



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Biokuro dūmų užterštumui sumažinti įpurškiamo vandens
pernašos procesų modeliavimas**

Baigiamasis magistro projektas

Radvilė Klepeckaitė

Projekto autorė

Prof. Habil. Dr. Gintautas Miliauskas

Vadovas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Biokuro dūmų užterštumui sumažinti išpurškiamo vandens pernašos procesų modeliavimas

Baigiamasis magistro projektas
Termoinžinerija (6211EX023)

Radvilė Klepeckaitė

Projekto autorė

**Prof. Habil. Dr. Gintautas
Miliauskas**

Vadovas

Lekt. dr. Linas Paukštaitis

Recenzentas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Radvilė Klepeckaitė

Biokuro dūmų užterštumui sumažinti įpurškiamo vandens pernašos procesų modeliavimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Radvilė Klepeckaitė

Patvirtinta elektroniniu būdu



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Studijų programa: 6211EX023 Termoinžinerija

MAGISTRO BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

Studentei

Radvilei Klepeckaitei

(Vardas, Pavardė)

1. Baigiamojo Projekto tema –

Biokuro dūmų užterštumui sumažinti įpurškiamo vandens pernašos procesų modeliavimas

(Lietuvių kalba)

Modeling of Sprayed Water Transfer Processes to Reduce Pollution of Biofuel Flue Gas

(Anglų kalba)

2. Darbo tikslas ir uždaviniai –

Darbo tikslas – skaitiškai įvertinti šalinamų drėgnų dūmų sraute įpurkšto vandens sudėtinius šilumos ir masės mainų procesus kondensaciniame ekonomiaizeryje lašelių kondensacijos ir pereinamojo garavimo režime.

Darbo uždaviniai:

1. Atlikti literatūros analizę vandens įpurškimo kondensaciniuose ekonomiaizeriuose aspektu.
2. Sudaryti matematinį modelį lašelio šilumos ir masės mainų procesams kondensacijos ir garavimo režimuose aprašyti.
3. Aptarti skaitinio tyrimo metodiką ir išryškinti jos universalumą kintančių lašelio fazinių virsmų režimų atžvilgiu.
4. Skaitiškai sumodeliuoti vandens lašelio šilumos ir masės mainų procesus kontaktinio ekonomiaizerio atvejui ir pateikti jų grafinę interpretaciją.
5. Palyginamuoju būdu įvertinti vandens lašelių ŠMM procesų sąveiką drėgnų dūmų sraute.
6. Apibrėžti dūmų temperatūros įtaką lašelio šilumai ir faziniams virsmams.
7. Apibendrinti tyrimo rezultatus išvadamis.

Studentė

Radvilė Klepeckaitė

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

2021-02-18

(Data)

Baigiamojo
projekto vadovas

Gintautas Miliauskas

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

2021-02-18

(Data)

Klepeckaitė Radvilė. Biokuro dūmų užterštumui sumažinti įpurškiamo vandens pernašos procesų modeliavimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. habil. dr. Gintautas Miliauskas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Energijos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: biokuro dūmai, kondensacinis ekonomizaizeris, vandens lašeliai, faziniai virsmai, šilumos ir masės mainai, skaitinis modeliavimas.

Kaunas, 2021. 61 p.

Santrauka

Skaitiškai sumodeliuoti į šalinamų drėgnų dūmų srautą įpurškto vandens sudėtiniai šilumos ir masės mainų procesai kontaktiniame kondensaciniame ekonomizaizeryje lašelių kondensacijos ir garavimo režime. Atlikta literatūros apžvalginė analizė vandens įpurškimo kondensaciniuose ekonomizaizeriuose tema. Aptarti ir išryškinti šilumos ir masės mainų procesų ypatumai vandens lašelio garavimo ir kondensacijos režimuose. Sudarytas matematinis modelis lašelio šilumos ir masės mainams drėgnų biokuro dūmų sraute balansiniu metodu aprašyti. Aptarta skaitinio tyrimo metodika ir išryškintas jos universalumas kintančių lašelio fazinių virsmų režimų atžvilgiu. Skaitiškai sumodeliuoti lašelio šilumos ir masės mainų procesai vandens įpurškimui kondensacinio ekonomizaizerio technologijoje būdingose kraštinėse sąlygose. Pateikta grafinė lašelio šilimo ir fazinių virsmų grafinė interpretacija. Apibrėžta vandens lašelių sudėtinių šilumos ir masės mainų procesų sąveika kondensacinio ekonomizaizerio technologijai būdingose kraštinėse sąlygose. Įvardinti procesų sąveiką apibrėžiantys faktoriai ir apibrėžta biokuro šalinamų dūmų temperatūros įtaka įpurškto vandens lašelių šilimui ir faziniams virsmams. Tyrimo rezultatai apibendrinti 6 išvadomis.

Klepeckaitė Radvilė. Modeling of Sprayed Water Transfer Processes to Reduce Pollution of Biofuel Flue Gas. Master's Final Degree Project / supervisor prof. habil. dr. Gintautas Miliauskas; Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Energy Engineering

Keywords: biofuel flue gas, condensing economizer, water droplets, phase transformations, heat and mass transfer, numerical modeling.

