



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Lašelių konvekcinio šildymo ir garavimo skaitinis
tyrimas vandens įpurškimui kuro deginimo
technologijoms būdingose kraštinėse sąlygose**

Magistro baigiamasis projektas

Projektą parengė

Nojus Motuzas

Projektui vadovavo

Prof. Gintautas Miliauskas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Lašelių konvekcinio šildymo ir garavimo skaitinis
tyrimas vandens įpurškimui kuro deginimo
technologijoms būdingose kraštinėse sąlygose**

Magistro baigiamasis projektas
Termoinžinerija (6211EX023)

Projektą parengė

Nojus Motuzas

Projektui vadovavo

Prof. Gintautas Miliauskas

Projektą recenzavo

Doc. Monika Maziukienė

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Nojus Motuzas

Lašelių konvekcinio šildymo ir garavimo skaitinis tyrimas vandens įpurškimui kuro deginimo technologijoms būdingose kraštinėse sąlygose

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdamas (-a) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasis (-i) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektualios nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. visi baigiamajame projekte pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena projekto dalis nėra plagijuota nuo spausdintinių ar elektroninių šaltinių, o visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. baigiamajame projekte tinkamai laikiausi asmens duomenų apsaugos reikalavimų, nenaudojau neskelbtinų ar konfidencialių duomenų be teisėto pagrindo, o jei juos naudoju, jie yra tinkamai nuasmeninti;
4. jei rengiant baigiamąjį projektą naudojausi dirbtinio intelekto (toliau – DI) ar kitais automatizuotais įrankiais, juos taikiau pagal Universitete nustatytą tvarką, nepažeisdamas (-a) akademinio sąžiningumo principų;
5. nesumokėjau ir nesu įsipareigojęs mokėti jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis jokiame fiziniame ar juridiniame asmeniui;
6. suprantu, kad išaiškėjus akademinio nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikoma atsakomybė pagal Universitete nustatytą tvarką ir galiu būti pašalintas (-a) iš Universiteto; akademinio nesąžiningumo atvejis gali būti nagrinėjamas ir po studijų baigimo, inicijuojant kvalifikacinio laipsnio atšaukimo procedūrą.



Kaunas technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Išduota studentui (-ei) – Nojus Motuzas

1. Projekto tema

Lašelių konvekcinio šildymo ir garavimo skaitinis tyrimas vandens įpurškimui kuro deginimo technologijoms būdingose kraštinėse sąlygose.

(Lietuvių kalba)

Numerical Study of Droplets Convective Heating and Evaporation Under Boundary Conditions Typical for Water Injection in Fuel Combustion Technologies

(Anglų kalba)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: Sumodeliuoti vandens lašelio fazinių virsmų režimų ciklą, kuro deginimo technologijoms būdingose kraštinėse sąlygose, bei išryškinti jų įtaką sudėtinių šilumokaitos ir fazinių virsmų sąveiką apibrėžiantiems faktoriams, akcentuojant dūmų valymo technologinį atvejį.

Uždaviniai:

1. Atlikti literatūros tyrimą:
 - 1.1. Išanalizuoti kuro deginimo technologijoms būdingus vandens įpurškimo atvejus.
 - 1.2. Įvertinti lašelių konvekcinio šildymo ir garavimo procesų svarbą efektyviam vandens įpurškimui užtikrinti.
 - 1.3. Apžvelgti taikomus lašelių konvekcinės pemašos modelius.
 - 1.4. Apibendrinti apžvalgą sukonkretinant skaitinio tyrimo kraštines sąlygas ir uždavinius.
2. Metodinėje dalyje:
 - 2.1. Pateikti skysčio lašelio konvekcinio šildymo ir garavimo matematinį modelį
 - 2.2. Aptarti skaitinio modeliavimo algoritmą ir pateikti jo realizavimo šilumos srautų balansu grindžiamą iteracinę schemą.
 - 2.3. Pristatyti KTU EK skaitinio modeliavimo programą „LAŠAS“ ir aprašyti įvesties (*INPUT*) parametrus ir gaunamus ŠMM parametrų (*OUTPUT*) laikinių funkcijų masyvus.
 - 2.4. Pravesti skaitinį tyrimą numatytose kraštinėse sąlygose.
3. Atliktų gautų rezultatų grafinę interpretaciją ir analizę:
 - 3.1. Apibrėžti Furje skaičiaus laiko skalės universalumą lašelių dispersiškumui konvekcinio šildymo atveju.
 - 3.2. Įvertinti kraštinių sąlygų įtaką lašelių konvekciniam šildymui.
 - 3.3. Apibrėžti kraštinių sąlygų įtaką konvekciniam garavimui.
 - 3.4. Įvertinti kraštinių sąlygų įtaką procesų sąveiką apibrėžiantiems parametrams.
 - 3.5. Apibendrinti rezultatus ir pateikti rekomendacijas.
4. Parengti MBP aiškinamąjį raštą ir pranešimo prezentaciją.

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Skaitinio tyrimo kraštinės sąlygos:
pradinis įpurkštų lašelių Reinoldso skaičius $Re_0 \leq 250$;
dūmų temperatūra $t_d = 100-1500$ °C;
dujų drėgnumas $X_v = 0,1 - 0,4$;
pradinis lašelio skersmuo $2R = 100 - 1000$ μm;
dujų, į kurias įpurškiami lašeliai, greitis $w_d = 5 - 15$ m/s.

4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Parengti mokslinį straipsnį jaunųjų mokslininkų konferencijos „Industrial engineering 2026“ darbų rinkiniui ir pristatyti pranešimu.

Projekto autorius	Nojus Motuzas <i>(Vardas, Pavardė)</i>	<i>(Parašas)</i>	2026-02-12 <i>(Data)</i>
Projekto vadovas	Gintautas Miliauskas <i>(Vardas, Pavardė)</i>	<i>(Parašas)</i>	2026-02-12 <i>(Data)</i>
Krypties studijų programų vadovas	Algimantas Balčius <i>(Vardas, Pavardė)</i>	<i>(Parašas)</i>	2026-02-12 <i>(Data)</i>

Motuzas, Nojus. Lašelių konvekcinio šildymo ir garavimo skaitinis tyrimas vandens įpurškimui kuro deginimo technologijoms būdingose kraštinėse sąlygose. Magistro baigiamasis projektas / projektui vadovavo prof. Gintautas Miliauskas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir studijų krypčių grupė: Energijos inžinerija, Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: vandens įpurškimas, lašelis, konvekcinis šildymas, faziniai virsmai.

Kaunas, 2026. 72 p.

Santrauka

Lašelių konvekcinio šildymo ir garavimo skaitinio tyrimo tikslas yra sumodeliuoti vandens lašelio fazinių virsmų režimų ciklą (FVRC), esant kraštinėms sąlygoms, kurios būdingos realiems vandens įpurškimo taikymo atvejams. Tuomet pagal gautus rezultatus įvertinti pradinių vandens įpurškimo parametrų įtaką sudėtinių šilumokaitos ir fazinių virsmų sąveiką apibrėžiantiems parametrams bei lašelių garavimo trukmei ir nustatyti vandens įpurškimo technologijos valdymo galimybes. Šio tyrimo metu nagrinėjamos kuro deginimo technologijos, kuriose taikomas vandens įpurškimas, siekiant pagerinti jų ekologinius ar efektyvumo rodiklius. Remiantis realiais šioms technologijoms būdingais parametrais, apibrėžiamos kraštinės sąlygos, kurioms esant nagrinėjama lašelio pradinės temperatūros, pradinio Reinoldso kriterijaus, įpurškiamo lašelio dydžio bei dujų temperatūros įtaka. Pastaraisiais dviem atvejais taip pat įvertinamas ir spinduliavimo poveikis. Nustačius šias kraštines sąlygas, naudojant skaitinio modeliavimo programą „Lašas“, sumodeliuojami vandens lašelio FVRC. Apskaičiuotų parametrų kitimas atvaizduojamas grafiškai. Gauti rezultatai rodo, kad pradinis Reinoldso skaičius (Re_0), veikdamas FVRC dinaminis parametras, daro didesnę įtaką ciklo trukmei, kai lašelis garuoja aukštos temperatūros dujose. Garavimui vykstant $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ dujose, lašeliai, kurių $Re_0 = 150$, išgaruoja 10 % greičiau, nei lašeliai, kurių pradinis Reinoldso skaičius yra 5. O $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ dujose lašelių, kurių $Re_0 = 55$, fazinių virsmų režimo ciklas trunka net 18,2 % trumpiau nei lašelių, kurių $Re_0 = 5$. O štai pradinė lašelio temperatūra daro didesnę įtaką FVRC trukmei esant žemesnei dujų temperatūrai. Karšti lašeliai, kurių pradinė temperatūra $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, gali išgaruoti iki 9 % greičiau, palyginti su šaltais $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros lašeliais, kai garavimas vyksta $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros dujose, arba iki 12 % greičiau, kai garavimas vyksta $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros dujose. Nors lašelių skersmuo konvekcinio šildymo atveju termininiams parametrams jokios įtakos neturi, tačiau spinduliavimas labiau veikia didesnius lašelius. $110\text{ }\mu\text{m}$ pradinio skersmens lašeliams spinduliavimas gali lemti iki 6,86 % FVRC trukmės skirtumą, o $20\text{ }\mu\text{m}$ pradinio skersmens lašeliams – vos 0,62 % (kai lašeliai garuoja $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ dujose). Dujų temperatūra daro didelę įtaką lašelių FVRC trukmei. Lašeliai, garuojantys $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros dujose, išgaruoja 2,8 karto greičiau, o $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ dujose – net 5 kartus greičiau. Aukštesnės temperatūros dujose pasireiškia ir didesnė spinduliavimo įtaka. Lašeliams garuojant $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros dujose, Stefano srauto įtaka privalo būti įvertinta, nes ji slopina šilumos mainus net iki 37,1 %. Tiesa, žemesnės temperatūros dujose Stefano srauto įtaka mažesnė – 28,3 %, esant $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, ir 10,5 %, esant $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ dujų temperatūrai.

Motuzas, Nojus. Numerical Study of Droplets Convective Heating and Evaporation Under Boundary Conditions Typical for Water Injection in Fuel Combustion Technologies. Master's Final Degree Project / supervisor prof. Gintautas Miliauskas; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and study field group: Power Engineering, Engineering Sciences.

Keywords: water injection, water droplets, convective heating, phase change

Kaunas, 2026. 72 p.

Summary

The aim of the numerical study of droplet convective heating and evaporation is to simulate the phase change regimes cycle (PCRC) of a water droplet under boundary conditions typical for real water injection application cases. Based on the obtained results, to evaluate the influence of initial water injection parameters on the parameters defining the complex interaction of heat transfer and phase change, as well as on droplet evaporation duration, in order to evaluate the control capabilities of water injection technology. During this study, fuel combustion technologies using water injection are examined with the aim of improving their environmental or efficiency parameters. Based on the real parameters typical for these technologies, boundary conditions are defined under which the influence of the droplet's initial temperature, initial Reynolds number, injected droplet size, and gas temperature are investigated. For the latter two cases, the effect of radiation is also evaluated. Under these boundary conditions, water droplet PTRCs are simulated using the numerical modelling program "LAŠAS". The variation of the calculated parameters is presented graphically. The obtained results show that the initial Reynolds number (Re_0), by influencing the dynamic parameters of the PTRC, has a greater effect on the cycle duration when the droplet evaporates in high-temperature gases. During evaporation in 450 °C gases, droplets with $Re_0 = 150$ evaporate 10% faster than droplets with an initial Reynolds number of 5. In 1300 °C gases, the phase transition regime cycle of droplets with $Re_0 = 55$ is as much as 18.2% shorter than that of droplets with $Re_0 = 5$. Meanwhile, the initial droplet temperature has a greater influence on the PTRC duration at lower gas temperatures. Hot droplets with an initial temperature of 90 °C can evaporate up to 9% faster compared to cold droplets at 10 °C when evaporation occurs in gases at 1300 °C, or up to 12% faster when evaporation occurs in gases at 450 °C. Although droplet diameter has no effect on thermal parameters in the case of convective heating, radiation is more significant for larger droplets. For droplets with an initial diameter of 110 μm, radiation can account for up to a 6.86% difference in PTRC duration, while for droplets with an initial diameter of 20 μm it is only 0.62% (when droplets evaporate in 1300 °C gases). Gas temperature has a significant influence on droplet PTRC duration. Droplets evaporating in gases at 900 °C evaporate 2.8 times faster, and in gases at 1300 °C — as much as 5 times faster. A greater influence of radiation is also felt in higher-temperature gases. When droplets evaporate in gases at 1300 °C, the influence of the Stefan flow must be taken into account, as it suppresses heat transfer by up to 37.1%. However, in lower-temperature gases, the influence of the Stefan flow is smaller — 28.3% at 900 °C and 10.5% at a gas temperature of 450 °C.

Turinys

Lentelių sąrašas	10
Paveikslų sąrašas	11
Įvadas.....	15
1. Teorinė dalis	17
1.1. Vandens įpurškimo taikymas kuro deginimo technologijose	17
1.2. Vandens įpurškimo taikymas, siekiant sumažinti teršalų išmetimus	17
1.2.1. Teršalai, susidarantys degimo procesų metu	17
1.2.2. Teršalų emisijų teisinis reguliavimas.....	19
1.2.3. Azoto oksidų emisijų mažinimas pirminėmis priemonėmis	21
1.2.4. Azoto oksidų emisijų mažinimas antrinėmis priemonėmis	22
1.3. Vandens įpurškimo technologijos įtaka katilinės techniniams rodikliams	23
1.3.1. Vandens įpurškimo į degimui skirtą orą praktinis taikymas ir įtaka degimo procesams	23
1.3.2. Oro drėgnumo įtaka teršalų susidarymui	25
1.4. Lašelių konvekcinio šildymo ir garavimo svarba efektyviam vandens įpurškimui užtikrinti.....	27
1.4.1. Šilumos perdavimas kondukcija (laidumu).....	27
1.4.2. Šilumos perdavimas spinduliavimu	28
1.4.3. Šilumos perdavimas konvekcija.....	28
1.5. Lašelių konvekcinės pernašos atveju taikomi matematiniai modeliai.....	29
1.5.1. Pastovia lašelio paviršiaus temperatūra grindžiamas modelis	29
1.5.2. Lašelio begalinio šiluminio laidumo modelis.....	30
1.5.3. Analitinis apibrėžto šiluminio laidumo modelis	30
1.5.4. Efektyviojo šiluminio laidumo modelis	30
1.5.5. Vidinė vandens cirkuliacija apibrėžiamas sukurinis bei tiesioginiu Navjė-Stokso lygčių sprendimu grindžiamas modeliai.....	31
1.6. Vandens įpurškimo parametrai, darantys įtaką faziniams virsmams	31
1.7. Tyrimo kraštinės sąlygos ir uždaviniai	32
2. Metodinė dalis.....	34
2.1. Vandens lašelių terminė ir energinė būseną	35
2.1.1. Lašelio konvekcinio šildymo ir garavimo modelis	37
2.2. Tyrimui naudojama programinė įranga.....	38
2.2.1. Įvesties (INPUT) parametrai	38
2.2.2. Gaunami (OUTPUT) parametrai	38
3. Rezultatų analizė.....	41
3.1. Lašelių pradinės temperatūros įtaka fazinių virsmų režimų ciklui	41
3.1.1. Skirtingos pradinės temperatūros vandens lašelių garavimas 450 °C temperatūros dujose	41
3.1.2. Skirtingos pradinės temperatūros vandens lašelių garavimas 1300 C temperatūros dujose	46
3.2. Lašelio įpurškimo greičio įtaka FVRC.....	49
3.2.1. Skirtingų lašelių įpurškimo greičių įtaka, lašeliams garuojant 450 C temperatūros dujose	49

3.2.2. Skirtingų lašelių įpurškimo greičių įtaka, lašeliams garuojant 1300 C temperatūros dujose	55
3.3. Lašelio dydžio įtaka fazinių virsmų režimų ciklui.....	58
3.4. Dujų temperatūros įtaka fazinių virsmų režimų ciklui	61
Išvados.....	68
Literatūros sąrašas	69
Priedai.....	73
1 priedas	73

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Kompetentingų institucijų nustatytos azoto dioksido ribinės vertės [3]	18
2 lentelė. Leistinos teršalų emisijos, išreikštos mg/Nm ³ , esamiems kūrą deginantiems įrenginiams, kurių galia < 5 MW [9]	20
3 lentelė. Leistinos teršalų emisijos (išreikštos mg/Nm ³) esamiems kūrą deginantiems įrenginiams, kurių galia > 5 MW [9]	20
4 lentelė. Leistinos teršalų emisijos, išreikštos mg/Nm ³ , naujiems kūrą deginantiems įrenginiams [9]	20
5 lentelė. Baudos už Lietuvos Respublikos aplinkos apsaugos įstatymo 75 straipsnio pažeidimą [11]	21
6 lentelė. Galimos šilumos atidavimo koeficiento reikšmės, prie skirtingų konvekcijos tipų [25].....	28
7 lentelė. Tiriamų FVRC parametrai.....	33
8 lentelė. Pradinio lašelio skersmens įtaka fazinių virsmų režimų ciklo trukmei.....	59
9 lentelė. Dujų temperatūros įtaka lašelio fazinių virsmų režimo trukmei	67

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Azotų oksidų koncentracijos (NO_2 būsenoje) priklausomybė nuo temperatūros [4]	18
1.2 pav. Rūgščiojo lietaus formavimasis [6]	19
1.3 pav. Azoto oksidų koncentracijos priklausomybė nuo įpurškiamo vandens kiekio [12] ...	21
1.4 pav. Vandens įpurškimo į degimo kamerą schema [12]	22
1.5 pav. Selektyviosios nekatalizinės azoto oksidų redukcijos veikimo principas [14]	22
1.6 pav. Selektyviosios nekatalizinės azoto oksidų redukcijos efektyvumas [13]	23
1.7 pav. Principinė katilinės su vandens įpuškimu schema Nr.1 [18]	24
1.8 pav. Principinė katilinės su vandens įpuškimu schema Nr.2 [19]	24
1.9 pav. Katilo efektyvumo bei azoto oksidų ir anglies monoksidų emisijų priklausomybė nuo įpurškiamo vandens kiekio [19]	25
1.10 pav. Azoto oksidų emisijų priklausomybė nuo absoliutinio oro drėgnumo [18]	26
1.11 pav. Azoto oksidų emisijų priklausomybė nuo absoliutinio oro drėgnumo, esant skirtingiems oro pertekliaus koeficientams [20]	27
1.12 pav. Anglies monoksido emisijų priklausomybė nuo absoliutinio oro drėgnumo, esant skirtingiems oro pertekliaus koeficientams [20]	27
2.1 pav. Vandens technologinio dispergavimo/įpurškimo geometrinė interpretacija [34]	34
2.2 pav. Temperatūros pasiskirstymas vandens lašelyje pereinamojo garavimo režimo metu, kai lašelis šyla	39
2.3 pav. Šilumos srautai garuojančiame lašelyje pereinamojo garavimo režimo metu, kai lašelis šyla	40
2.4 pav. Fluido greičių profilis fluidui aptekant kūną [39]	40
3.1 pav. Lašelio paviršiaus temperatūros kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja $450\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $Re_0 = 50$; $2R = 110\text{ }\mu\text{m}$; $p_d = 0,1\text{ MPa}$, $w_d = 8\text{ m/s}$	41
3.2 pav. Garo srauto kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b) bei jo tankio kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (c) ir viso FVR ciklo metu (d), kai lašelis garuoja $450\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $Re_0 = 50$; $2R = 110\text{ }\mu\text{m}$; $p_d = 0,1\text{ MPa}$, $w_d = 8\text{ m/s}$	42
3.3 pav. $10\text{ }^\circ\text{C}$ pradinės temperatūros lašelio šilumos srautų kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja $450\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $Re_0 = 50$; $2R = 110\text{ }\mu\text{m}$; $p_d = 0,1\text{ MPa}$, $w_d = 8\text{ m/s}$	43
3.4 pav. $60\text{ }^\circ\text{C}$ pradinės temperatūros lašelio šilumos srautų kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja $450\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $Re_0 = 50$; $2R = 110\text{ }\mu\text{m}$; $p_d = 0,1\text{ MPa}$, $w_d = 8\text{ m/s}$	43
3.5 pav. $90\text{ }^\circ\text{C}$ pradinės temperatūros lašelio šilumos srautų kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja $450\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $Re_0 = 50$; $2R = 110\text{ }\mu\text{m}$; $p_d = 0,1\text{ MPa}$, $w_d = 8\text{ m/s}$	44
3.6 pav. Lašelio skersmens kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja $450\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $Re_0 = 50$; $2R = 110\text{ }\mu\text{m}$; $p_d = 0,1\text{ MPa}$, $w_d = 8\text{ m/s}$	44

3.7 pav. Šiluminio Spoldingo parametro kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 450 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $Re_0 = 50$; $2R = 110 \mu\text{m}$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$	45
3.8 pav. Nu santykio su Nu skaičiumi, kai Stefano srauto įtaka nėra vertinama, kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 450 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $Re_0 = 50$; $2R = 110 \mu\text{m}$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$...	46
3.9 pav. Lašelio paviršiaus temperatūros kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $Re_0 = 50$; $2R = 110 \mu\text{m}$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$	46
3.10 pav. Garo srauto kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $Re_0 = 50$; $2R = 110 \mu\text{m}$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$	47
3.11 pav. 10 °C (a) ir 90°C (b) pradinės temperatūros lašelio šilumos srautų kitimas viso FVR ciklo metu , kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $Re_0 = 50$; $2R = 110 \mu\text{m}$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$	48
3.12 pav. Lašelio skersmens kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $Re_0 = 50$; $2R = 110 \mu\text{m}$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$	48
3.13 pav. Šiluminio Spoldingo parametro (a) ir Nu santykio su Nu, kai Stefano srauto įtaka nėra vertinama (b), kitimas viso FVR ciklo metu , kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $Re_0 = 50$; $2R = 110 \mu\text{m}$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$	49
3.14 pav. Lašelio paviršiaus temperatūros kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 450 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_0 = 40 \text{ °C}$; $2R = 110 \mu\text{m}$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$	50
3.15 pav. Garo srauto kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 450 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_0 = 40 \text{ °C}$; $2R = 110 \mu\text{m}$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$	51
3.16 pav. Iš dujų paimamo konvekcinės šilumos srauto tankio kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 450 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_0 = 40 \text{ °C}$; $2R = 110 \mu\text{m}$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$	51
3.17 pav. Nuselto skaičiaus kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 450 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_0 = 40 \text{ °C}$; $2R = 110 \mu\text{m}$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$	52
3.18 pav. Lašelio slydimo greičio kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 450 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_0 = 40 \text{ °C}$; $2R = 110 \mu\text{m}$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$	52
3.19 pav. Konvekcinio šilumos srauto tankio lašelio viduje kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 450 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_0 = 40 \text{ °C}$; $2R = 110 \mu\text{m}$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$	53
3.20 pav. Lašelio skersmens kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 450 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_0 = 40 \text{ °C}$; $2R = 110 \mu\text{m}$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$	54
3.21 pav. Šiluminio Spoldingo parametro (a) ir Nu santykio su Nu, kai Stefano srauto įtaka nėra vertinama (b) kitimas viso FVR ciklo metu, kai lašelis garuoja 450 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_0 = 40 \text{ °C}$; $2R = 110 \mu\text{m}$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$	54

3.22 pav. Lašelio paviršiaus temperatūros (a) ir garo srauto (b) kitimas viso FVR ciklo metu, kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_{i0} = 40$ °C; $2R = 110$ μm; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s	55
3.23 pav. Lašelio skersmens kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_{i0} = 40$ °C; $2R = 110$ μm; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s	56
3.24 pav. Lašelio, kurių pradinis Re 5 (a) ir 55 (b) šilumos srautų kitimas viso FVR ciklo metu, kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_{i0} = 40$ °C; $2R = 110$ μm; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s	56
3.25 pav. Lašelio slydimo greičio (a) ir efektyviojo šilumos laidumo koeficiento (b) kitimas viso FVR ciklo metu, kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_{i0} = 40$ °C; $2R = 110$ μm; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s.....	57
3.26 pav. Nu skaičiaus (a) ir Nu santykio su Nu, kai Stefano srauto įtaka nėra vertinama (b) kitimas viso FVR ciklo metu, kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_{i0} = 40$ °C; $2R = 110$ μm; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s	57
3.27 pav. Lašelio skersmens kitimas sekundinėje laiko skalėje (a) ir Furje skalėje(b), kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_{i0} = 40$ °C; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s. Ištinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas.....	58
3.28 pav. Lašelio paviršiaus temperatūros kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_{i0} = 40$ °C; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s. Ištinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas	59
3.29 pav. Lašelio centro temperatūros kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_{i0} = 40$ °C; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s. Ištinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas.....	60
3.30 pav. Lašelio paviršiaus ir centro temperatūrų skirtumo (a) ir konvekcinės šilumos srauto lašelio viduje kitimas (b), kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_{i0} = 40$ °C; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s. Ištinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas.....	60
3.31 pav. Garo srauto (a) ir Nu santykio su Nu, kai nevertinama Stefano srauto įtaka (b), kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_{i0} = 40$ °C; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s. Ištinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas.....	61
3.32 pav. Lašelio paviršiaus temperatūros kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja dujų sraute. $2R = 110$ μm; $X_v = 0,18$; $t_{i0} = 40$ °C; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s. Ištinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas.....	62
3.33 pav. Lašelio centro temperatūros kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja dujų sraute. $2R = 110$ μm; $X_v = 0,18$; $t_{i0} = 40$ °C; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s. Ištinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas.....	62
3.34 pav. Lašelio paviršiaus ir centro temperatūrų skirtumo kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja dujų sraute.	

$2R = 110 \mu\text{m}$; $X_v = 0,18$; $t_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$. Ištisinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas	63
3.35 pav. Konvekcinio šilumos srauto tankio lašelio viduje kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja dujų sraute. $2R = 110 \mu\text{m}$; $X_v = 0,18$; $t_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$. Ištisinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas	64
3.36 pav. Lašelių sugeriamos spinduliuotės (a) ir iš dujų gaunamo konvekcinio šilumos srauto tankio (b) paviršiaus ir centro temperatūrų skirtumo kitimas, kai lašelis garuoja dujų sraute. $2R = 110 \mu\text{m}$; $X_v = 0,18$; $t_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$. Ištisinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas.....	64
3.37 pav. Fazinių virsmų šilumos srauto tankio kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja dujų sraute. $2R = 110 \mu\text{m}$; $X_v = 0,18$; $t_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$. Ištisinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas	65
3.38 pav. Garo srauto kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja dujų sraute. $2R = 110 \mu\text{m}$; $X_v = 0,18$; $t_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$. Ištisinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas.....	66
3.39 pav. Šiluminio Spoldingo parametro (a) ir Nu santykio su Nu , kai Stefano srauto įtaka nėra vertinama (b) kitimas viso FVR ciklo metu, kai lašelis garuoja dujų sraute. $2R = 110 \mu\text{m}$; $X_v = 0,18$; $t_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$. Ištisinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas	66
3.40 pav. Lašelio skersmens kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja dujų sraute. $2R = 110 \mu\text{m}$; $X_v = 0,18$; $t_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$. Ištisinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas.....	67

Ivadas

Vandens įpurškimas į dujų srautą yra dažnas reiškinys tiek inžinerijoje, tiek ir gamtoje. Pagrindinė to priežastis – unikalios vandens terminės savybės. Tai bene didžiausią savitąją šilumą turintis skystis (4,2 kJ/kg), tad vanduo gali sugerti milžinišką šilumos kiekį, santykinai nedaug pakylant jo temperatūrai. Vandeniui pereinant iš kietos būsenos į skystą (ledui tirpstant) reikia suteikti 334 kJ/kg šilumos, o iš skystos į dujinę – net 2256,4 kJ/kg (soties būsenoje, esant atmosferiniam slėgiui). Visa tai rodo, kad vanduo yra kone idealus fluidas aušinti ar perduoti šilumą. Dėl to, turint dujas, kurios yra per karštos optimaliam technologiniam procesui, į jas yra patogų įpurkšti vandenį. Vanduo taip pat pasižymi labai geromis tirpumo savybėmis ir neretai vadinamas universaliu tirpikliu, nes gali ištirpinti daugiau įvairių medžiagų negu betkoks kitas skystis. Ši savybė panaudojama valant dūmus. Vanduo įpurškiamas tam, kad sugaudytų smulkias kietąsias daleles bei jame tirpstančius kenksmingus cheminius junginius. Tai itin aktualu griežtėjant aplinkosaugos reikalavimams. Vandens tirpumo savybės turi ir neigiamą reikšmę. Degimo metu neišvengiamai susidaro rūgštinių oksidų, kurie yra tirpūs vandenyje. Kadangi tarp degimo produktų visada yra bent dalis vandens (sudegus kure esančiame vandeniliui ir dėl kuro ar oro drėgnumo), minėti oksidai ištirpsta vandenyje, suformuodami rūgštis. Šios labai gerai reaguoja su metalais, tad leidžiant kondensacijai įvykti prie metalinių paviršių, jie neišvengiamai prakiurs gerokai anksčiau, nei numatyta jų eksploataavimo trukmė. Vadinasi, prieš įrengiant vandens įpurškimo į dujas sistemas, privaloma tinkamai įvertinti bei apsibrėžti įpurškimo parametrus, kad ne tik būtų pasiekti pageidaujami dujų parametrai, bet ir vanduo visiškai išgaruotų, kol dvifazis (vandens / dujų) srautas nepasiekė korozijai neatsparių paviršių. Vandens įpurškimo technologija turi veikti esant kiek įmanoma mažesnei įpurškiamo vandens temperatūrai ir įpurškimo greičiui, kad sistema būtų kuo efektyvesnė, pigesnė bei paprastesnė. Tai didelis iššūkis, kadangi kuro deginimo technologijose procesų parametrai gali būti nepastovūs, tad vandens įpurškimo sistemoms tenka prie jų prisitaikyti. Įprastai lašelių garavimo skaičiavimams yra naudojami supaprastinti modeliai, kurie vertina lašelio garavimą stacionariose sąlygose, tačiau realybėje, lašelių įpurškimo metu, jie juda dideliu greičiu, kuris lemia suintensyvėjusius konvekcinius šilumos mainus tiek tarp lašelių ir dujų, tiek lašelio viduje. Minėti modeliai tiksliai neįvertina lašelio temperatūros pasiskirstymo bei kitimo, kuris stipriai įtakoja lašelio garavimo intensyvumą. Visa tai gali lemti netinkamą vandens įpurškimo sistemos veikimą. Šio tyrimo tikslas yra sumodeliuoti vandens lašelio fazinių virsmų režimų ciklą, naudojant lašelio konvekcinio šildymo bei garavimo modelį, kuro deginimo technologijoms būdingose kraštinėse sąlygose, bei išryškinti jų įtaką sudėtinių šilumokaitos ir fazinių virsmų sąveiką apibrėžiantiems faktoriams, akcentuojant dūmų valymo technologinį atvejį. Skaitinis tyrimas atliekamas naudojant lašelio konvekcinio šildymo bei garavimo modelį, kuris leidžia tirti tiek konvekcinius šilumos mainus tarp lašelio ir dujų, tiek konvekciją lašelio viduje. Šis modelis įvertina ir fazinių virsmų procesų tarpusavio sąveiką. Tyrimo metu, vertinama pradinių lašelių įpurškimo parametrų įtaka jo garavimui. Pagal gautus rezultatus nustatoma kokią reikšmę šie parametrai gali turėti vandens įpurškimo sistemos valdymui.

Tyrimo uždaviniai:

1. nustatyti kraštines sąlygas, kurios būdingos vandens įpurškimui kuro deginimo technologijose;

2. įvertinti lašelio pradinės temperatūros įtaką lašelių garavimui;
3. nustatyti pradinio Re skaičiaus įtaką konvekcinį šilumos mainų intensyvumui bei jų poveikį lašelio garavimo trukmei;
4. apžvelgti spinduliavimo įtaką lašelių terminiams parametrams bei jų poveikį faziniams virsmams, priklausomai nuo lašelio dydžio;
5. įvertinti spinduliavimo įtaką lašelių garavimui skirtingos temperatūros dujose;
6. išanalizuoti fazinių virsmų procesų sąveiką apibrėžiančius parametrus bei jų įtaką lašelio garavimui.

1. Teorinė dalis

1.1. Vandens įpurškimo taikymas kuro deginimo technologijose

Kadangi vanduo yra bene labiausiai paplitęs junginys žemėje, tad jo garavimas yra neretai aptinkamas reiškinys. Faktas, kad vanduo, esant atmosferiniam slėgiui, užverda 100 °C temperatūroje yra visiems gerai žinomas. Tokia aukšta temperatūra gamtoje pasitaiko ne itin dažnai, tačiau net ir be to, faziniai vandens virsmai yra gyvybiškai svarbus reiškinys Žemėje. To priežastis – paviršinis vandens garavimas vyksta bet kokioje temperatūroje. Vandens garavimą lemia ne tik šilumos, bet ir masės mainai. Oras ar kitos dujos, priklausomai nuo temperatūros, gali savyje sulaikyti tam tikrą kiekį vandens garo. Kol vandens garo kiekis dujose nepasiekia soties taško, vandens molekulės gali pereiti iš skystos būsenos į dujinę. Paviršinio garavimo atveju, kai temperatūra santykinai nedidelė (< 100 °C), slaptoji garavimo šiluma yra netgi truputį didesnė, negu vandeniui garuojant, tad vandens faziniai virsmai yra kone idealus šilumos perdavimo būdas net ir žemoje temperatūroje. Vandens (ar kitų skysčių) garinimas taikomas daugelyje pramonės procesų, kuriuose reikalingas šilumos perdavimas, reguliuojant degimo procesus. Vyraujant pasaulinėms tendencijoms mažinti iškastinio kuro vartojimą bei aplinkos taršą, tampa vis aktualiau maksimaliai efektyviai išnaudoti kurą deginančius įrenginius, nedarant kompromisų su ekologiniais jų rodikliais. Įrenginiai, gaminantys energiją iš atsinaujinančių energijos šaltinių, kol kas nėra pajėgūs patenkinti esamo energijos poreikio. Kadangi didesnę dalį šios rinkos sudaro saulės ir vėjo jėgainės, o jų valdyti žmogui paprasčiausiai neįmanoma, tad jų generuojama šiluminės ar elektros energijos galia yra nepastovi ir sunkiai prognozuojama. Dėl to, kurą deginantys įrenginiai šilumos bei elektros gamyboje vis dar išlieka labai svarbūs, kadangi jie gali užtikrinti stabilų energijos tiekimą, nepriklausomai nuo aplinkos sąlygų. Tačiau labai svarbu, kad jų veikimas būtų tinkamai optimizuotas, minimizuojant jų neigiamą poveikį aplinkai: dirbti kuo efektyviau, kad būtų sumažinami CO₂ išmetimai, ir kartu dirbti taip, kad degimo metu susidarytų kuo mažiau žmogui ir aplinkai kenksmingų junginių.

1.2. Vandens įpurškimo taikymas, siekiant sumažinti teršalų išmetimus

1.2.1. Teršalai, susidarantys degimo procesų metu

Įprastai, kalbant apie kurą deginančių įrenginių žalą aplinkai, yra minimi CO₂ išmetimai, bet šių dujų poveikis apsiriboja šiltnamio efekto stiprinimu. Tačiau degimo metu gali susiformuoti ir žmogui bei gamtai tiesioginę neigiamą įtaką darantys teršalai – azoto oksidai (NO_x), sieros dioksidas (SO₂) bei kietosios dalelės.

