30 iki 80, atšokimo stadijoje jau stebimas lašelio susiskaidymas į keletą smulkių lašelių. O esant  $We$  per 80, lašas skaidosi į smulkesnius lašelius jau pirmoje, atsitrenkimo, stadijoje. Kiti autoriai [3] nagrinėja paviršiaus, ant kurio krenta lašelis, drėgmės sugeriamumo efektą, turintį stiprią įtaką lašelio pasklidimui tolimesnėse stadijose. Šiuos ir kitus efektus bandoma modeliuoti, gaunamas geras rezultatų sutapimas [4].

Be pagrindinių parametru (Reinoldso skaičius (Re), Vėberio skaičius (We)), lašelio bei sienelės

sąveiką apibrėžia ir paviršiaus šiurkštumas. Keičiant paviršiaus hidraulinio šiurkštumo aukštį galima efektyviai turbulizuoti pasienio sluoksnį bei pagerinti skysčio ir paviršiaus šilumos mainus [5]. Literatūroje aprašyta, kad egzistuoja hidraulinio ( $k$ ) ir geometrinio ( $h$ ) šiurkštumo elementų aukščio ryšys, bei pateiktos išraiškos, kurių koeficientai kinta priklausomai nuo atstumo tarp šiurkštumo elementų. Mūsų atveju hidraulinis šiurkštumo aukštis  $k = 1/3 h$ .

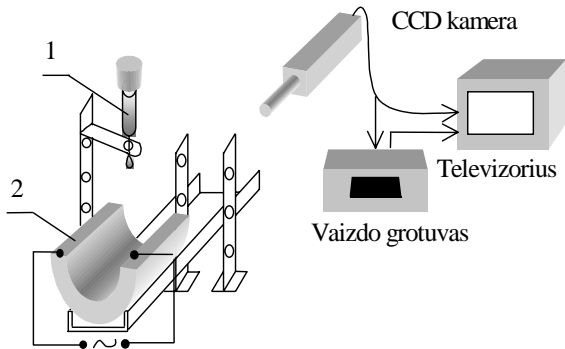
Šiame darbe nagrinėjamas daugiakomponentis kuras – mazutas. Literatūroje [6] nurodoma, kad mazuto lašelis, patekęs į karštą aplinką, sudega per kelias stadijas. Pirma, jis kaista, tuo pačiu metu žemesnės virimo temperatūros komponentės garuoja ne tik nuo paviršiaus, bet ir iš lašo centro. Šį procesą lydi lašo pūtimasis. Kartais staigus garavimas gali suardyti lašą. Po to seka įsiliepsnojimas ir degimas su lėta termine dekompozicija (skilimu) bei lakiųjų dalių baigiamuoju išgarinimu. Vėliau stebimas aiškus ardomasis virimas ir lašo išsipūtimas (susitraukimas), lydymas terminio skaidymosi, todėl formuojasi anglies karkasas. Iš pastarųjų, išgaravus likusioms dalims ir sudegus dujoms, formuojasi atviro struktūros anglies liekanos. Galiausiai heterogeniškai dega anglis.

Kai lašelis atsitrenkia į karštą paviršių, šiluma nuo įkaitinto paviršiaus patenka į lašelį laidumu, konvekcija ir spinduliavimu. Gauta šiluma gali būti sunaudota lašelio temperatūrai padidinti arba išgarinti lakiąsias dalis. Jeigu susidūrimo metu perduodamos šilumos kiekis pakankamai didelis, tai garuojant la-

kiosioms dalims iš jų susiformuoja garų pagalvė, atskirianti skystį nuo paviršiaus. Pastaroji apsunkina šilumos mainus ir turi įtakos lašelio degimo trukmei. Todėl šiame darbe nagrinėjamas mazuto lašo degimas ant skirtingo šiluminio laidumo bei šiurkštumo paviršių.

**2. MATAVIMŲ METODIKA**

Mazuto lašo judėjimo priklausomybei nuo paviršiaus šiurkštumo, kaitinamo paviršiaus temperatūros, lašo kritimo greičio nustatyti sumontavome naują stendą (1 pav.).



1 pav. Mazuto lašelio riedėjimo stendas: 1 – adata su mazutu, 2 – kvarcinio stiklo ar nerūdijančio plieno lovelis

Loveliai, kuriais riedėjo lašeliai, buvo gauti perpjovus tiek kvarcinio stiklo, tiek nerūdijančio plieno 60 mm skersmens ir 100 mm ilgio vamzdžius. Juos pakaitomis dėjome į putų šamoto plytoje padarytą tokio pat skersmens kaitintuvą. Pastarojo dugne išilgai ašies suformuotose įdubose paklojome nichromo vielą kaitinimui. Putų šamoto kaitintuvus su kvarciniu ar plieniniu loveliu buvo sumontuotas ant plokštės, kurios vienas galas įtvirtintas nejudamai, o kitą galėjome pakelti iki norimo aukščio ir užfiksuoti. Šitaip padaroma nuožulni plokštuma, kurios posvyrio kampą lengva apskaičiuoti. Žinodami riedėjimo kampą, galėjome nustatyti ir svorio jėgą.