Kaunas, 2021. 61 p.

Summary

Heat and mass transfer processes of water injected into the stream of wet biofuel flue gas in a contact condensing economizer in the droplet condensation and evaporation mode were numerically modelled. A review of the literature on the topic of water injection in condensing economizers has been performed. Peculiarities of heat and mass transfer processes in water droplet evaporation and condensation modes are discussed and highlighted. A mathematical model was developed to describe the heat and mass exchange of a droplet in the wet biofuel flue gas stream by the balance method. The methodology of numerical research is discussed and its versatility with respect to the changing modes of droplet phase transformations is highlighted. Droplet heat and mass transfer processes for water injection in condensing economizer technology under typical boundary conditions have been numerically modeled. A graphical interpretation of droplet heating and phase transformations is presented. The interaction of composite heat and mass transfer processes of water droplets under typical boundary conditions of condensing economizer technology are defined. Factors defining the interaction of processes and the influence of the temperature of biofuel flue gas on the heating and phase transformations of injected water droplets are named. The results of the study are summarized in 6 conclusions.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	11
Įvadas.....	12
1. Literatūros apžvalga	14
1.1. Biokuro dūmų savybės	14
1.1.1. Biokuro sudėtis.....	14
1.1.2. Biokuro dūmų sudėtis.....	16
1.2. Šilumos atgavimui ir dūmų išvalymui naudojami įrenginiai - ekonomaizeriai	17
1.2.1. Ekonomaizerių tipai.....	19
1.3. Biokuro dūmų teršalų išmetimams taikomi apribojimai	21
1.4. Biokuro dūmų valymas skruberiuose	22
1.5. Išpurškiamo skysčio dispergavimas ekonomaizeryje.....	23
2. Metodinė dalis.....	25
2.1. Sudėtinių ŠMM procesų sąveikos esmės paaiškinimas.....	25
2.2. ŠMM procesų sąveikos savitumai kondensacinio ekonomaizerio technologijoje	27
2.3. Pagrindiniai kondensuotos terpės ŠMM dūmuose parametrai	29
2.4. Vandens lašelio šilumos ir masės mainų modelis	30
2.4.1. Šilumos srautų ryšio interpretacija kondensaciniame režime	33
2.4.2. Šilumos srautų geometrinė ir fizikinė interpretacija garavimo režime	34
2.5. Skaitinio modeliavimo metodika.....	34
3. Vandens lašo sudėtinių ŠMM procesų sąveikos įvertinimas kontaktinio ekonomaizerio atveju	36
3.1. Kraštinės ŠMM procesų sąlygos	36
3.2. Modeliavimo rezultatų grafinė interpretacija ir analizė	36
3.2.1. Stefano hidrodinaminio srauto įtakos lašelio pereinamiesiems ŠMM procesams įvertinimas	
37	
3.2.2. Stefano hidrodinaminio srauto įtakos lašelio ŠMM parametrų $P(\tau)$ ir $P_0(\tau)$ funkcijoms procentinis įvertinimas pereinamųjų fazinių virsmų režime	47
3.2.3. Drėgnų dūmų temperatūros įtakos vandens lašelių pagrindiniams ŠMM parametrams kondensacinio ekonomaizerio technologijoje įvertinimas	53
Išvados	58
Literatūros sąrašas	59

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Kietojo kuro komponentai [21]	15
1.2 lentelė. Biokuro kai kurių medžių rūšių apatinio šilumingumo priklausomybė nuo drėgmės kiekio naudojamojoje kuro masėje [23]	17
1.3 lentelė. Į orą išmetamų teršalų ribinės vertės pagal 2010/75 Direktyvą [29].....	21
1.4 lentelė. Taršos tarifai viršijus ribines vertes [30].....	21