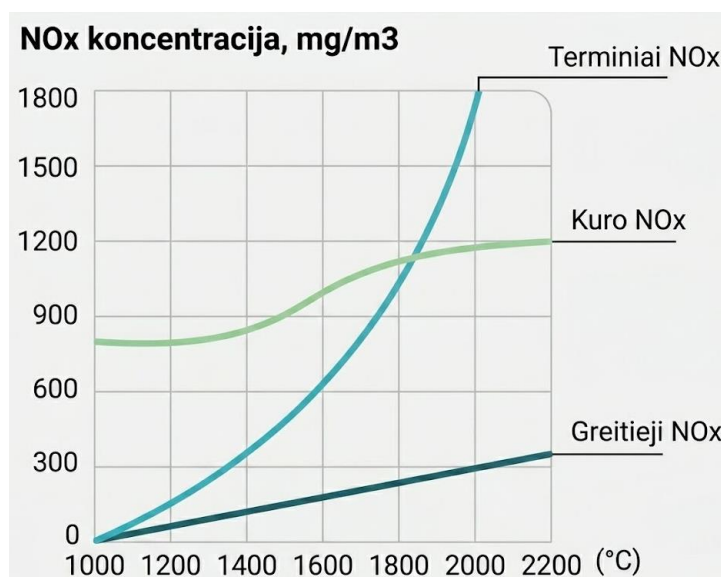
Azoto oksidai – taip bendrai yra vadinami azoto monoksidas (NO) ir azoto dioksidas (NO₂). Azoto monoksidas yra bespalvės nuodingos dujos, susiformuojančios oksiduojantis azotui. Jis beveik netirpsta vandenyje, tačiau yra labai chemiškai aktyvus. Dėl to patekęs į atmosferą, NO reaguoja su kitais junginiais, tokiu būdu formuodamas antrinius teršalus, tokius kaip NO₂. Azoto monoksidas taip pat prisideda ir prie ozono sluoksnio nykimo viršutiniuose atmosferos sluoksniuose, kadangi saulės spinduliuojama šiluma priverčia azoto monoksidus reaguoti su ozonu ir redukuoja jį iki deguonies [1]. Azoto dioksidas yra raudonai rudos spalvos dujos, kurios taip pat yra labai nuodingos ir chemiškai aktyvios. NO₂ reaguojant su vandeniu susiformuoja azoto rūgštis, kuri gali sukelti rūgštųjų lietu. Ji pažeidžia

jautrias ekosistemas, tokias kaip ežerai bei miškai. Didelė NO₂ koncentracija ore gali sudirginti žmonių kvėpavimo takus ir sukelti tokius simptomus kaip kosulys, švokštimas ar pasunkėjęs kvėpavimas. Ilgą laiką padidėjusi NO₂ koncentracija gali lemti astmos atsiradimą ir paūmėjimus, didinti riziką sirgti kvėpavimo takų infekcijomis [2]. Ilgalaikis NO₂ poveikis sveikatai yra apžvelgtas Pasaulinės sveikatos organizacijos. Naujausi tyrimai rodo, kad didelės NO₂ koncentracijos kelia tiesioginę riziką sveikatai. 1 lentelėje pateiktos ribinės NO₂ koncentracijos, kurioms esant tam tikrą laiką gali atsirasti sveikatai neigiamų padarinių [3].

1 lentelė. Kompetentingų institucijų nustatytos azoto dioksido ribinės vertės [3]

Laikas (min.)	10	20	30
Mirtini padariniai	118 ppm	98 ppm	88 ppm
Negrįžtami padariniai	60 ppm	55 ppm	50 ppm
Grįžtami padariniai	5 ppm	5 ppm	5 ppm

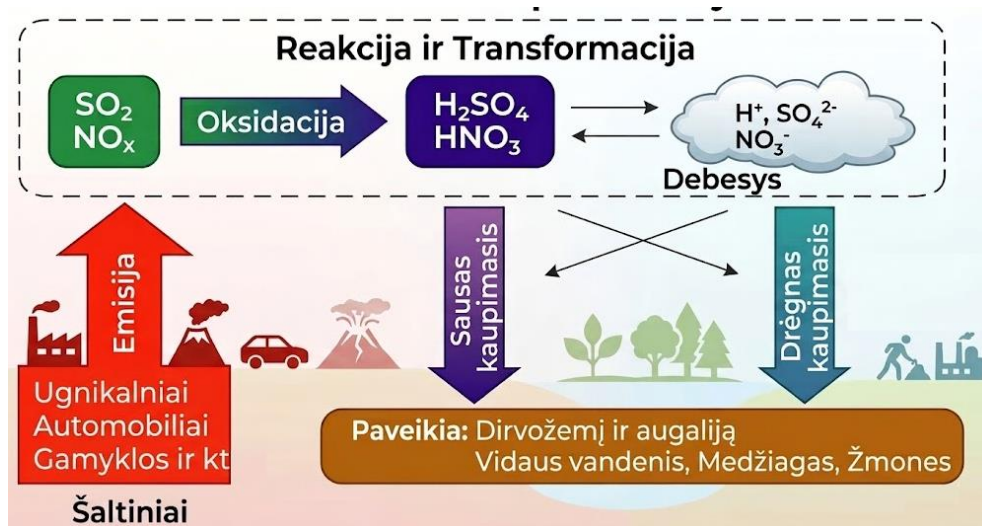
Pagal formavimosi pobūdį azoto oksidai skirstomi į terminius, kuro ir greituosius. Pastarieji formuojasi deginant angliavandenilius. Aukštoje temperatūroje angliavandeniliai skyla ir susiformuoja jų radikalai, kurie reaguoja su degimui skirtame ore esančiu azotu (N₂) ir palieka laisvą azoto joną, kuris reaguodamas su deguonimi suformuoja azoto oksidus. Terminiai azoto oksidai pradeda formotis tik aukštesnėje nei 1000 °C temperatūroje, kadangi azoto oksidacija yra endoterminė reakcija, kuriai reikia labai didelio energijos kiekio. Terminių NO_x koncentracija labai stipriai priklausoma nuo temperatūros, kadangi nuo 1300 °C ji pradeda augti eksponentiškai. O štai kuro NO_x yra labiausiai priklausomi nuo kuro sudėtyje esančio azoto ir nors aukštesnėje temperatūroje gaunamos didesnės jų koncentracijos, tačiau skirtumas nėra toks ženklus kaip pirmais dviem atvejais. Kaip matyti 1.1 pav., visų tipų azoto oksidų koncentracijos priklauso nuo temperatūros, tačiau, net ir ją kontroliuojant, azoto oksidų susidarymas neišvengiamas, jei kuro sudėtyje yra azoto [4].



1.1 pav. Azotų oksidų koncentracijos (NO₂ būsenoje) priklausomybė nuo temperatūros [4]

Sieros dioksidas – tai bespalvės nedegios dujos, susidaranti deginant kurą, kurio sudėtyje yra sieros, pavyzdžiui, anglį, mazutą, dyzeliną. Dėl neigiamo poveikio žmonėms ir

aplinkai SO₂ yra laikomas teršalu. Jis dirgina akis, gleivinę ir kvėpavimo takus. Trumpalaikis didelių SO₂ koncentracijų poveikis gali sukelti bronchų spazmus ar net širdies sustojimą, vidutinė dozė – plaučių edemą, o maža – sisteminę acidozę. Šio teršalo poveikiui itin jautrūs kvėpavimo takų ligomis sergantys žmonės [5]. Aplinkoje esantis SO₂ pavojingas, nes oksiduojasi ir reaguoja su vandeniu, tokiu būdu suformuodamas sieros rūgštį (H₂SO₄) arba sulfitinę rūgštį (H₂SO₃). Šios rūgštys maišosi su ore esančiais vandens garais ir ištirpsta krituliuose, taip susidaro rūgštusis lietus. Toks lietus rūgština dirvožemį bei vandenį, lėtina augalų augimą, žaloja vandenyje esančias ekosistemas (žr. 1.2 pav.) [6].



1.2 pav. Rūgščiojo lietaus formavimasis [6]

Kietosios dalelės – taip vadinamos smulkios iš sulfatų, nitratų, amoniako, kalcio chlorido, anglies, mineralinių dulkių ar vandens sudarytos dalelės, kurias galima įkvėpti. Dalelės yra skirstomos pagal dydį, kuris įprastai apibrėžiamas pagal aerodinaminį skersmenį. Didžiausią neigiamą įtaką žmonių sveikatai daro mažesnio nei 10 μm skersmens dalelės. Nuo 2,5 iki 10 μm skersmens dalelių šaltiniai yra žiedadulkės, dulkės, atsirandančios dėl vėjo sukeltos erozijos, kasybos darbų ar žemdirbystės. Mažesnės nei 2,5 μm skersmens dalelės atsiranda deginant kurą katilinėse, jėgainėse ar transporto priemonėse. Šios dalelės geba įsiskverbti giliai į plaučius, patenka į kraujotaką ir gali sukelti širdies, kraujagyslių ar kvėpavimo takų ligas. Šių ligų priežastimi gali tapti tiek ilgalaikis, tiek ir trumpalaikis kietųjų dalelių poveikis. Ilgalaikis šių dalelių poveikis yra vienas iš plaučių vėžio rizikos veiksnių [7].

1.2.2. Teršalų emisijų teisinis reguliavimas

Vyraujant pasaulinėms tendencijoms palaipsniui pereiti prie švarios energijos gamybos, aptartų teršalų išmetimai yra ribojami teisiškai. ES direktyva 2015/2193 nustato maksimalias leistinas NO_x, kietųjų dalelių ir SO₂ koncentracijas išmetamuosiuose dūmuose vidutiniams kurą deginantiesiems įrenginiams [8]. Lietuvoje ši direktyva yra įgyvendinama Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2017 m. rugsėjo 18 d. įsakymu Nr. D1-778 „Dėl išmetamų teršalų iš vidutinių kurą deginančių įrenginių normų patvirtinimo“. Jame nustatytos leistinos emisijų normos priklauso nuo įrenginio galios, jo kuro rūšies bei įrenginio amžiaus. 2 ir 3 lentelėse pateikti duomenys rodo, kad esamiems kurą deginantiesiems įrenginiams, taikomi

gerokai griežtesni reikalavimai kietųjų dalelių bei SO₂ emisijoms, kai deginamas iškastinis kuras [9].

2 lentelė. Leistinos teršalų emisijos, išreikštos mg/Nm³, esamiems kurą deginantiems įrenginiams, kurių galia < 5 MW [9]

Teršalas	Kieta biomasė	Kitas kietasis kuras	Gazolis	Skystasis kuras, išskyrus gazolį	Gamtinės dujos	Dujinis kuras, išskyrus gamtines dujas
SO ₂	200	1100	–	350	–	200
NO _x	650	650	200	650	250	250
Kietosios dalelės	50	50	–	50	–	–

3 lentelė. Leistinos teršalų emisijos (išreikštos mg/Nm³) esamiems kurą deginantiems įrenginiams, kurių galia > 5 MW [9]

Teršalas	Kieta biomasė	Kitas kietasis kuras	Gazolis	Skystasis kuras, išskyrus gazolį	Gamtinės dujos	Dujinis kuras, išskyrus gamtines dujas
SO ₂	200	400	–	350	–	35
NO _x	650	650	200	650	200	250
Kietosios dalelės	30	30	–	30	–	–

Tiesa, projektuojamiems naujiems įrenginiams taikomos gerokai griežtesnės azoto oksidų ir kietųjų dalelių emisijos (žr. 4 lentelę), tad, projektuojant naujas katilines ar kitus kurą deginančius įrenginius, būtina atsižvelgti ir į jų taršos mažinimo priemones.

4 lentelė. Leistinos teršalų emisijos, išreikštos mg/Nm³, naujiems kurą deginantiems įrenginiams [9]

Teršalas	Kieta biomasė	Kitas kietasis kuras	Gazolis	Skystasis kuras, išskyrus gazolį	Gamtinės dujos	Dujinis kuras, išskyrus gamtines dujas
SO ₂	200	400	—	350	—	35
NO _x	300	300	200	300	100	200
Kietosios dalelės	20	20	—	20	—	—

Teisinė atsakomybė už šių normų pažeidimus gali kilti tiek pačiai įmonei, kuriai priklauso įrenginys, tiek jos vadovams ir darbuotojams (operatoriams), kurie atsakingi už tinkamą įrenginio veikimą. Lietuvos Respublikos administracinių nusižengimo kodekso 242 straipsnio 1 dalis numato, kad šie pažeidimai juridinių asmenų vadovams ar kitiems atsakingiems asmenims užtraukia baudą nuo 170 iki 1170 Eur, operatoriams ši bauda kiek mažesnė – nuo 60 iki 300 Eur [10]. Teisinę atsakomybę juridiniams asmenims numato Lietuvos Respublikos aplinkos apsaugos įstatymo 75 straipsnis. Baudos dydis šiuo atveju priklauso nuo to, kiek kartų viršytos leistinos teršalų emisijos ir ar pažeidimas pakartotinis. Už pirmą pažeidimą, jei emisijos viršytos iki 1,5 karto, bauda nedidelė (300–600 Eur), tačiau jei emisijų normos viršijamos daugiau nei 5 kartus, bauda įmonei gali siekti nuo 6000 iki

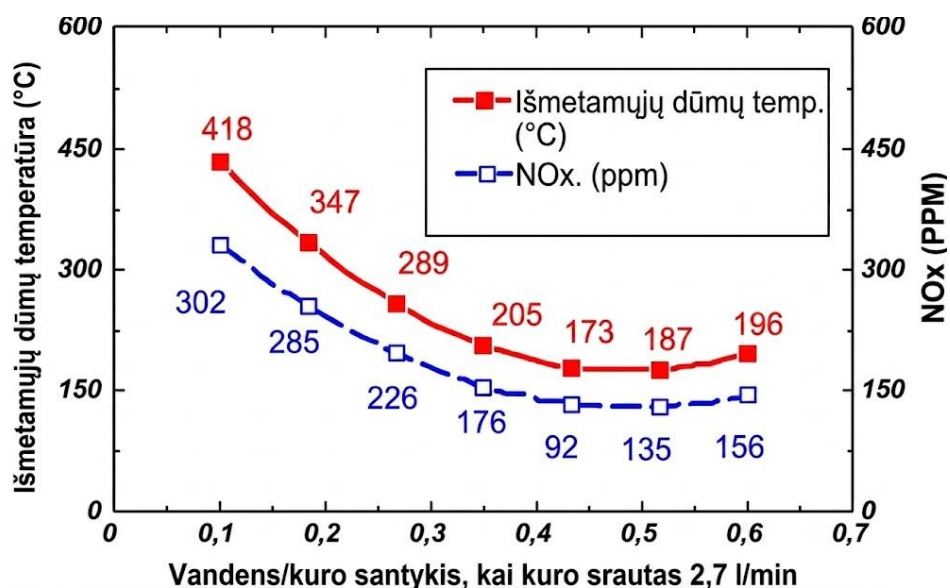
10000 Eur, o už pakartotinį tokį pažeidimą bauda siektų net 10000–23000 Eur [11] (žr. 5 lentelę).

5 lentelė. Baudos už Lietuvos Respublikos aplinkos apsaugos įstatymo 75 straipsnio pažeidimą [11]

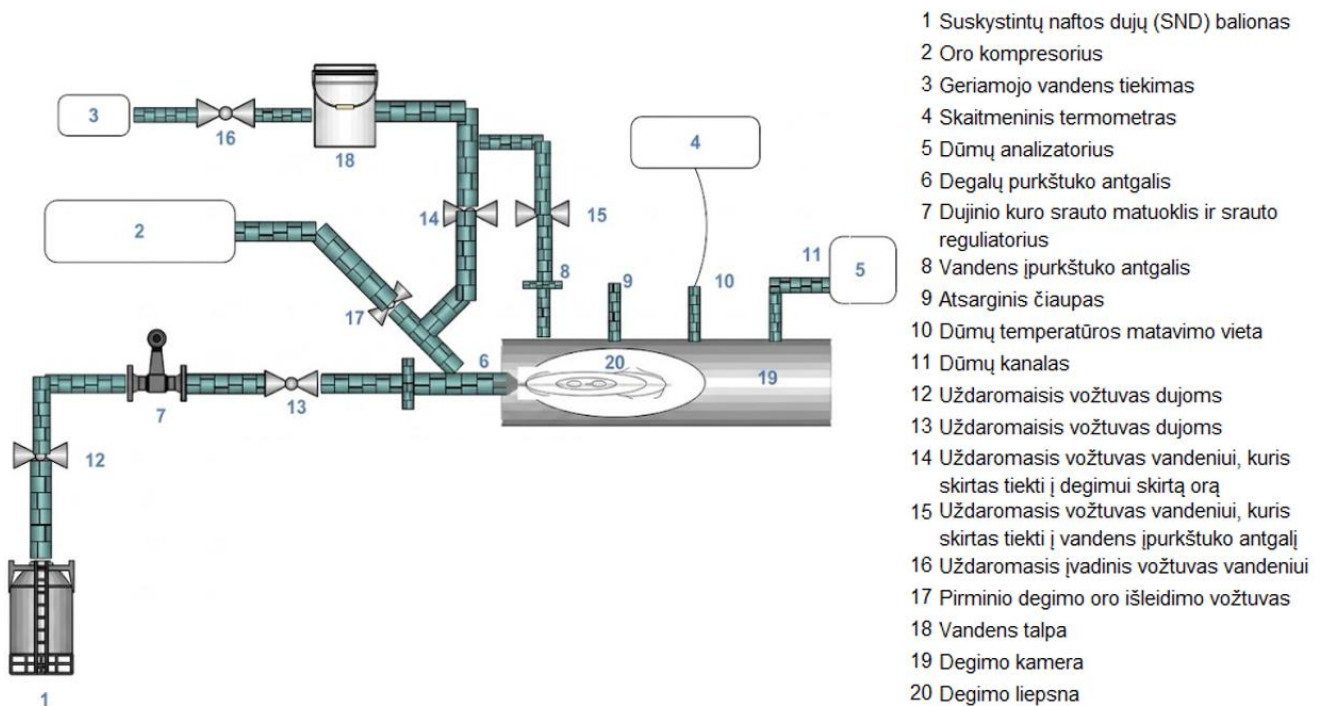
Normatyvų viršijimas	Pirma bauda	Pakartotinė bauda
Iki 1,5 karto	300–600 €	600–1 200 €
Nuo 1,5 iki 3 kartų	1 200–2 300 €	3 000–6 000 €
Nuo 3 iki 5 kartų	3 000–6 000 €	6 000–10 000 €
5 kartus ir daugiau	6 000–10 000 €	10 000–23 000 €

1.2.3. Azoto oksidų emisijų mažinimas pirminėmis priemonėmis

Vienas racionaliausių būdų sumažinti NO_x emisijas – optimizuoti degimo procesus taip, kad būtų išvengta terminių azoto oksidų susidarymo. Norint tai pasiekti, reikia kontroliuoti degimo temperatūrą, kad ji neviršytų 1300 °C ribos. Vienas iš būdų tai padaryti – įpurškėti vandenį į degimo kamerą. Tokiu atveju vanduo, panaudodamas savo milžinišką slaptąją garavimo šilumą, paima didelį energijos kiekį iš degimo zonos, sumažindamas dujų temperatūrą. Atliekant eksperimentinį tyrimą, kuriame buvo nagrinėjama įpurškiamo vandens kiekio įtaka išmetamųjų dūmų temperatūrai ir azoto oksidų koncentracijai, nustatyta, kad vandens įpurškimas į degimo kamerą gali sumažinti azoto oksidų koncentraciją dūmuose 45 %, kai vandens ir kuro santykis 0,4 (žr. 1.3 pav.). Atliekant tyrimą buvo kūrenamos suskystintosios naftos dujos (80 % propanas ir 20 % butanas), kurių degimo temperatūra ~2200 °C. Tyrimui naudotos įrangos principinė schema pateikta 1.4 pav. [12].



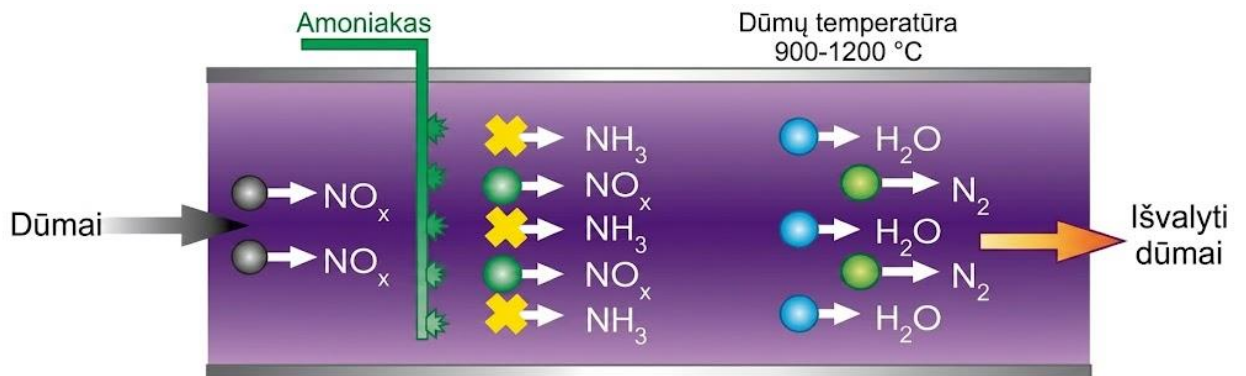
1.3 pav. Azoto oksidų koncentracijos priklausomybė nuo įpurškiamo vandens kiekio [12]



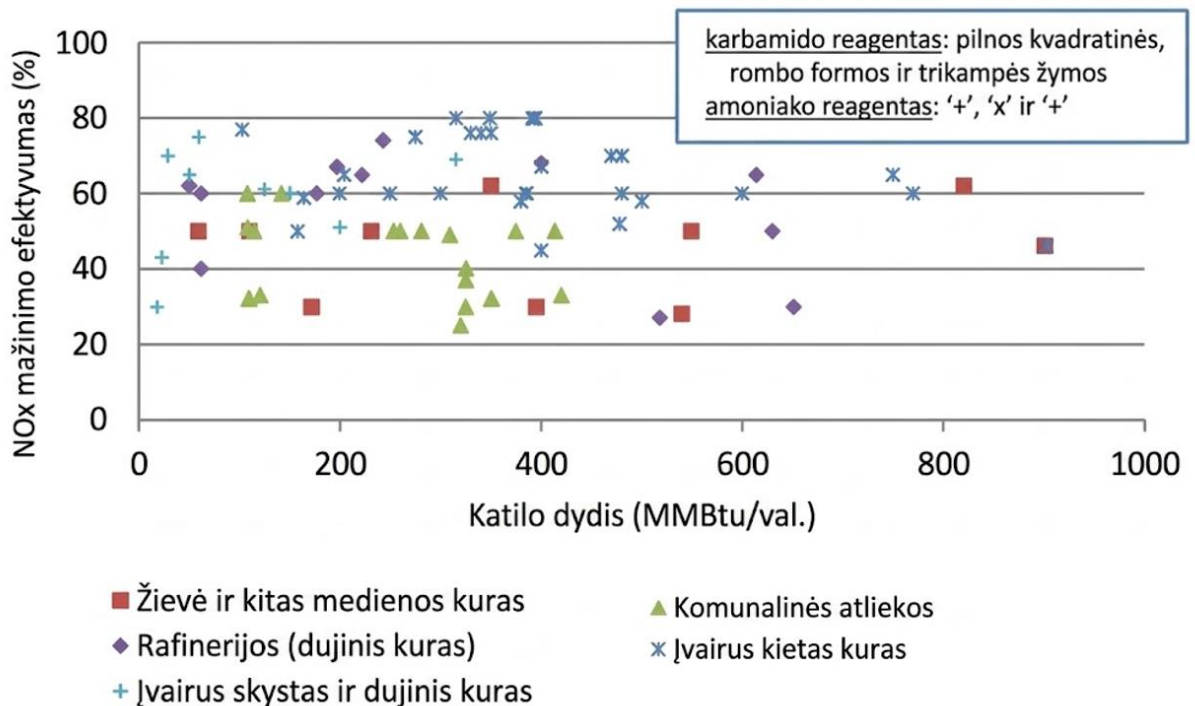
1.4 pav. Vandens įpurškimo į degimo kamerą schema [12]

1.2.4. Azoto oksidų emisijų mažinimas antrinėmis priemonėmis

Kartais išvengti NO_x susiformavimo neįmanoma dėl kuro sudėties arba degimui būtinos aukštos degimo temperatūros. Tokiu atveju vienintelis būdas neviršyti leistinų emisijų yra NO_x valymas iš dūmų. Bene dažniausiai tai daroma selektyviosios nekatalizinės azoto oksidų redukcijos būdu. Jos metu su vandeniu sumaišyti reagentai (amoniakas arba karbamidai) įpurškiami į karštus dūmus, kurių temperatūra apie $900\text{ }^\circ\text{C}$. Šioje temperatūroje reagentai reaguoja tiek su NO , tiek su NO_2 , redukuodami juos iki N_2 (žr. 1.5 pav.). Kai naudojamas amoniakas, kaip atliekinis produktas gaunamas vanduo, o naudojant karbamidą – vanduo ir CO_2 . Priklausomai nuo įrenginio tipo ir jo naudojamo kuro, šis metodas gali sumažinti azoto oksidų koncentraciją 25–60 %, kai naudojamas karbamidai, ir 61–65 %, kai naudojamas amoniakas (žr. 1.6 pav.) [13].



1.5 pav. Selektivosios nekatalizinės azoto oksidų redukcijos veikimo principas [14]



1.6 pav. Selektivosios nekatalizinės azoto oksidų redukcijos efektyvumas [13]

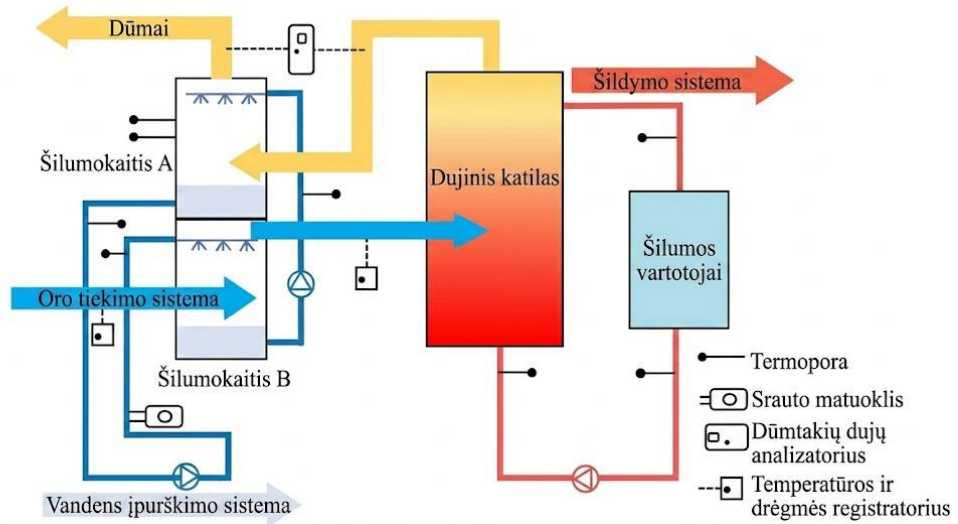
Kitas būdas sumažinti NO_x koncentraciją dūmuose yra selektyvioji katalizinė redukcija. Šios reakcijos metu taip pat naudojamas amoniakas arba karbamidas. Nors selektyvioji katalizinė redukcija naudojama kiek rečiau nei selektyvioji nekatalizinė redukcija, nes ši technologija yra brangesnė, tačiau ji gali vykti žemesnės temperatūros dūmuose (250–450 °C) ir pasiekti mažesnes NO_x koncentracijas [15]. Tyrimai rodo, kad naudojant šią technologiją galima sumažinti azoto oksidų koncentraciją dūmuose net iki 95 %. Tiesa, labai svarbu, kad reakcijos metu būtų maksimizuoti dujų, katalizatoriaus ir įpurkštų reagentų kontaktinis plotas [16]. Pagrindinė priežastis, kodėl ši technologija yra brangesnė ir dėl to rečiau naudojama, yra brangūs iš titano ir vanadžio oksidų gaminami katalizatoriai [17].

1.3. Vandens įpurškimo technologijos įtaka katilinės techniniams rodikliams

1.3.1. Vandens įpurškimo į degimui skirtą orą praktinis taikymas ir įtaka degimo procesams

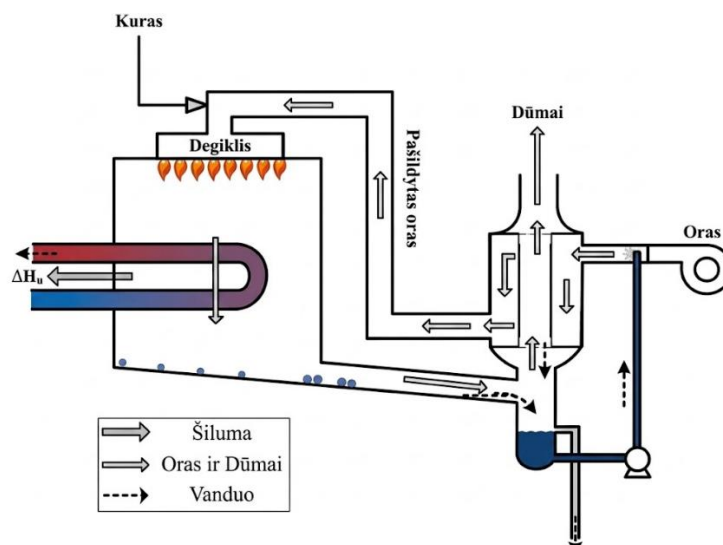
Nors iš pirmo žvilgsnio gali pasirodyti, kad vanduo gali daryti neigiamą poveikį degimo efektyvumui, kadangi garuodamas sugeria nemažą dalį šilumos, tačiau pastaruoju metu itin sparčiai populiarėja kondensaciniai ekonomizeriai, kurie didžiąją dalį šios šilumos regeneruoja, todėl šiluminiai nuostoliai dėl padidėjusios drėgmės tampa minimalūs. Šios priežastys leidžia inžinieriams integruoti vandens įpurškimo sistemas katilinėse. 1.7 pav. pateikiama principinė katilinės schema, kurioje vaizduojama, kaip vandens įpurškimas gali būti integruojamas į katilinės technologinį procesą. Šioje katilinėje oras, prieš tiekiant jį į degiklį, yra pašildomas ir sudrėkinamas kontaktiniame šilumokaityje (šilumokaitis B). Paskui šis oras naudojamas dujų deginimui katile, ten jis pašildo termofikacinį vandenį, skirtą vartotojams. Iš katilo išėję dūmai, prieš išmetant juos į aplinką, yra tiekiami į kitą kontaktinį šilumokaitį (šilumokaitis A), kuriame į dūmus išpurškiamas vanduo, kad juos papildomai

ataušintų. Dūmams aušinti panaudotas vanduo kartu su iš dūmų susikondensavusiu vandeniu yra surenkamas ir panaudojamas įpurškimui į pirmąjį šilumokaitį. Prieš šilumokaitį (šilumokaitis B) yra numatytas ir papildomas šilumokaitis, kuris esant poreikiui gali pašildyti įpurškiamą vandenį. Taigi, šioje sistemoje vanduo yra įpurškiamas tiek į dūmus, tiek ir į degimui tiekiamą orą [18].



1.7 pav. Principinė katilinės su vandens įpuškimu schema Nr.1 [18]

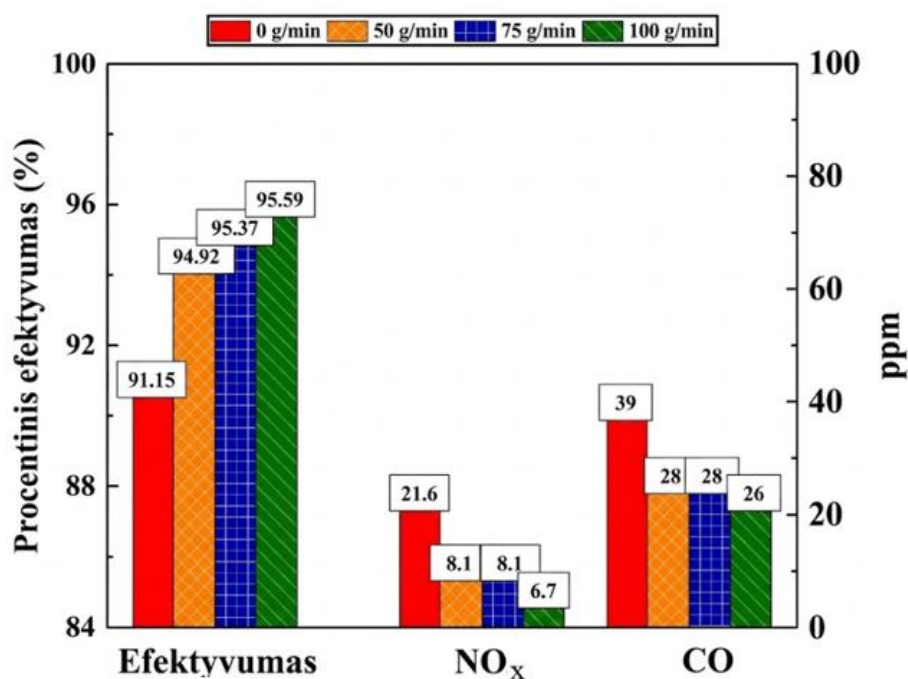
1.8 pav. pateikiama principinė schema, kaip vandens įpurškimas naudojamas buitiniame kondensaciniame katile. Vanduo yra įpurškiamas į orą, kuris tiekiamas į degiklį. Prieš patekdamas į degiklį, oras pereina per šilumokaitį, kuriame jį pašildo iš degimo kameros išėję dūmai. Kadangi šis katilas kondensacinis, tad dūmuose esančių vandens garų kondensacija prasideda degimo kameroje. Dėl to šiame katile suprojektuotas kondensato surinkimas tiek nuo degimo kameros, tiek ir nuo oro pašildymo šilumokaičio, kuriame vyksta kondensacija, kadangi drėgnas oras papildomai ataušina dūmus. Susidaręs kondensatas surenkamas ir vėl įpurškiamas į orą [19].