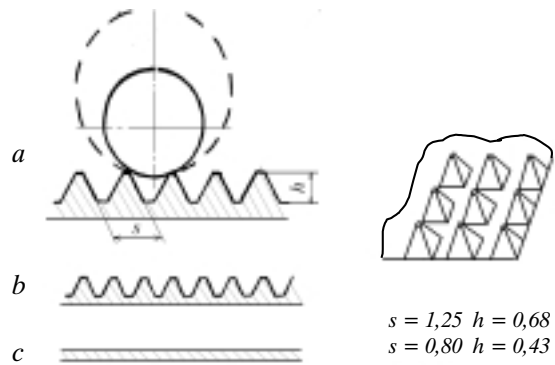
Mazuto lašus metėme iš skirtingo aukščio. Stovu laisvai aukštyn ir žemyn judėjo plokštelė, kurią galėjome užfiksuoti pasirinktame aukštyje. Žinodami atstumą  $H$  nuo adatos galo iki kaitinamo paviršiaus, pagal  $\sqrt{2gH}$  apskaičiavome lašo judėjimo greitį (1 lentelė).

1 lentelė. Lašelio kritimo greitis					
Fiksavimo vieta	1	2	3	4	5
v m/s	1,62– 1,84	2,03– 2,12	2,37– 2,40	2,52– 2,64	2,74– 2,82

Kiekvienu atveju aukščiai buvo nevienodi, tačiau juos stengėmės parinkti taip, kad kritimo greitis visais kampų atvejais kistų panašiose ribose, o gautus rezultatus būtų lengva palyginti. Naudotas mazutas, kurio tankis  $\rho=970$  (kg/m<sup>3</sup>), specifinė šiluma  $c_p = 2,0$  (kJ/kgK), kinematinė klampa  $\nu = 118$  (mm<sup>2</sup>/s), žemutinė degimo šiluma – 40 500 (kJ/kg), pliūpsnio  $T = 95^\circ\text{C}$ . Anglies kiekis  $C = 86\%$ , sieros  $S = 2,1\text{--}2,5\%$ , vandenilio  $H_2 = 10,5\%$ , peleningumas  $\sim 0,04\%$ , vandens ir mechaninių priemaišų mažiau nei 1%.

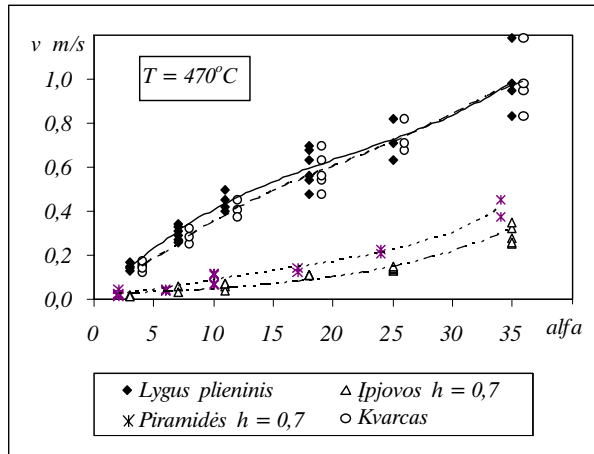
Eksperimentų metu mazutas buvo lašinamas pro 0,6 mm skersmens adatą. Nusistovėjęs mazuto iš adatos ištekėjimui, krenta vienodo dydžio lašai. Vienas iš jų ir buvo nukreipiamas ant įkaitinto paviršiaus. Viso eksperimento metu mazuto temperatūra – vidutiniškai  $76\pm 1^\circ\text{C}$ . Kaitinamo paviršiaus temperatūra nustatyta chromelio ir aliumelio lydinio termopora, prijungta prie skaitmeninio voltmetro V7-40. Lašelio riedėjimas bei gyvavimo laikas buvo filmuojamas vaizdo kamera CCD, kurios fotoelemento matrica yra  $632 \times 512$  dydžio, bei įrašomas į vaizdo magnetofoną “Sony” SLV-X712, įgalinantį išskaidyti vaizdą į 25 fragmentus per sekundę. Analizuodami vaizdo įrašą, stebėjome lašelio skersmenį, riedėjimo bei garavimo laiką. Anglies darinio liekana analizuota mikroskopu OLYMPUS su prie jo prijungta skaitmenine vaizdo kamera Sony DVC-151 AP, kurios fotoelemento matrica  $768 \times 512$ .