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Atsinaujinančių energijos išteklių sąnaudų struktūra 2019 m. Lietuvoje % [18]	14
1.2 pav. Cheminė medienos sudėtis (%) sausojoje masėje [21]	15
1.3 pav. Jėgainės pagrindinė schema. DV – dūmų valymo įrenginiai; AB – kuro talpykla; GK – garo katilas; ASP – aukšto slėgio pašildytuvai; MS – maitinimo siurblys; AD – atmosferinis deaeratorius; ŽSP – žemo slėgio pašildytuvai; GT – garo turbina; K – kondensatorius; KS – kondensacinis siurblys; TS – termofikacinis siurblys; EG – elektros generatorius; ET – elektros tinklas; DK – dūmų kaminas; DS – dūmų siurblys; KE – kondensacinis ekonomaizeris	18
1.4 pav. Korpusinis – vamzdelinis ekonomaizeris [44]	19
1.5 pav. Kontaktinis kondensacinis ekonomaizeris [44]	20
1.6 pav. Dūmų papildomos šilumos dalis, priklausomai nuo jų ataušinimo temperatūros ($\lambda=1,5$; $w=0,5$; $t_1=150^\circ\text{C}$) [24]	20
1.7 pav. Skruberio principinė schema [24]	22
1.8 pav. Principinė dispersinės džiovyklos schema [45]	23
2.1 pav. Kondensato plėvelė ant kondensacijos paviršiaus	27
2.2 pav. Vandens lašelio šilumos ir masės mainų kondensacinio režimo (a) ir garavimo režimo (b) geometrinė interpretacija sudėtinio šildymo konvekcija ir spinduliavimu atveju [40]	28
2.3 pav. Lašelio paviršiaus temperatūros kitimo interpretacija lašelio šildymo laidumu, konvekcija ir sudėtinio šildymo atvejais pagal darbe [12] pateiktus apibendrinimus	31
2.4 pav. Šilumos srautų ryšio diagrama kondensaciniame režime	33
2.5 pav. Šilumos srautų ryšio diagrama garavimo režime	34
3.1 pav. Stefano hidrodinaminio srauto įtaka apskaičiuotam garo srautui g_g lašelio paviršiuje kondensaciniame režime (a) ir jo pradinėje stadijoje (b), kai 20°C temperatūros $100\ \mu\text{m}$ pradinio skersmens vandens lašelis šyla 80°C temperatūros ir $X_g=0,3$ dūmų sraute, o pradinis slydimo greitis yra $40\ \text{m/s}$	40
3.2 pav. Stefano hidrodinaminio srauto įtaka apskaičiuotajam garo srautui g_g lašelio paviršiuje režimu kaitos iš kondensacinio į garavimą laikotarpiu (a) ir pereinamojo garavimo režime (b) kai 20°C temperatūros $100\ \mu\text{m}$ pradinio skersmens vandens lašelis šyla 80°C temperatūros ir $X_g=0,3$ dūmų sraute, o pradinis slydimo greitis yra $40\ \text{m/s}$	41
3.3 pav. Stefano hidrodinaminio srauto įtaka apskaičiuotajam garo srauto tankiui m_g lašelio paviršiuje kondensacinio režimo pradžioje (a) ir jo pabaigoje (b), kai 20°C temperatūros $100\ \mu\text{m}$ pradinio skersmens vandens lašelis šyla 150°C temperatūros ir $X_g=0,3$ dūmų sraute, o pradinis slydimo greitis yra $40\ \text{m/s}$	42
3.4 pav. Stefano hidrodinaminio srauto įtaka apskaičiuotajam garo srauto tankiui m_g lašelio paviršiuje keičiantis fazinių virsmų režimui (a) ir pereinamajame garavimo režime (b), kai 20°C temperatūros $100\ \mu\text{m}$ pradinio skersmens vandens lašelis šyla 150°C temperatūros ir $X_g=0,3$ dūmų sraute, o pradinis slydimo greitis yra $40\ \text{m/s}$	43
3.5 pav. Stefano hidrodinaminio srauto įtaka apskaičiuotajam konvekciniui šilumos srautui $q_{c,d}$ kondensaciniame (a) ir pereinamajame garavimo režime (b), kai 20°C temperatūros $100\ \mu\text{m}$ pradinio skersmens vandens lašelis šyla 150°C temperatūros ir $X_g=0,3$ dūmų sraute, o pradinis slydimo greitis yra $40\ \text{m/s}$	44
3.6 pav. Stefano hidrodinaminio srauto įtaka apskaičiuotajam konvekciniui šilumos srautui $q_{c,l}$ lašelyje kondensaciniame režime (a) ir pereinamajame garavimo režime (b), kai 20°C temperatūros $100\ \mu\text{m}$ pradinio skersmens vandens lašelis šyla 150°C temperatūros ir $X_g=0,3$ dūmų sraute, o pradinis slydimo greitis yra $40\ \text{m/s}$	45