1.8 pav. Principinė katilinės su vandens įpuškimu schema Nr.2 [19]

1.3.2. Oro drėgnumo įtaka teršalų susidarymui

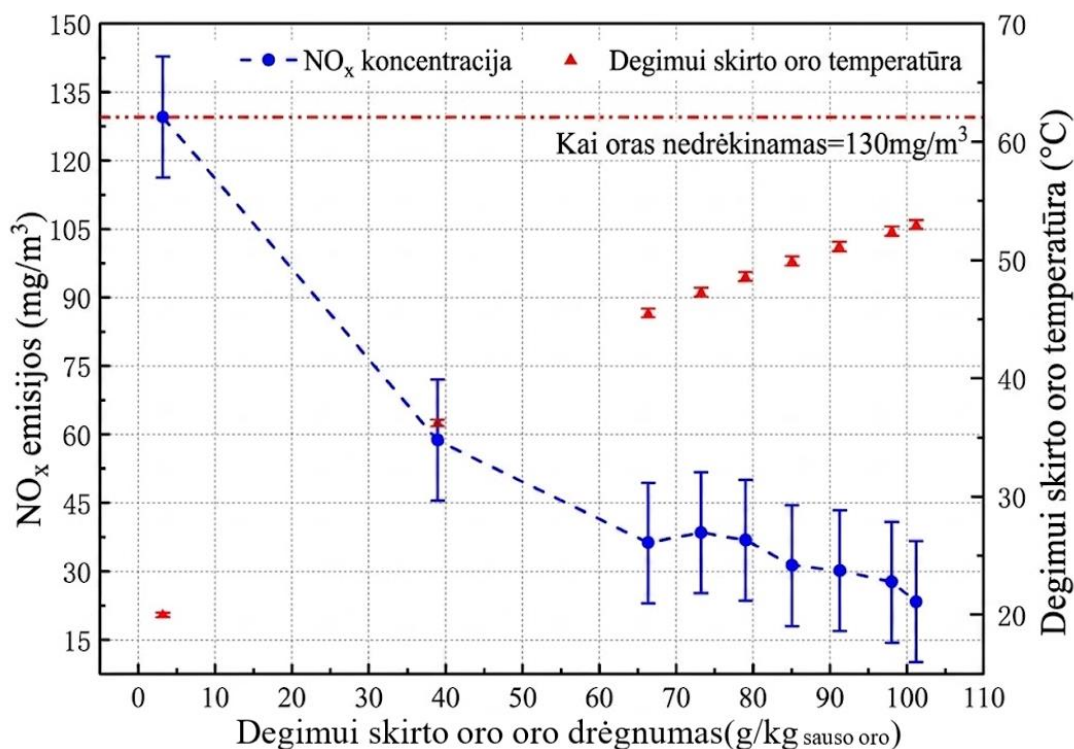
Kurą deginančiuose įrenginiuose vandens įpurškimas į degimui tiekiamą orą, tokiu būdu jį drėkinant, leidžia sumažinti temperatūrą degimo kameroje, tai lemia kiek mažesnius šiluminius nuostolius per katilo sienes ir leidžia išvengti terminių azoto oksidų (NO_x) susidarymo. Pietų Korėjos mokslininkai atliko tyrimą, pavadinimu „Theoretical and experimental study of waste-heat-recovery boiler with water injection“, kuris publikuotas „Heliyon“ žurnale. Vanduo buvo purškiamas į oro srautą, kuris tiekiamas į 24 kW galios kondensacinio katilo (žr. 1.8 pav.) degiklį. Oras, į kurį įpurkštas vanduo, yra pašildomas išmetamųjų dujų, prieš tiekiant į degiklį. Degimo metu vanduo leidžia palaikyti žemesnę nei įprasta liepsnos temperatūrą, greitai sugerdamas degimo metu išsiskiriančią šilumą. Katilo šilumokaityje dūmai yra ataušinami, o išgaravęs vanduo sukondensuojamas. Kondensatas iš naujo panaudojamas įpurškiant jį į orą, kuris tiekiamas į degiklį, o atvėsusę dūmai papildomai ataušinami atiduodant jį šilumą į degiklį tiekiamam orui. Šio tyrimo eksperimentiniai rezultatai, pavaizduoti 1.9 pav., rodo, kad didinant įpurškiamo vandens kiekį galima ne tik padidinti katilo efektyvumą, bet ir net 3 kartus sumažinti azoto oksidų emisijas ir 1,5 karto sumažinti anglies monoksido išmetimus [19].



1.9 pav. Katilo efektyvumo bei azoto oksidų ir anglies monoksidų emisijų priklausomybė nuo įpurškiamo vandens kiekio [19]

Teigiamą vandens, įpurškiamo į degimui skirtą orą, įtaką azoto oksidų emisijoms patvirtina ir kitas tyrimas, pavadinimu „Combustion Air Humidification for NO_x Emissions Reduction in Gas Boiler An Experimental Study“, publikuotas „Heat Transfer Engineering“ žurnale. Šiame tyrime azoto oksidų emisijoms tirti naudotas stendas, įrengtas pagal 1.7 pav. pavaizduotą katilinės schemą. Šio tyrimo rezultatai (žr. 1.10 pav.) rodo, kad azoto oksidų emisija labai stipriai priklauso nuo oro drėgnumo. Pasiekus 0,1 kg/kg oro drėgnumą, azoto oksidų koncentraciją dūmuose tiriamu atveju galima sumažinti net 5 kartus (nuo 130 iki 26 mg/Nm^3).

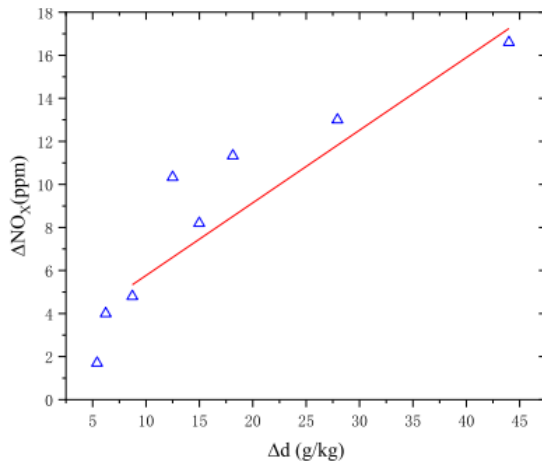
Norint pasiekti tokį didelį oro drėgnumą, reikia turėti bent 54 °C temperatūrą, kadangi žemesnės temperatūros oras nepajėgus savyje sutalpinti tokio didelio drėgmės kiekio [18].



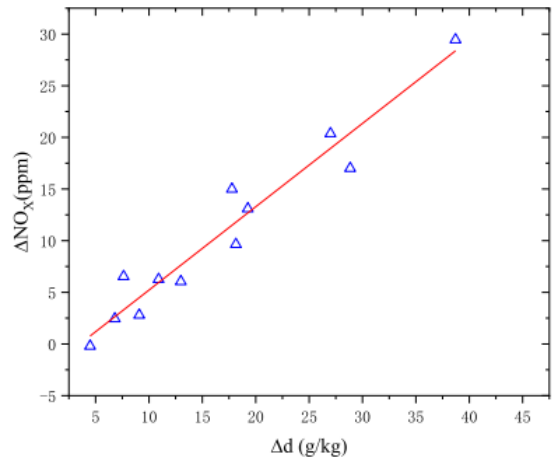
1.10 pav. Azoto oksidų emisijų priklausomybė nuo absoliutinio oro drėgnumo [18]

Dar vienas tyrimas, pagrindžiantis teigiamą vandens įpurškimo įtaką, yra „Experimental study on effects of supply-air humidification on energy and emission performance of domestic gas boilers“, publikuotas žurnale „Energy & Buildings“. Jame tiriami katilai be papildomo drėkinimo pasiekdavo 43 ppm (88 mg/Nm³), esant oro pertekliaus koeficientui 1,3, ir 74 ppm (152 mg/Nm³), esant oro pertekliaus koeficientui 1.11 pav. matyti, kad vandens drėgnumas gali gerokai sumažinti net ir taip jau mažas NO_x emisijas turinčių katilų azoto oksidų emisijas. Tiek esant oro pertekliaus koeficientui 1,3, tiek 1,1, padidinus oro drėgnumą per 40 g/kg, azoto oksidų koncentracijos sumažėjo apie 1,5 karto. Tai rodo, kad, įpurškiant vandenį, galima naudoti mažesnį oro pertekliaus koeficientą, palaikant tas pačias NO_x emisijas. Dėl to per katilą nereikia cirkuliuoti balastinio oro, kuris tik be reikalo apkrauna ventiliatorius ir pasiima dalį naudingos šilumos. Šis aspektas tampa vis aktualesnis, kadangi laikui bėgant griežtėja katilams leistinos NO_x emisijos, o šis metodas gali leisti jas papildomai sumažinti, nemažinant katilo efektyvumo naudojant perteklinį orą [20].

Kaip matyti 1.12 pav., su anglies monoksido (CO) emisijomis nutinka priešingai: didinant oro drėgnumą, jos didėja. Dėl to labai svarbu tinkamai valdyti vandens įpurškimą, nes, jam esant pernelyg dideliame, gali būti viršytos CO išmetimo normos. Kadangi CO yra nuodingos dujos, jų koncentracija išmetamuosiuose dūmuose, kaip ir NO_x, reglamentuojama [20].

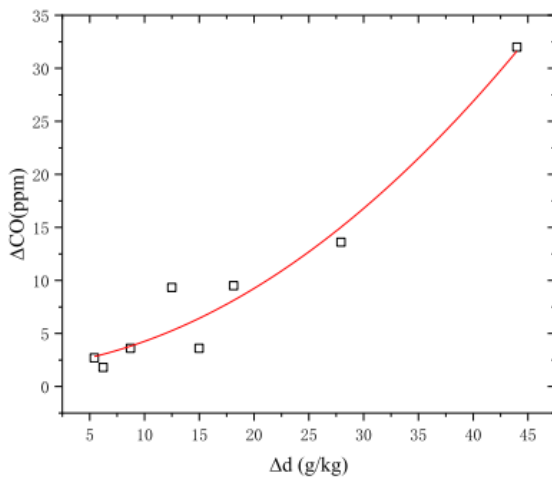


(a) $\alpha = 1.3$

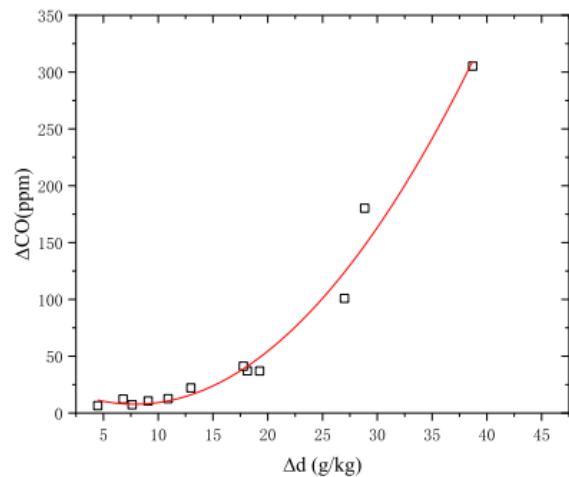


(b) $\alpha = 1.1$

1.11 pav. Azoto oksidų emisijų priklausomybė nuo absoliutinio oro drėgnumo, esant skirtingiems oro pertekliaus koeficientams [20]



(a) $\alpha = 1.3$



(b) $\alpha = 1.1$

1.12 pav. Anglies monoksido emisijų priklausomybė nuo absoliutinio oro drėgnumo, esant skirtingiems oro pertekliaus koeficientams [20]

1.4. Lašelių konvekcinių šildymo ir garavimo svarba efektyviam vandens įpurškimui užtikrinti

Šiluma gali būti perduodama 3 būdais – kondukcija, konvekcija arba spinduliavimu.

1.4.1. Šilumos perdavimas kondukcija (laidumu)

Šiuo būdu šilumos mainai vyksta tarp dviejų gretimų neizoterminio kūno vietų. Mainų intensyvumas nusakomas kaip temperatūrų skirtumo santykis su termine varža, kuri yra šilumos mainų kelio santykis su medžiagos šiluminiu laidumu [21]:

$$q_l = \frac{T_1 - T_2}{R_l}, \text{ kai } R_l = \frac{\delta}{\lambda}; \quad (1.1)$$

čia q_1 – laidmu perduodamo šilumos srauto tankis, W/m^2 ; T_1 – šilumos šaltinio temperatūra, K; T_2 – vietos į kurią plinta šiluma temperatūra, K; R_l – šiluminė varža; δ – šilumos mainų kelio ilgis, m; λ – šilumos laidumo koeficientas, $W/(m \cdot K)$.

Šilumos laidumo koeficientas λ priklauso nuo kūno, kuriame vyksta šilumos mainai, medžiagos bei temperatūros. Vandens šilumos laidumo koeficientas atmosferiniame slėgyje kinta nuo 0,56 $W/(m \cdot K)$ (kai temperatūra 0,01 °C) iki 0,68 $W/(m \cdot K)$ (kai temperatūra 99,6 °C) [22].

1.4.2. Šilumos perdavimas spinduliavimu

Spinduliavimo metu šiluma yra perduodama per atstumą. Šiai pernašai nereikalinga terpė, o perduodamas šilumos srauto tankis yra apskaičiuojamas pagal formulę:

$$q_r = \varepsilon * \sigma * (T_1^4 - T_2^4), \text{čia } \sigma = 5,6703 * 10^{-8}; \quad (1.2)$$

čia q_r – spinduliuojamo šilumos srauto tankis, W/m^2 ; ε – kūno juodumo laipsnis; σ – Stefano-Bolcmano konstanta, $W/(m^2 \cdot K^4)$.

Taigi ši pernaša priklauso tik nuo kūno juodumo laipsnio ir spinduliuojančio bei spinduliuotę sugeriančio kūnų temperatūrų [23].

1.4.3. Šilumos perdavimas konvekcija

Konvekinė šilumos pernaša yra gerokai kompleksiškesnė. Tai šilumos ir masės perdavimo būdas, būdingas skysčiams ir dujoms (fluidams), vykstantis dėl pačių fluidų judėjimo [24]. Vykstant konvekcijai, perduodamas šilumos srauto tankis tarp fluideo ir su juo sąveikaujančio kūno priklauso nuo temperatūrų skirtumo tarp fluideo ir aptekamo kūno bei šilumos atidavimo koeficiento ir apskaičiuojamas pagal formulę:

$$q_c = \alpha * (T_f - T_p); \quad (1.3)$$

čia q_c – konvekinio šilumos srauto tankis, W/m^2 ; α – šilumos atidavimo koeficientas; $W/(m^2 \cdot K)$; T_f – fluideo temperatūra; K; T_p – paviršiaus temperatūra, K.

Šilumos atidavimo koeficientas labai stipriai priklauso nuo fluideo fizikinių savybių, jo judėjimo pobūdžio, aptekamo kūno geometrijos. Kaip rodo 6 lentelė, vien dėl skirtingo kūno aptekėjimo, šilumos atidavimo koeficientas gali skirtis kelias dešimtis ar net šimtus kartų. Tiksliam šilumos atidavimo koeficientui nustatyti taikomi eksperimentiniai metodai arba jis išskaičiuojamas iš kriterinių lygčių [25].

6 lentelė. Galimos šilumos atidavimo koeficiento reikšmės, prie skirtingų konvekcijos tipų [25]

Procesas		α ($W/m^2 \cdot K$)
Laisvoji konvekcija	Dujose	2 – 25
	Skysčiuose	50 – 1000
Priverstinė konvekcija	Dujose	25 – 250
	Skysčiuose	100 – 20 000
Konvekcija fazinių virsmų metu	Virimas ar kondensacija	2500 – 100 000

Pagrindinis parametras, kuriuo nusakomas šilumos atidavimas konvekcijos metu, yra Nuselto (Nu) skaičius. Jis apibrėžia šilumos laidumo konvekcijos metu santykį su šilumos laidumu kondukcijos metu:

$$Nu = \frac{\alpha * l}{\lambda}; \quad (1.4)$$

Konvekcija gali būti natūrali arba priverstinė. Priverstinė konvekcija vyksta tuomet, kai fluidą veikia koks nors išorinis veiksnys, priverčiantis jį judėti. Skaičiuojant Nu skaičių priverstinės konvekcijos atveju didžiausią įtaką jam daro Reinoldso (Re) skaičius, kuris apibrėžia judančio fluideo inertinių ir klampumo jėgų santykį, skaičiavimuose taip pat įvertinamas ir Prandtlio (Pr) skaičius, nusakantis hidrodinaminio ir šiluminio pasienio sluoksnių storių santykį [26].

Savaiminės konvekcijos veikimas yra paremtas fluidus veikiančia Archimedo jėga. Kadangi skysčiai bei dujos šildami beveik visuomet plečiasi, jų tankis mažėja, todėl fluidai tampa lengvesni ir kyla į viršų. Nu skaičiaus reikšmė savaiminės konvekcijos atveju labiausiai priklauso nuo Railio skaičiaus (Ra). Jis gaunamas sudauginus Prandtlio ir Grasshofo skaičius. Pastarasis nurodo fluidą veikiančių Archimedo jėgų santykį su fluideo klampumo jėgomis [26].

1.5. Lašelių konvekcinės pernašos atveju taikomi matematiniai modeliai

Kadangi lašelio garavimas yra sudėtingas procesas, susidedantis iš kelių tarpusavyje sąveikaujančių fizikinių procesų, tad skaičiavimams gali būti taikomi įvairūs konvekcinės pernašos modeliai. Įprastai jie skirstomi į 6 kategorijas: pastovios paviršiaus temperatūros, begalinio laidumo, analitinį apriboto laidumo, efektyviojo laidumo, vidine vandens cirkuliacija apibrėžiamą sūkurinį bei tiesioginiu Navjė-Stokso lygčių sprendimu grindžiamą modelius. Pagrindiniai skirtumai tarp jų – skaičiavimų kompleksiskumas ir tikslumas [27].

1.5.1. Pastovia lašelio paviršiaus temperatūra grindžiamas modelis

Tai vienas paprasčiausių modelių, kuriame yra daroma prielaida, kad lašelio temperatūra yra pastovi, o tai lemia pastovų jo garavimo greitį, tad lašelio skersmens matematinė išraiška garavimo metu gali būti išreiškiama:

$$d^2(\tau) = d_0^2 - K * \tau; \quad (1.5)$$

garavimo konstanta K apskaičiuojama:

$$K = \frac{8 * \rho_d * D_{v,d} * d}{\rho_l} \ln(1 + B_M); \quad (1.6)$$

čia d – lašelio skersmuo; d_0 – lašelio pradinis skersmuo; τ – laikas; ρ_d – dujų tankis; $D_{v,d}$ – vandens difuzijos dujose koeficientas; ρ_l – vandens tankis; B_M – Spoldingo parametras masės pernašai.

Pagrindinis šio metodo privalumas – skaičiavimų paprastumas, kadangi norint apskaičiuoti laiką, per kurį lašelis išgaravo, ar rasti lašelio dydį tam tikru laiko momentu, pakanka išspręsti paprastą lygtį. Tačiau šis modelis visiškai nevertina šilumos mainų lašelio viduje, tad jis yra tikslus tik tuomet, kai į dujas įpurškiami lašeliai yra soties būsenos, dujos, lašelio atžvilgiu nejuda, lašelis išlieka sferinės formos, o jo tankis ir paviršiaus įtempimas nesikeičia, o masės

mainai nėra paveikiami cheminių reakcijų ar kondensacijos. Dėl to dažniausiai šis modelis yra pernelyg supaprastintas praktiniam panaudojimui [28].

1.5.2. Lašelio begalinio šiluminio laidumo modelis

Remiantis šiuo modeliu, laikoma, kad šiluminis laidumas lašelyje – begalinis. Tai reiškia, kad iš aplinkos gauta šiluma lašelyje pasiskirsto akimirksniu, tad lašelis nuolatos yra izoterminės būsenos. Tokia prielaida grindžiama tuo, kad šiluminis laidumas lašelyje yra daug didesnis negu dujose, tad šiluma jame pasiskirsto labai greitai ir jo šilimo laikotarpis gali būti nevertinamas. Lašelio šilimas nusakomas lygtimi:

$$\rho_l * V_l * c_{pl} \frac{dT_l}{dt} = 4\pi R \alpha * (T_d - T_l) = q_{c,d}; \quad (1.7)$$

čia V_l – lašelio tūris; c_{pl} – vandens savitoji šiluma; T_l – lašelio temperatūra; R – lašelio spindulys; α – šilumos atidavimo koeficientas; T_d – dujų temperatūra; T_l – lašelio temperatūra; $q_{c,g}$ – konvekcinio šilumos srauto tankis, kurį dujos perduoda lašeliui.

Šis modelis yra kiek tikslesnis nei grindžiamas pastovia lašelio temperatūra, kadangi jis įvertina energiją, kurią lašelis sugeria iš dujų. Pagrindinis šio modelio trūkumas, kad jame nėra įvertintas šilumos plitimo greitis, tad realybėje lašelio paviršiaus temperatūra, nuo kurios priklauso garavimo intensyvumas, bus mažesnė nei šiame modelyje [29].

1.5.3. Analitinis apibrėžto šiluminio laidumo modelis

Šis modelis įvertina tai, kad skystis, iš kurio susiformavo lašelis, turi apibrėžtą šiluminį laidumą, tad pereinamojo garavimo metu jis bus neizoterminis. Šis modelis laikosi nuostatos, kad konvekcija lašelio viduje nevyks, tad šiluma lašelyje perduodama tik laidumu. Laikant, kad lašelis yra sferinės formos, šilumos mainų juose lygtį galima parašyti:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_l}{c_l \rho_l} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{2}{R} (\partial T) \right); \quad (1.8)$$

kadangi lašelis yra šildomas konvekciniu būdu jį supančių dujų ir aušinamas dėl fazinių virsmų metu prarandamos energijos, tad energijos balanso lygtis lašelio paviršiuje gali būti užrašoma:

$$\alpha(T_d - T_R) = -\rho_l L R_d + \frac{\lambda_l (\partial T)}{\partial R} \Big|_{R=R_d}; \quad (1.9)$$

čia T_R – lašelio paviršiaus temperatūra; λ_l – vandens šilumos laidumo koeficientas; L – vandens slaptoji garavimo šiluma; T_l – lašelio temperatūra; R_D – lašelio skersmens pokytis.

Šis modelis gali gana tiksliai apskaičiuoti lašelio garavimą, kai lašelis nėra veikiamas išorinių jėgų. Tačiau įpurškimo metu lašelis įprastai juda greičiau negu dujos, tad kol lašelio ir dujų greičiai skiriasi, vyksta trintis tarp dujų ir lašelio paviršiaus. Ji lemia cirkuliaciją lašelio viduje, kuri lašelio viduje sukelia priverstinę konvekciją, kuri suintensyvina šilumos mainus [29].

1.5.4. Efektyviojo šiluminio laidumo modelis

Šis modelis veikia analogišku principu kaip ir analitinis apibrėžto šiluminio laidumo modelis, tačiau šiuo atveju vietoje šilumos laidumo koeficiento λ_l yra naudojamas koeficientas kef , kuris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\lambda_{ef} = k_{ef} * \lambda_l; \quad (1.10)$$

koeficientas k_{ef} kinta nuo 1 (kai $Pe_l < 1$) iki 2,72 (kai $Pe_l > 500$) ir yra apskaičiuojamas pagal formulę:

$$k_{ef} = 1.86 + 0.86 \tanh \left[2.225 \log_{10} \left(\frac{Pe_l}{30} \right) \right]; \quad (1.11)$$

čia λ_{ef} – efektyvusis vandens šilumos laidumo koeficientas; k_{ef} – efektyviojo konvekcinio šilumos laidumo koeficientas; Pe_l – Pekle skaičius lašeliui.

Įvertinę šį koeficientą galime tiksliai apskaičiuoti šilumos mainus lašelio viduje, net kai lašelis juda. Tad šis modelis yra optimalus, siekiant tiksliai įvertinti šilumos mainus lašelyje [29].

1.5.5. Vidine vandens cirkuliacija apibrėžiamas sūkurinis bei tiesioginiu Navjė-Stokso lygčių sprendimu grindžiamas modeliai

Šie modeliai skaitiniam modeliavimui naudojami labai retai. Pagrindinė to priežastis – itin didelis jų kompleksiskumas. Rezultatų prasme, šie modeliai nėra daug tikslesni už efektyviojo šiluminio laidumo modelį, tad įprastai yra naudojami paprastesniems bei plačiau naudojamiems modeliams pagrįsti arba pamatiniam fizikinių procesų išaiškinimui [27].

1.6. Vandens įpurškimo parametrai, darantys įtaką faziniams virsmams

Vandens garavimas priklauso tiek nuo jį supančių dujų, tiek ir nuo paties lašelio fizikinių savybių, plačiau aprašomų šio projekto antroje dalyje. Tačiau ne visus šiuos parametrus lengva reguliuoti. Pavyzdžiui, dujų savybes kontroliuoti yra gerokai sudėtingiau. Dujų temperatūrą reguliuoti sudėtinga, nes jos pasižymi santykinai nedideliu šilumos atidavimo koeficientu. Žinoma, šį koeficientą galima padidinti stipriai turbulizuojant dujų srautą, tačiau tokiu atveju stipriai išaugtų aerodinaminis pasipriešinimas, kuriam kompensuoti tektų statyti gerokai galingesnius oro pūtimo ventiliatorius ar dūmsiurbes, kurie ne tik užima daug vietos, vartoja daugiau elektros energijos, skleidžia daug triukšmo, bet ir gali sukelti dideles vibracijas, galinčias pažeisti kanalus ar netgi katilą. Taip pat jie yra inertiški, tad juos sunku valdyti. Žinoma, mažesnį šilumos atidavimo koeficientą galima kompensuoti didinant šilumokaičio plotą, tačiau tokiu atveju jie taptų labai griozdiški, tad stipriai išaugtų tiek jų pačių, tiek ir jų įrengimo kaina. Dujų greitis yra beveik nereguliuojamas. Kadangi dujų srautas (oro ar dūmų) katilinėse yra tiesiogiai susietas su degimu, dirbant nominalia galia jis bus pastovus, tad dujų greitį apibrėžia suprojektuotų kanalų vidinis skerspjūvio plotas, o jį pakeisti galima tik keičiant pačius kanalus. Deginant skystą kurą ar dujinį kurą dūmų drėgnumas priklauso tik nuo kuro esančio vandenilio kiekio. Degant biokurui, drėgnumas priklauso ne tik nuo kuro cheminės sudėties, bet ir nuo jo drėgnumo. Pasitaiko atvejų, kai biokuras yra drėkinamas tam, kad kūrykloje temperatūra būtų sumažinta žemiau pelenų lydymosi temperatūros – tai būdas reguliuoti dūmų drėgnumą. Kiek lengviau yra valdyti įpurškiamo vandens parametrus. Įpurškiamų lašelių dydį bei pradinį lašelio greitį, nuo kurio fazinių virsmų režimų cikle priklauso pradinis Reinoldso skaičius Re_0 , nusako purkštukų charakteristika. Tad juos galima reguliuoti keičiant purkštukus. Žinoma, įpurškiant vandenį didesniu greičiu ar disperguojant jį mažesnius lašelius, didėja ir hidraulinis pasipriešinimas, tad tam pasiekti, gali tekti montuoti siurbį, galintį sukelti didesnę slėgį, jei esamo siurblio kėlimo aukštis yra nepakankamas.

1.7. Tyrimo kraštinės sąlygos ir uždaviniai

Įvertinant tai, kad įpurkšti lašeliai nuolat sąveikauja su dujomis, šiame tyrime yra naudojamas konvekcinio šildymo bei garavimo modelis. Tinkamai ištirti konvekcinius šilumos mainus tarp lašelio ir dujų yra svarbu todėl, kad, kol lašeliai garuoja, jie vyks nuolatos. Konvekcinė šilumos pernaša yra kompleksiška bei priklauso nuo daugybės parametrų, kurie gali lemti šimtus kartų intensyvesnius šilumos mainus. Dėl to, šio tyrimo metu nagrinėjama kokią įtaką konvekciniams šilumos mainams daro įpurkšto vandens parametrai, kad būtų galima įvertinti, vandens įpurškimo sistemos valdymo galimybes. Tyrimo metu, taip pat yra įvertinama spinduliavimo įtaka priklausomai nuo lašelio dydžio ir dujų temperatūros.

Apibendrinant apžvelgtus galimus vandens įpurškimo atvejus, išsigryninamos jiems būdingos kraštinės sąlygos. Skaitinio tyrimo metu, vertinama lašelio pradinės temperatūros (t_0), pradinio Reinoldso (Re_0) skaičiaus, pradinio lašelio skersmens ($2R$) bei dujų temperatūros (t_d) įtaka. Tyrimo kraštinėse sąlygose naudojami įvesties parametrai pateikiami 7 lentelėje.

Išskiriami 3 jiems būdingi dujų temperatūros atvejai:

- 450 °C – vandens ir reagentų mišinio įpurškimas į dūmus selektyviosios katalizinės redukcijos metu;
- 900°C – vandens ir reagentų mišinio įpurškimas į dūmus selektyviosios nekatalizinės redukcijos metu;
- 1300 °C – vandens įpurškimas į liepsną, siekiant išvengti azoto oksidų susidarymo.

Kadangi didžiojoje dalyje aprašytų vandens įpurškimo taikymo atvejų vanduo yra įpurškiamas į dūmus, tad tūrinė vandens garų dalis juose priklauso nuo kuro sudėties. Šiuo atveju priimama tūrinė garo dalis dujose $X_v = 0,18$. Ji būdinga dūmams, kurie gaunami kūrenant gamtines dujas [30] arba drėgną medieną [31].

Dūmų kanalai ar skruberiai, kuriuose būna įpurškiamas vanduo, įprastai tiesiogiai sujungti su kaminu, tad slėgis juose yra lygus atmosferos slėgio ir aerodinaminių slėgio nuostolių sumai. Kanalai dažniausiai projektuojami taip, kad dūmų greitis juose būtų 5–12 m/s, tad laikant, kad dujų greitis juose vidutinis – apie 8 m/s, aerodinaminiai slėgio nuostoliai gali siekti apie 1,5 Pa/m [32]. Palyginti su atmosferiniu slėgiu, tai nežymus dydis, kadangi pačio atmosferinio slėgio metinė svyravimų amplitudė Lietuvoje siekia 370 Pa, tad net ir 100 m ilgio dūmų kanaluose slėgio nuostoliai nesiectų net pusės amplitudės vertės [33].

Tiriant lašelio pradinės temperatūros įtaką, naudojamos vandens temperatūros nuo 10 iki 90 °C. 10 °C temperatūra būdinga vandentiekio vandeniui, tad ji laikoma apatine riba, kadangi mažesnės temperatūros vanduo retai sutinkamas pramonėje. Kaip viršutinė riba pasirenkama 90 °C temperatūra, nes yra artima soties temperatūrai atmosferiniame slėgyje ir būdinga nemažos dalies pramoninių vandens šildymo katilų tiekiamo termofikacinio vandens temperatūrai, tad, naudojant jose vandens įpurškimo technologiją, turimas pakankamo potencialo šilumos šaltinis. Taip pat tiriamos ir 25, 40 bei 60 °C tarpinės temperatūros. Tiriant kitų parametrų įtaką pradinė vandens temperatūra laikoma 40 °C. Ji būdinga kondensatui, gautam efektyviame kondensaciniame ekonomiaizeryje.

Lašelio įpurškimo charakteristikai apibrėžti naudojamas Reinoldso (Re) skaičius. Jis nusako šilumos mainų intensyvumą pradinio lašelio įpurškimo į dujas momentu. Priklausomai nuo dujų kinematinės klampos ir lašelio skersmens, Re skaičius nusako pradinį lašelio slydimo greitį dujose. Tiriant pradinio Re skaičiaus įtaką lašelių garavimui, apatinė jo riba užsiduodama $Re_0 = 5$. Ji nurodo, kad lašelio pradinis slydimo greitis nedidelis ir simbolizuoja mažiausią greitį kuriuo vanduo įpurškiamas. Viršutinė pradinio Re riba užsiduodama taip, kad lašelio pradinis slydimo greitis būtų arti 80 m/s. Prie didesnio slydimo greičio, tiriami 110 μm skersmens lašeliai pradėtų deformuotis ir skaidytis. Taip pat tiriamos ir tarpinės Re_0 reikšmės.

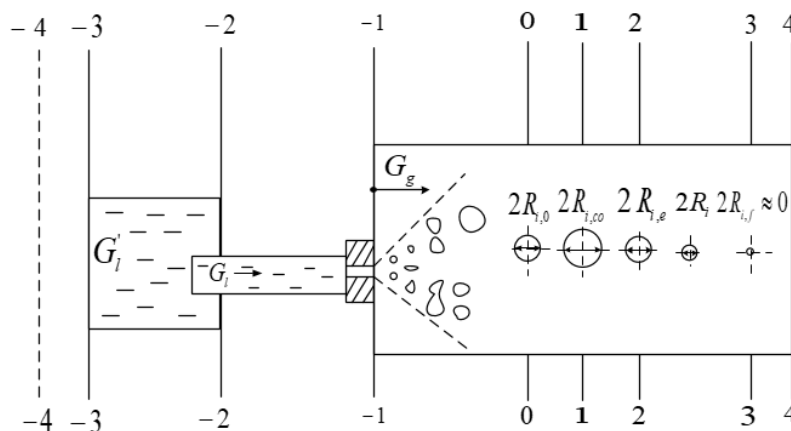
7 lentelė. Tiriamų FVRC parametrai

Parametras	t_{10} įtaka FVRC		Re_0 įtaka FVRC		2R įtaka FVRC	t_d įtaka FVRC
	t_d , °C	450	1300	450	1300	1300
Re_0	50		5; 15; 25; 50; 100;150	5; 10; 20; 35; 55	50	50
t_{10} , °C	10; 25; 40; 60; 90		40		10; 25; 40; 60; 90	40
2R, μm	110		110		110; 80; 50; 20	110
p_d , MPa	0,1 (atmosferinis)					
w_d , m/s	8					
X_v	0,18					

2. Metodinė dalis

Šildomas dideliame tūryje, bet koks skystis, taip pat ir vanduo, pašyla iki soties būsenai būdingos t_s temperatūros ir užverda. Soties būsenos temperatūra priklauso nuo slėgio. Iki tol, kol išgaruoja visas skystis, teikiama šiluminė energija išnaudojama pusiausvirajam skysčio garavimui užtikrinti, todėl verdančio didelio skysčio tūrio terminė būsena nepakinta.

Išskaidžius skystį į lašelius, pasikeičia dideliems jo tūriams būdingos pernašos proceso vyksmo sąlygos. Esminis į lašelius disperguoto skysčio terminės būsenos kitimo savitumas yra tas, jog maži skysčio tūreliai šildomi neužverda, o pusiausvirai garuoti pradeda pašilę iki būdingos t_s temperatūros, kuri yra žemesnės už soties būsenos t_s temperatūrą, kad ir kaip intensyviai jie būtų šildomi. Taip yra todėl, kad lašelių terminės ir energinės būsenos balansas nusistovi skysčiui lašeliuose neužvirus. Vandens technologinį įpurškimą galima pateikti principine geometrinės interpretacijos diagrama (žr. 2.1 pav.).



2.1 pav. Vandens technologinio dispergavimo/įpurškimo geometrinė interpretacija [34]

2.1 pav. sąlyginai išskirti 9 pjūviai laiko $\tau \equiv 0 \rightarrow \infty$ skalės apibrėžtame -4 intervale:

- Laiko $-4 \rightarrow -1$ pjūviai žymi didelio tūrio skysčio parengimo dispergavimui procesą.
- Laikotarpis $\tau \equiv \tau_{-1} \rightarrow \tau_0$ apibrėžia skysčio didelio tūrio dispergavimo procesą, kuriame skystis, veikiamas dinaminių jėgų, suskaidomas į baigtinį mažesnių tūrių skaičių. Dispergavimo procese susidarantys maži skysčio tūriai gali susilieti ar toliau skaidytis į dar mažesnius. Esant tam tikroms sąlygoms, gali vykti sproguos garavimas.
- Laiko skalės pjūvyje 0-0, laiko skalės $\tau \equiv \tau_0$ laiko momentu, susiformuoja apibrėžto dispersiškumo lašelių ir juos nešančių dujų dvifazis srautas. Susiformavusio lašelių srauto fazinių virsmų analizė pradedama sąlyginai numatant, kad $\tau_0 = 0$.