Buvo pasirinkti paviršiaus šiurkštumo variantai: lygus plieninis, kvarcinis su jam būdingu paviršiaus šiurkštumu, plieniniai su skirtingais šiurkštumo elementais. Didžiausias jų aukštis buvo apytikriai 3,7, o mažiausias – 5,8 karto mažesnis už lašelio skersmenį. Nerūdijančio plieno paviršiuje šiurkštumo elementai buvo vienu atveju skersinės įpjovos, kitu atveju – piramidės formos (2 pav.). Pasirinkti paviršiai, šiurkštumo elementų aukščiai  $h$  bei žingsniai tarp jų  $s$  pateikti 2 lentelėje. Naudotų paviršių temperatūriniai šilumos laidumo koeficientai  $a$  atitinkamai kvarcui  $3,3 \cdot 10^{-6}$ , plienui –  $12 \cdot 10^{-6}$  (m<sup>2</sup>/s).



2 pav. Tyrimams naudotų paviršių ir mazuto lašelio ant jų schematinis vaizdas. a, b – skersinės skirtingo aukščio įpjovos, c – lygus plieninis ar kvarcinis paviršius, d – paviršius su piramidės formos šiurkštumo elementais

2 lentelė. Paviršiai ir jų šiurkštumas				
	Lygus plieninis	Kvarcinis	Plieninis-1	Plieninis-2
$h$ mm	–	<0,005	0,425	0,675
$s$ mm	–	–	0,800	1,200



3 pav. Lašo riedėjimo skirtingo šiurkštumo bei laidumo paviršiais greitis

Palyginimui 3 paveiksle pateikti lašelio riedėjimo visais skirtingais paviršiais greičiai. Pastebėta, kad temperatūra neturi įtakos judėjimo tendencijai, o šiurkštumas gerokai sumažina lašelio greitį.

### 3. REZULTATŲ APTARIMAS

Patekęs ant karšto paviršiaus lašelis patiria visas pagrindines stadijas: įkaista, garuoja, užsiliepsnoja ir dega. Tačiau šiuo atveju daugiausia šilumos lašelis gauna laidumu nuo sienelės, kurios temperatūra, fiziniai bei geometriniai parametrai turi įtakos lašelio degimo eigai.

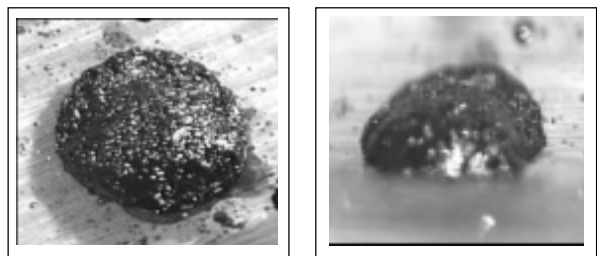
Atsitrenkęs į paviršių lašelis pasklinda ant jo pusantro–dviejų skersmenų plote, bet tuoj pat paviršinės jėgos padaro jį pradinės formos. Nuo paviršiaus, kuriuo lašelis liečiasi su sienele, garuoja žemos virimo temperatūros medžiagos. Todėl susiformuoja garų pagalvė, atskirianti lašelį nuo paviršiaus. Ant plieninio paviršiaus dėl jo didelio šilumos laidumo ši pagalvė susidaro jau 350°C temperatūroje, tuo tarpu ant kvarcinio – aukštesnėje nei 420°C.

Nuo 480 iki 550°C temperatūroje lašas rieda kvarciniu horizontaliu paviršiumi nestipriai garuodamas apytikriai 0,7–0,5 s. Po to, staigiai padidėjus skersmeniui, jis ima gausiai garuoti. Tai vyksta dėl lašo viduje padidėjusios garų koncentracijos. Kadangi kvarco mažas šilumos laidumas, todėl išsiskiriantys garai lokaliai atšaldo paviršių ir mazuto lašelio kraš-

tai prilimpa prie jo. O iš viršuje esančios skystos masės susiformuoja savotiškas kupolas. Garuodamos lakiosios medžiagos prasiveržia į paviršių tose vietose, kuriose paviršiniai įtempimai mažiausi. Garų išsiskyrimo metu išnešama dalis skystos masės, todėl aplinkui matyti išsitaškiusių mažesnių nei pusės milimetro skersmens lašelių, kurių kiekis skaičiuojamas dešimtimis. Išsiskyrus garams, kupolas subliūkšta. Lašo viduje naujai susidarantys garai vėl formuoja kupolą. Procesas kartojasi. Kadangi lašas daugiausia šilumos gauna laidumu, arčiau paviršiaus pirmiausia susidaro anglies karkasas. Dėl šios priežasties naujai prasiveržiant garams „pulsuoja“ tik viršutiniai kupolo sluoksniai, kol galiausiai susiformuoja uždaras, bet daug mikroporų turintis anglies darinio karkasas (4 pav.).