3.7 pav. Stefano hidrodinaminio srauto įtaka apskaičiuotajai 20°C temperatūros 100 μm pradinio skersmens vandens lašelio paviršiaus temperatūrai kondensaciniame (a) ir pereinamojo garavimo (b) režime, kai lašelis šyla $X_g=0,3$ drėgnumo 150°C temperatūros dūmuose ir pradinis slydimo greitis yra 40 m/s	46
3.8 pav. Stefano hidrodinaminio srauto įtaka garo srauto lašelio paviršiuje procentiniam pokyčiui, kai 20°C temperatūros 100 μm pradinio skersmens vandens lašelis šyla $X_g=0,3$ drėgnumo 80 °C (a) arba 150°C (b) temperatūros dūmuose ir pradinis slydimo greitis yra 40 m/s	49
3.9 pav. Stefano hidrodinaminio srauto įtaka lašelio paviršiaus temperatūros procentiniam pokyčiui, kai 20°C temperatūros 100 μm pradinio skersmens vandens lašelis šyla $X_g=0,3$ drėgnumo 80 °C (a) arba 150°C (b) temperatūros dūmuose ir pradinis slydimo greitis yra 40 m/s	50
3.10 pav. Stefano hidrodinaminio srauto įtaka lašelio skersmens procentiniam pokyčiui, kai 20°C temperatūros 100 μm pradinio skersmens vandens lašelis šyla $X_g=0,3$ drėgnumo 80 °C (a) arba 150°C (b) temperatūros dūmuose ir pradinis slydimo greitis yra 40 m/s	51
3.11 pav. Stefano hidrodinaminio srauto įtaka lašelio konvekcinio šildymo srauto procentiniam pokyčiui, kai 20°C temperatūros 100 μm pradinio skersmens vandens lašelis šyla $X_g=0,3$ drėgnumo 80 °C (a) arba 150°C (b) temperatūros dūmuose ir pradinis slydimo greitis yra 40 m/s	52
3.12 pav. Biokuro temperatūros įtaka lašelio šilimui, kai 20°C temperatūros 100 μm pradinio skersmens vandens lašelis šyla $X_g=0,3$ drėgnumo 80°C (1) arba 150°C (2) temperatūros dūmuose ir pradinis slydimo greitis yra 40 m/s.....	55
3.13 pav. Biokuro temperatūros įtaka garo srautui lašelio paviršiuje, kai 20°C temperatūros 100 μm pradinio skersmens vandens lašelis šyla $X_g=0,3$ drėgnumo 80°C (1) arba 150°C (2) temperatūros dūmuose ir pradinis slydimo greitis yra 40 m/s.....	55
3.14 pav. Biokuro temperatūros įtaka garo srauto lašelio paviršiuje tankiui, kai 20°C temperatūros 100 μm pradinio skersmens vandens lašelis šyla $X_g=0,3$ drėgnumo 80°C (1) arba 150°C (2) temperatūros dūmuose ir pradinis slydimo greitis yra 40 m/s.....	56
3.15 pav. Biokuro temperatūros įtaka konvekciniame šilumos srautui, kai 20°C temperatūros 100 μm pradinio skersmens vandens lašelis šyla $X_g=0,3$ drėgnumo 80 °C (1) arba 150°C (2) temperatūros dūmuose ir pradinis slydimo greitis yra 40 m/s.....	56
3.16 pav. Biokuro dūmų temperatūros įtaka lašelio judėjimo greičiui, kai 20°C temperatūros 100 μm pradinio skersmens vandens lašelis šyla $X_g=0,3$ drėgnumo 80°C (1) arba 150°C (2) temperatūros dūmuose ir pradinis slydimo greitis yra 40 m/s.....	57
3.17 pav. Dūmų temperatūros įtaka Reinoldso kriterijaus dinamikai, kai 20°C temperatūros 100 μm pradinio skersmens vandens lašelis šyla $X_g=0,3$ drėgnumo 80 °C (1) arba 150°C (2) temperatūros dūmuose ir pradinis slydimo greitis yra 40 m/s.....	57

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

FVRC – Fazinių virsmų režimų ciklas

Habil. Dr. – Habilituotas daktaras;

Lekt. – lektorius;

ŠMM – Šilumos ir masės mainai

Prof. – profesorius.

AEŠ – atsinaujinantys energijos šaltiniai.

ES – Europos sąjunga.

ŽŠV – žemutinė šilumos vertė.

Terminai:

Lašelis – vandens nedidelis tūris, kurį apibrėžia jam ekvivalentiškos sferos skersmuo.

Faziniai virsmai – vandens lašelio kondensacinis arba garavimo režimas.

Kondensacinis režimas – fazinių virsmų režimas, kai lašelio temperatūra yra žemesnė už rasos taško temperatūrą ir lašelio paviršiuje kondensuojasi vandens garas.

Pereinamasis garavimas – lašelio paviršinis garavimas, kai teikiama šiluma vandenį šildo ir garina.

Pusiausviras garavimas – lašelio paviršinis garavimas, kai teikiama šiluma tik garina vandenį.

Fazinių virsmų režimų ciklas – nuosekliai kintančių kondensacinio, pereinamojo garavimo ir pusiausviro garavimo režimų seka.

ŠMM procesų sąveika – kartu vykstančių šilumos ir masės mainų procesų tarpusavio įtaka, dėl kurios pakinta procesų intensyvumas.

Stefano hidrodinaminis srautas – tai papildomas dujų mišinio hidrodinaminis judėjimas prie lašelio vykstant paviršiniams faziniams virsmams, iššaukiantis papildomą garo srautą ir pakeičiantis šiluminio, hidrodinaminio ir difuzinio pasienio sluoksnių storius.

Konvekcinis šildymas – šilumos teikimas konvekcija dujose slystančiam lašeliui.

Lašelio terminiai parametrai – lašelio šilimą dūmuose apibrėžiantys parametrai, tarp kurių svarbiausia yra lašelio paviršiaus temperatūra.

Lašelio energiniai parametrai – lašelio energinę būseną apibrėžiantys parametrai, tarp kurių svarbiausi yra šilumos srautai lašelio paviršiuje.

Lašelio fazinių virsmų parametrai – lašelio fazinių virsmų procesą apibrėžiantys parametrai, tarp kurių svarbiausias yra garo srautas lašelio paviršiuje.