Disperguoto skysčio tūrelių pagal dydį susiskirstymas yra artimas Gauso dėsniai, t. y. smulkiųjų ir stambiųjų tūrelių koncentracija yra mažiausia, o vidutinio stambumo – didžiausia. Veikiami inercinių, trinties ir gravitacinių jėgų, disperguoto skysčio tūreliai yra deformuoti, todėl, griežtu vertinimu, susiformuojančių lašelių forma nėra sferinė. Todėl šilumos ir masės mainų lokaliniai parametrai lašelio paviršiuje yra saviti. Tačiau disperguoto skysčio technologijų efektyvumą apibrėžia dujų ir lašelių sraute vykstančių fazinių virsmų procesų vidutiniai parametrai. Todėl lašelių šilumos mainų ir fazinių virsmų tyrimuose dažnai pritaikomas sferinio lašelio modelis, numatantis, kad realios formos mažo lašelio tūris

$V_{sk} [m^3]$ prilygsta sferinio lašelio tūriui $V_l [m^3]$. Tuomet lašelių srauto dispersiškumas apibrėžiamas pagal jų tūrį atitinkančių sferų ekvivalentinį skersmenį:

$$d_{ek} \equiv d = 2R = 2 \sqrt[3]{\frac{3V_l}{4\pi}}, \quad (2.1)$$

čia d_{ek} – ekvivalentinis lašelio skersmuo; R – lašelio spindulys; V_l – lašelio tūris.

Paneigus įprastinėms technologijoms nebūdingą lašelių sprogu garavimo režimą, disperguoto vandens lašelių technologinius atvejus apibrėžia 2.1 paveikslo principinėje schemoje laikotarpiai, kuriuos išskiria $0 \rightarrow 3$ pjūviai:

- Laikotarpis $\tau \equiv \tau_0 \rightarrow \tau_1$ apibrėžia skysčio lašelių kondensacinį režimą.
- Laikotarpis $\tau \equiv \tau_1 \rightarrow \tau_2$ apibrėžia pereinamąjį garavimo režimą, kuriame lašeliams teikiama šiluminė energija juos šildo ir garina.
- Laikotarpis $\tau \equiv \tau_2 \rightarrow \tau_3$ apibrėžia pusiausviro garavimo režimą, kuriame lašeliams teikiama šiluminė energija yra sunaudojama tik skysčiui garinti.
- Laiko momentu $\tau \equiv \tau_3$ skysčio lašeliai išgaruoja, todėl laikotarpis apibrėžia naujai susiformavusio drėgnesnio vienfazio srauto galimus technologinius atvejus.

Disperguoto skysčio lašelių terminę, energinę būseną bei fazinius virsmus apibrėžia vykstančių sudėtinių šilumos ir masės mainų (ŠMM) procesų tarpusavio sąveika, kurios savitumas ir intensyvumas priklauso nuo lašelio fazinių virsmų režimo. Pernašos procesus vandens įpurškimu į dujų srautą grindžiamose technologijose patogiu analizuoti lašelių fazinių virsmų režimų cikle (FVRC). Laikotarpio $\tau \equiv \tau_0 \rightarrow \tau_3$ metu, lašelių paviršiuje vykstantys fazinių virsmų procesai pateikiami nuosekliai vykstančių kondensacinio $\tau \equiv \tau_0 \rightarrow \tau_1$, pereinamojo garavimo $\tau \equiv \tau_1 \rightarrow \tau_2$ ir pusiausvirojo garavimo $\tau \equiv \tau_2 \rightarrow \tau_3$ režimų nuoseklių laikotarpių suma, kuri apibrėžia lašelių fazinių virsmų režimų ciklo (FVRC) trukmę:

$$\tau \equiv 0 \rightarrow \tau_{co} \rightarrow \tau_e \rightarrow \tau_f; \quad (2.2)$$

čia τ_{co} – laikas kuomet baigiasi kondensacinis režimas; τ_e – laikas kuomet baigiasi pereinamojo garavimo režimas; τ_f – laikas kuomet baigiasi pusiausvirojo garavimo režimas (lašelis išgaruoja).

Režimų kaita FVR cikle (2.2) apibrėžiama pagal lašelių terminės ir energinės būsenos savitumą režimuose ir jų kaitos momentuose.

2.1. Vandens lašelių terminė ir energinė būseną

Lašelio terminė būseną apibrėžiama pagal lašelio masės vidutinę temperatūrą $T_{l,m} [K]$, o jos kitimas laike apibrėžiamas $T_{l,m}(\tau)$ funkcija, kuri apskaičiuojama pagal lašelio temperatūros lauką:

$$T_{l,m}(\tau) \equiv \frac{\int_0^R \rho_l(\tau,r) \cdot c_{p,l}(\tau,r) \cdot T(\tau,r) \cdot r^3 dr}{\int_0^R \rho_l(\tau,r) \cdot c_{p,l}(\tau,r) \cdot r^3 dr}; \quad (2.3)$$

Numatomas šilumokaitos lašelyje simetriškumas radialinės koordinatės $r \equiv 0 \rightarrow R$ [m] atžvilgiu, kuris apibrėžiamas temperatūros laukui keliamu reikalavimu:

$$T_l \equiv T(\tau, r), \text{ kai } \left. \frac{\partial T(\tau, r)}{\partial r} \right|_{r=R} = 0; \quad (2.4)$$

Tuomet temperatūros susiskirstymas lašelyje aprašomas pagal [35] modelį:

$$T(r, \tau) = T_R(\tau) + \frac{2}{r} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi r}{R} \int_0^{\tau} F_{n,r} \exp \left[-\frac{k_{ef} \lambda_l}{\rho_l c_{p,l}} \left(\frac{n\pi}{R} \right)^2 (\tau - \tau_*) \right] d\tau_*; \quad (2.5)$$

Šiame modelyje, šaltinio Funkcija $F_{n,r}$ įvertina spinduliuotės srauto, lašelio paviršiaus temperatūros kitimo, vandens fizikinių savybių kitimo bei vandens cirkuliavimo įtaką lašelio terminei būsenai:

$$F_{n,r} = \frac{1}{R} \int_0^R (F_1 + F_2) r \sin \frac{n\pi r}{R} dr; \quad F_1 = \frac{1}{\rho_l c_{p,l} r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 q_r) - \frac{dT_R}{dt}; \quad (2.6)$$

$$F_2 = \frac{1}{\rho_l c_{p,l}} \frac{\partial T_l}{\partial r} \frac{\partial (k_{ef} \lambda_l)}{\partial r} - \frac{T_l}{\rho_l c_{p,l}} \frac{\partial (\rho_l c_{p,l})}{\partial \tau_*};$$

Vandens galimo priverstinio cirkuliavimo lašelyje įtaka įvertinta efektyviojo šilumos laidumo koeficientu $\lambda_{ef} = \lambda_l \cdot k_{ef}$, o efektyviojo šilumos laidumo parametras k_{ef} aprašytas pagal [36] rekomendaciją:

$$k_{ef} = 1.86 + \tanh \left(2,245 * \log_{10} \frac{Pe_l}{30} \right); \quad (2.7)$$

Pekle skaičius vandens lašeliui apibrėžiamas pagal [36] rekomendacijas.

Kintančiai lašelio terminei būsenai aprašyti yra svarbios dvi temperatūros lauko $T(\tau, r)$ temperatūrų funkcijos:

- lašelio paviršiaus temperatūros kitimą laike aprašanti funkcija $T_R(\tau)$:

$$T_R(\tau) \equiv T(\tau, r = R); \quad (2.8)$$

- lašelio centro temperatūros kitimą laike aprašanti funkcija $T_C(\tau)$:

$$T_C(\tau) \equiv T(\tau, r = 0); \quad (2.9)$$

Lašelio energinė būseną apibrėžiama pagal lašelio vidinę energiją H_l [J], kurios dinamika FVR cikle apibrėžiama pagal lašelio masės M_l [kg] ir jo entalpijos h_l [J/kg] kitimą:

$$H_l(\tau) = M_l(\tau) \cdot h_l(\tau); \quad M_l(\tau) = \frac{4}{3} \pi \rho_{l,m}(\tau) R^3(\tau); \quad h_l(\tau) = c_{p,l}(\tau) T_{l,m}(\tau); \quad (2.10)$$

Lašelio vidinės energijos kitimą apibrėžia į lašelį įtekantys ir iš jo ištekantys šilumos srautai, kuriuos susieja lašelio energijos momentinio balanso lygtis. Ji konvekcinio šildymo ir garavimo atveju užrašoma taip:

$$\vec{q}_{c,d}(\tau) + \vec{q}_{c,l}(\tau) + \vec{q}_f(\tau) = 0 \leftrightarrow T_R(\tau); \quad (2.11)$$

Į lašelį įtekantys ir iš jo ištekantys šilumos srautai apibrėžia lašelio paviršiaus momentinę temperatūrą T_R , kuri privalo užtikrinti jų balansą. Konvekcinės šilumos srauto tankis lašelyje $q_{c,l}$ [W/m²] apibrėžiamas pagal modifikuotą šilumos laidumo Furje dėsnį:

$$q_{c,l} = -\lambda_{ef} \text{grad } T_R \cong -\lambda_l k_{ef} \left. \frac{\partial T(\tau, r)}{\partial r} \right|_{r=R}; \quad (2.12)$$

čia: T – temperatūra, K; T_R – lašelio paviršiaus temperatūra, K; T_C – lašelio centro temperatūra, K; $T_{l,m}$ – lašelio masės vidutinė temperatūra, K; H_l – lašelio vidinė energija, J; h_l – lašelio entalpija, J/kg; λ_l – vandens šilumos laidumo koeficientas, W/(m K); λ_{ef} – vandens efektyviojo šilumos laidumo koeficientas, W/(m K); k_{ef} – vandens cirkuliavimo įtaką šilumos plitimui lašelyje įvertinantis efektyviojo šilumos laidumo koeficientas; ρ_l – vandens tankis,

kg/m³; $c_{p,l}$ – vandens savitoji šiluma, J/(kg K); $2R$ – lašelio tūriui ekvivalentinės sferos skersmuo, m; $q_{c,d}$ – dujų lašeliui suteikiamo konvekcinės šilumos srauto tankis, W/m²; $q_{c,l}$ – lašelyje sklindančios konvekcinės šilumos srauto tankis, W/m²; q_f – lašelio faziniuose virsmuose dalyvaujančios šilumos srauto tankis, W/m²; Pe_l – Pekle skaičius vandens lašeliui.

Temperatūros gradientas (2.12) išraiškoje aprašomas diferencijuojant temperatūros lauko lygtį (2.5), priimant, kad radialinė koordinatė yra lygi sferos, kurios tūris yra toks pat kaip lašelio, spinduliui.

2.1.1. Lašelio konvekcinio šildymo ir garavimo modelis

Išorinis konvekcinis šildymas vyksta, kai dujų temperatūra T_d yra aukštesnė už lašelio paviršiaus temperatūrą T_R . Lašelio konvekcinis garavimas vyksta kai aptekančių dujų srauto drėgnumas X_v yra mažesnis už lašelio paviršiaus temperatūra apibrėžtą dujų mišinio prie lašelio drėgnumą $X_{v,R}$. Kai $X_v > X_{v,R}$, tuomet vyksta kondensacinis fazinių virsmų režimas ir į lašelį įsilieja kondensatas.

Lašelio šildymas ir faziniai virsmai yra glaudžiai susiję. Fazinius virsmus visuomet lydi Stefano hidrodinaminis srautas. Dėl jo pakinta lašelį gaubiančių pasienio sluoksnių storis, lemiantis pakitusį lašelių konvekcinio šildymo ir fazinių virsmų procesų greitį. Konvekcinio šilumos atidavimo ir fazinių virsmų šilumos srautai tradiciškai apskaičiuojami pagal panašumo teorija grindžiamus empirinius modelius. Konvekcinio šilumos srauto, kurį dujos perduoda lašeliui, tankis $q_{c,d}$ [W/m²] apibrėžiamas kaip Nuselto skaičiaus funkcija ir aprašomas pagal modifikuotą Nuselto šilumos atidavimo dėsnį [35-37]:

$$q_{c,d} = \frac{\lambda_{vg}}{2R} (T_d - T_R) \left[\frac{\ln(1+B_T)}{B_T} + \frac{Nu-2}{(1+B_T)^{0.7}} \right]; \quad (2.13)$$

$$Nu = 1 + (1 + RePr)^{1/3} f(Re); Re = 2R \frac{\rho_d}{\mu_{vd}} |w_d - w_l| ; \quad (2.14)$$

$$f(Re \leq 1) = 1; f(1 < Re \leq 400) = Re^{0.077} ;$$

$$B_T = \frac{c_{p,vd} (T_d - T_R)}{L} \cdot \left(1 + \frac{q_{c,l}}{q_{c,d}} \right); \quad (2.15)$$

Lašelio fazinių virsmų dinamika ciklo (2.2) režimuose aprašyta pagal lašelio masės balanso lygtį, numatančią, kad lašelio masė gali kisti tik dėl paviršinių fazinių virsmų [38]:

$$g_v = -\frac{4}{3} \pi \frac{d}{dt} (\rho_l R^3) = 2\pi R \rho_{vg} D_{v,d} \overline{Sh} \ln(1 + B_M); B_M = \frac{Y_{v,R} - Y_{v,d}}{1 - Y_{v,R}};; \quad (2.16)$$

$$\overline{Sh} = 2 + \frac{Sh-2}{(1+B_M)^{0.7} \frac{\ln(1+B_M)}{B_M}}; Sh = 1 + (1 + Re Sc)^{1/3} f(Re);$$

čia $q_{c,d}$ – konvekcinės šilumos srauto į lašelį tankis, W/m²; λ_{vd} – vandens garo ir dujų būdingo mišinio prie lašelio šilumos laidumo koeficientas, W/(m K); T_d – dūmų temperatūra, K; T_R – lašelio paviršiaus temperatūra, K; B_T – Stefano hidrodinaminio srauto įtaką konvekciam šildymui įvertinantis Spoldingo šilumos pernašos parametras; Nu – Nuselto skaičius negaruojančiai sferai; Re – Reinoldso skaičius lašeliui; Pr – Prandtlio skaičius; $\mu_{v,d}$ – vandens garo ir dujų mišinio prie lašelio paviršiaus dinaminė klampa, Pa*s; w_d – dujų srauto greitis, m/s; w_l – lašelio greitis, m/s; $c_{p,vd}$ – vandens garo ir dujų mišinio prie lašelio paviršiaus

savitoji šiluma, J/(kg K); $q_{c,l}$ – konvekcinės šilumos srauto lašelyje tankis, W/m²; g_v – garo srautas, kg/s; ρ_{vg} – vandens garo ir dujų mišinio prie lašelio paviršiaus tankis, kg/m³; B_M – Stefano hidrodinaminio srauto įtaką konvekciniam garavimui įvertinantis Spoldingo masės pernašos parametras; $Y_{v,R}$ – masinė vandens garo dalis dujose prie lašelio paviršiaus; $Y_{v,d}$ – masinė vandens garo dalis dujose; $D_{v,d}$ – vandens difuzijos dujose koeficientas, m²/s; Sh – Šervudo skaičius; \overline{Sh} – modifikuotas vidutinis Šervudo skaičius lašeliui; Sc – Šmidto skaičius lašeliui.

2.2. Tyrimui naudojama programinė įranga

Skaitinis tyrimas atliekamas naudojant Kauno technologijos universiteto energetikos katedros sukurtą skaitinio modeliavimo programą „Lašas“. Ši programa pagal užduodamus įvesties parametrus sumodeliuoja lašelio fazinių virsmų režimų ciklą iki visiško išgaravimo ir sugeneruoja rezultatų masyvą, kuriame yra apskaičiuoti faziniams virsmams svarbūs parametrai.

2.2.1. Įvesties (INPUT) parametrai

Tam, kad sumodeliuoti FVRC ciklą iki visiško išgaravimo, programai „Lašas“ reikalingi 8 įvesties parametrai:

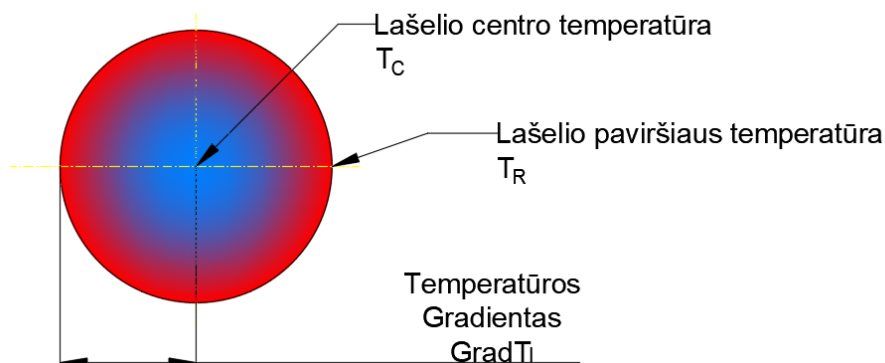
- Dujų temperatūra – ji apibrėžia vieną iš šilumos mainus lemiančių temperatūrų. Taip pat nuo jos priklauso dūmų fizikinės savybės.
- Dujų drėgnumas – nurodo pradinę vandens koncentraciją dūmuose. Ji lemia masės mainų intensyvumą, atsirandantį dėl koncentracijų skirtumo. Taip pat nuo jo priklauso dūmų fizikinės savybės.
- Dujų greitis – jis reikalingas apibrėžti dūmų ir lašelių judėjimo greičių skirtumą. Lašelio judėjimo greitis nustatomas iš Reinoldso skaičiaus.
- Dujų slėgis – jis svarbus tuo, kad nuo jo priklauso vandens lašelio soties būsenos temperatūra. Esant didesniai slėgiui ji būtų aukštesnė, mažesniai – žemesnė. Taip pat nuo jo priklauso dūmų fizikinės savybės.
- Spinduliuojančių šaltinių juodumo laipsnis – šis parametras nurodo, kokia šilumos šaltinio maksimalios spinduliuojamos šilumos dalis išspinduliuojama.
- Įpurkštų į dūmus lašelių temperatūra – ji apibrėžia kitą šilumos mainus lemiančią temperatūrą. Jos ir dūmų temperatūros skirtumas sukuria šilumos mainų varančiąją jėgą.
- Pradinis vidutinis lašelių skersmuo – tai parametras apibrėžiantis pradinį lašelių dydį (masę, tūrį, plotą).
- Lašelį aptekančių dūmų Reinoldso skaičius – šis parametras priklauso nuo lašelio greičio dūmų atžvilgiu (slydimo greičio), dūmų kinematinės klampos bei lašelių ekvivalentinio skersmens.

2.2.2. Gaunami (OUTPUT) parametrai

Naudojant programą „Lašas“ gauti parametrai pagal jų fizikinę prasmę skirstomi į terminius, energinius, dinامينius bei fazinių virsmų parametrus.

Pagrindiniai lašelio terminiai parametrai yra jo temperatūra centre bei paviršiuje. Pagal jų skirtumą nustatomas lašelio neizotermiškumas. Žinant lašelio neizotermiškumą ir spindulį

galima nustatyti temperatūros gradientą, o iš jo nusistatyti lašelio masinę temperatūrą. 2.2 pav. pavaizduotas temperatūros pasiskirstymas pereinamojo garavimo metu šylančiame lašelyje. Raudona spalva rodo labiau įšilusį (aukštesnės temperatūros) lašelio paviršių, o mėlyna – vėsesnį centrą.



2.2 pav. Temperatūros pasiskirstymas vandens lašelyje pereinamojo garavimo režimo metu, kai lašelis šyla

Gaunamus energinius parametrus sudaro šilumos srauto tankiai, pavaizduoti 2.3 pav.:

- Konvekcinis šilumos srauto tankis, kurį dūmai perduoda lašeliui, priklauso nuo lašelio paviršiaus ir dujų temperatūrų skirtumo bei šilumos atidavimo koeficiento α , kurio dydis priklauso nuo lašelio pradinio Reinoldso skaičiaus.
- Konvekcinis šilumos srauto tankis lašelyje, nusakantis kaip intensyviai lašelio viduje vyksta šilumos mainai.
- Fazinių virsmų šilumos srauto tankis, lemiantis koks lašelio šilumos kiekis buvo atiduotas lašeliui garuojant, ar gautas kondensuojantis garui aplink jį.
- Lašelyje sugerto spinduliavimo šilumos srauto tankis.

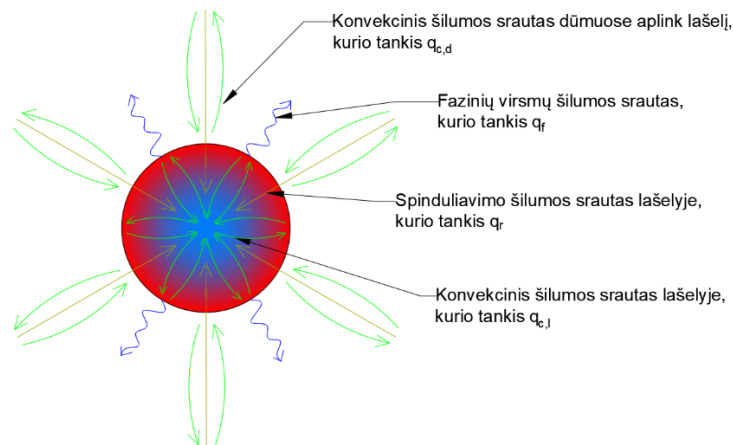
Taip pat energiniams parametrams priklauso:

- Lašelio entalpija, pagal kurią galima nustatyti energiją lašelyje. Jos pokytį lemia anksčiau išvardinti šilumos srautai.
- Efektyviojo šilumos laidumo lašelyje parametras, nurodantis konvekcinio ir laiduminio šilumos srauto santykį.
- Šilumos atidavimo koeficientas α , nuo kurio priklauso konvekcinis šilumos srauto tankis dūmuose aplink lašelį.

Lašelio FVRC fazinių virsmų parametrai yra:

- Garo srautas ir jo tankis – nurodo lašelio masės pokytį per 1 s. Jei tai teigiamas dydis lašelio masė mažėja dėl garavimo, o jei neigiamas – didėja dėl kondensacijos.
- Lašelio ekvivalentinis skersmuo – apskaičiuotas lašelio dydis įvertinus per iteracijos laikotarpį įvykusius fazinius virsmus.
- Lašelio paviršiaus bematis plotas – lašelio, paveikto fazinių virsmų, paviršiaus ploto santykis su pradinio įpurkšto lašelio paviršiaus plotu.
- Lašelio paviršiaus bematis tūris – lašelio, paveikto fazinių virsmų, tūrio santykis su pradinio įpurkšto lašelio tūriu.

- Garo slėgių skirtumu apibrėžta fazinių virsmų jėga – slėgių skirtumas tarp dūmų ir lašelio.



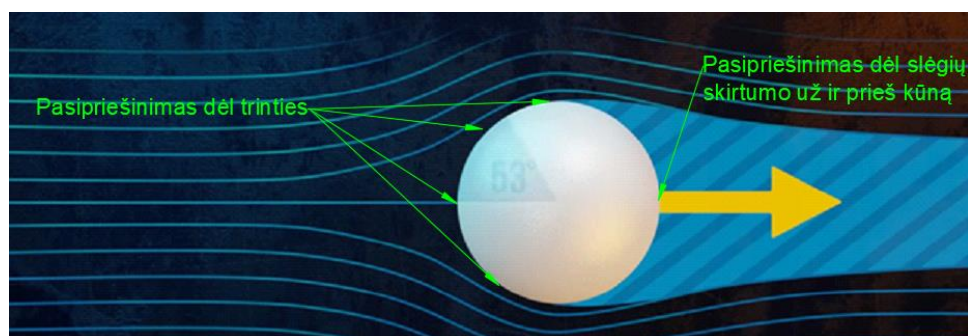
2.3 pav. Šilumos srautai garuojančiame lašelyje pereinamojo garavimo režimo metu, kai lašelis šyla

Lašelio FVRC dinaminiai parametrai yra:

- Lašelio slydimo greitis – rodo greičių skirtumą tarp dūmų srauto ir lašelio.
- Lašelio slydimo pagreitis – nurodo kaip greitai dūmų srautas stabdo lašelį.
- Lašelio Reinoldso skaičius – nurodo dūmų srauto, aptekančio lašelį turbulentiškumą.
- Trinties pasipriešinimo koeficientas (žr. 2.4 pav.) – nusakantis pasipriešinimą atsirandantį dėl tarp dūmų ir lašelio trinties.
- Pilnojo pasipriešinimo koeficientas (žr. 2.5 pav.) – susidedantis iš pasipriešinimo dėl trinties bei slėgių skirtumo už ir prieš sferą.



2.4 pav. Fluido greičių profilis fluidui aptekant kūną [39]



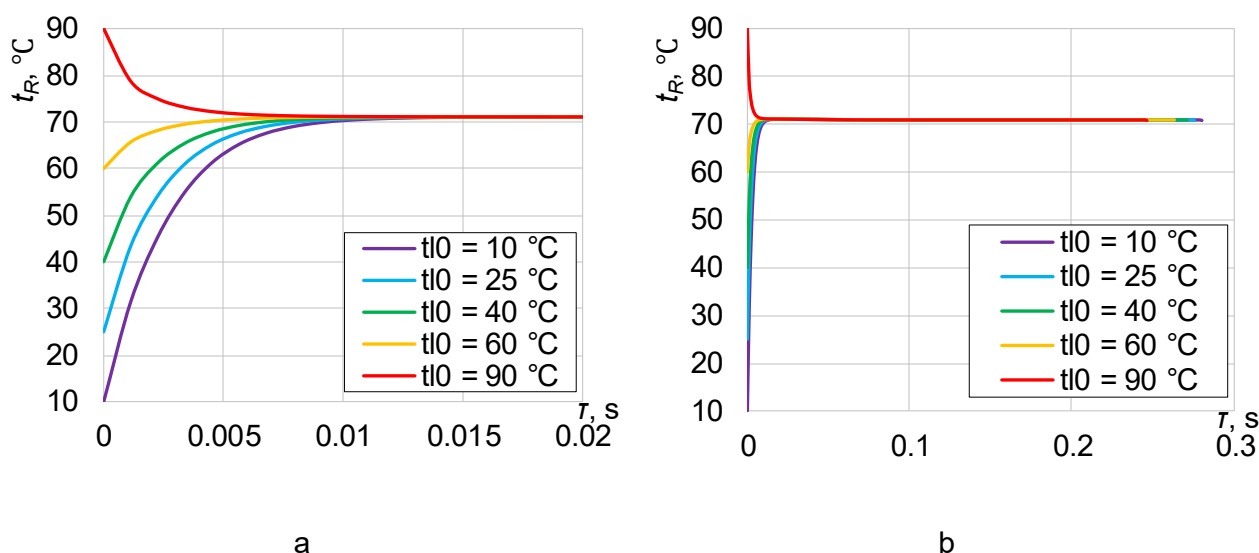
2.4 pav. Sferos aerodinamika [39]

3. Rezultatų analizė

3.1. Lašelių pradinės temperatūros įtaka fazinių virsmų režimų ciklui

3.1.1. Skirtingos pradinės temperatūros vandens lašelių garavimas 450 °C temperatūros dujose

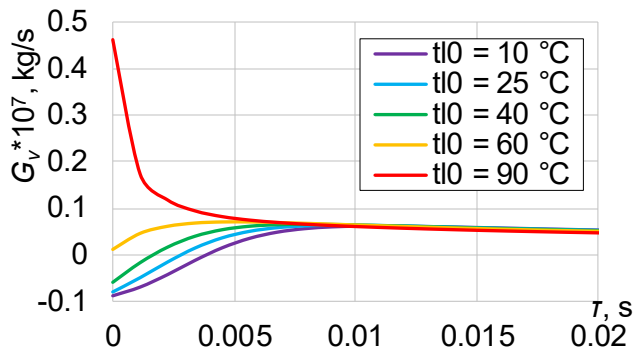
Vertinant pradinės lašelio temperatūros įtaką fazinių virsmų ciklui, visų pirma reikia įvertinti, kaip jo metu kinta paviršiaus temperatūra. Ji apibrėžia tiek šilumos mainus lašelyje, tiek ir už jo ribų. 3.1 pav. matyti, kad paviršiaus temperatūra kinta tik pačioje FVRC pradžioje, o paskui nusistovi ties 70,9 °C, nepriklausomai nuo pradinės lašelio temperatūros. Tiesa, dėl mažesnio temperatūrų skirtumo aukštesnės temperatūros lašelių temperatūra nusistovi greičiau. Palyginti, lašelio, kurio pradinė temperatūra 60 °C, paviršiaus temperatūra nusistovi per maždaug 0,007 s, o šaltesniems lašeliams prireikia daugiau laiko (0,012 s). Vienintelio 90 °C temperatūros lašelio paviršiaus temperatūra mažėja. Tai rodo, kad pereinamojo garavimo metu šiluma sklinda nuo lašelio centro link paviršiaus, o vėsesniuose lašeliuose šilumos srauto kryptis priešinga.



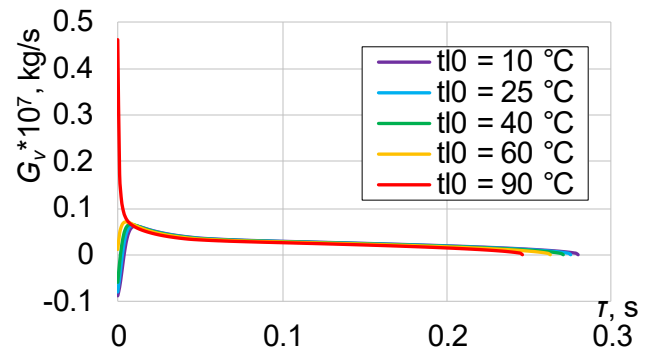
3.1 pav. Lašelio paviršiaus temperatūros kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 450 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $Re_0 = 50$; $2R = 110 \mu\text{m}$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$

Aukštesnė paviršiaus temperatūra lemia gerokai intensyvesnį garavimą (žr. 3.2 pav. a ir b). 90 °C pradinės temperatūros lašelis pasiekia savo garavimo intensyvumo piką (0,0462 mg/s) pačioje pradžioje. Tačiau garo srautas nuo lašelio greitai ima mažėti dėl auštančio paviršiaus. O štai lašeliams, kurių temperatūra mažesnė nei pusiausvirojo garavimo, situacija priešinga – garo srautas ciklo pradžioje yra nedidelis, kadangi nemaža dalis iš dujų paimamos šilumos yra sunaudojama lašeliui šildyti. Mažesnės nei 60 °C temperatūros lašelių fazinių virsmų ciklo pradžioje vyksta kondensacinis režimas. Jam pasibaigus, garo srautas ima didėti, kol paviršiaus temperatūra nusistovi ir prasideda pusiausvirojo garavimo režimas. Jo metu garo srautas ima mažėti, nes garuojant lašeliui mažėja ir jo paviršiaus plotas. Žvelgiantį garo srauto tankio grafiką, pavaizduotą 3.2 pav. c ir d, matyti, kad jo kitimo tendencija ciklo pradžioje yra analogiška kaip ir garo srauto. Tačiau pasiekus pusiausvirojo

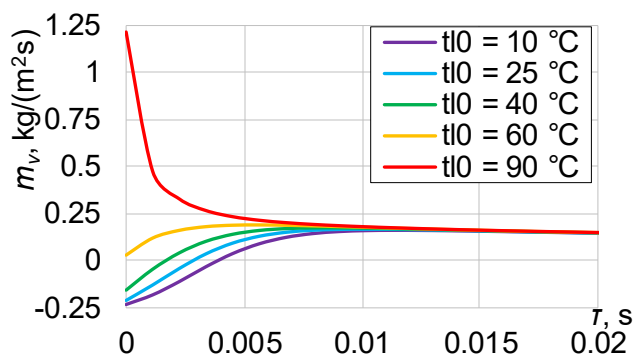
garavimo režimą, garo srauto tankis ima didėti, kadangi šis parametras neįvertina mažėjančio lašelio paviršiaus ploto, o iš dujų paimamas šilumos srautas išlieka intensyvus.