Ant lygaus plieninio paviršiaus taip pat susidaro karkasas, tačiau jo formavimasis šiek tiek skiriasi. Dėl didesnio plieno šilumos laidumo mazuto lašelis ne tik ilgiau išbūna ant paviršiaus nesuireš, bet ir spėja išgarinti daugiau žemos virimo temperatūros lakiųjų medžiagų. Dėl šios priežasties vėliau nebūna karkaso „pulsavimo“. Prilipęs prie paviršiaus lašelis išsilieja dviejų skersmenų plote, o iš jo viršuje esančios skystos masės, veikiant paviršinėms jėgoms, susiformuoja naujas, mažesnis, lašelis, kuris slysta jau prikepusiu prie paviršiaus sluoksniu. Pastarojo storis santykinai mažas, o plotas – didelis, todėl jis intensyviai garuoja. Išsiskiriantys garai gali pastumti ar net išmesti naujai susidariusį lašelį į priekį, kur jis dar pakaista, jo skersmuo padidėja ir susiformuoja vientisas anglies darinio karkasas. Pirminio išsiliejimo vietoje lieka plonas anglies darinio sluoksnis.

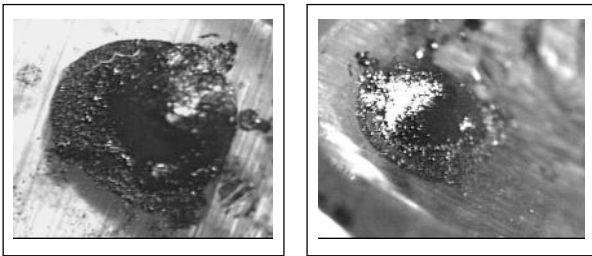
Padidinus temperatūrą iki 600°C, ant plieninio paviršiaus stebimas lašelio sproginimas. Tuomet, kai iš po lašo apačios besiveržiantys garai išmeta lašelį į viršų, vaizdo įrašė stebime jau ne vieną, bet keletą didelių greičiu į skirtingas puses lekiančių lašiukų. Taigi lašelis skaidosi ore, bet ne atsitrenkęs į paviršių. Tuo tarpu ant kvarcinio stiklo 600°C temperatūroje besiveržiantys garai padalija lašelį į keletą vienodų dalių. Ten, kur masės buvo daugiau, garavimo



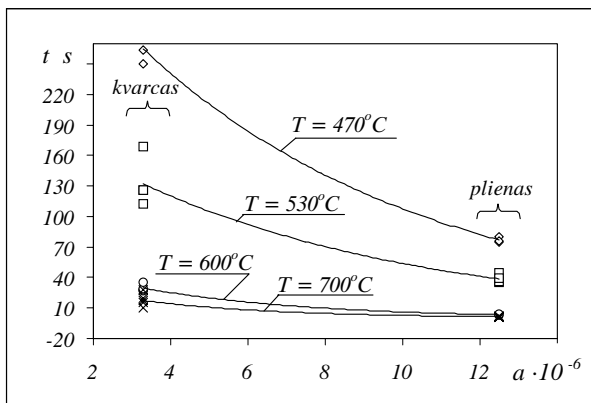
4 pav. Anglies darinio karkaso vaizdas iš viršaus ir iš šono

proceso metu formuojasi skrybėlės formos anglies dariniai (5 pav.). Kitur – ploni, glaudžiai prie paviršiaus prikepę sluoksniai, kurių centras porėtesnis nei kraštai (7 pav.) ir kuris sudega greičiau. Kai sienelės temperatūra yra 700°C, ant plieninio paviršiaus stebime ne tik lašo sproginimą, bet ir išsiskyrusių lakiųjų medžiagų užsiliepsnojimą. O ant kvarco matome skaidymąsi į smulkesnius. T. y. besiveržiantys garai padalija lašą iš pradžių į 2–3 mažesnio skersmens lašelius, kurie čia pat kaista, garuoja ir papildomai skaidosi į dar smulkesnius.