Įvadas

Šiandieninėje energijos gamyboje, ypač Lietuvoje, dažnai naudojamas biokuras. Biokuras yra drėgnas, jo sudėtyje yra įvairių cheminių elementų, kurie degdami patenka į dūmus. Degant kure esančiam vandeniliui bei išgaruojant kuro drėgmei susidaro drėgni degimo produktai. Panaudojus karštų dūmų šiluminę energiją jie yra išmetami į aplinką, tačiau svarbu prieš tai juos išvalyti nuo įvairių cheminių junginių ir kietųjų dalelių, kurios teršia aplinkos orą, bei atgauti vandens garo fazinių virsmų šilumą, siekiant sumažinti gamtos šiluminį užteršimą. Tam gali būti naudojami įvairūs valymo įrenginiai, bet šiame darbe bus gilinama į skysčio išpurškimo technologiją pritaikantį kondensacinį ekonomizerį bei jame vykstančius šiluminius ir fazinius procesus įpurškiant vandens lašelius į dūmų srautą, siekiant dūmus ataušinti, išnaudojant likusią energijos kiekį, bei juos išvalyti. Toks dūmų valymo būdas labai svarbus įvairiais aspektais. Vienas jų – aplinkosauginis. Siekiant nuosekliai mažinti atmosferos taršą laikui bėgant leidžiamas išmetamų teršalų kiekis yra mažinamas, todėl neišvengiamai dūmų valymo technologijos turi būti tobulinamos, efektyvinamos ar kuriami kitokie sprendimai dūmų valymui. Be to dūmų valymas ekonomizeriu aktualus energijos gamintojams ekonomiškai tuo, kad jame galima panaudoti išmetamuose dūmuose likusią šilumos energiją, kurios nebuvo galima išnaudoti gamybos procese prieš tai, todėl padidinamas katilinės šiluminis našumas ir gaunamas didesnis pelnas parduodant energiją. Tai svarbu ne tik ekonominiu požiūriu, bet ir energetiniu – efektyviau panaudojama energija, mažiau švaistomi energetiniai resursai.

Valant degimo produktus kondensaciniame ekonomizeryje susiduriama su svarbia problema – dūmuose esantis cheminiai junginiai reaguoja su vandeniu ir kondensuojantis sukuria agresyvią terpę, kuri ardo juodųjų metalų konstrukciją, todėl įrenginio tarnavimo trukmė mažėja. Siekiant išvengti ekonomizeryje galimos metalų korozijos svarbus yra įpurškiamo vandens lašelio išgaravimo greitis. Be to į biokuro dūmus išpurškiamo vandens šilumokaitos procesų kontroliavimas svarbus norint kaip įmanoma efektyviau išnaudoti dūmuose likusią sukauptą šiluminę energiją. Išpurkštam vandeniui sąveikaujant su biokuro dūmais vyksta šilumos ir masės mainų procesai, faziniai virsmai. Šių procesų išpurškiamo skysčio sistemose sąveikai įtaką daro daugelis veiksnių. Tam, kad įvertinti jų poveikį, reikia atsižvelgti į procesų visumą ir esminių procesų sąveiką. Tai įmanoma atlikti tik išsamiai pažinus paprasčiausiose kraštinėse sąlygose vykstančių pernašos procesų dėsningumus. Gerai pažinus lašelių sudėtinius šilumos ir masės mainų procesus galima tobulinti esamas ir kurti naujas, efektyvesnes skysčio išpurškimo grindžiamas technologijas.

Lašelių šilumos ir masės mainai tiriami jau daugiau kaip šimtmetį [1-3]. Evoliuciniu požiūriu būtų galima išskirti ankstyvojo [1], vidurinio [4] ir vėlesniojo [5] laikotarpio mokslinius tyrimus. Pirmieji lašelių šilumos ir masės mainų tyrimai atlikti jiems garuojant žemos temperatūros aplinkoje, dažniausia eksperimentuojant su ant termoporos karoliuko pakabintais nejudančiais įvairių skysčių lašeliais [1]. Dujų srautu aptekamų lašelių konvekcinės šilumokaitos atveju šilumos ir masės mainų tyrimais vystyta lašelių konvekcinės šilumokaitos ir garavimo procesų sąveikos įvertinimo metodika, kuri grindžiama Spoldingo šilumos ir masės pernašos parametrų empirine praktika [4]. Naujausi moksliniai tyrimai išsiskiria tuo, kad vykdomi kompleksiniai eksperimentiniai ir teoriniai tyrimai, atsižvelgiant į sudėtinių pereinamųjų pernašos procesų sąveiką, vykstančią pusskaidriuose lašeliuose veikiant sugeriamai spinduliuotei [5]. Šiuolaikiniai eksperimentiniai tyrimo metodai išsamiai tiria išpurkšto skysčio lašelių pereinamuosius sudėtinius pernašos procesus [6-10] bei vysto spektrinės spinduliuotės modeliavimo metodus [11-16].