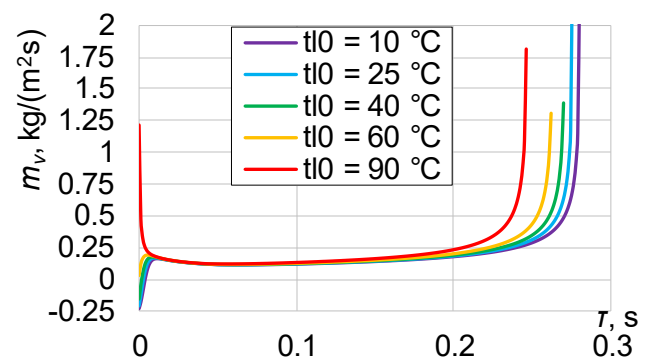
a



b



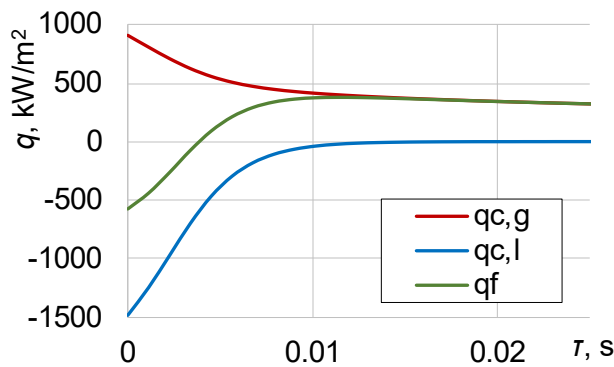
c



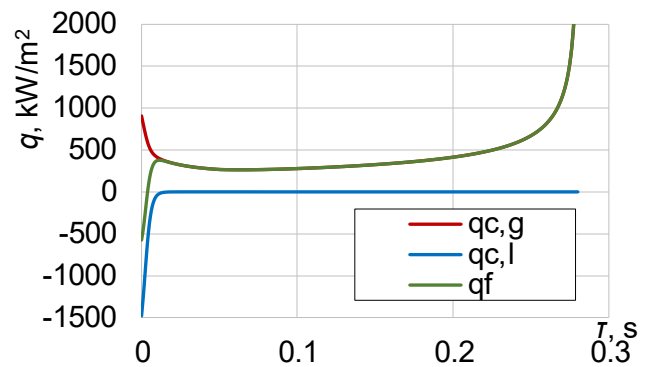
d

3.2 pav. Garo srauto kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b) bei jo tankio kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (c) ir viso FVR ciklo metu (d), kai lašelis garuoja 450 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $Re_0 = 50$; $2R = 110 \mu\text{m}$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$

3.3 pav. pavaizduota, kaip konvekciniai ir fazinių virsmų šilumos srautai veikia 10 °C pradinės temperatūros lašelį. Kondensacinio režimo metu lašelis iš dujų, sukondensuodamas jose esančius vandens garus, sugeria nemažą kiekį šilumos, kuri panaudojama lašeliui šildyti. Šio režimo metu, šilumos srautas, tenkantis lašeliui šildyti, yra lygus dujų konvekcinio šildymo bei kondensacijos metu lašeliui atiduodamos šilumos srautų sumai. Pačioje FVRC pradžioje dujos lašeliui suteikia 907 kW/m² šilumos srautą konvekcine pernaša ir 574 kW/m² šilumos srautą dėl vykstančios kondensacijos. Po 0,004 s nuo lašelio įpurškimo, kai lašelio paviršiaus temperatūra pasiekia 57,8 °C, kondensacinis režimas baigiasi. Lašeliui toliau šylant, prasideda pereinamojo garavimo režimas, tad fazinių virsmų šilumos srautas keičia kryptį – lašelis pradeda garuoti. Tuomet iš dujų gaunamas konvekcinis šilumos srautas yra naudojamas tiek lašeliui šildyti, tiek garinti. Po 0,023 s nuo FVRC pradžios, lašelis visiškai sušyla, konvekcija lašelyje baigiasi ir visa iš dujų gaunama šiluma sunaudojama lašeliui garinti – prasideda pusiausvirojo garavimo režimas. Jo metu konvekcijos būdu iš dujų gaunamas šilumos srautas lygus šilumos srautui, kuris sunaudojamas lašeliui garinti. Šių srautų kitimo tendencija analogiška kaip ir garo srauto tankio.



a

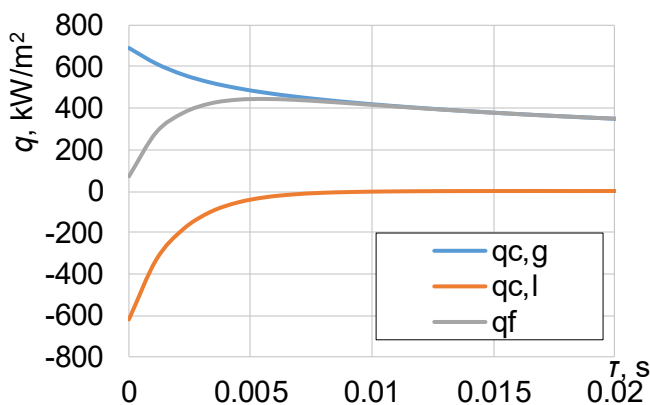


b

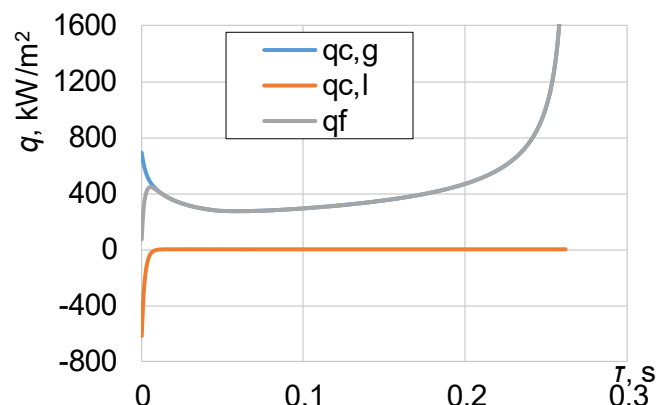
3.3 pav. 10 °C pradinės temperatūros lašelio šilumos srautų kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 450 °C temperatūros dujų sraute.

$$X_v = 0,18; Re_0 = 50; 2R = 110 \mu\text{m}; p_d = 0,1 \text{ MPa}, w_d = 8 \text{ m/s}$$

Tuo tarpu aplink lašelį, kurio pradinė temperatūra 60 °C, nors jo temperatūra žemesnė nei pusiausvirojo garavimo, kondensacinis režimas nevyksta, nes lašelis neataušina dujų žemiau jų rasos taško ribos. Būtent dėl kondensacinio režimo nebuvimo šio lašelio sugeriamas šilumos srautas pačioje FVRC pradžioje yra kone 2,5 karto mažesnis nei šaltesnių lašelių – 619 kW/m². Tiesa, dėl nedidelio lašelio pradinės ir pusiausvirojo garavimo temperatūrų skirtumo šilumos mainai lašelyje gana greit baigiasi – po 0,15 s prasideda pusiausvirojo garavimo režimas. Mažesnis temperatūrų skirtumas taip pat lemia ir mažesnį iš dujų paimamą šilumos srautą vos tik lašeliui patekus į dujas – 690 kW/m² (žr. 3.4 pav.).



a



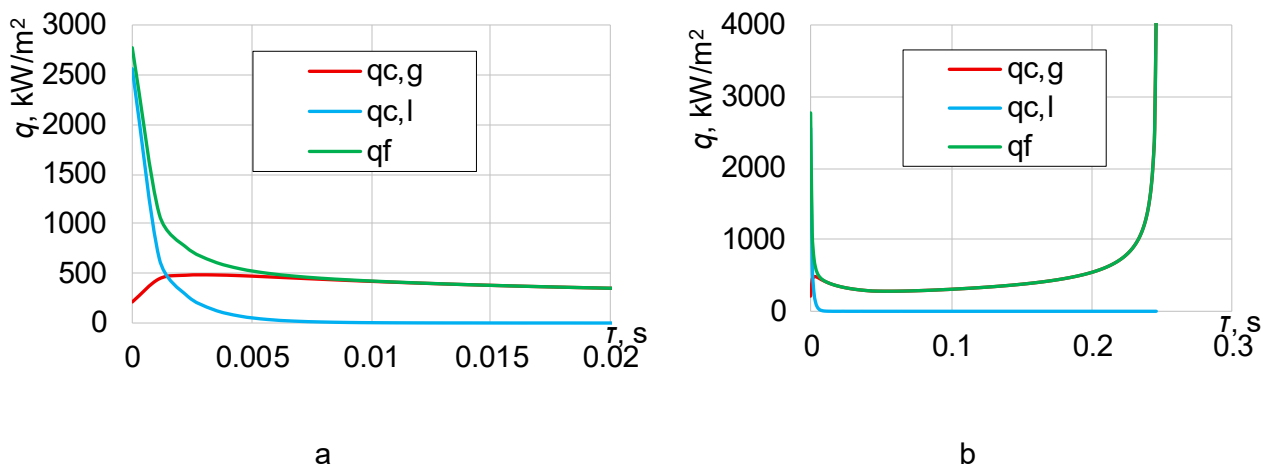
b

3.4 pav. 60 °C pradinės temperatūros lašelio šilumos srautų kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 450 °C temperatūros dujų sraute.

$$X_v = 0,18; Re_0 = 50; 2R = 110 \mu\text{m}; p_d = 0,1 \text{ MPa}, w_d = 8 \text{ m/s}$$

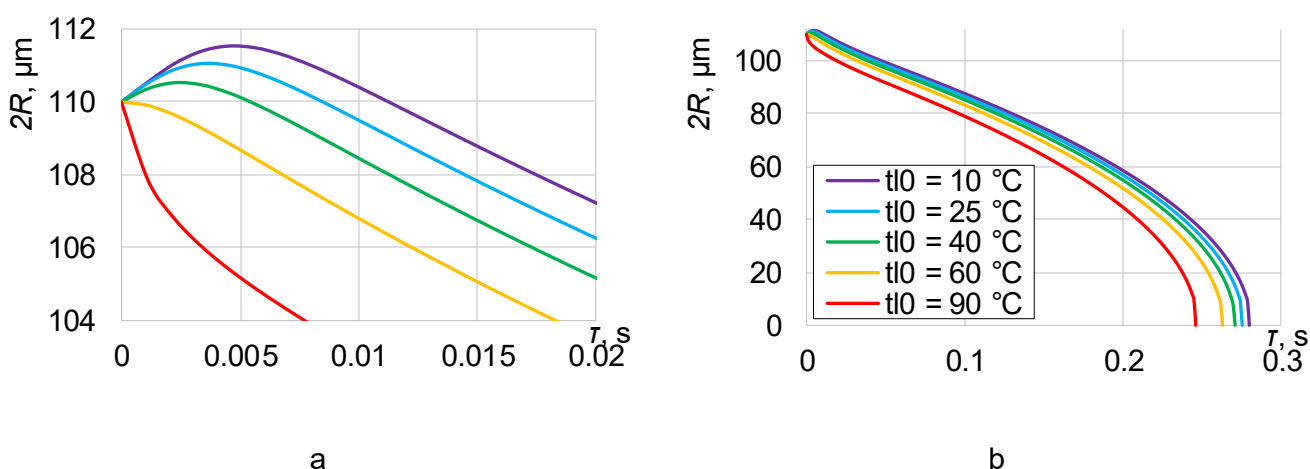
Žvelgiant į lašelį, kurio pradinė temperatūra 90 °C, šilumos srautus (žr. 3.5 pav.), galima matyti, kad ciklo pradžioje jame esanti perteklinė šiluma iš karto sunaudojama jo garinimui, nes tuomet jo temperatūra būna aukštesnė nei pusiausvirojo garavimo. Dėl to šiuo atveju kondensacinis režimas taip pat nevyksta. Tai lemia labai intensyvų garavimą pačioje ciklo

pradžioje – fazinių virsmų šilumos srauto tankis net 2771 kW/m^2 . Didžioji dalis šilumos gaunama iš lašelio viduje esančios perteklinės energijos (2559 kW/m^2), o iš dujų tuo metu paaimamas šilumos kiekis nedidelis – 212 kW/m^2 . Tiesa, lašeliui auštant, konvekcija jo viduje slopsta, kartu mažėja ir fazinių virsmų šilumos srauto tankis. Pereinamojo garavimo režimas čia labai trumpas: po $0,019 \text{ s}$, kai temperatūra lašelyje nusistovi, šilumos mainai nutrūksta.



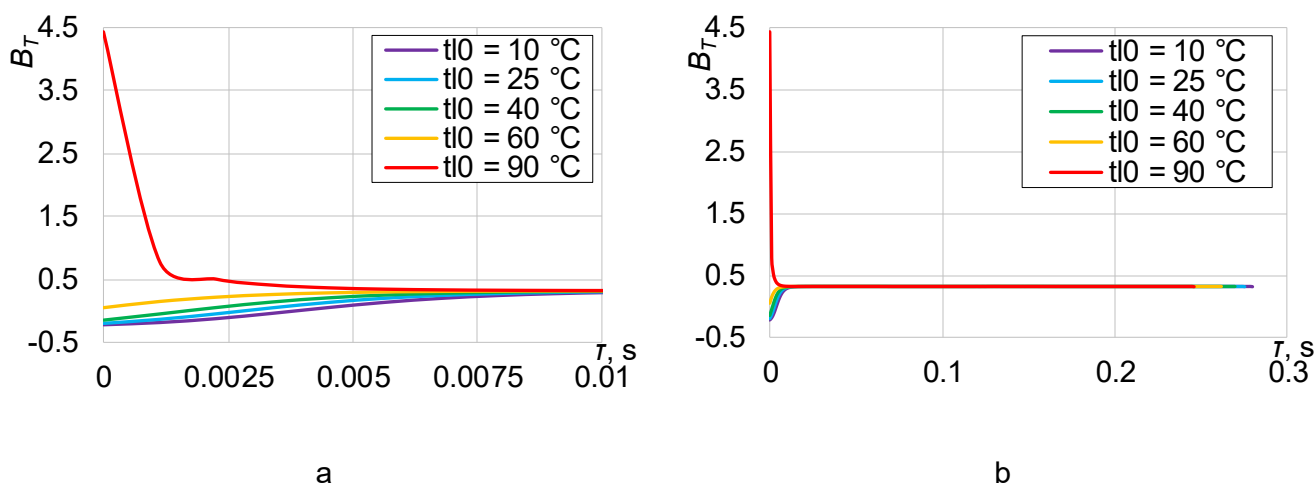
3.5 pav. $90 \text{ }^\circ\text{C}$ pradinės temperatūros lašelio šilumos srautų kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja $450 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $Re_0 = 50$; $2R = 110 \text{ }\mu\text{m}$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$

Lašelio skersmens kitimo tendencija žvelgiant į visą FVRC yra labai panaši, nepriklausomai nuo jo pradinės paviršiaus temperatūros. Pagrindinis skirtumas yra tas, kad įpurkšti aukštesnės temperatūros lašeliai visiškai išgaruoja kiek anksčiau. To priežastį galime pamatyti FVRC pradžioje (žr. 3.6 pav.). Kadangi vėsesni lašeliai atvėsina aplink juos esančias dujas iki žemesnės nei jų rasos taškas temperatūros, jose esantys vandens garai kondensuojasi ir įsilieja į lašelį. Lašelis tampa didesnis, tad jam reikia daugiau laiko išgaruoti. Nėgana to, vykstant kondensacijai lašelis negaruoja, tai dar labiau pailgina jo garavimo ciklą. Visa tai atspindi $12 \text{ } \%$ arba ($0,034 \text{ s}$) skirtumas tarp šalčiausio ($10 \text{ }^\circ\text{C}$) ir karščiausio lašelio ($90 \text{ }^\circ\text{C}$) FVR ciklų.



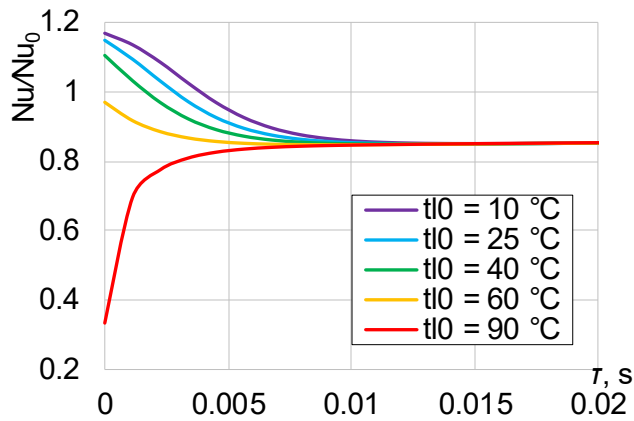
3.6 pav. Lašelio skersmens kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja $450 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $Re_0 = 50$; $2R = 110 \text{ }\mu\text{m}$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$

Vykstant faziniams virsmams, vyksta tiek šilumos, tiek masės mainai. Garavimo režimų metu vandens molekulės atsiskiria nuo lašelio paviršiaus ir palieka tuščią vietą, o kadangi visata nemėgsta tuštumos, šią iš karto užpildo lašelį supančių dujų srautas, vadinamas Stefano srautu. Kadangi jo kryptis yra priešinga garo srauto nuo lašelio kryptiai, jis slopina šilumos mainus tarp dujų ir lašelio. Vykstant kondensaciniam režimui, situacija priešinga. Kadangi vandens garų tankis yra daug mažesnis negu vandens (vandens tankis atmosferiniame slėgyje šioje būsenoje yra apie 960 kg/m^3 , o vandens garų – $0,6 \text{ kg/m}^3$), vykstant kondensacijai vandens garai akimirksniu susitraukia 1600 kartų, palyginti su jų pirminiu tūriu, ir atsiradusią tuščią vietą užpildo Stefano srautas. Stefano srauto kryptis šiuo atveju sutampa su kondensacijos, tad šilumos mainai tarp lašelio ir dujų suintensyvėja. Stefano srauto įtaka vertinama Spoldingo parametru B_T (žr. pav. 3.7). Jo reikšmė pačioje FVRC pradžioje kondensacinio režimo metu (žemesnės nei $60 \text{ }^\circ\text{C}$ pradinės temperatūros lašeliams) yra neigiama, tačiau netrukus ima didėti ir, prasidėjus pusiausvirojo garavimo režimui, nusistovi pasiekusi pikinę reikšmę ($B_T = 0,32$), nes tuo metu visa iš dujų gaunama šiluma yra sunaudojama lašeliui garinti. O štai $90 \text{ }^\circ\text{C}$ pradinės temperatūros lašelyje vyksta kardinaliai priešingas procesas, kadangi jo garavimo pikas pasiekiamas pačioje FVRC pradžioje. Tuomet Stefano srauto intensyvumas yra kone 15 kartų didesnis nei pusiausvirojo garavimo metu, tačiau labai greitai, vos per $0,066 \text{ s}$, jis nusistovi ties ta pačia reikšme kaip ir žemesnės pradinės temperatūros lašeliai.

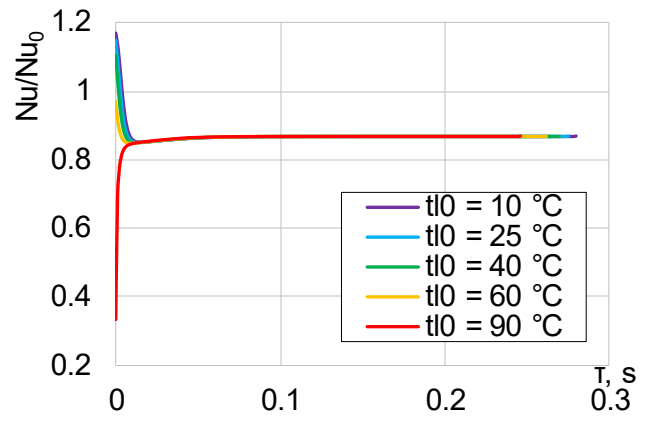


3.7 pav. Šiluminio Spoldingo parametro kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja $450 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $Re_0 = 50$; $2R = 110 \text{ } \mu\text{m}$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$

Viso to rezultatai gerai atskleidžia Nuselto skaičiaus santykis su Nuselto skaičiumi, kai Stefano srauto įtaka nėra vertinama, pavaizduotas 3.8 pav. Jis rodo, kad kondensacinio režimo metu šilumos mainai tarp lašelio ir dujų gali būti suintensyvinami iki $16,9 \%$. Tačiau, prasidėjus garavimui, kai garo srautas pasiekia didžiausią reikšmę, šilumos mainai slopinami 15% ($60 \text{ }^\circ\text{C}$ ir vėsesniems lašeliams). Nusistovėjus garavimui, šilumos mainai staigiau slopsta karštesniuose lašeliuose, kadangi jie savo garavimo piką, kuris būna ir intensyvesnis, pasiekia greičiau. $90 \text{ }^\circ\text{C}$ pradinės temperatūros lašeliui Stefano srauto įtaka pereinamojo garavimo metu yra milžiniška – šilumos mainų intensyvumas sumažinamas net iki $66,7 \%$. Vėlesnėse ciklo stadijose šilumos mainų slopinimas nusistovi ties maždaug $13,3 \%$ visais pradinėmis temperatūromis atvejais.



a

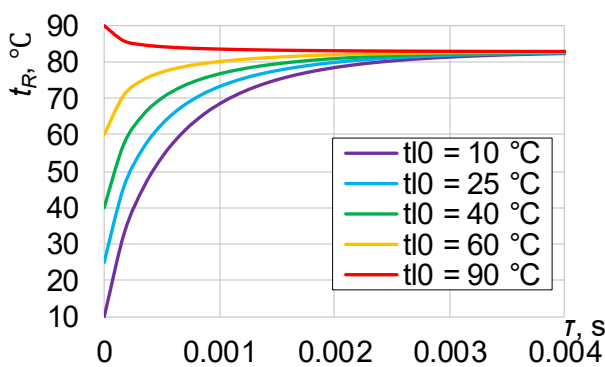


b

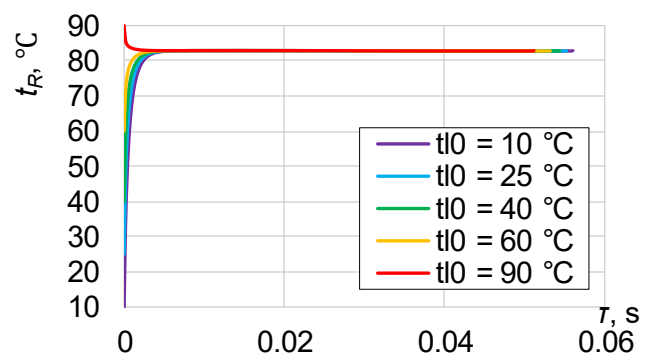
3.8 pav. Nu santykio su Nu skaičiumi, kai Stefano srauto įtaka nėra vertinama, kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 450 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $Re_0 = 50$; $2R = 110\text{ }\mu\text{m}$; $p_d = 0,1\text{ MPa}$, $w_d = 8\text{ m/s}$

3.1.2. Skirtingos pradinės temperatūros vandens lašelių garavimas 1300 °C temperatūros dujose

Lašeliui garuojant aukštesnės temperatūros dujose, jo paviršiaus temperatūros kitimo tendencija išlieka panaši. 3.9 pav. matyti, kad paviršiaus temperatūra taip pat kinta tik pačioje FVRC pradžioje ir vėliau nusistovi ties $82,8\text{ °C}$, nepriklausomai nuo pradinės lašelio temperatūros. Tad karštesnėse dujose lašelio pusiausvirojo garavimo temperatūra kiek aukštesnė. Skirtumas tarp nagrinėjamų atvejų – $10,9\text{ °C}$. Tiesa, šiuo atveju temperatūros nusistovi gerokai greičiau. Lašelio, kurio pradinė temperatūra 90 °C , paviršiaus temperatūra nusistovi per maždaug $0,002\text{ s}$, o šaltesniems lašeliams gali prireikti kone dvigubai daugiau laiko (10 °C lašeliui – $0,004\text{ s}$). Kaip ir pirmu nagrinėtu atveju, vienintelio 90 °C temperatūros lašelio paviršiaus temperatūra mažėja, kadangi, net ir esant aukštesnei pusiausvirojo garavimo temperatūrai, pastaroji yra žemesnė už lašelio pradinę.



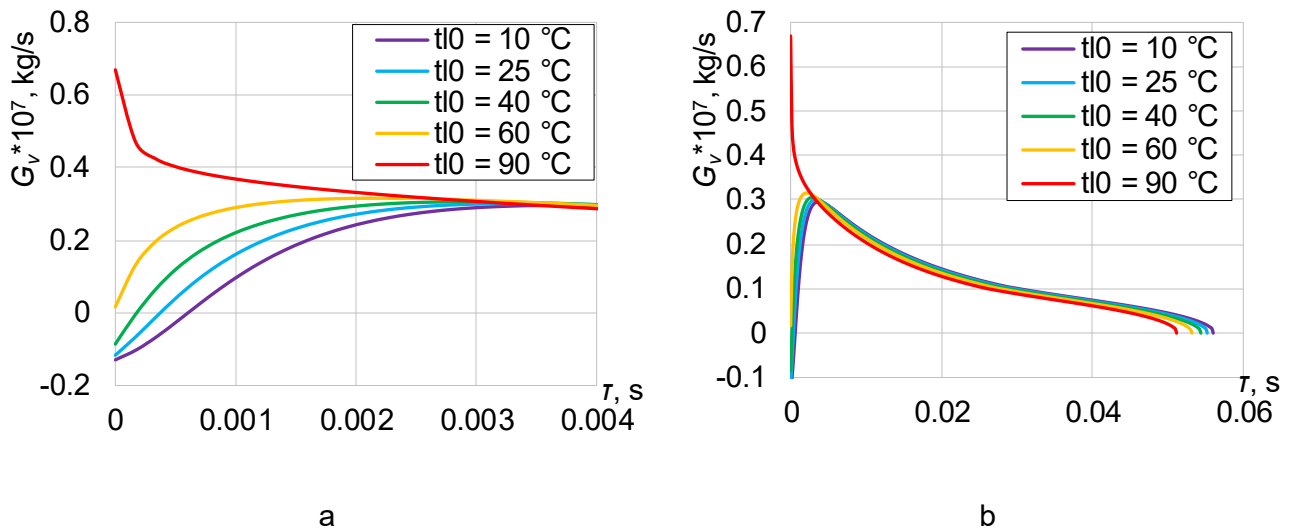
a



b

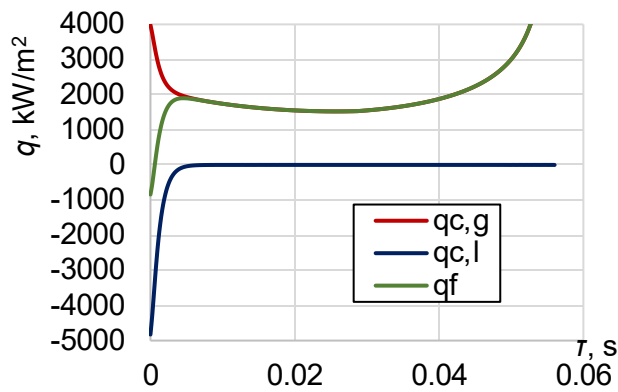
3.9 pav. Lašelio paviršiaus temperatūros kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $Re_0 = 50$; $2R = 110\text{ }\mu\text{m}$; $p_d = 0,1\text{ MPa}$, $w_d = 8\text{ m/s}$

Aukštesnės lašelio paviršiaus ir dujų temperatūros lemia gerokai intensyvesnį garavimą, nei lašeliui garuojant 450 °C dujose (žr. 3.10 pav.). 90 °C pradinės temperatūros lašelis savo garavimo intensyvumo piką (0,067 mg/s, apie 1,5 karto didesnis nei lašeliui garuojant 450 °C dujose) pasiekia pačioje pradžioje. Dėl staigesnio aušimo garo srautas nuo lašelio ima staigiai mažėti. Mažesnės nei 60 °C temperatūros lašelių fazinių virsmų ciklo pradžioje vyksta kondensacinis režimas, tik šiuo atveju jis kiek intensyvesnis. Kondensacijai pasibaigus, garo srautas ima staigiai didėti, kol paviršiaus temperatūra nusistovi, garo srautas pasiekia savo pikinę reikšmę, kuri yra apie 3 kartus didesnė nei prieš tai nagrinėtu atveju, ir prasideda pusiausvirojo garavimo režimas. Lašeliui garuojant, mažėja jo paviršiaus plotas, todėl ima mažėti ir garo srautas.

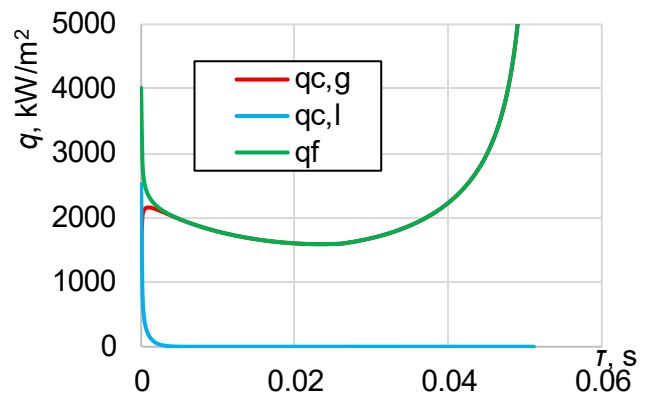


3.10 pav. Garo srauto kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $Re_0 = 50$; $2R = 110 \mu\text{m}$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$

3.11 pav. matyti, kad konvekciniai ir fazinių virsmų šilumos srautai, veikiantys 10 °C pradinės temperatūros lašelį, yra gerokai intensyvesni. Šiuo atveju kondensacinio režimo metu lašelis, sukondensuodamas dujose esančius vandens garus, sugeria kone dvigubai daugiau šilumos, kuri panaudojama lašeliui šildyti. Tuo tarpu konvekciniu būdu iš dujų paimamo šilumos srauto tankis yra net apie 4 kartus didesnis. Kadangi šio režimo metu šilumos srautas, tenkantis lašeliui šildyti, yra lygus dujų konvekcinio šildymo bei kondensacijos metu lašeliui atiduodamos šilumos srautų sumai, tad ir konvekcinio šilumos srauto lašelyje tankis yra apie 3 kartus didesnis. Žvelgiant į lašelio, kurio pradinė temperatūra 90 °C, šilumos srautus, galima matyti, kad ciklo pradžioje, kai jame esanti perteklinė šiluma iš karto yra sunaudojama jo garinimui, konvekcinio šilumos srauto lašelyje tankio didžiausia vertė yra analogiška kaip ir tuo atveju, kai lašelis garuoja 450 °C dujose. Tačiau dėl gerokai intensyvesnio konvekcinio šilumos srauto iš dujų pereinamojo garavimo režimas esant 90 °C pradinei lašelio temperatūra labai trumpas ir vos po 0,005 s, kai temperatūra lašelyje nusistovi, šilumos mainai nutrūksta. Pusiausvirojo garavimo metu lašelis šiuo atveju garuoja daugiau nei 4 kartus intensyviau nei 450 °C dujose.



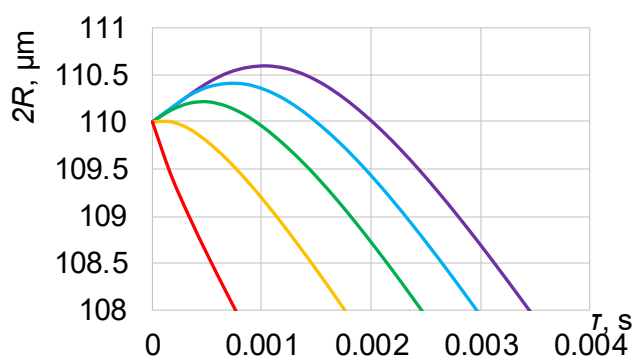
a



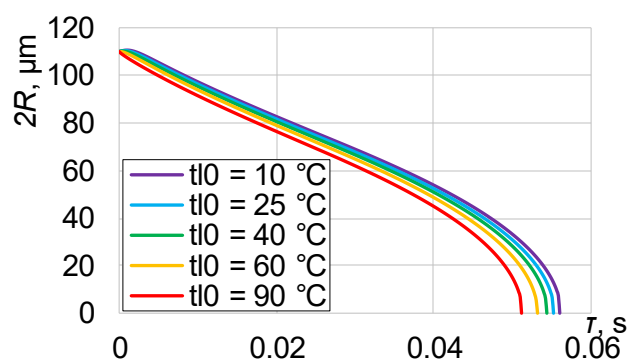
b

3.11 pav. 10 °C (a) ir 90 °C (b) pradinės temperatūros lašelio šilumos srautų kitimas viso FVR ciklo metu, kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $Re_0 = 50$; $2R = 110 \mu\text{m}$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$

Lašelio skersmens kitimo tendencija išlieka gana panaši, nepriklausomai nuo jo pradinės paviršiaus temperatūros. Nors ir čia įpurkšti aukštesnės temperatūros lašeliai visiškai išgaruoja kiek anksčiau, tačiau skirtumas nėra toks ženklus, kadangi konvekcinis šilumos srautas lašelyje išlieka panašus, o šilumos mainai su dujomis yra gerokai intensyvesni, tad lašelyje sukaupta energija daro santykinai mažesnę poveikį lašelio garavimui. To priežastį galime pamatyti FVRC pradžioje (žr. 3.12 pav.) – 90 °C pradinės temperatūros lašelio skersmens kitimo kreivė yra ne tokia stati. Tai lemia, kad lašeliui garuojant 1300 °C dujose gaunamas 9 % arba (0,005 s) skirtumas tarp šalčiausio (10 °C) ir karščiausio lašelio (90 °C) FVR ciklų.



a

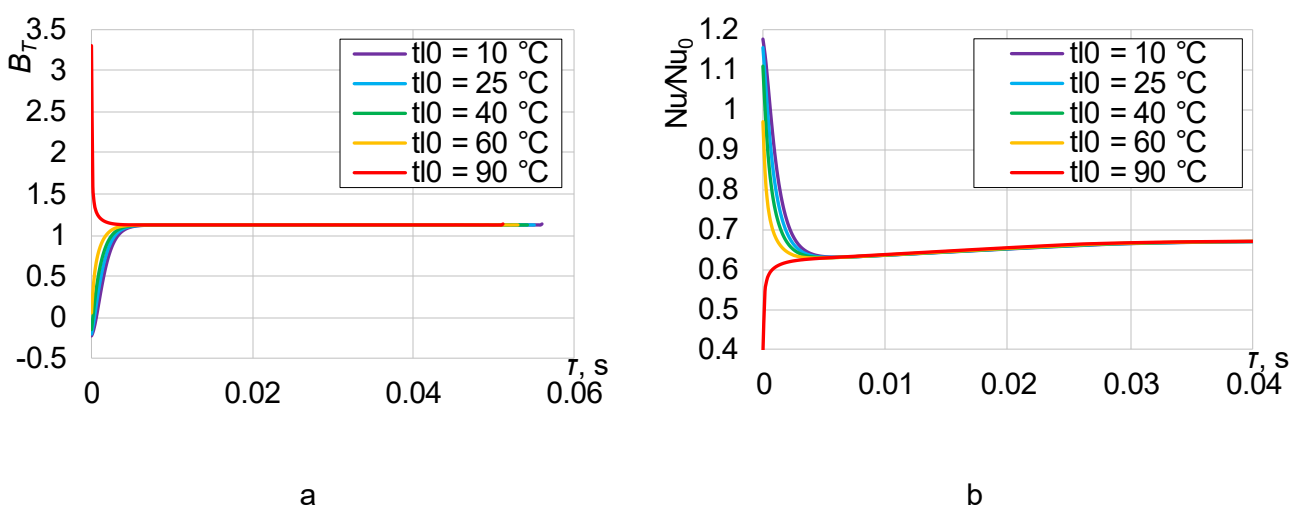


b

3.12 pav. Lašelio skersmens kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $Re_0 = 50$; $2R = 110 \mu\text{m}$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$

3.13 pav. a parodo, kad, lašeliui garuojant aukštesnės temperatūros dujose, Stefano srauto įtaką įvertinančio Spoldingo parametro B_T vertės garavimo metu išauga. Nors kondensacinio režimo metu (žemesnės nei 60 °C pradinės temperatūros lašeliams) Spoldingo parametro vertė yra neigiama ir jos dydis labai panašus kaip ir vėsesnėse dujose, tačiau netrukus ji

ima didėti ir, prasidėjus pusiausvirojo garavimo režimui, nusistovi ties pikine verte ($B_T = 1,12$). $90\text{ }^\circ\text{C}$ pradinės temperatūros lašelyje vyksta kardinaliai priešingas procesas, kadangi jo garavimo pikas pasiekiamas pačioje FVRC pradžioje. Tuomet Stefano srauto intensyvumas yra 3 kartus didesnis nei pusiausvirojo garavimo metu, tačiau labai greitai, vos per $0,004\text{ s}$, jis nusistovi ties ta pačia reikšme kaip ir žemesnės pradinės temperatūros lašeliai. Šio proceso rezultatai gerai atspindi Nuselto skaičiaus santykis su Nuselto skaičiumi, kai Stefano srauto įtaka nėra vertinama (žr. 3.13 pav. b). Jis rodo, kad kondensacinio režimo metu šilumos mainai tarp lašelio ir dujų gali būti suintensyvinami iki 16 %. Tačiau, kai garo srautas pasiekia pikinę reikšmę, šilumos mainai slopinami net 37 %. $90\text{ }^\circ\text{C}$ pradinės temperatūros lašeliui Stefano srauto įtaka pereinamojo garavimo metu yra milžiniška – šilumos mainų intensyvumas sumažinamas net iki 61 %. Vėlesnėse ciklo stadijose šilumos mainai slopinimas nusistovi ties maždaug 33 %, nepriklausomai nuo lašelio pradinės temperatūros.