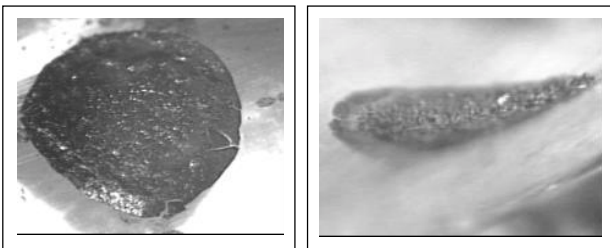
Lyginami lašelio išdegimo laikus, pastebime, kad mažesnis kvarcinio stiklo temperatūros laidumo koeficientas sąlygoja ilgesnį laiką (6 pav.). Ypač didelis skirtumas žemesnėse temperatūrose, tuo tarpu aukštesnėse (600–700°C) jis sumažėja, bet nėra ly-



5 pav. Ant kvarcinio paviršiaus 600°C temperatūroje susiformavęs anglies darinio karkasas



6 pav. Mazuto lašelio išdegimo laiko priklausomybė nuo  $a = \lambda/\rho c_p$



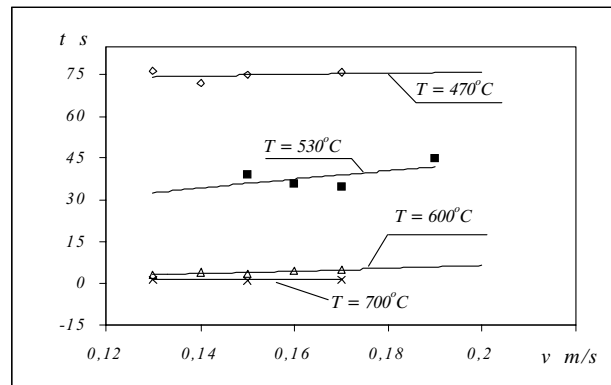
7 pav. Anglies darinys, susidaręs ant 650°C temperatūros kvarcinio paviršiaus

gus. Pavyzdžiui, ant kvarco 600°C temperatūroje lašas sudega per apytikriai 25 s, o ant plieno – per 4 s. Iš tikrųjų tiksliai nustatyti sudegimo laiką šiame temperatūrų intervale ant plieninio paviršiaus yra gana sudėtinga, nes po sproginimo dalis mazuto lašelio masės išmetama už bandinio ribų. Tačiau galima teigti, kad gauti duomenys rodo realią situaciją, juk vyksta sproginimas, lašas suskaidomas į smulkesnius lašelius, kurių sudegimo laikas atitinkamai trumpesnis.

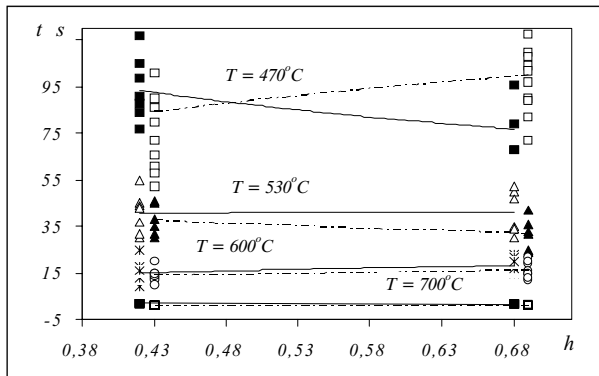
Dėl susidarančios garų pagalvės lašelis rieda plieniniu paviršiumi esant net ir nedideliam (3°) nuožulnumo kampui. Keičiant plokštumos posvyrio kampą keičiasi tiek lašelio riedėjimo greitis, tiek išdegimo laikas (8 pav.).

Grafike matyti, kad išdegimo laikas trumpesnis esant mažesniai greičiui, nes po lašeliu susitelkia daugiau garų, kurie sąlygoja lašelio skaidymąsi bei sproginimą aukštesnėse temperatūrose.

Tolimesni eksperimentai siejasi su paviršiaus šiurkštumo įtakos įvertinimu. Todėl buvo pasirinkti skirtingi šiurkštumo elementų aukščiai bei skirtingi paviršiaus nuolydžiai, kad būtų galima surasti riedančio lašelio ir paviršiaus šiurkštumo sąveiką. Suformuoti šiurkštumo elementai neleidžia susidaryti pakankamam garų pagalvės storiui, kuris leistų lašeliui judėti horizontaliu šiurkščiu paviršiumi, tačiau skatina lašo skaidymąsi. Dėl suformuotų briaunų sunkiau pašalinami garai, todėl jie susitelkia ir ima veikti kaip reaktyvinė jėga, galinti pastumti ar net numesti lašą per keletą centimetrų į priekį, kur jis suskyla, nes šiurkštumo elementų aukštis didesnis už pasiplojusio ant paviršiaus lašelio storį. Palyginus sudegimo laikus (9 pav.), pastebėta, kad aukštesnėse temperatūrose (600–700°C) ant paviršiaus su skersinėmis įpjovomis lašas dega ilgiau. Be to, degimo laikas dar pailgėja esant didesniai šiurkštumo aukščiui. Degimo ant piramidinio paviršiaus laikas trum-