Tyrimo tikslas – skaitiškai įvertinti šalinamų drėgnų dūmų sraute įpurškto vandens sudėtinius šilumos ir masės mainų procesus kondensaciniame ekonomizaizeryje lašelių kondensacijos ir pereinamojo garavimo režime.

Tyrimo objektas – į šalinamų biokuro dūmų srautą kondensaciniame ekonomizaizeryje įpurškiami vandens lašeliai.

Tyrimo uždaviniai:

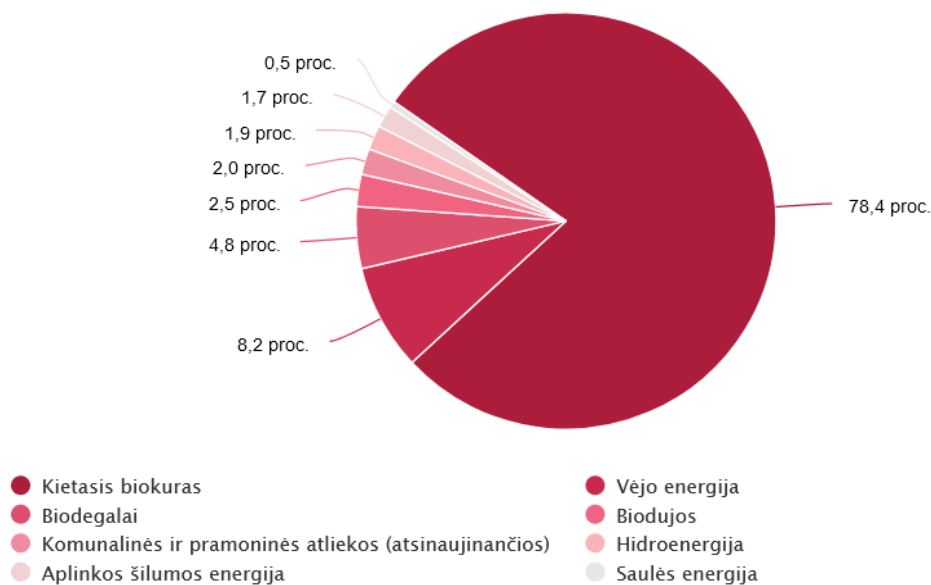
1. Atlikti literatūros analizę vandens įpurškimo kondensaciniuose ekonomizaizeriuose aspektu.
2. Sudaryti matematinį modelį lašelio šilumos ir masės mainų procesams kondensacijos ir garavimo režimuose aprašyti.
3. Aptarti skaitinio tyrimo metodiką ir išryškinti jos universalumą kintančių lašelio fazinių virsmų režimų atžvilgiu.
4. Skaitiškai sumodeliuoti vandens lašelio šilumos ir masės mainų procesus kontaktinio ekonomizaizerio atvejui ir pateikti jų grafinę interpretaciją.
5. Palyginamuoju būdu įvertinti vandens lašelių ŠMM procesų sąveiką drėgnų dūmų sraute.
6. Apibrėžti dūmų temperatūros įtaką lašelio šilumai ir faziniams virsmams.
7. Apibendrinti tyrimo rezultatus išvadomis.

Tyrimo metodai - tikslui pasiekti iš pradžių bus atliekama literatūros analizė, aptariami šilumos ir masės mainų procesų ypatumai lašelių kondensacijos ir garavimo metu, tada sudaromas skaitinis modelis, numatant kraštines sąlygas, atliekami skaičiavimai ir galiausiai apibendrinami rezultatai bei padaromos išvados.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Biokuro dūmų savybės

Katilinėje gali būti naudojamas kietasis, skystasis ar dujinis kuras. Kuru galima vadinti bet kokią medžiagą, kurią techniškai ir ekonomiškai apsimoka deginti, kai norima gauti šilumos [17]. Šiame darbe bus nagrinėjami kondensaciniame ekonomizažeryje vykstantis procesai biokuro dūmams kontaktuojant su vandeniu, todėl pagrindinis energijos šaltinis pasirenkamas biokuras. Lietuvoje energijos gamybos sektoriuje biokuras yra viena iš reikšmingiausių kuro rūšių – 2019 metais iš jo pagaminta 50,1% visos energijos, skirtos elektrai ir centralizuotai tiekiamai šilumai [18,19]. Bendrai energijos gamybai iš atsinaujinančių energijos šaltinių (toliau – AEŠ), tokių kaip vėjo energija, biodegalai, biodujos, komunalinės atliekos ir kt., kontekste biokuras sudarė 78,4% visų AEŠ sąnaudų 2019 metais [18] (žr. 1.1 pav.). Taip pat biokuro dėka Lietuva galėjo pasiekti ES šalims iki 2020 metų išsikeltą tikslą – iš AEŠ pagaminti ne mažiau kaip 20% visos Europoje pagaminamos energijos. Lietuvai iki šio laikotarpio buvo nustatyta pasiekti 23% ir tai pavyko padaryti jau 2014 metais. 2018 metais Europos Parlamentas patvirtino dar griežtesnius reikalavimus – iki 2030 metų ES privaloma 32% AEŠ dalis energijos gamyboje. Valstybės narės privalo perkelti persvarstytą direktyvą, kuri turi įsigalioti nuo 2021 metų liepos 1 d., iki 2021 metų birželio 30 d. [20]. Todėl akivaizdu, kad AEŠ įtaka energijos gamybai ateityje vis didės ir Lietuvos atveju kol kas biokuras yra viena iš pagrindinių priemonių išsikeltiems tikslams įgyvendinti.