3.13 pav. Šiluminio Spoldingo parametro (a) ir Nu santykio su Nu, kai Stefano srauto įtaka nėra vertinama (b), kitimas viso FVR ciklo metu, kai lašelis garuoja $1300\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros dujų sraute.

$$X_v = 0,18; Re_0 = 50; 2R = 110\text{ }\mu\text{m}; p_d = 0,1\text{ MPa}, w_d = 8\text{ m/s}$$

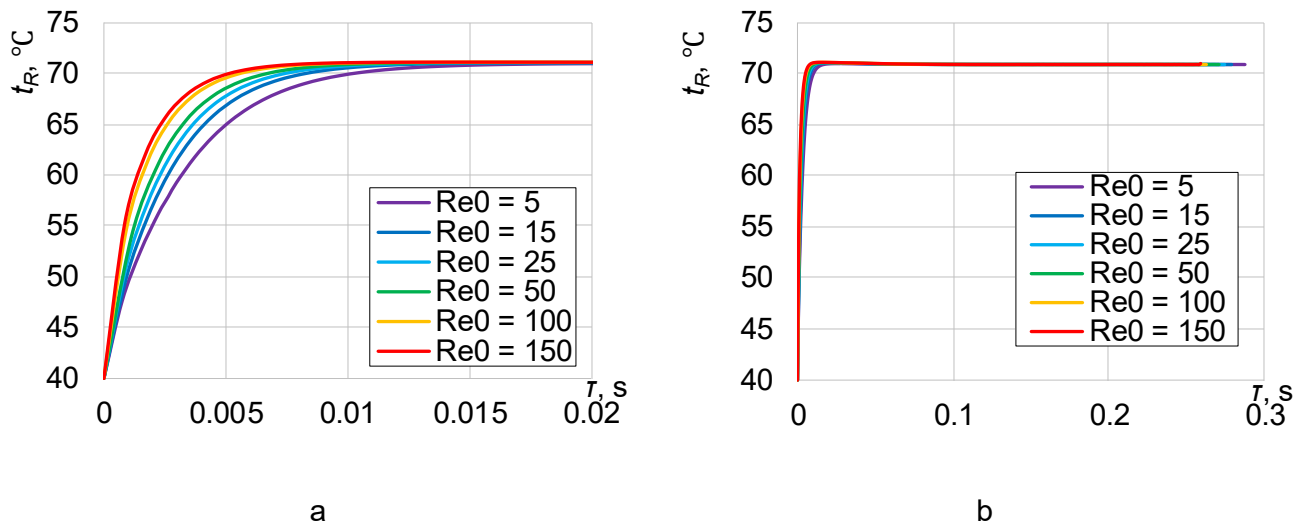
Apibendrinant, lašelio pradinė temperatūra daro ženklų įtaką FVRC terminiams bei energiniams parametrų ciklo pradžioje. Nors vėlesnėse ciklo stadijose skirtingos pradinės temperatūros lašelių parametrų kitimas suvienodėja, tačiau skirtumai ciklo pradžioje lemia gana ženklų fazinių virsmų režimų ciklų trukmių skirtumą. Karšti ($t_{l0} = 90\text{ }^\circ\text{C}$) lašeliai gali išgaruoti iki 9 % greičiau, palyginti su šaltais ($t_{l0} = 10\text{ }^\circ\text{C}$), kai garavimas vyksta $1300\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros dujose arba iki 12 % greičiau, kai garavimas vyksta $450\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros dujose, tad lašelio pradinės temperatūros įtaka didesnė, kai lašelis garuoja vėsesnėse dujose.

3.2. Lašelio įpurškimo greičio įtaka FVRC

3.2.1. Skirtingų lašelių įpurškimo greičių įtaka, lašeliams garuojant $450\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros dujose

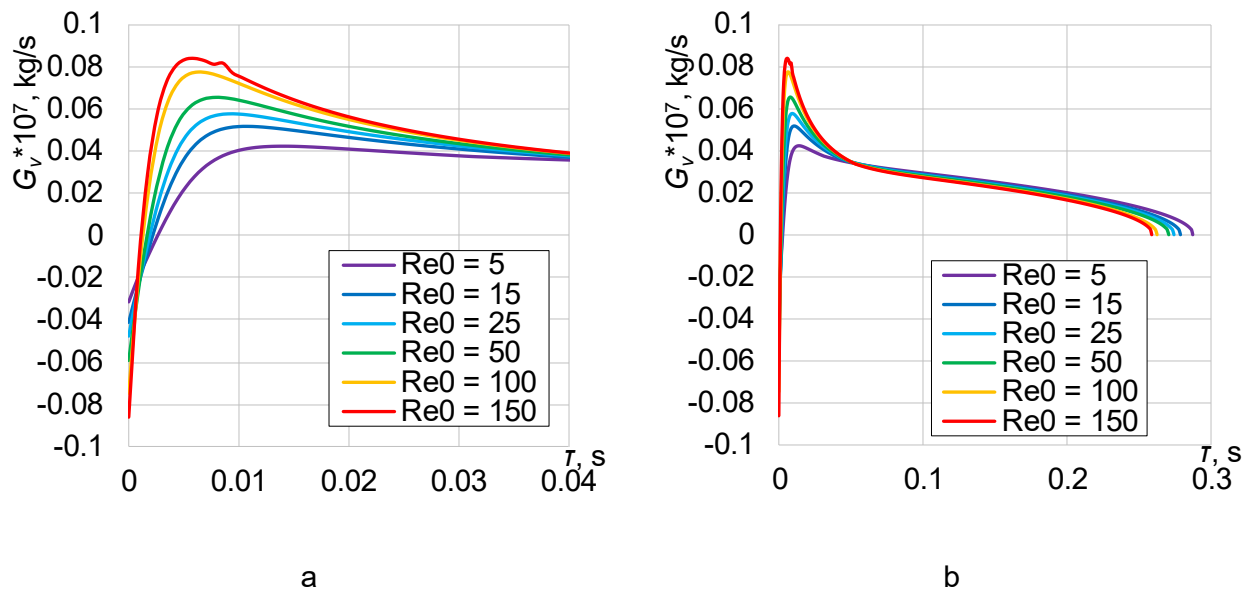
Pradinis Reinoldso skaičius, kaip matyti 3.14 pav., lašelio paviršiaus temperatūrai daro įtaką tik pačioje FVRC pradžioje, kol vis dar vyksta šilumos mainai lašelio viduje. Pusiausvirojo

garavimo metu paviršiaus temperatūra siekia 70,9 °C, nepriklausomai nuo pradinio Re skaičiaus. Lašelių, kurių Re_0 didesnis, temperatūros kitimo kreivės FVRC pradžioje yra statesnės, tai rodo, kad jų paviršius įšyla greičiau. Tiesa, tarp didžiausių tiriamų reikšmių ($Re_0 = 100$ ir $Re_0 = 150$) skirtumas nėra toks ženklus, kaip tarp žemesnių. Lašelio, kurio $Re_0 = 5$, paviršiaus temperatūra įšyla per maždaug 0,022 s, esant $Re_0 = 15$ – per 0,014 s, $Re_0 = 100$ – per 0,009 s, o $Re_0 = 150$ – 0,008 s, tad esant itin dideliems pradiniais Reinoldso skaičiams, pastarųjų įtaka paviršiaus temperatūrai smarkiai silpnėja. Lašelių, kurių Re_0 didesnis, paviršius pereinamojo garavimo režimo metu, dar prieš temperatūrai nusistovint gali pasiekti iki 71,1 °C.



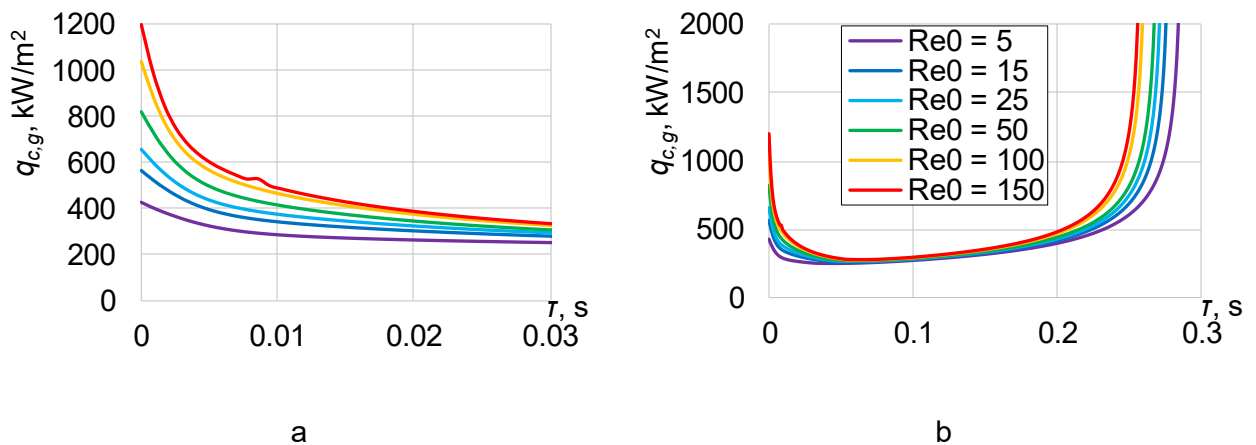
3.14 pav. Lašelio paviršiaus temperatūros kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 450 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_{i0} = 40$ °C; $2R = 110$ μ m; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s

Garų srauto kitimo grafikas, pavaizduotas 3.15 pav., rodo, kad kondensacinis režimas šiomis kraštinėmis sąlygomis vyksta visiems lašeliams, nepriklausomai nuo jų pradinio Reinoldso skaičiaus reikšmės. Tačiau kondensato srautas į lašelį ima iš karto mažėti, o po kelių šimtųjų sekundės dalių, kai lašelių paviršius pašyla iki 57,9 °C, prasideda pereinamojo garavimo režimas. Jo metu garų srautas ima augti, kol pasiekia savo piką, kuris koreliuoja su paviršiaus temperatūros piku. Po to garų srautas ima mažėti, nes mažėja ir garuojančio lašelio paviršiaus plotas. Pagrindinis skirtumas yra tas, kad didesniu greičiu judančių lašelių garų srautas kinta staigiau ir pikinės reikšmės būna didesnės. Tiesa, net ir pusiausvirojo garavimo režime garų srautas kinta staigiau, kai lašelių Re_0 yra didesnis.



3.15 pav. Garo srauto kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 450 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_0 = 40$ °C; $2R = 110$ μm ; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s

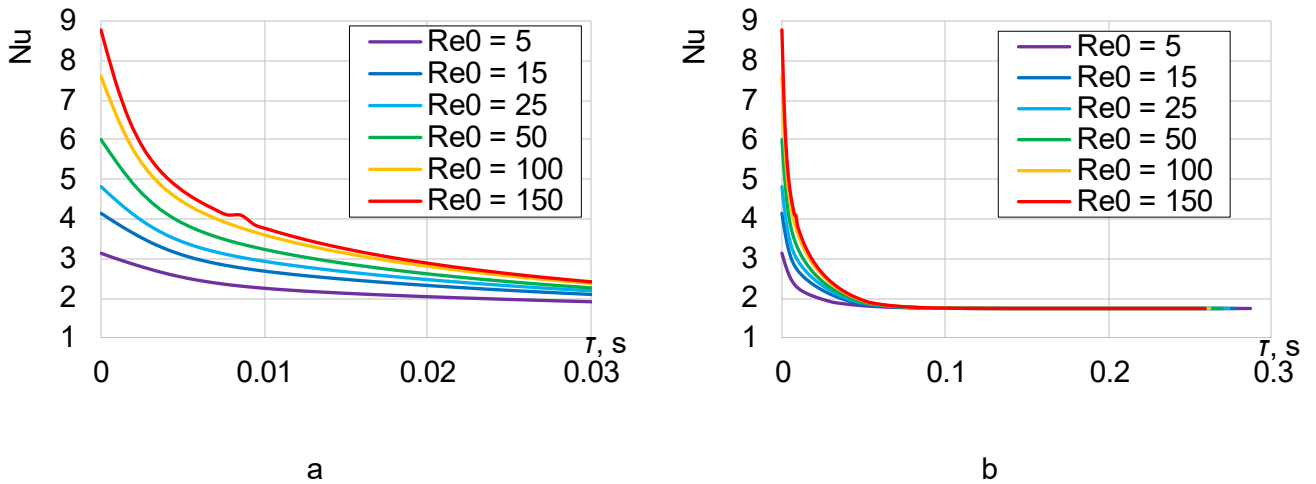
Kodėl garavimas intensyvesnis, gerai paaiškina iš dujų paimamo konvekcinio šilumos srauto tankis, kurio kitimas pavaizduotas 3.16 pav. Pradinėje FVRC stadijoje lašeliai, kurių Re_0 didesnis, iš dujų paima gerokai didesnę šilumos srautą, tad ir garuoja intensyviau. Vėlesnėse ciklų stadijose šio parametro kitimo tendencija supanašėja, tačiau intensyvesnę šildymą patyrę lašeliai dėl stipresnio garavimo labiau sumažėja, todėl dėl mažesnio paviršiaus ploto juos veikia intensyvesnis šilumos srauto tankis.



3.16 pav. Iš dujų paimamo konvekcinės šilumos srauto tankio kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 450 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_0 = 40$ °C; $2R = 110$ μm ; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s

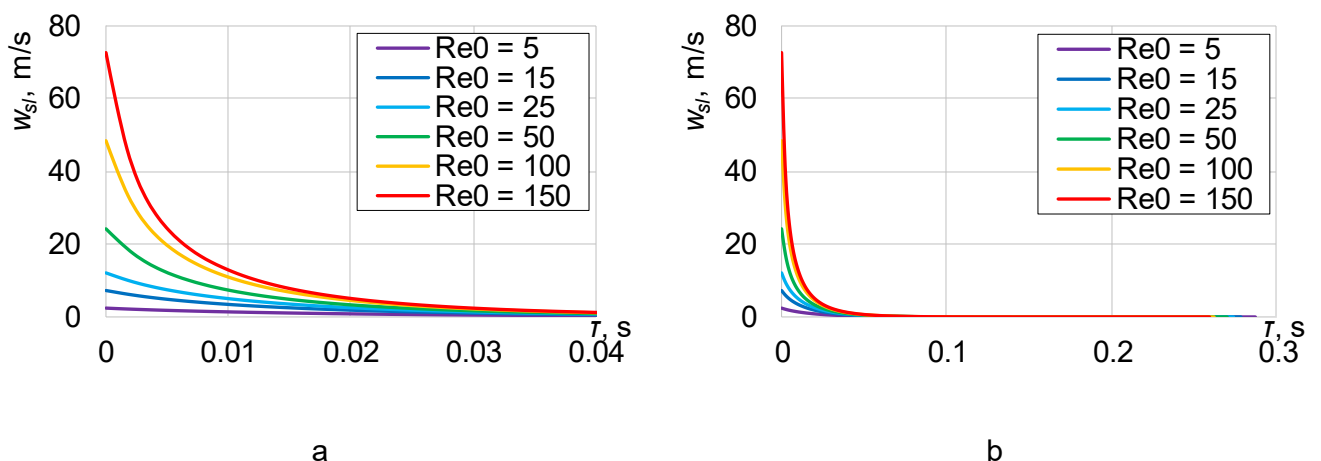
Šilumos mainų intensyvumą gerai atspindi Nu skaičius, įvertinantis, kiek kartų šilumos mainai konvekcijos būdu yra intensyvesni nei kondukcinės pernašos (žr. 3.17 pav.). FVRC pradžioje matoma akivaizdi priverstinės konvekcijos įtaka, kuri gali suintensyvinti šiluminius mainus net iki 5 kartų, palyginti su savaimine konvekcija šiomis sąlygomis, kai lašelio pradinis Re skaičius – 150. Tiesa, stipresnė konvekcija greičiau slopsta ir jau po 0,08 s

tampa vienodo stiprumo visais tiriamais Re_0 atvejais. Praėjus 0,14 s nuo FVRC pradžios, priverstinė konvekcija išnyksta ir šilumos mainai tarp lašelio vyksta savaiminės konvekcijos, kuri yra 1,735 karto intensyvesnė nei kondukcinė šilumos pernaša, būdu.



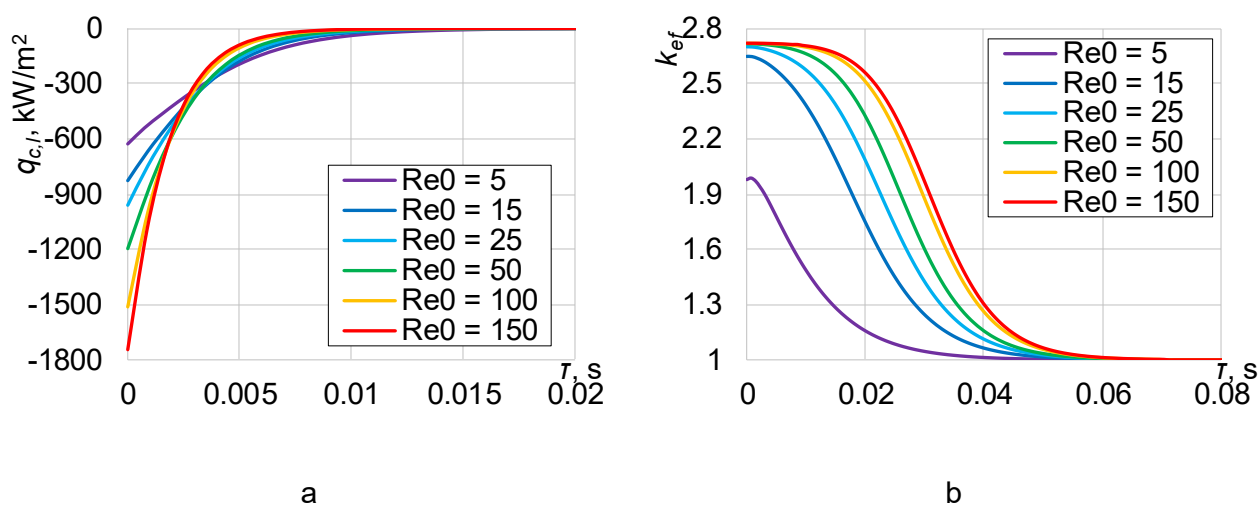
3.17 pav. Nuselto skaičiaus kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 450 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_{i0} = 40$ °C; $2R = 110$ μm ; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s

Intensyvesnių šilumos mainų FVRC pradžioje priežastis – didesnis lašelio slydimo greitis. 3.18 pav. rodo, kad lašelio slydimo greičio kitimas yra analogiškas Nu skaičiaus kitimui. $Re_0 = 150$ lemia 72,6 m/s pradinį slydimo greitį, o $Re_0 = 100$ – 48,4 m/s, $Re_0 = 50$ – 24,2 m/s, $Re_0 = 25$ – 12,1 m/s, $Re_0 = 15$ – 7,3 m/s, $Re_0 = 5$ – 2,4 m/s. Didesni slydimo greičiai mažėja gerokai sparčiau ir vos po 0,08 s, kaip ir Nu skaičius kitimo atveju, skirtumas tarp skirtingų slydimo greičių beveik išnyksta. To priežastis – aerodinaminės trinties jėga, kuri nusako lašelio lėtėjimo pagreitį. Kadangi jos stiprumas priklauso nuo greičio, pakelto kvadratu, tad dideliu greičiu judančius lašelį veikia gerokai didesnis lėtėjimo pagreitis. Po 0,14 s lašeliai pradeda judėti tokiu pat greičiu kaip ir dujos.



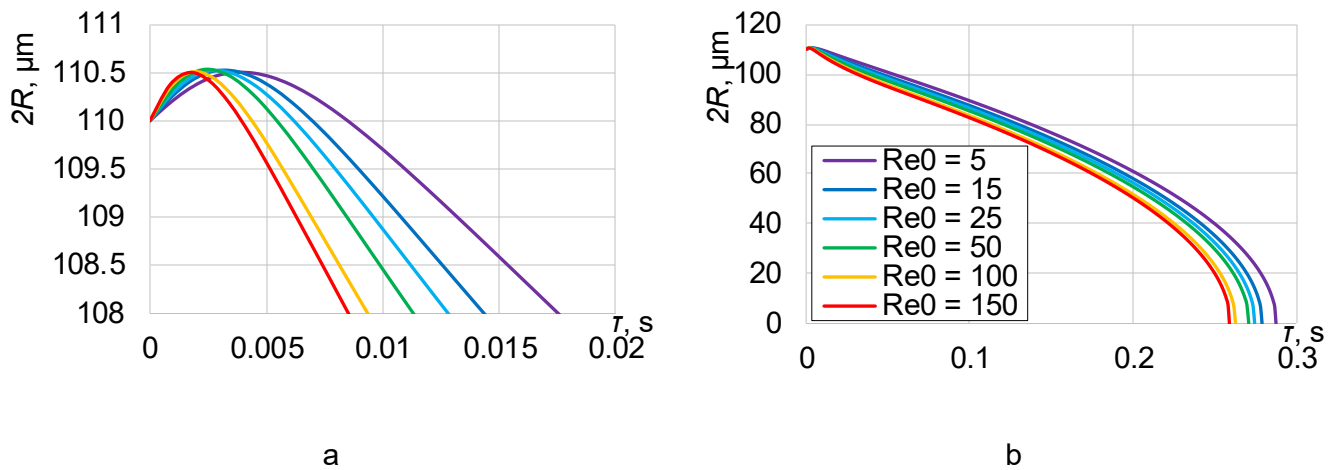
3.18 pav. Lašelio slydimo greičio kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 450 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_{i0} = 40$ °C; $2R = 110$ μm ; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s

Didesnis slydimo greitis taip pat lemia ir intensyvesnius šilumos mainus lašelio viduje (žr. 3.19 pav. a). Kai lašelis dujų atžvilgiu juda dideliu greičiu, dėl dujų ir vandens trinties lašelio viduje formuojasi sūkuriai, kurie kuria vandens cirkuliaciją, lemiančią priverstinę konvekciją. 3.19 pav. b matyti, kad k_{ef} koreliuoja su lašelio slydimo greičiu, tačiau koreliacija – nėra tiesinė. Šiomis kraštinėmis sąlygomis priverstinė konvekcija gali suintensyvinti šilumos mainus lašelio viduje iki 2,72 karto. Tai nutinka tuomet, kai lašelio ir dujų greičių skirtumas didesnis nei 21 m/s. Tiesa, pereinamojo garavimo režimas, kada lašelis šyla, trunka trumpiau nei laikotarpis, kol lašelis lėtėja. Kai lašelio $Re_0 \geq 100$, laikas, kada k_{ef} būna pasiekęs maksimalią reikšmę, yra ilgesnis nei pereinamojo garavimo režimas, tad didesnė pradinio Reinoldso skaičiaus vertė neduoda jokios ženklios naudos lašelio konvekciniam šildymui.



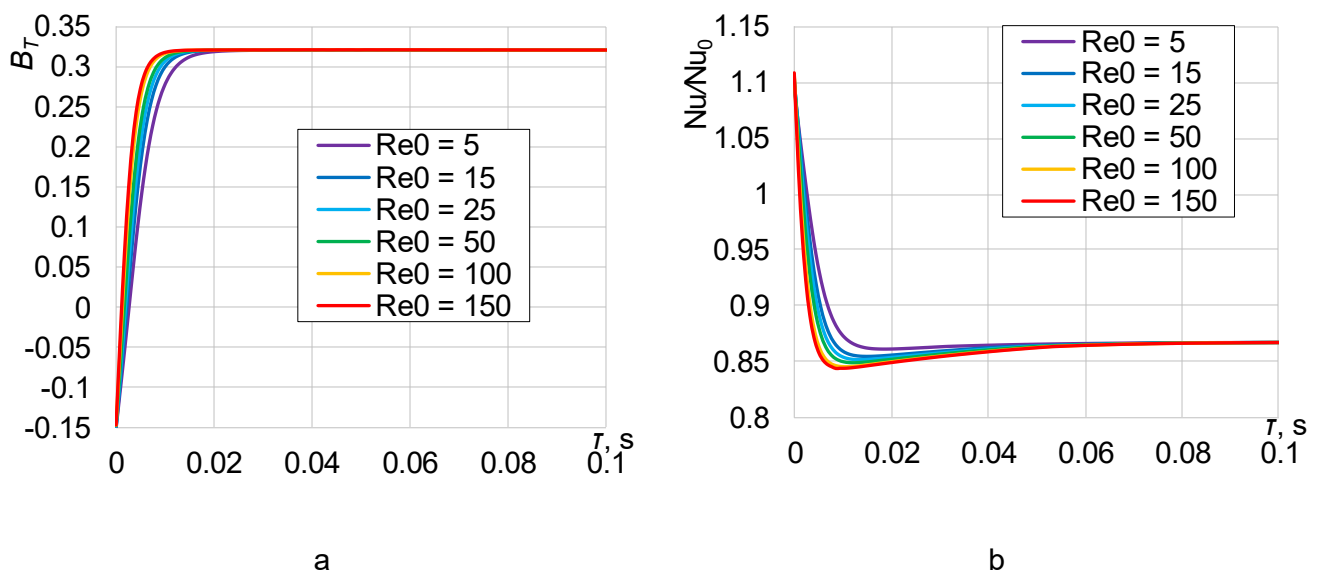
3.19 pav. Konvekcinio šilumos srauto tankio lašelio viduje kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 450 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_0 = 40$ °C; $2R = 110$ μm ; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s

Nors aplink didesniu greičiu įpurkštus lašelius kondensacija vyksta intensyviau, jų skersmuo padidėja tiek pat, kiek ir kitų, mažesniu greičiu įpurkštų lašelių – iki 110,5 μm , nes jų kondensacinis režimas vyksta trumpiau (žr. 3.20 pav.). Vėlesnėse ciklo stadijose skersmens kitimo tendencija išlieka panaši visais įpurškimo atvejais. Dėl ilgesnės kondensacinio ir pereinamojo garavimo režimų trukmės mažesniu greičiu įpurkštų lašelių skersmuo pradeda mažėti vėliau. FVRC pradžioje taip pat galima pamatyti ir kiek staigesnį jų skersmens mažėjimą, kadangi jų garo srauto pikas didesnis. Lašeliai, kurių pradinis Re skaičius nedidelis ($Re_0 = 5$) visiškai išgaruoja per 0,288 s, o lašeliai, kurių $Re_0 = 150$, – per 0.259 s, tad jų FVRC trunka 0,029 s arba 10 % trumpiau.



3.20 pav. Lašelio skersmens kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 450 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_{i0} = 40$ °C; $2R = 110$ μm; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s

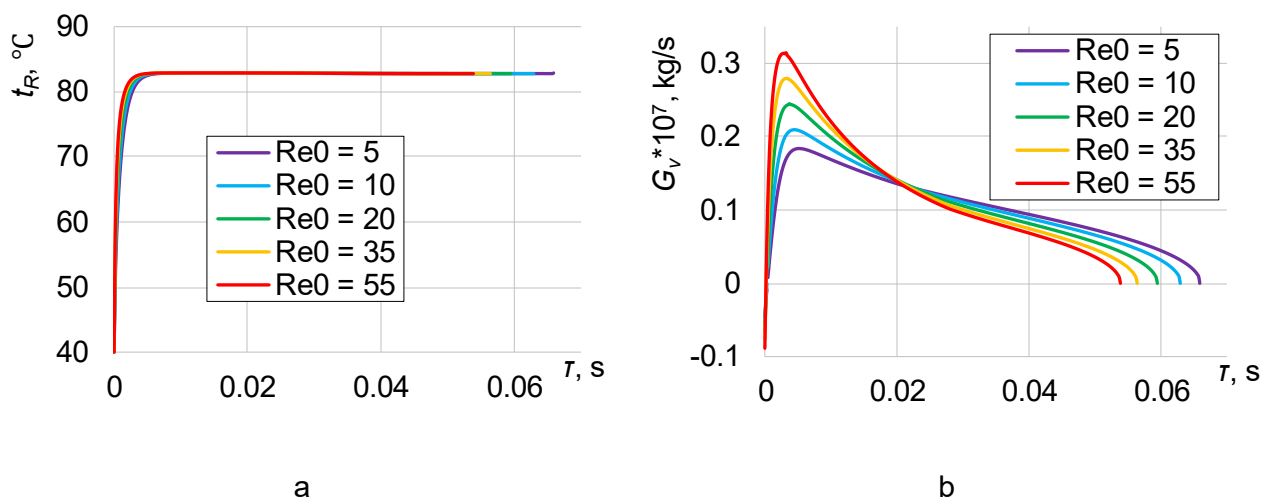
Šiluminio Spoldingo parametro, nusakančio Stefano srauto įtaką, kitimo grafikas, pavaizduotas 3.21 pav. a, rodo, kad kitimo tendencija yra panaši, nepriklausomai nuo lašelio pradinio Re_0 skaičiaus. Tiesa, BT reikšmė nusistovi kiek greičiau, kai lašelių Re_0 didesnis, nes jų pereinamojo garavimo režimas baigiasi greičiau. Žvelgiant į Stefano srauto poveikį šilumos mainams, matyti, kad kondensacinio režimo metu šilumos mainai suintensyvinami apie 10 %, o vėliau, garavimui pasiekus pikinę reikšmę, Stefano srautas slopina mainus nuo 14,5 % ($Re_0 = 5$ lašeliui) iki 15,6 % ($Re_0 = 150$ lašeliui). Šilumos mainai slopsta staigiau, kai lašelių pradinis slydimo greitis didesnis, nes jie savo garavimo piką pasiekia greičiau. Taip pat dėl didesnio pikinio garo srauto šilumos mainai tarp šių lašelių ir dujų nukenčia kiek labiau. Vėlesnėse FVRC stadijose šilumos mainų slopinimas nusistovi ties maždaug 13,3 % (žr. 3.21 pav. b)



3.21 pav. Šiluminio Spoldingo parametro (a) ir Nu santykio su Nu_0 , kai Stefano srauto įtaka nėra vertinama (b) kitimas viso FVR ciklo metu, kai lašelis garuoja 450 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_{i0} = 40$ °C; $2R = 110$ μm; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s

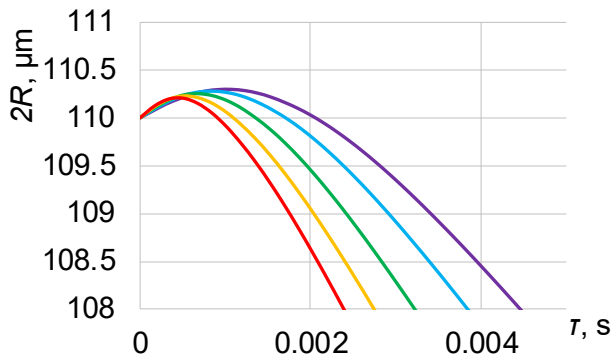
3.2.2. Skirtingų lašelių įpurškimo greičių įtaka, lašeliams garuojant 1300 °C temperatūros dujose

Aukštesnės temperatūros dujose garuojančių lašelių pusiausvirojo garavimo temperatūra padidėja iki 82,9 °C. Kaip ir žemesnės temperatūros dujose, taip ir čia ryškesnių paviršiaus temperatūros kitimų skirtumų galima pamatyti tik ciklo pradžioje – lašeliai, kurių pradinis Reinoldso skaičius didesnis, įšyla greičiau (žr. 3.22 pav. a). Garo srauto kitimo grafikas, pavaizduotas 3.22 pav. b, rodo, kad kondensacinis režimas šiomis kraštinėmis sąlygomis irgi vyksta visiems lašeliams, nepriklausomai nuo jų pradinio Reinoldso skaičiaus reikšmės. Intensyvesnę kondensaciją patiria lašeliai, kurių Re_0 didesnis. Tačiau, kondensato srautas į lašelį ima iš karto mažėti, o po kelių dešimtųjų milisekundės dalių, kai lašelių paviršius pašyla iki 57,5 °C, prasideda pereinamojo garavimo režimas: garo srautas ima augti, kol pasiekia savo piką. Po to garo srautas ima mažėti, nes mažėja ir garuojančio lašelio paviršiaus plotas. Pagrindinis skirtumas išlieka tas, kad didesniu greičiu judančių lašelių garo srautas kinta staigiau ir pikinės reikšmės būna didesnės.

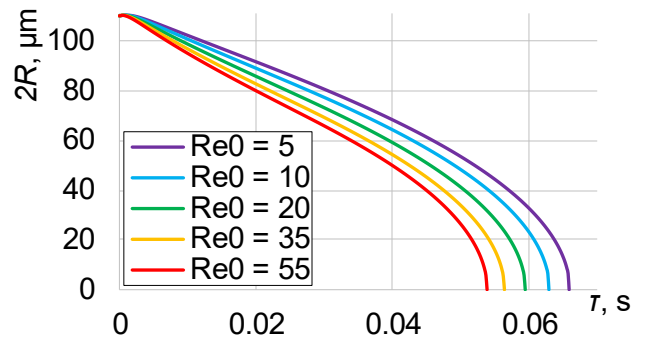


3.22 pav. Lašelio paviršiaus temperatūros (a) ir garo srauto (b) kitimas viso FVR ciklo metu, kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_0 = 40$ °C; $2R = 110$ μm ; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s

Nors aplink didesniu greičiu įpurštus lašelius kondensacija vyksta intensyviau, jų skersmuo padidėja mažiau, kadangi jiems kondensacinis režimas vyksta trumpiau. Vėlesnėse ciklo stadijose skersmens kitimo tendencija išlieka panaši visais įpurškimo atvejais, tačiau mažesniu greičiu įpurštų lašelių skersmuo pradeda mažėti vėliau (žr. 3.23 pav.). To priežastis – ilgesni kondensacijos ir pereinamojo garavimo režimai. Nors žvelgiant į visą ciklą, jie trunka labai trumpai, jų įtaka itin reikšminga. Lašeliai, kurių pradinis Re skaičius nedidelis ($Re_0 = 5$) visiškai išgaruoja per 0,0659 s, o lašeliai, kurių $Re_0 = 55$, vos per 0,0539 s, tad jų FVRC trunka 18,2 % trumpiau.