8 pav. Lašelio išdegimo ant lygaus plieninio paviršiaus laiko priklausomybė nuo riedėjimo greičio esant skirtingoms temperatūroms



9 pav. Išdegimo laiko priklausomybė nuo paviršiaus šiurkštumo geometrinio aukščio  $h$ . Skersinių įpjovų duomenis atitinka ištisinės, o piramidinių – punktyrinės linijos

pesnis, nes dėl tokio šiurkštumo elementų išsidėstymo padidėja kaitinamo paviršiaus plotas, todėl lašelis intensyviau garuoja, vyksta jo skaidymasis į smulkesnius ir jis greičiau išdega. Didesnis paviršiaus šiurkštumas pageidautinas tik esant nuo 450 iki 550°C temperatūrai. Tačiau, skirtingai nei visais kitais tyrinėjtais atvejais, 470°C temperatūroje lašas sudega greičiau ant paviršiaus su skersinėmis įpjovomis. Aukštos skersinės briaunos neleidžia lašeliui pasiskirstyti į visas puses vienodai, kaip tai būna ant piramidinio paviršiaus. Todėl skysta masė dažniausiai pasiskirsto dviejose–trijose įpjovose, kur suformuoja apytikriai 3–4 lašelio skersmenų ilgio anglies liekanos karkasus. Tuo tarpu ant paviršiaus su aukštomis piramidėmis masė telkiasi labiau tarp piramidžių, kur ir susiformuoja skrybėlės formos karkasas, kuris, kaip minėta, susidaro ir ant kvarcinio paviršiaus, tik kur kas aukštesnėje (600°C) temperatūroje (5 pav.). Ant smulkesnio piramidinio paviršiaus dėl didesnio išsiskiriančių garų kiekio jų prasiveržimo metu centre atsiranda įdubimas. Todėl galiausiai kupolas subliūkšta ir centras prikepa prie paviršiaus.

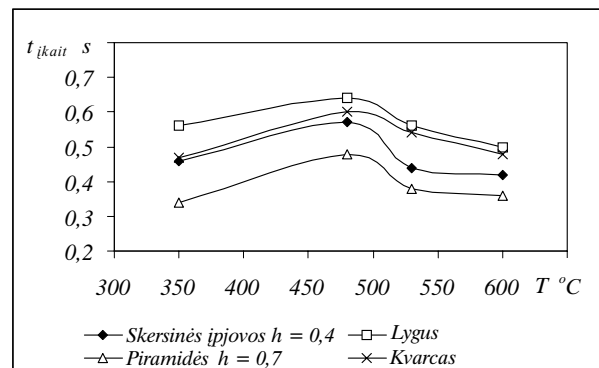
Pastebėta, kad iki 600°C temperatūroje lašas ant horizontalios šiurkščios plokštumos skaidėsi tik į du–tris smulkesnius lašus, kurie suformuodavo tam tikros formos anglies darinio karkasą. Tuo tarpu per 600°C temperatūroje lašelis dažniausiai susiskaidydavo į 5–8 mažesnius lašelius, t. y. garų išmestas į viršų lašas, atsitrenkęs į paviršių, suskyla į keletą smulkesnių lašų, kurie savo ruožtu skaidosi į dar smulkesnius lašelius, pastarieji dar kartą suskyla. Procesas sustoja tuomet, kai po atsitrenkimo į paviršių lašelis prilimpa prie jo. Toks skaidymasis vyksta ant mažesnio šiurkštumo paviršių. Ant paviršių, kurių šiurkštumo elementai aukštesni, lašelis taip pat skaidosi į smulkesnius lašus, tačiau dėl jo mažėjančio skersmens patekęs į tarpą tarp briaunų

jų jis prilimpa ir suformuoja anglies darinio dėmę-karkasą.

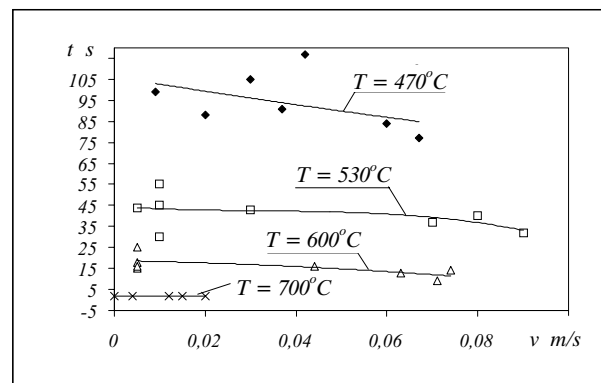
Be lašelio sudegimo laikų, buvo stebima ir jo įkaitimo trukmė. Kaip matyti (10 pav.), 470°C temperatūroje visais nagrinėjtais atvejais gaunamas pikas.