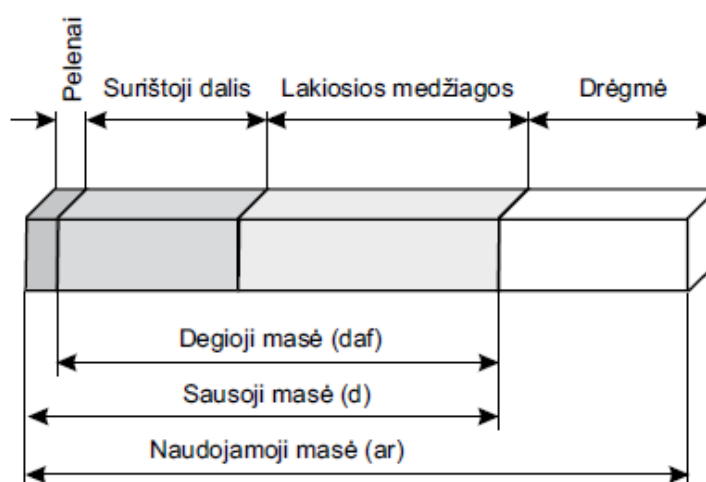
1.1 pav. Atsinaujinančių energijos išteklių sąnaudų struktūra 2019 m. Lietuvoje % [18]

Kadangi pasirinktame tyrimo objekte, kontaktiniame kondensaciniame ekonomizažeryje, biokuro dūmai tiesiogiai sąveikauja su vandeniu, vykstant įvairiems fizikiniams bei cheminiams procesams, svarbu suprasti biokuro dūmų savybes, kurios priklauso nuo biokuro.

1.1.1. Biokuro sudėtis

Medienos biomasė deginimui gaunama iš miško, želdynų ir kitos neapdorotos medienos, kaip medienos apdirbimo pramonės šalutiniai produktai bei atliekos ir kt. [18]. Dažniausiai šilumos gamyboje naudojamos medienos skiedros, taip pat dar gali būti naudojami briketai, granulės. Biokuro

sudėtis pavaizduota 1.2 paveikslėlyje. Jis sudarytas iš degiosios ir nedegiosios dalies. Kuro sudėtis paprastai išreiškiama jį sudarančių elementų masės procentais. Pelenai A ir drėgmė W sudaro biokuro nedegiąją dalį. Pelenai – tai nedegus likutis, kuris susidaro iš kure esančių mineralinių priemaišų jam visiškai sudegus. Nedegios mineralinės priemaišos mažina kuro degimo šilumą, kūryklos ir katilo ekonomiskumą. Pelenai ir vanduo sudaro išorinį kuro balastą – drėgną kurą sunkiau uždegti, mažesnė jo degimo šiluma. Dėl drėgmės sumažėja kūryklos temperatūra, todėl pablogėja šilumos mainai. Paprastai drėgmės W kietame kure būna nuo 5 iki 60 %, medienos peleingumas A gali siekti iki 1% sausosios masės [17].



1.2 pav. Cheminė medienos sudėtis (%) sausosioje masėje [21]

Kure degieji elementai yra anglis (C), vandenilis (H) ir siera (S). Beveik visų rūšių kure į junginių su šiais elementais sudėtį įeina deguonis (O) ir azotas (N). Deguonis ir azotas, kurui degant, šilumos neišskiria – jie sudaro vidinį kuro balastą ir yra nepageidaujami, o išorinį sudaro jau minėti pelenai ir drėgmė. Kurui degant azotas pereina į degimo produktus. Medienos sausosioje dalyje daugiausia yra anglies C (48-50%), vandenilio H (6,0-6,5%) ir deguonies O (38-42%) (1.1 lentelė) [21]. Šie trys komponentai sudaro apie 99% sausos masės. Sudegus 1 kg anglies išsiskiria 33 500 kJ energijos, sudegus tokiam pat kiekiui vandenilio 4,4 karto daugiau, nei anglies (17). Kiti komponentai: azotas N (0,5-2,3%), siera S (0,05%) ir chloras Cl (<0,01%) [21]. Siera yra organinių junginių (S_{or} %), sulfidų (S_{sd} %) ir sulfatų (S_{st} %) pavidalu. Organinė ir sulfidinė siera dega, todėl vadinama degiąja – sudegus 1 kg išsiskiria 9050 kJ šilumos [17]. Sulfatinė siera nedega, todėl priskiriama prie pelenų, dažniausiai jos būna iki 8% kietame kure. Deginant kurą svarbus yra sieros kiekis, nes dūmuose esantys vandens garai, atvėsinti iki vadinamojo rasos taško, pradeda kondensuotis, o susidariusiame skystyje tirpsta anglies dioksidas bei kiti dūmuose esantys rūgštiniai oksidai. Dėl šios priežasties