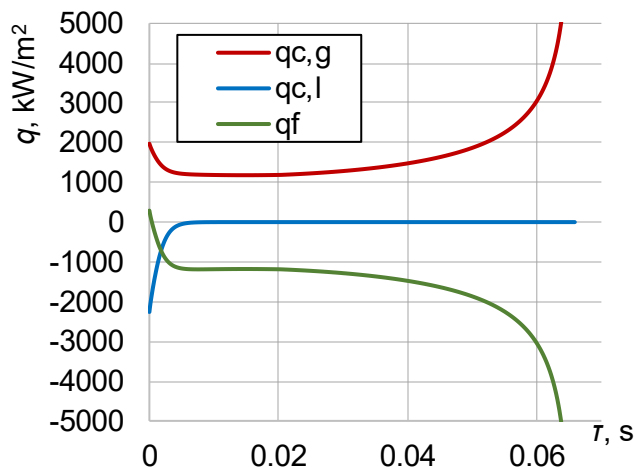
a



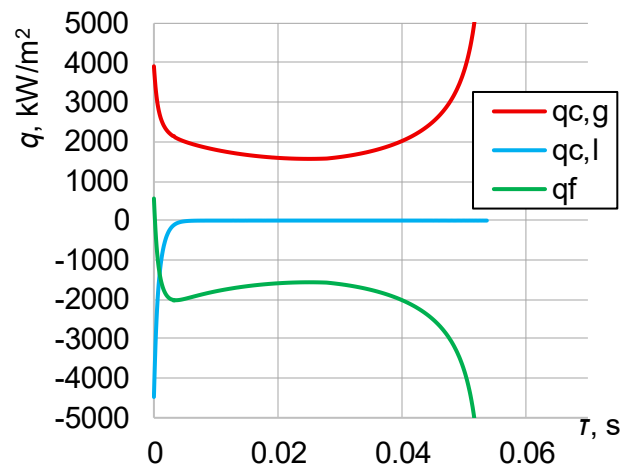
b

3.23 pav. Lašelio skersmens kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_0 = 40$ °C; $2R = 110$ μm ; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s

Nagrinėdami konvekcinį ir fazinį virsmų šilumos srautų kitimą ciklo metu, galime pamatyti, kad ciklo pradžioje šilumos mainai tarp dujų ir lašelio yra maždaug 2 kartus intensyvesni, kai lašelio $Re_0 = 55$, nei tuo atveju, kai jo $Re_0 = 5$ (žr. 3.24 pav.). Tai paaiškina, kodėl garo srautas kinta staigiau.



a

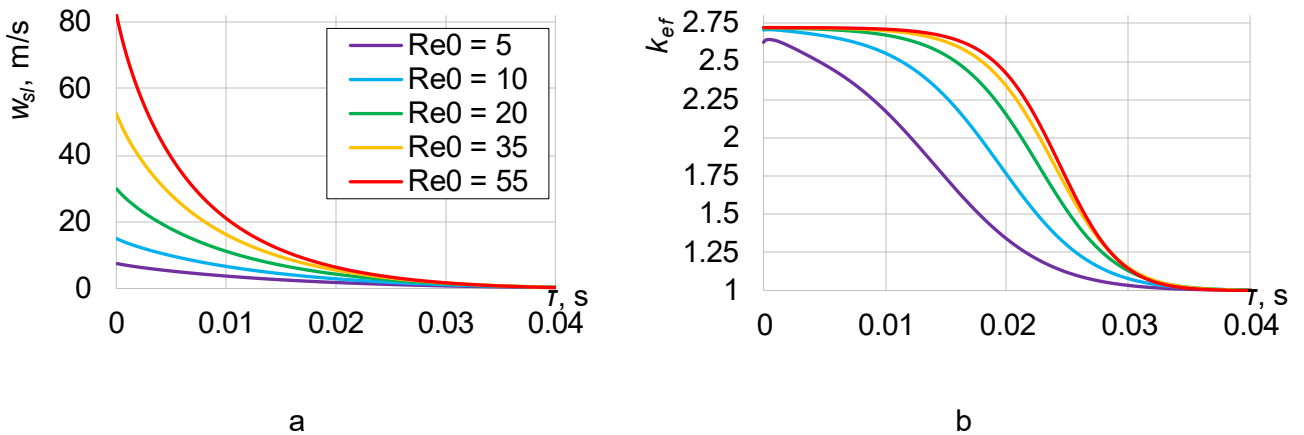


b

3.24 pav. Lašelio, kurių pradinis Re 5 (a) ir 55 (b) šilumos srautų kitimas viso FVR ciklo metu, kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_0 = 40$ °C; $2R = 110$ μm ; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s

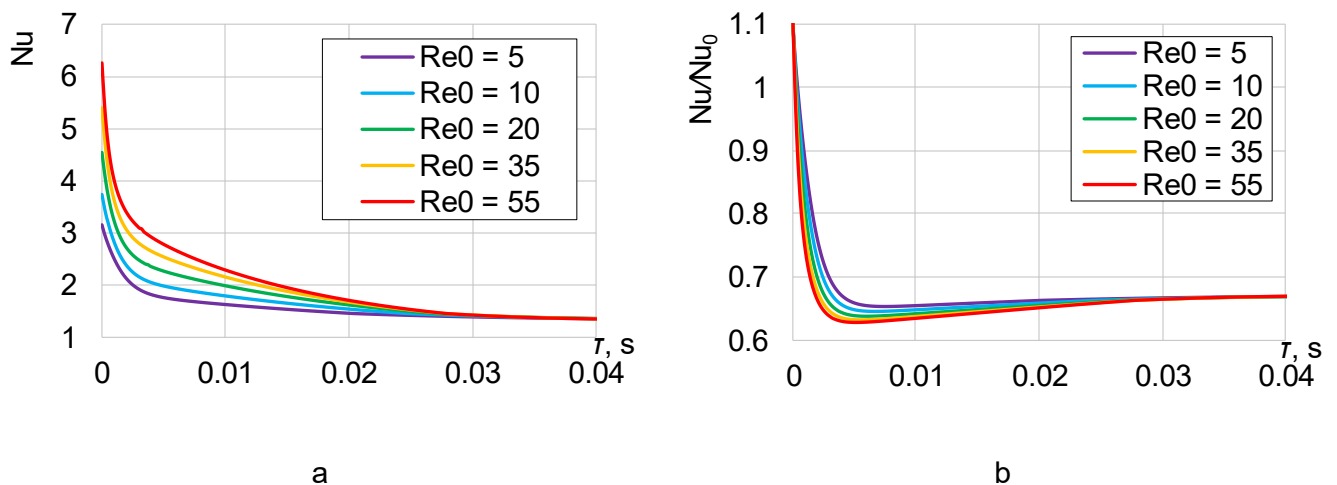
3.25 pav. rodo, kad efektyviojo šilumos laidumo koeficientas, kuriuo išreiškiama priverstinės konvekcijos įtaka lašelio viduje, glaudžiai koreliuoja su lašelio slydimo greičiu. Nė vienu iš tiriamų atvejų efektyviojo laidumo koeficientas neviršijo 2,72. Tai rodo ribą, iki kurios priverstinė konvekcija gali suintensyvinti šilumos mainus. Ši riba yra pasiekama, kai lašeliai dujų atžvilgiu juda didesniu nei 14 m/s greičiu. Kai lašeliai pradeda judėti lėčiau, kef reikšmė ima mažėti, kol lašelio ir dujų greičiai susilygina ($w_{sl} = 0$) ir priverstinė konvekcija išnyksta (kef tampa lygus 1). Vienintelis privalumas lašeliams turėti didesnę nei 14 m/s slydimo greitį

yra tas, kad juose šilumos mainai vyksta intensyviau ilgesnį laiką (kol jų slydimo greitis tampa mažesnis nei 14 m/s). Tiesa, didesniu greičiu įpurkšti lašeliai dėl stipresnio aerodinaminio pasipriešinimo lėtėja gerokai sparčiau.



3.25 pav. Lašelio slydimo greičio (a) ir efektyviojo šilumos laidumo koeficiento (b) kitimas viso FVR ciklo metu, kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_0 = 40$ °C; $2R = 110$ μ m; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s

Nuselto skaičiaus, kitimo grafikas rodo, kad aukštesnės temperatūros dujose garuojantiems lašeliams, kurių $Re_0 = 5$, priverstinė konvekcija gali suintensyvinti šilumos mainus iki 2,35 karto, lyginant su savaimine konvekcija. Tuo tarpu kai lašelio $Re_0 = 55$, šilumos mainai tarp dujų ir lašelio suintensyvinami 4,66 karto (žr. 3.26 pav. a). Nagrinėjant Stefano srauto poveikį šilumos mainams, matyti, kad kondensacinio režimo metu šilumos mainai suintensyvėja apie 10 %, o vėliau, garavimui pasiekus pikinę reikšmę, Stefano srautas slopina mainus nuo 35 % (esant $Re_0 = 5$ lašeliui) iki 37 % (esant $Re_0 = 55$ lašeliui). Šilumos mainai staigiau slopsta, kai lašelių pradinis slydimo greitis didesnis, nes jie savo garavimo piką pasiekia greičiau. Taip pat dėl didesnio pikinio garo srauto šilumos mainai tarp lašelių ir dujų nukenčia kiek labiau. Vėlesnėse FVRC stadijose šilumos mainų slopinimas nusistovi ties maždaug 33 % (žr. 3.26 pav. b).



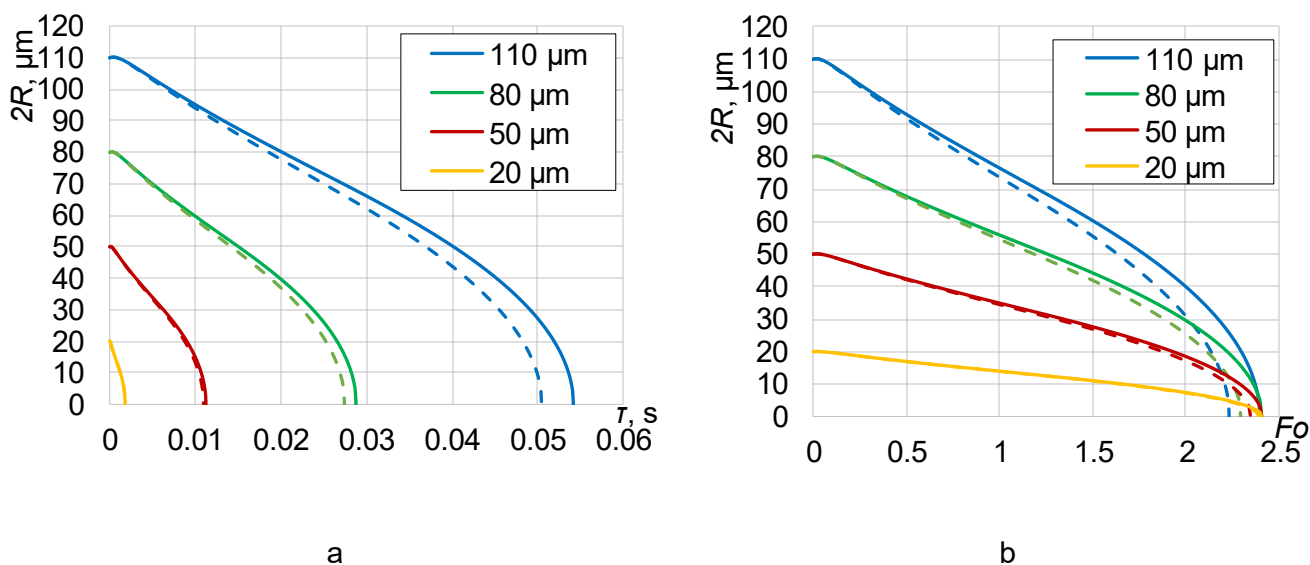
3.26 pav. Nu skaičiaus (a) ir Nu santykio su Nu_0 , kai Stefano srauto įtaka nėra vertinama (b) kitimas viso FVR ciklo metu, kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_0 = 40$ °C; $2R = 110$ μ m; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s

Apibendrinant, didesnis lašelio pradinis Reinoldso skaičius daro akivaizdžią įtaką dinaminiam FVRC parametrui, kurie lemia gerokai intensyvesnius šilumos mainus tiek tarp lašelio ir dujų, tiek ir lašelio viduje. Garavimui vykstant 450 °C dujose, lašeliai kurių $Re_0 = 150$ išgaruoja 10 % greičiau nei lašeliai, kurių $Re_0 = 5$. O 1300 °C dujose lašelių, kurių $Re_0 = 55$, fazinių virsmų režimo ciklas trunka net 18,2 % trumpiau nei lašelių, kurių $Re_0 = 5$. Tai rodo, kad pradinio Reinoldso skaičius įtaka yra didesnė aukštesnės temperatūros dujose.

3.3. Lašelio dydžio įtaka fazinių virsmų režimų ciklui

Tarpusavyje lyginant skirtingo dydžio lašelių fazinių virsmų režimų ciklus, visų pirma į akis krinta ženklūs ciklų trukmių skirtumai. Akivaizdu, kad mažesni lašeliai išgaruos greičiau nei didesni, kadangi jų tūris mažesnis. Tą patvirtina 3.27 pav. a., kuris rodo, kad šiomis kraštinėmis sąlygomis, 110 μm pradinio skersmens lašelis visiškai išgaruoja per 0,0542 s, 80 μm lašelis – per 0,0288 s, 50 μm lašelis – per 0,0109 s, o 20 μm lašelis – vos per 0,0018 s. Analizuojant spinduliavimo įtaką lašelių skersmens kitimui, galima pastebėti, kad ji gerokai stipresnė didesnio pradinio skersmens lašeliams. Įvertinus spinduliavimo įtaką 110 μm pradinio skersmens lašeliui paaiškėjo, kad jo FVRC trukmė sutrumpėja iki 0,0504 s (6,86 % trumpesnis), o lašeliui, kurio pradinis skersmuo 20 μm, spinduliavimas ženklios įtakos nedaro, kadangi įvertinus spinduliavimą gaunamas vos 0,62 % trumpesnis FVRC (žr. 8 lentelę).

Kadangi skirtumai tarp lašelių ciklų trukmės labai dideli, lyginti skirtingų pradinių dydžių lašelių FVRC parametrus sekundinėje laiko skalėje nepatogu. Dėl to parametrus palyginti naudojama Furjė laiko skalė, kurioje parametru kitimas yra stebimas ne pagal praėjusias sekundes, o pagal bedimensinį Fo skaičių, nusakantį laidumų perduodamos šilumos kiekio santykį su jos absorbcija. Ši skalė leidžia suvienodinti FVRC trukmę. Kaip matome 3.27 pav. b, visų lašelių (nevertinant spinduliavimo) FVRC baigiasi, kai $Fo = 2,39$.

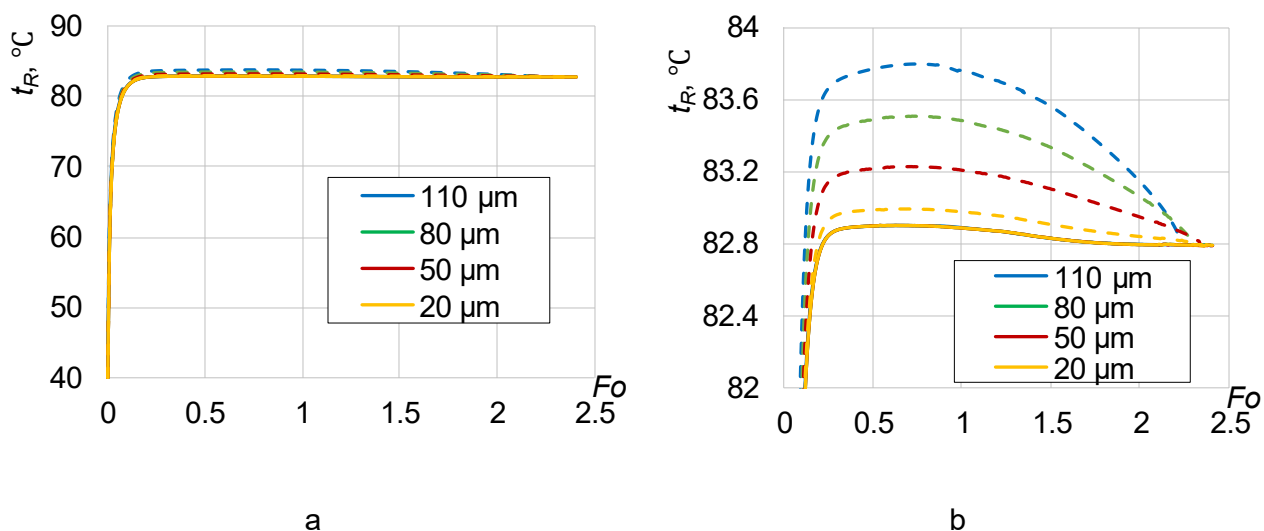


3.27 pav. Lašelio skersmens kitimas sekundinėje laiko skalėje (a) ir Furjė skalėje(b), kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_0 = 40$ °C; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s. Išsitiesinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas

8 lentelė. Pradinio lašelio skersmens įtaka fazinių virsmų režimų ciklo trukmei

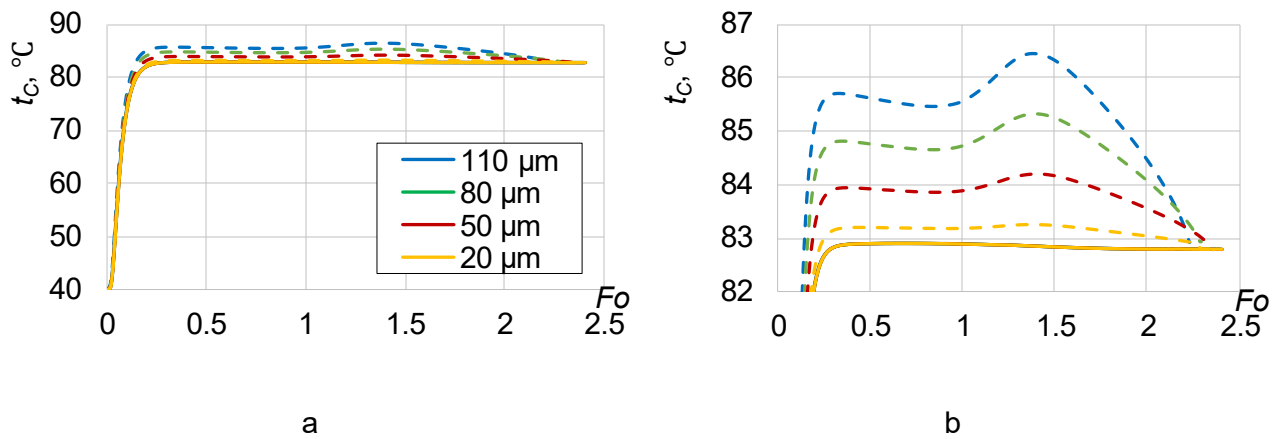
Pradinis lašelio skersmuo	Ciklo trukmė, kai nevertinama spinduliavimo įtaka, s	Ciklo trukmė, kai vertinama spinduliavimo įtaka, s	Absoliutus skirtumas, s	Santykinis FVRC sutrumpėjimas įvertinus spinduliavimą
20	0,001798	0,001786	0,0000112	0,62%
50	0,011235	0,010955	0,00028	2,49%
80	0,028761	0,027417	0,001344	4,67%
110	0,054151	0,050435	0,003715	6,86%

Žvelgiant į lašelių paviršiaus temperatūros kitimą, pavaizduotą 3.28 pav., matyti, kad visų dydžių lašelių paviršius temperatūra konvekcinio šildymo atveju Fo skalėje kinta visiškai analogiškai ir pasiekia 82,9 °C. Tačiau, įvertinus spinduliavimą, matyti, kad paviršiaus temperatūra kinta nevienodai – didesnių lašelių paviršius įšyla labiau. 110 μm pradinio skersmens lašelio paviršius pasiekia 83,8 °C, 80 μm – 83,5 °C, 50 μm – 83,2 °C, o 20 μm – tik 83 °C temperatūrą.



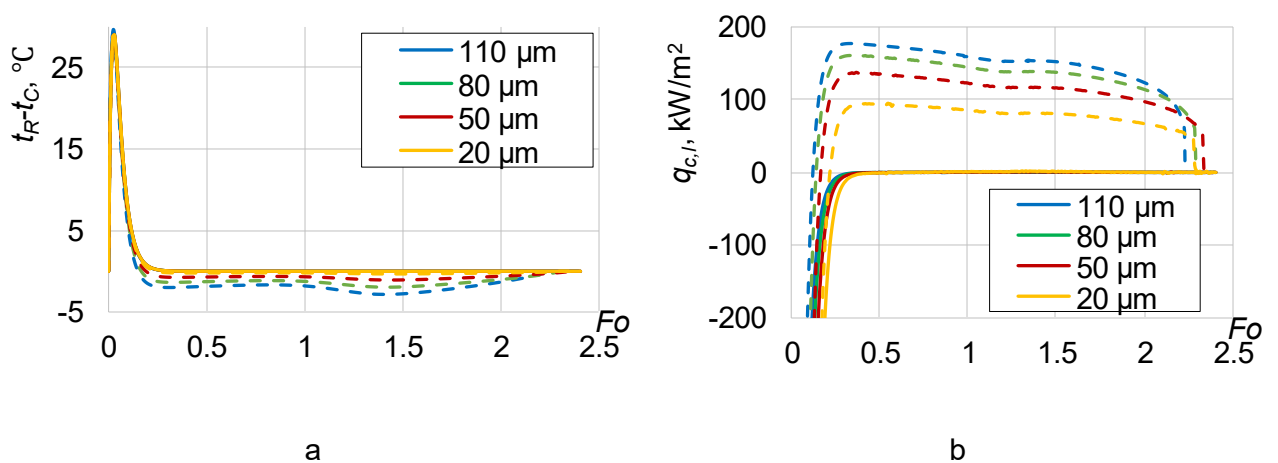
3.28 pav. Lašelio paviršiaus temperatūros kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_{i0} = 40$ °C; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s. Ištinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas

Lašelio centro temperatūros kitimo grafikas (žr. 3.29 pav.) rodo, kad nors konvekcinio šildymo atveju lašelio centro temperatūra pasiekia analogišką reikšmę kaip ir paviršiaus, tik jo pokyčiai įvyksta kiek vėliau. Tačiau spinduliavimo atveju lašelių centras gali pasiekti net iki 2,7 °C aukštesnę temperatūrą.



3.29 pav. Lašelio centro temperatūros kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_{i0} = 40$ °C; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s. Išsistinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas

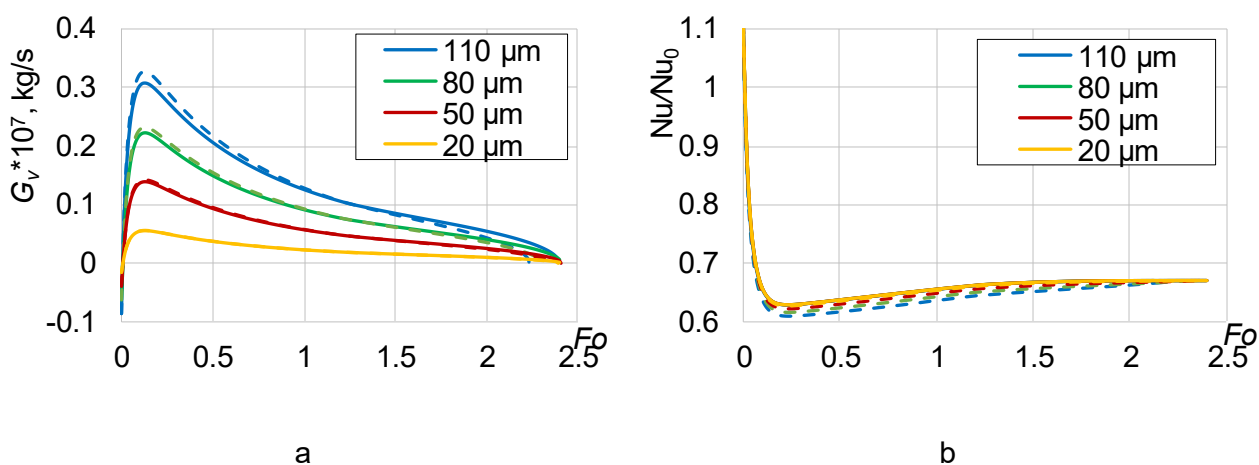
Temperatūrų skirtumas tarp lašelio paviršiaus ir centro lemia neizotermiškumą lašelyje pusiausvirojo garavimo režimo metu (žr. 3.30 pav. a). Kadangi lašelis sugeria spinduliuotę visu savo tūriu, temperatūra jame didėja, o dėl mažesnės pusiausvirojo garavimo temperatūros šiluma ima plisti nuo jo centro link paviršiaus. Paviršiaus ir centro temperatūrų skirtumas pusiausvirojo garavimo režimo metu 110 μm pradinio skersmens lašelyje pasiekia iki 2,5 °C. Mažesnio skersmens lašeliuose skirtumas kiek mažesnis, o pačiame mažiausiame iš tiriamų lašelių (20 μm) – vos 0,3 °C. Šie temperatūrų skirtumai sukelia konvekcinius šilumos mainus lašelio viduje (žr. 3.30 pav. b), tad konvecinė šilumos pernaša lašelyje spinduliavimo atveju vyksta viso FVRC metu. 110 μm pradinio skersmens lašelyje šio srauto tankis pusiausvirojo garavimo metu pasiekia iki 177 kW/m². Mažesniuose lašeliuose dėl mažesnio temperatūrų skirtumo šis srautas mažesnis, tačiau skirtumai ne tokie dideli kaip temperatūrų skirtumų, kadangi mažėjant skersmeniui, mažėja ir lašelio šiluminė varža.



3.30 pav. Lašelio paviršiaus ir centro temperatūrų skirtumo (a) ir konvecinės šilumos srauto lašelio viduje kitimas (b), kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_{i0} = 40$ °C; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s. Išsistinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas

Garų srauto kitimo FVRC metu grafikas (žr. 3.31 pav. a) rodo, kad spinduliavimas didesnę įtaką daro dideliems lašeliams. 110 μm pradinio skersmens lašelio garų srauto pikinė reikšmė, esant spindulinei šilumos pernašai, padidėja per maždaug 6 %, ir nors 80 μm pradinio skersmens lašelio atveju ji vis dar ženkli – 4 %, tačiau 20 μm lašelio atveju, garų srauto padidėjimas tesiekia vos 0,6 %. Spinduliavimo įtaka Stefano srautui nedidelė ir jis taip pat labiau veikia didesnius lašelius. Įvertinus spinduliavimą, nustatyta, kad Stefano srautas pusiausvirojo garavimo metu slopina šilumos mainus 110 μm pradinio skersmens lašeliui 39 % – 1,9 % labiau nei tik konvekcinio šildymo atveju. Tuo tarpu 20 μm pradinio skersmens lašeliui spinduliavimas lemia tik 0,2 % susilpnėjusius šilumos mainus (žr. 3.31 pav. b).

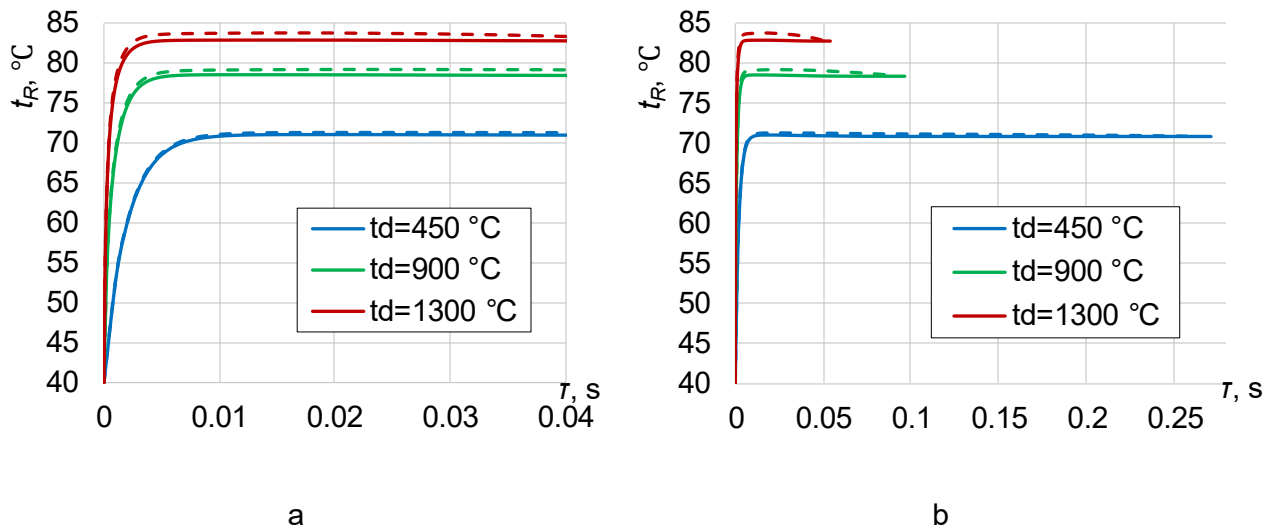
Apibendrinant, nors lašelio dydis konvekcinio šildymo atveju ir nedaro įtakos terminiams FVRC parametrų, tačiau įvertinus spinduliavimą, matyti, kad jo padaryti skirtumai – nevienodi. Spindulinė šilumos pernaša kur kas reikšmingesnė didesniems lašeliams. Kadangi jie sugeria spinduliuotę visu savo tūriu, spindulinė šilumos pernaša turi didesnę įtaką jų paviršiaus ir centro temperatūroms, dėl kurių skirtumo atsiranda konvekcija lašelyje ir pusiausvirojo garavimo režimo metu. 110 μm pradinio skersmens lašeliams garuojant 1300 °C dujose, spinduliavimas gali lemti iki 6,86 % FVRC trukmės skirtumą, kai tuo tarpu 20 μm pradinio skersmens lašeliams – vos 0,62 %



3.31 pav. Garų srauto (a) ir Nu santykio su Nu_0 , kai nevertinama Stefano srauto įtaka (b), kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujų sraute. $X_v = 0,18$; $t_{i0} = 40$ °C; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s. Išsitiesinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas

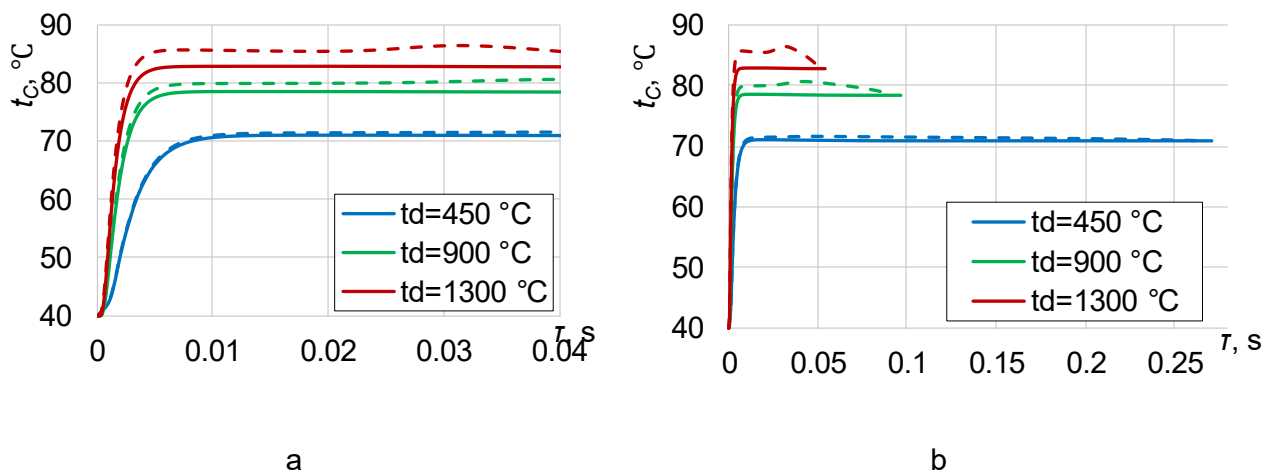
3.4. Dujų temperatūros įtaka fazinių virsmų režimų ciklui

Dujų temperatūra daro didelę tiesioginę įtaką lašelių garavimui, nes šilumos perdavimas yra tiesiogiai proporcingas temperatūrų skirtumui. Tai labai gerai atsispindi lašelio paviršiaus temperatūros kitimo grafikuose (žr. 3.32 pav.). Karštesnėse dujose garuojančių lašelių paviršius įšyla gerokai greičiau ir pasiekia aukštesnę temperatūrą – 1300 °C dujose garuojantis lašelis konvekcinio šildymo atveju pasiekia 82,9 °C temperatūrą, garuojantis 900 °C dujose – 78,6 °C, o 450 °C – tik 71 °C. Įvertinus spinduliavimo įtaką, skirtumas tampa dar ženklesnis, nes temperatūrų skirtumas yra vienintelis spinduliavimo intensyvumą nusakantis kintamasis. Dėl spinduliavimo 1300 °C dujose garuojančio lašelio paviršiaus temperatūra pakyla iki 83,8 °C, 900 °C dujose – iki 79,2 °C, o 450 °C dujose tik iki 71,3 °C.



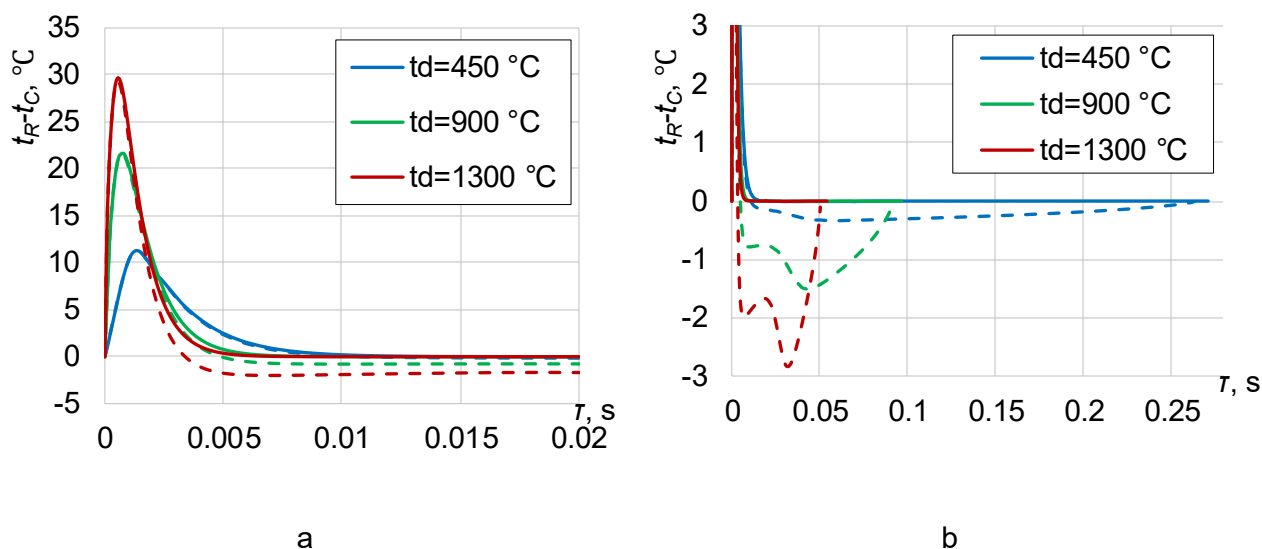
3.32 pav. Lašelio paviršiaus temperatūros kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja dujų sraute. $2R = 110 \mu\text{m}$; $X_v = 0,18$; $t_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$. Išsistinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas

Lašelio centro temperatūra kinta labai panašiai kaip ir paviršiaus (žr. 3.33 pav.). Pagrindinis skirtumas – centro temperatūra pakinta kiek vėliau. Nevertinant spinduliavimo, pusiausvirojo garavimo režimo metu lašelio centro temperatūra yra lygiai tokia pat kaip ir paviršiaus. Tiesa, įvertinus spinduliavimą galima pastebėti, kad lašelio centras pasiekia kiek aukštesnę temperatūrą – $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ pradinės temperatūros lašelyje centras pasiekia $85,5 \text{ }^\circ\text{C}$, o $900 \text{ }^\circ\text{C}$ pradinės temperatūros lašelyje – $80 \text{ }^\circ\text{C}$. O štai $450 \text{ }^\circ\text{C}$ pradinės temperatūros lašelyje skirtumas nežymus, jo centro temperatūra pasiekia $71,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (tik $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ padidėjimas, palyginti su atveju, kai spinduliavimo įtaka nevertinama).