Manoma, tai susiję su virsmis, vykstančiais pačiame mazute. Literatūroje [7] teigiama, kad mazute, esant nuo 320 iki 490°C temperatūrai, per peroksidus vyksta egzoterminės reakcijos, kurių šiluma suvartojama endoterminėms angliavandenilių skilimo reakcijoms. Vyksta staigus degimo greičio sumažėjimas, kuris greičiausiai sąlygoja ir įkaitimo laiko pailgėjimą.

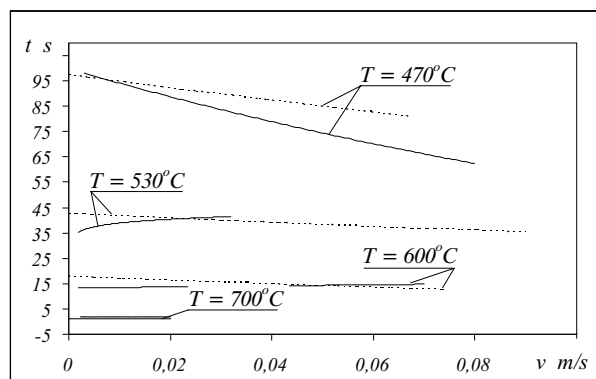
Priešingai nei lygaus paviršiaus atveju, didesnis riedėjimo per šiurkštų paviršių greitis sąlygoja spartesnį lašelio sudegimą. Tai ypač pasakytina žemesnių kaip 400–480°C temperatūrų atvejais (11 pav.), nes lašelis, riedėdamas šiurkščia nuožulnia plokštuma, palieka ant paviršiaus 2/3 savo skersmens pločio ištisinį pėdsaką, kuris didėjant temperatūrai siaurėja. Lašui suskilus į kelis lašus, pastarieji taip pat rieda paviršiumi ir skaidosi į smulkesnius lašelius. Kadangi lašelio masė pasiskirsto didesniame plote,



10 pav. Įkaitimo laikas



11 pav. Išdegimo laiko kitimas nuo lašo riedėjimo greičio. Paviršius – skersinės įpjovos, kurių  $h = 0,43$  mm



12 pav. Lašo išdegimo ant skirtingų paviršių laikų palyginimas: piramidinio (ištisinė linija) ir su skersinėmis įpjovomis (punktūrinė linija),  $h = 0,43$  mm

pagerėja deguonies difuzija ir greičiau išdega anglis. Tuo tarpu aukštesnėse temperatūrose laiko skirtumai labai nedideli. Skersinių įpjovų ir piramidžių atveju rezultatai analogiški (12 pav.).

11 ir 12 paveiksluose neparodytos priklausomybės su aukštesniais šurkštumo elementais, nes lašo riedėjimo greitis dažniausiai yra labai mažas, be to, aukštesnėse temperatūrose lašelis skaidosi bei sprogs, dalis masės „išmetama“ už bandinio ribų, todėl negalima nustatyti tikslaus išdegimo laiko.

Šiame darbe nagrinėtas mazuto lašelio išdegimas ant paviršiaus, įkaitinto iki  $650^{\circ}\text{C}$ , t. y. tol, kol jo garai staigiai užsiliepsnoja. Užkritęs ant šurkštaus, iki  $700^{\circ}\text{C}$  įkaitinto, paviršiaus lašas po kelių dešimtųjų sekundės dalių išsipučia, ima judėti ir virpėti. Paviršiaus spinduliavimas suteikia lašeliui papildomą šilumos kiekį, o tai sąlygoja spartesnį garavimo bei kondensacijos procesų vyksmą lašo viduje, todėl stebimas nuolatinis jo skersmens kitimas. Garai, pasiekę kritinę ribą, veržiasi su tokia didele jėga, kad išmeta lašą į orą ir suskaido jį į smulkius lašukus, kuriuos vėliau uždega užsiliepsnojusios lakiosios dalys, išsiskyrusios sprogo metu. Galiausiai ant paviršiaus lieka anglies žarijų, kurios po 1,5–2,0 sekundžių sudega.

#### 4. IŠVADOS

1. Mazuto lašelio išgaravimas ir likusios anglies karkaso sudegimas nuo  $350$  iki  $750^{\circ}\text{C}$  temperatūroje trunka nuo  $250$  iki kelių sekundžių, priklausomai nuo paviršiaus temperatūros, jo struktūros, sprogdinančios lašelį į smulkesnius lašelius, bei deguonies difuzijos sąlygų baigiamojoje anglies išdegimo fazėje.

2. Paviršiaus laidumas paspartina lakiųjų dalių išgaravimą, keičia lašo karkaso vystymosi formą, sutrumpina anglies išdegimo laiką.

3. Mazuto lašelis iki  $500^{\circ}\text{C}$  temperatūroje greičiau sudega ant šurkštesnio skersinėmis įpjovomis išsidėsčiusio paviršiaus, o per  $550^{\circ}\text{C}$  – ant smulkesnio piramidinio paviršiaus.

4. Lašelis gali sudegti per kelias sekundes, jeigu pasiekama jo sprogo fazė (greičiausiai pasiekama ant laiaus lygaus paviršiaus), o ant kitų paviršių – aukštesnėje temperatūroje.

5. Riedėdamas lašelis skaidosi į smulkesnius lašelius, todėl jo išdegimo laikas sutrumpėja nuo  $35$  iki  $3$  s, priklausomai nuo paviršiaus šurkštumo, temperatūros bei laidumo.

Gauta

2003 01 16

#### Pažymėjimai

$\lambda$	šilumos laidumo koeficientas (W/mK)
$\rho$	tankis ( $\text{kg/m}^3$ )
$\sigma$	skysčio paviršiniai įtempimai (N/m)
$c_p$	masinė savitoji šiluma (J/kgK)
We	Vėberio skaičius
Re	Reinoldso skaičius
$d$	lašelio skersmuo (m)
$v$	greitis (m/s);
$k$	hidraulinis šurkštumo aukštis (mm)
$h$	geometrinis šurkštumo elemento aukštis (mm)
$g$	laisvojo kritimo pagreitis ( $\text{m/s}^2$ )
$H$	aukštis (m)
$s$	šurkštumo elementų išsidėstymo žingsnis (mm)
$a$	temperatūros laidumo koeficientas ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$\delta$	kinematinė klampa ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

#### Literatūra

- Zapalowicz Z. Critical contact Weber number for toluene droplets dropping onto the heated wall surface // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2002. Vol. 25. P. 523–528.
- Wachters L. H. J., Westerling N. A. J. The heat transfer from a hot wall to impinging drops in the spheroidal state // *Chemical Eng. Sci.* 1966. Vol. 21. P. 1047–1056.
- Šikalo Š., Marengo M., Tropea C., Ganic E. N. Analysis of impact of droplets on horizontal surfaces // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2002. Vol. 25. P. 503–510.
- Dalton J. E., Harvie D., Fletcher F. A hydrodynamic and thermodynamic simulation of droplet impacts on hot surfaces, Part I, II // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2001. Vol. 44. P. 2633–2659.
- Šlančiauskas A. Two friendly rules for the turbulent heat transfer enhancement // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2001. Vol. 44. P. 2155–2161.
- Lefebvre A. H. *Atomization and Sprays*. 1989. 421 p.
- Магарил П. З. Теоретические основы процессов переработки нефти // *Химия*. Москва, 1976.
- Kalpokaite-Dičkuvienė R., Šlančiauskas A. Mazuto lašelio anglies išdegimas ant karšto paviršiaus // *Energetika*. 2001. Nr. 4. P. 32–37.

Regina Kalpokaitė-Dičkuvienė, Anupras Šlančiauskas

**THE INFLUENCE OF SURFACE PARAMETERS ON THE BURNOUT OF FUEL DROPLET**

**S u m m a r y**

The major object of research was the behavior and burnout of a droplet of black liquid fuel on a hot surface with different temperature, thermal conductivity and roughness. It was found that the ratio  $\lambda/\rho c_p$  influenced the evaporation of volatile mater and the form of carbon residue. Also, the relation between droplet size and shape of roughness was determined. When the thermal conductivity of the surface was high enough, the droplet broke down into smaller parts or even exploded. Roughness and inclination of the surface stimulate droplet fragmentation and diffusion, so the carbon burned out more quickly.

**Key words:** heavy liquid fuel, diffusion, thermal conductivity

Регина Калпокайте-Дичкувене, Анупрас Шланčiauskas

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ НА ГОРЕНИЕ КАПЛИ МАЗУТА**

**Р е з ю м е**

Проведены испытания, во время которых исследовалось горение капли мазута на поверхностях с различной теплопроводностью и шероховатостью. Установлено, что выражение  $\rho c_p/\lambda$  влияет на испарение легких фракций, образование из сажи отдельной формы каркаса, а также определяет связь между размером капли и формой шероховатости поверхности. При достаточно высокой теплопроводности поверхности капля мазута может взорваться в результате быстрого выделения газов уже при температуре 600°C. Шероховатость поверхности и её наклонность создают условия для разделения капли на мелкие части, что способствует сокращению времени сгорания сажи.

**Ключевые слова:** мазут, горение, теплопроводность