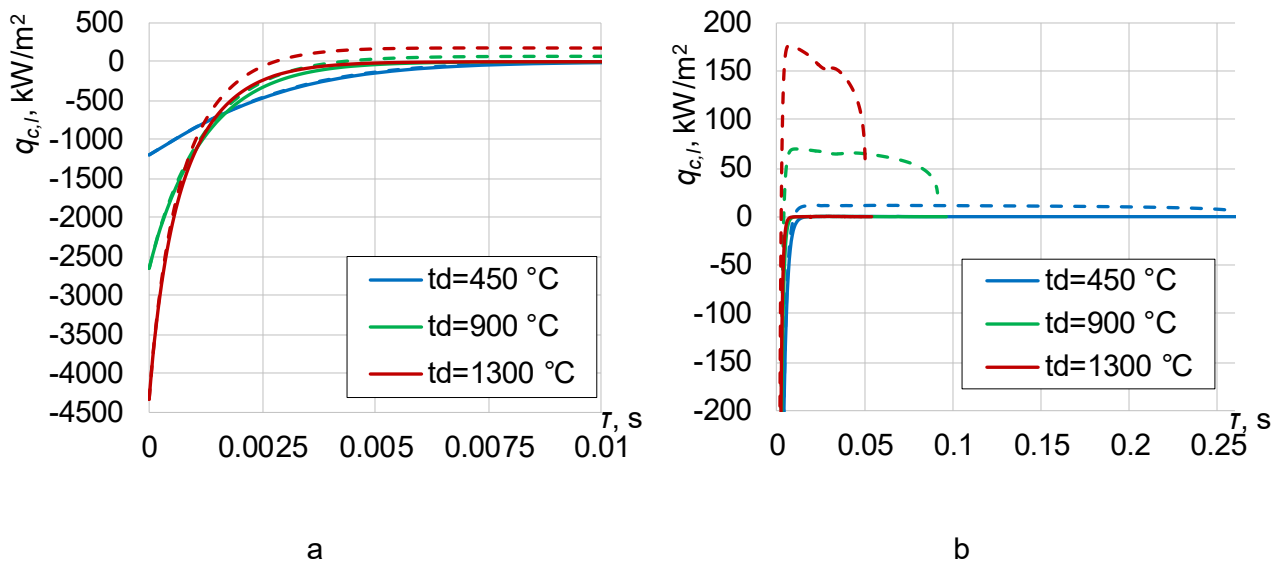
3.33 pav. Lašelio centro temperatūros kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja dujų sraute. $2R = 110 \mu\text{m}$; $X_v = 0,18$; $t_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$. Išsistinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas

3.34 pav., kuriame pateiktas lašelių paviršiaus ir centro temperatūrų skirtumo kitimas, rodo, kad FVRC pradžioje temperatūrų skirtumas yra teigiamas. Vadinasi, lašelis šyla. Aukštesnės temperatūros dujose pasiekiamas didesnis temperatūrų skirtumas. Konvekcinio šildymo atveju temperatūrų skirtumas išnyksta, kai prasideda pusiausvirojo garavimo režimas, tad baigiasi ir šilumos mainai lašelio viduje. Tačiau, kai vertinama ne tik konvekinė, bet ir spindulinė šilumos pernaša, temperatūrų skirtumas pusiausvirojo garavimo režimo metu tampa neigiamas – tai rodo, kad šiluma pradeda plisti nuo lašelio centro paviršiaus link. Šiuo atveju temperatūrų skirtumas taip pat didesnis aukštesnės temperatūros dujose garuojančiuose lašeliuose. Esant pusiausvirojo garavimo režimui, 1300 °C lašelyje pasiekiamas iki 2,8 °C temperatūrų skirtumas, 900 °C dujose – iki 1,5 °C, o štai 450 °C dujose garuojančiame lašelyje šis skirtumas nežymus – vos 0,3 °C.



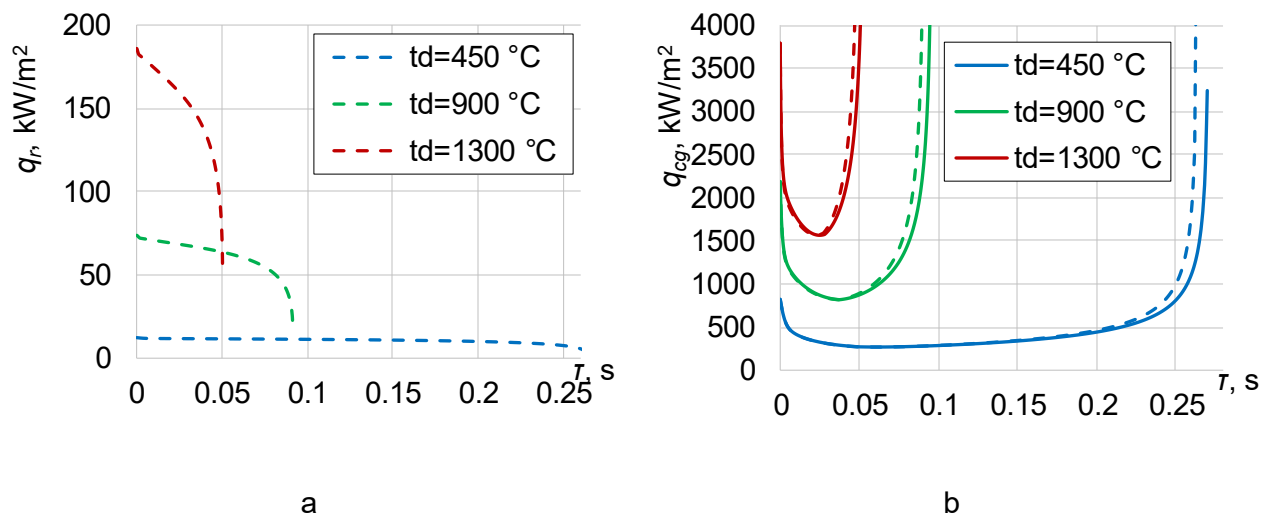
3.34 pav. Lašelio paviršiaus ir centro temperatūrų skirtumo kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja dujų sraute. $2R = 110 \mu\text{m}$; $X_v = 0,18$; $t_0 = 40$ °C; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1$ MPa, $w_d = 8$ m/s. Ištisinės linijos – konvecinis šildymas, punktyrinės – konvecinis ir spindulinis šildymas

Aukštesnis temperatūrų skirtumas lašelio viduje lemia intensyvesnius šilumos mainus (žr. 3.35 pav.). Taigi karštesnėse dujose garuojančiuose lašeliuose vyksta gerokai intensyvesnė konvekcija, tad pereinamojo garavimo režimas trunka trumpiau. Spinduliavimas ženklios įtakos konveciniams šilumos mainams pereinamojo garavimo režimo metu nedaro. Jo įtaka išryškėja pusiausvirojo garavimo režimo metu. Tuomet dėl lašelio sugertos spinduliuotės atsiradęs temperatūrų skirtumas priverčia šilumos srautą judėti link lašelio paviršiaus. Intensyvesnis šilumos srautas lašelyje būdingas karštesnėse dujose garuojančiam lašeliui.



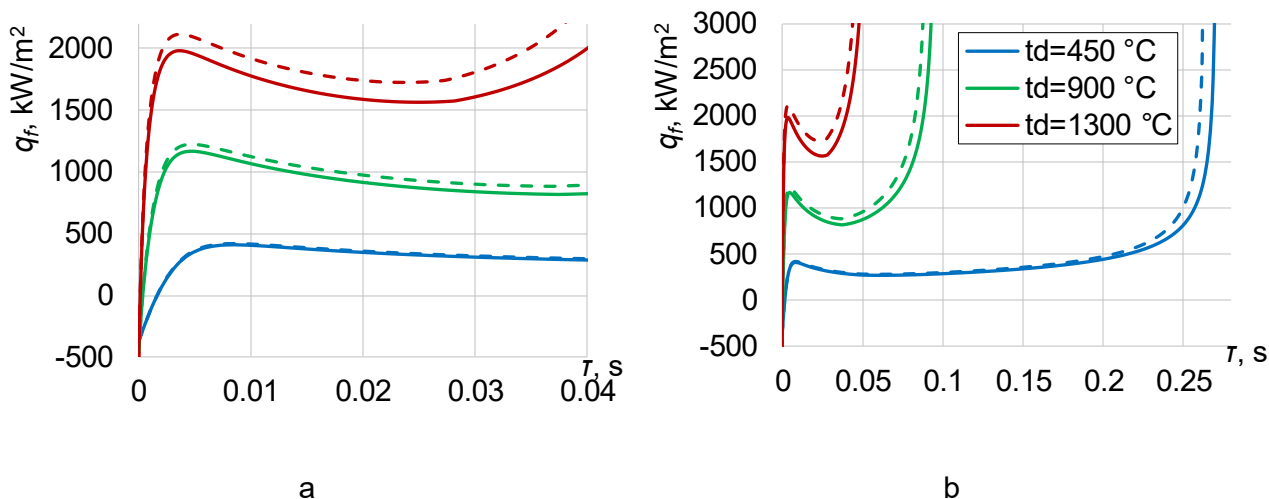
3.35 pav. Konvekcinio šilumos srauto tankio lašelio viduje kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja dujų sraute. $2R = 110 \mu\text{m}$; $X_v = 0,18$; $t_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$. Išsistinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas

Spinduliavimo būdu gaunamas šilumos srauto tankis, pavaizduotas 3.36 pav. a, pusiausvirojo garavimo metu koreliuoja su konvekcinio šilumos srauto tankiu lašelyje. Tiesa, pereinamojo garavimo režimo metu spinduliavimo šilumos srauto tankis yra labai nedidelis, palyginti su konvekcijos būdu iš dujų paimamu šilumos srauto tankiu, pavaizduotu 3.36 pav. b. Pačioje FVRC pradžioje konvekcinis šilumos srauto tankis yra net 20 kartų stipresnis lašeliui garuojant $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros dujose, 30 kartų, kai $t_d = 900 \text{ }^\circ\text{C}$, ir net 68 kartus, kai $t_d = 450 \text{ }^\circ\text{C}$. Vėlesnėse ciklo stadijose konvekcinis šildymas kiek prislopsta, tačiau vis tiek išlieka dešimtis kartų intensyvesnis už spinduliavimą.



3.36 pav. Lašelių sugeriamos spinduliuotės (a) ir iš dujų gaunamo konvekcinio šilumos srauto tankio (b) paviršiaus ir centro temperatūrų skirtumo kitimas, kai lašelis garuoja dujų sraute. $2R = 110 \mu\text{m}$; $X_v = 0,18$; $t_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$. Išsistinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas

Bendrą spinduliavimo ir konvekcinio šildymo įtaką gerai atspindi fazinių virsmų šilumos srauto tankis, pavaizduotas 3.37 pav. Pusiausvirojo garavimo režimo metu fazinių virsmų šilumos srauto tankis konvekcinio šildymo atveju sutampa su konvekciniu iš dujų paimamo šilumos srauto tankiu. 1300 °C dujose spinduliavimas lemia apie 150 kW/m² didesnę šilumos srautą, 900 °C dujose spinduliavimas šilumos srautą padidina tik apie 60 kW/m², o 450 °C dujose – vos apie 11,5 kW/m². Visais nagrinėjamais dujų temperatūrų atvejais vyksta kondensacinis režimas, kurio metu gaunamas šilumos srautas, kartu su spinduliavimo bei konvekcijos būdais iš dujų paimamais šilumos srautais naudojami lašeliui šildyti. Pereinamojo garavimo režimų metu dalis pastarųjų dviejų šilumos srautų naudojami tiek lašeliui šildyti, tiek jam garinti.

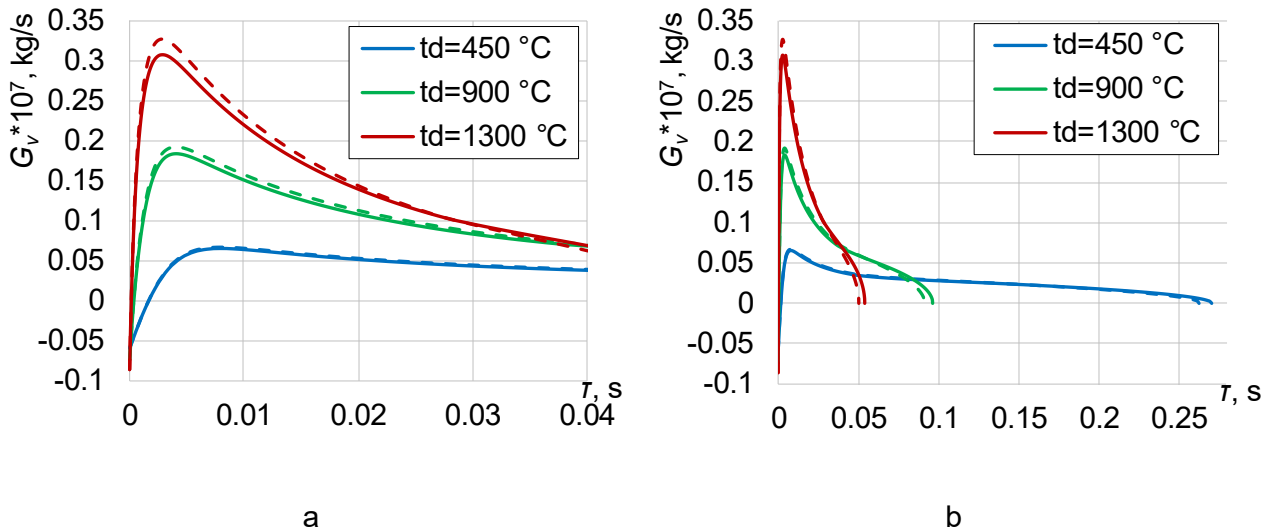


3.37 pav. Fazinių virsmų šilumos srauto tankio kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja dujų sraute. $2R = 110 \mu\text{m}$; $X_v = 0,18$; $t_{i0} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$. Iššisinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas

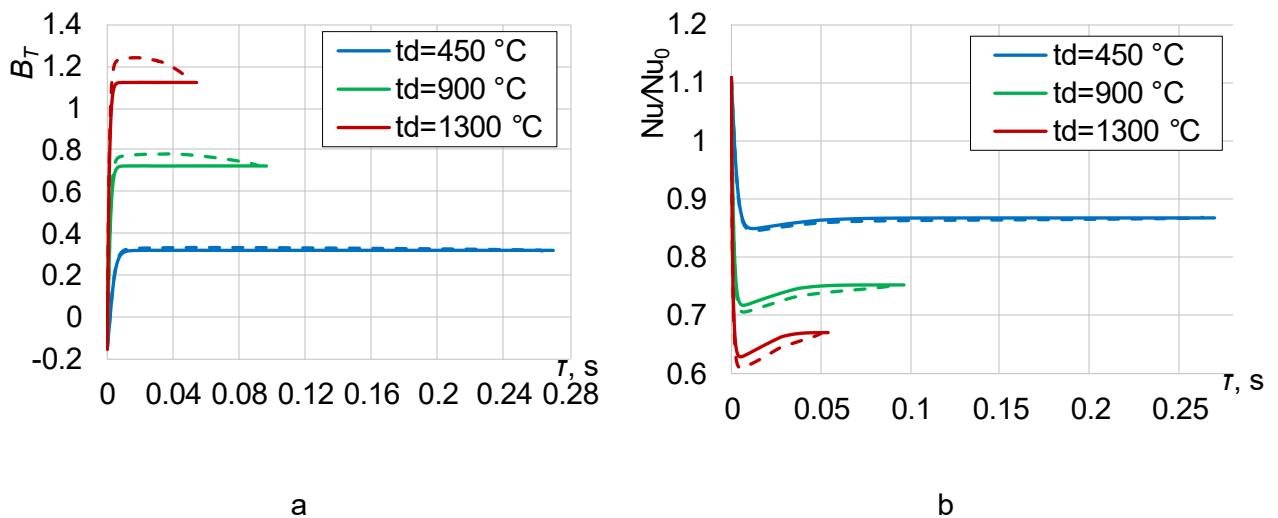
Spinduliavimo atveju kiek didesnis fazinių virsmų šilumos srauto tankis atsispindi ir garo srauto grafike (žr. 3.38 pav.). 1300 °C dujose spinduliavimas lemia 6,4 % intensyvesnę garavimą, 900 °C dujose – 4,6 %, o 450 °C dujose – vos 2,4 %. Apibendrinant, lašeliui garuojant aukštesnės temperatūros dujose, garo srautas gerokai didesnis, o jo kitimas – staigesnis.

Intensyvesnis garo srautas taip pat lemia ir didesnę Stefano srauto įtaką. Nedidelė šiluminio Spoldingo parametro reikšmė ($B_T = 0,33$), lašeliui garuojant 450 °C temperatūros dujose, rodo kad Stefano srautas nėra labai reikšmingas, tačiau, esant aukštesnei dujų temperatūrai, jo vertė ženkliai išauga: 900 °C temperatūros dujose iki 0,72, o 1300 °C dujose – net iki 1,12. Spinduliavimo atveju skirtumai dar ženklesni – 1300 °C temperatūros dujose Stefano srauto įtaka šilumos mainams gali padidėti iki 10 % (žr. 3.39 pav. a). Tai lemia gerokai silpnesnius šilumos mainus tarp lašelio ir dujų. Nu/Nu_0 kitimo grafikas (žr. 3.39 pav. b) rodo, kad FVRC vykstant 1300 °C dujose Stefano srautas gali slopinti šilumos mainus net iki 37,1 %, kai vertinamas tik konvekcinis šildymas, o vertinant bendrai konvekcinį šildymą ir spinduliavimą ši reikšmė padidėja iki 39 %. Tiesa, 900 °C dujose Stefano srautas mainus slopina kiek mažiau – iki 28,3 % (spinduliavimo atveju – iki 29,4%),

450 °C dujose – iki 10,5 %, o spinduliavimas šiuo atveju realios įtakos šilumos mainams nedaro (slopinimas padidėja tik 0,1 %).

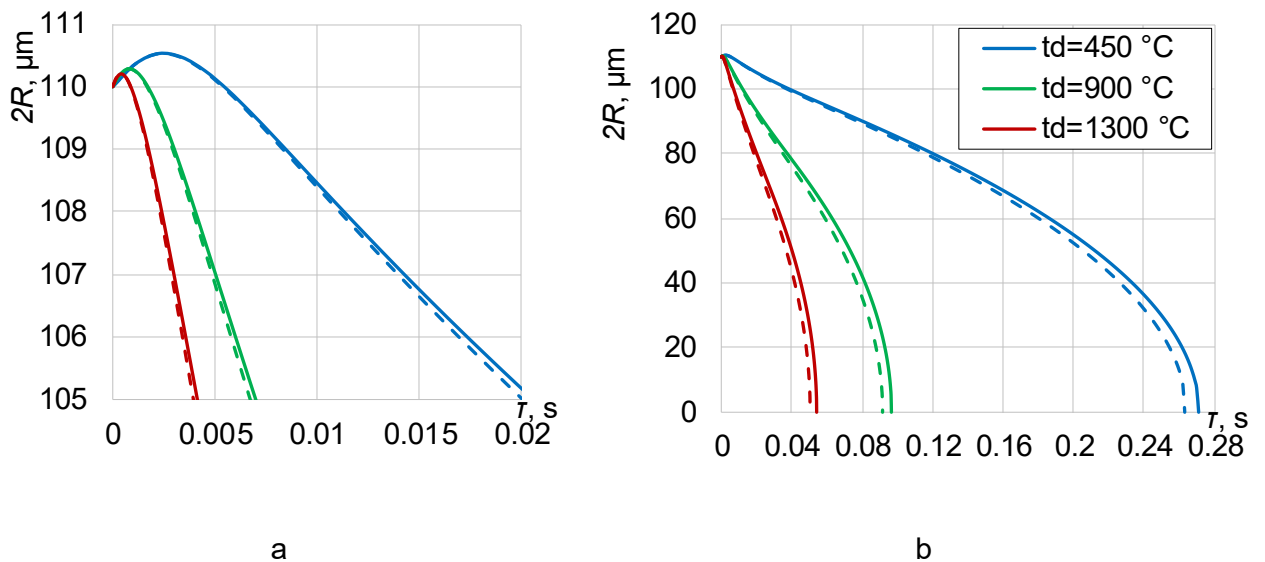


3.38 pav. Garo srauto kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja dujų sraute. $2R = 110 \mu\text{m}$; $X_v = 0,18$; $t_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$. Išštinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas



3.39 pav. Šiluminio Spoldingo parametro (a) ir Nu santykio su Nu_0 , kai Stefano srauto įtaka nėra vertinama (b) kitimas viso FVR ciklo metu, kai lašelis garuoja dujų sraute. $2R = 110 \mu\text{m}$; $X_v = 0,18$; $t_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$. Išštinės linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas

Iš lašelių skersmens kitimo grafiko (žr. 3.40 pav.) matyti, kad dujų temperatūra turi milžinišką įtaką FVRC trukmei. 9 lentelėje pateiktos FVRC trukmės rodo, kad lašelis 450 °C dujose visiškai išgaruoja per 0,271 s, 900 °C dujose – 2,8 karto greičiau, o 1300 °C dujose – net 5 kartus greičiau. Šiuo atveju gerai atsiskleidžia ir spinduliavimo įtaka FVRC trukmei. 1300 °C dujose spinduliavimo atveju ciklas yra 6,86 % trumpesnis. Žemesnės temperatūros dujose – spinduliavimo įtaka kiek mažesnė – 5,2 % ir 2,92 %, lašeliams atitinkamai garuojant 900 °C ir 450 °C dujose.



3.40 pav. Lašelio skersmens kitimas pradinėje fazinių virsmų stadijoje (a) ir viso FVR ciklo metu (b), kai lašelis garuoja dujų sraute. $2R = 110 \mu\text{m}$; $X_v = 0,18$; $t_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; $Re_0 = 50$; $p_d = 0,1 \text{ MPa}$, $w_d = 8 \text{ m/s}$. Išsines linijos – konvekcinis šildymas, punktyrinės – konvekcinis ir spindulinis šildymas

9 lentelė. Dujų temperatūros įtaka lašelio fazinių virsmų režimo trukmei

Dujų temperatūra	Ciklo trukmė, kai nevertinama spinduliavimo įtaka, s	Ciklo trukmė, kai vertinama spinduliavimo įtaka, s	Absolūtus skirtumas, s	Santykinis FVRC sutrumpėjimas įvertinus spinduliavimą
450	0,2710	0,2631	0,0079	2,92 %
900	0,0966	0,0916	0,0050	5,20 %
1300	0,0542	0,0504	0,0037	6,86 %

Apibendrinant, dujų temperatūra daro didelę įtaką lašelių FVRC trukmei. Lašeliai, garuojantys $900 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros dujose, išgaruoja 2,8 karto greičiau, o $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ dujose – net 5 kartus greičiau. Taip pat aukštesnės temperatūros dujose juntama ir didesnė spinduliavimo įtaka. Lašeliui garuojant $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ dujose, spindulinė šilumos pernaša pagreitina jo išgaravimą 6,86 %, $900 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros dujose FVRC sutrumpėja 5,2 %, o $450 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros dujose – vos 2,92 %.

Išvados

1. Lašelio pradinė temperatūra daro ženklų įtaką FVRC terminiams bei energiniams parametrams ciklo pradžioje. Karšti ($t_{10} = 90\text{ °C}$) lašeliai gali išgaruoti iki 9 % greičiau, palyginti su šaltais ($t_{10} = 10\text{ °C}$), kai garavimas vyksta 1300 °C temperatūros dujose, arba iki 12 % greičiau, kai garavimas vyksta 450 °C temperatūros dujose. Vadinasi, lašelio pradinės temperatūros įtaka didesnė, kai lašelis garuoja vėsesnėse dujose.
2. Didesnis lašelio pradinis Reinoldso skaičius daro akivaizdžią įtaką dinaminiam FVRC parametrams, kurie lemia gerokai intensyvesnius šilumos mainus tiek tarp lašelio ir dujų, tiek ir lašelio viduje. Garavimui vykstant 450 °C dujose, lašeliai kurių $Re_0 = 150$, išgaruoja 10 % greičiau nei lašeliai, kurių $Re_0 = 5$. O 1300 °C dujose lašelių, kurių $Re_0 = 55$, fazinių virsmų režimo ciklas trunka net 18,2 % trumpiau nei lašelių, kurių $Re_0 = 5$. Tai rodo, kad pradinio Reinoldso skaičiaus įtaka yra didesnė aukštesnės temperatūros dujose.
3. Spindulinė šilumos pernaša kur kas reikšmingesnė didesniems lašeliams. $110\text{ }\mu\text{m}$ pradinio skersmens lašeliams garuojant 1300 °C dujose, spinduliavimas gali lemti iki 6,86 % FVRC trukmės skirtumą, o $20\text{ }\mu\text{m}$ pradinio skersmens lašeliams – vos 0,62 %.
4. Dujų temperatūra daro didelę įtaką lašelių FVRC trukmei. Lašeliai, garuojantys 900 °C temperatūros dujose, išgaruoja 2,8 karto greičiau, o 1300 °C dujose – net 5 kartus greičiau. Aukštesnės temperatūros dujose pasireiškia didesnė spinduliavimo įtaka.
5. Stefano srauto stiprumas tiesiogiai koreliuoja su fazinių virsmų intensyvumu:
 - kondensacinio režimo metu jis gali suintensyvinti šilumos mainus iki 16 %. Intensyvesnis Stefano srautas būdingas vėsesniems lašeliams, o dujų temperatūra ir pradinis Re skaičius šiuo atveju ženklios įtakos neturi;
 - garavimo režimų metu konvekcinių šildymo atveju Stefano srautas slopina šilumos mainus net iki 37,1 % procento, kai lašelis garuoja 1300 °C temperatūros dujose. Žemesnės temperatūros dujose Stefano srauto įtaka mažesnė – 28,3 %, esant 900 °C , ir 10,5 %, esant 450 °C dujų temperatūrai.

Literatūros sąrašas

1. Encyclopedia Britannica. *Nitric oxide*. Svetainė. Prieiga per internetą: <https://www.britannica.com/science/nitric-oxide> [žiūrėta 2026-05-19].
2. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Basic information about NO2*. Svetainė. Prieiga per internetą: <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2> [žiūrėta 2026-05-19].
3. ANDEY, Sushil K.; Jaspal SINGH. Nitrogen dioxide: Risk assessment, environmental, and health hazard. Iš: J. SINGH et al. (red.), *Hazardous Gases: Risk Assessment on the Environment and Human Health*. Academic Press, 2021, p. 273–288. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89857-7.00001-3>
4. MATSUSHITA, H; N. FUKUDA; K. KAWATA ir N. OSHITA. Analysis of NOx formation behavior in waste combustion: development of three-dimensional analysis with detailed reaction mechanism. *Nippon Steel Engineering Co., Ltd. Technical Review*, 11, 2020, 1, 4–10. Prieiga per internetą: https://www.eng.nipponsteel.com/en/r_and_d/reports/vol11/
5. GAD, S. C. Sulfur Dioxide. Iš: *Encyclopedia of Toxicology (Third Edition)*, p. 420–423. Oxford: Academic Press, 2014. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123864543009337>
6. WONDYFRAW, M. Mechanisms and effects of acid rain on environment. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 5, 2014, 204. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000204>
7. WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). *Types of pollutants*. Svetainė. Prieiga per internetą: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts/types-of-pollutants> [žiūrėta 2026-05-19].
8. EUROPOS PARLAMENTAS IR EUROPOS SĄJUNGOS TARYBA. Direktyva (ES) 2015/2193 dėl tam tikrų teršalų, išmetamų į orą iš vidutinio dydžio kurą deginančių įrenginių, kiekio apribojimo. OL L 313, 2015-11-28. Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2015/2193/oj/eng> [žiūrėta 2026-05-19].
9. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. *Įsakymas dėl išmetamų teršalų iš vidutinių kurą deginančių įrenginių normų patvirtinimo*: 2017 m. rugsėjo 18 d. Nr. D1-778. Suvestinė redakcija nuo 2024-09-14. Prieiga per internetą: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/df291a809e9811e79127a823199cc174> [žiūrėta 2026-05-19].
10. LIETUVOS RESPUBLIKOS SEIMAS. *Lietuvos Respublikos administracinių nusižengimų kodeksas*: 2015 m. birželio 25 d. Nr. XII-1869. Suvestinė redakcija nuo 2026-05-01 iki 2026-05-20. Prieiga per internetą: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/b8d908c0215b11e58a4198cd62929b7a/noNkQpYKNc> [žiūrėta 2026-05-19].
11. LIETUVOS RESPUBLIKOS SEIMAS. *Lietuvos Respublikos aplinkos apsaugos įstatymas*. TAR, 1992-01-21, Nr. I-2223. Suvestinė redakcija nuo 2025-12-23. Prieiga per internetą: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.E2780B68DE62/qjwOPwDWjo> [žiūrėta 2026-05-19].

12. KOTOB, M. R.; T. LU ir S. S. WAHID. Experimental study of direct water injection effect on NO_x reduction from the gas fuel. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 76, 2020, 3, 92–108
13. J. L. SORRELS; D. D. RANDALL; C. R. FRY ir K. S. SCHAFFNER. Selective noncatalytic reduction. Research Triangle Park, NC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards; RTI International, 2019. Prieiga per internetą: https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-12/documents/scrcostmanualchapter7thedition_2016revisions2017.pdf
14. RAADMAN INDUSTRIAL GROUP. *NO_x reduction methods; strategies and technologies for reduction*. Svetainė. Prieiga per internetą: <https://raadmanburner.com/blog/nox-reduction-methods/> [žiūrėta 2026-05-19].
15. DAVID, O. *Removal of nitrogen oxides (NO_x) using selective catalytic reduction (SCR)*. ResearchGate, 2025. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/394412548_Removal_of_nitrogen_oxides_NOx_using_selective_catalytic_reduction_SCR [žiūrėta 2026-05-19].
16. Lin D.; L. Zhang; Z. Liu; B. Wang ir Y. Han. Progress of selective catalytic reduction denitrification catalysts at wide temperature in carbon neutralization. *Frontiers in Chemistry*, 10, 2022, 11-21. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.946133>
17. ŠVENČIANAS, P. Biosferos apsauga šiluminėje energetikoje: vadovėlis šiluminės energetikos specialybės studentams. Kaunas: Technologija, 1994.
18. ZHANG, Q.; W. ZHAO; D. SUN; X. MENG; K. HOOMAN ir kt. Combustion Air Humidification for NO_x Emissions Reduction in Gas Boiler: An Experimental Study. *Heat Transfer Engineering*, 45, 2024, 1, p. 55–68. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1080/01457632.2023.2171814>
19. SHIN, J.; PARK, T.; CHO, H.; YOO, J.; MOON, S. ir kt. Theoretical and experimental study of waste-heat-recovery boiler with water injection. *Heliyon*, 9, 2023, 9, e19417. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19417>
20. CHEN, W.; S. SHANG; B. WANG; X. LI; Y. CAO ir kt. Experimental study on effects of supply-air humidification on energy and emission performance of domestic gas boilers. *Energy and Buildings*, 209, 2020, 109726. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778819318845>
21. Encyclopedia Britannica. *Thermal conduction*. Svetainė. Prieiga per internetą: <https://www.britannica.com/science/thermal-conduction> [žiūrėta 2026-05-19].
22. ENGINEERING TOOLBOX. *Water – thermal conductivity at varying temperature and pressure*. Svetainė. Prieiga per internetą: https://www.engineeringtoolbox.com/water-liquid-gas-thermal-conductivity-temperature-pressure-d_2012.html [žiūrėta 2026-05-19].
23. ZHANG, H.; F. CHE; T. LIN ir W. ZHAO. 3 - Thermal Modeling, Analysis, and Design. Iš *Modeling, Analysis, Design, and Tests for Electronics Packaging beyond Moore*, Woodhead Publishing, 2020, p. 59-129. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102532-1.00003-2>
24. HELMENSTINE, Anne. *Convection: definition, examples, types*. Svetainė. Prieiga per internetą: <https://sciencenotes.org/convection-definition-examples-types/> [žiūrėta 2026-05-19].

25. INCROPERA, F. P.; D. P. DEWITT; T. L. BERGMAN; A. S. LAVINE. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6th ed.* Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.
26. GIMBUTIS, G; K. KAJUTIS; V. KRUKONIS; A. PRANCKŪNAS ir P. ŠVENČIANAS. *Šiluminė technika: Vadovėlis.* Vilnius: Mokslas, 1993.
27. SAZHIN, S. S. Advanced models of fuel droplet heating and evaporation. *Progress in Energy and Combustion Science*, 32, 2006, 2, p. 162–214. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128505000535>
28. ROEKAERTS, D. J. E. M. Transfer. Basics of Mass and Heat Transfer. Iš: De Jong W. et. Al. (red.), *Biomass as a Sustainable Energy Source for the Future: Fundamentals of Conversion Processes.* Wiley, 2014, p. 97–128. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1002/9781118916643.ch4>
29. SAZHIN, S. S.; T. KRISTYADI; W. A. ABDELGHAFAR ir M. R. HEIKAL. Models for fuel droplet heating and evaporation: Comparative analysis. *Fuel*, 85, 2006, 12, p. 1613–1630. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.02.012>
30. SONG, C. ir PAN, W. Tri-reforming of methane: a novel concept for catalytic production of industrially useful synthesis gas with desired H₂/CO ratios. *Catalysis Today*, 98, 2004, 4, p. 463–484. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2004.09.054>
31. WANG, D. Flue Gas Water Vapor Latent Heat Recovery for Pressurized Oxy-Combustion. Final Report. Des Plaines: Gas Technology Institute, 2018. Prieiga per internetą: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1484251>. [žiūrėta 2025-02-26].
32. ENGINEERING TOOLBOX. *Air ducts – friction and pressure loss.* Svetainė. Prieiga per internetą: https://www.engineeringtoolbox.com/duct-friction-pressure-loss-d_444.html [žiūrėta 2026-05-19].
33. LIETUVOS HIDROMETEOROLOGIJOS TARNYBA. *Lietuvos klimatas: monografija.* Vilnius: Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba, 2024. Prieiga per internetą: https://www.meteo.lt/app/uploads/2024/10/Lietuvos_klimatas_monografija.pdf [žiūrėta 2026-05-19].
34. MILIAUSKAS, G.; V. RAMANAUSKAS, ir M. MAZIUKIENĖ. The interaction of the complex transfer processes in the phase transformations regimes of a water droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 169, 2021, p. 120761. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120761>
35. MILIAUSKAS, G.; M. MAZIUKIENĖ; R. POŠKAS ir H. JOUHARA. Peculiarities of thermal and energy state variation in phase change regimes of water droplets in radiating biofuel flue gas flow. *Energy*, 307, 2024, p. 132620. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132620>
36. ABRAMZON, B. ir W. A. SIRIGNANO. Droplet vaporization model for spray combustion calculations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 32, 1989, 9, p. 1605–1618. Prieiga per internetą: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(89\)90043-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(89)90043-4)
37. MILIAUSKAS, G. ir V. SABANAS. Interaction of transfer processes during unsteady evaporation of water droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 2006, 11, p. 1790–1803. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.11.015>

38. TSENG, C. C. ir R. VISKANTA. Enhancement of water droplet evaporation by radiation absorption. *Fire Safety Journal*, 41, 2006, 3, p. 236–247. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.01.001>
39. THE EFFICIENT ENGINEER. *Understanding aerodynamic drag*. Prieiga per internetą: YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=GMmNKUIXXDs> [žiūrėta 2026-05-19].

Pažymėjimas, patvirtinantis dalyvavimą konferencijoje ir straipsnio publikavimą konferencijos leidinyje



CERTIFICATE

V24-11-85

This certificate confirms that

Nojus Motuzas, Gintautas Miliauskas

attended the 13th International Young Researchers' Conference
"Industrial Engineering 2026" and published the article

**Numerical Study of Water Droplet Phase Change Regimes
Cycles Using a Convective Heating and Evaporation Model for
Water Injection Application in Flue Gas Cleaning Technologies**

in the conference proceedings

14 May 2026, Kaunas, Lithuania

dr. Kazimieras Juzėnas

Dean of the Faculty of
Mechanical Engineering
and Design

A blue ink handwritten signature of Dr. Kazimieras Juzėnas.