1.1 lentelė. Kietojo kuro komponentai [21]

Elementas	Mediena	Žievė
C	48–50	51–66
H	6,0–6,5	5,9–8,4
O	38–42	24,3–40,2
N	0,5–2,3	0,3–0,8
S	0,05	0,05
Cl	< 0,01	0,01–0,03

katiluose ir kaminuose susidarantis dūmų kondensatas yra rūgštus ir koroziškai agresyvus: ardo plieną, mūrą, gelžbetonį ar kitas rūgštims neatsparias konstrukcines medžiagas [22]. Siekiant to išvengti įprasti katilai ir dūmtakiai projektuojami taip, kad nebūtų vandens garų kondensacijos juose.

Pagal kuro sudėtį (1.2 pav.) išskiriamos naudojami, sausoji ir degioji masės. Jos susideda iš jau minėtų kuro komponentų. Naudojamosios kuro masės elementinė sudėtis % yra tokia [17]:

$$C^n + H^n + S_a^n + O^n + N^n + A^n + W^n = 100 \quad (1.1)$$

Pašalinus iš kuro drėgmę gaunama sausoji kuro masė:

$$C^s + H^s + S_a^s + O^s + N^s + A^s = 100 \quad (1.2)$$

Pašalinus pelenus gaunama degioji masė:

$$C^d + H^d + S_a^d + O^d + N^d = 100 \quad (1.3)$$

Azotas ir deguonis yra chemiškai susijungę su degiaisiais elementais, todėl jie įeina į kuro degiąją masę.

1.1.2. Biokuro dūmų sudėtis

Degimo metu biokure esantys degieji cheminiai elementai reaguoja su deguonimi, suformuoja naujus junginius ir taip patenka į bendrą dūmų srautą. Kure yra trys elementai iš kurių degimo metu išsiskiria šiluma: anglis (C), vandenilis (H) ir sieras (S). Šie elementai visiškai sudega vykstant tokioms cheminėms reakcijoms [21]:



Degimui naudojamas atmosferos oro deguonis. Iš reakcijų matyti, jog pagrindiniai degimo produktai yra anglies dvideginis (CO_2), vandens garai (H_2O) ir sieros dvideginis (SO_2) bei šiluma. Degimo šiluma vadinamas šilumos kiekis, išsiskyręs visiškai sudegus 1 kg kietojo kuro [17]. Naudojamos dvi sąvokos: viršutinė Q_v^n ir apatinė Q_a^n [kJ/kg] naudojamos masės degimo šiluma. Į viršutinę degimo šilumą įeina šiluma, išsiskirianti kondensuojantis degimo produktuose esančiam vandens garui:

$$Q_a^n = Q_v^n - 2500 \cdot M_{H_2O} \quad (1.7)$$

Čia: 2500 – vandens garo kondensacijos šiluma, kJ/kg; M_{H_2O} – vandens garo kiekis kg, susidaręs sudegus 1 kg kuro.

Vandens garai susidaro iš kure esančio vandens ir degant vandeniliui. Skirtingų rūšių medienos kuro apatinio šilumingumo priklausomybė nuo drėgmės pavaizduota 1.2 lentelėje. Joje matyti, kad kuo didesnis medienos drėgnumas, tuo mažesnis apatinis šilumingumas.

Tiksliausiai degimo šilumą galima apskaičiuoti pagal Mendelejevo formulę, žinant kuro elementų sudėtį:

$$Q_a^n = 339C^n + 1035H^n + 109(O^n - S_a^n) - 25W^n \quad (1.8)$$

1.2 lentelė. Biokuro kai kurių medžių rūšių apatinio šilumingumo priklausomybė nuo drėgmės kiekio naudojamojoje kuro masėje [23]

Kuro drėgmė W, %	Kuro apatinis šilumingumas, MJ/kg							
	Pušis	Eglė	Beržas	Drebulė	Juodalksnis	Baltalksnis	Klevas	Liepa
20	15,13	14,94	14,95	14,43	14,96	14,86	14,95	14,95
25	14,03	13,86	13,86	13,38	13,87	13,77	13,86	13,86
30	12,93	12,77	12,78	12,32	12,78	12,69	12,78	12,78
35	11,83	11,68	11,69	11,27	11,70	11,61	11,69	11,69
40	10,73	10,60	10,60	10,21	10,61	10,53	10,60	10,60
45	9,64	9,51	9,52	9,16	9,52	9,45	9,52	9,52
50	8,54	8,42	8,43	8,10	8,43	8,37	8,43	8,43
55	7,44	7,34	7,34	7,05	7,35	7,29	7,34	7,34
60	6,34	6,25	6,25	5,99	6,26	6,21	6,25	6,25

Degimo produktų tūrį V_d (m^3/kg) sudaro dvi dalys - sausų dūmų tūris $V_{s.d.}$ ir garo tūris V_{H_2O} :

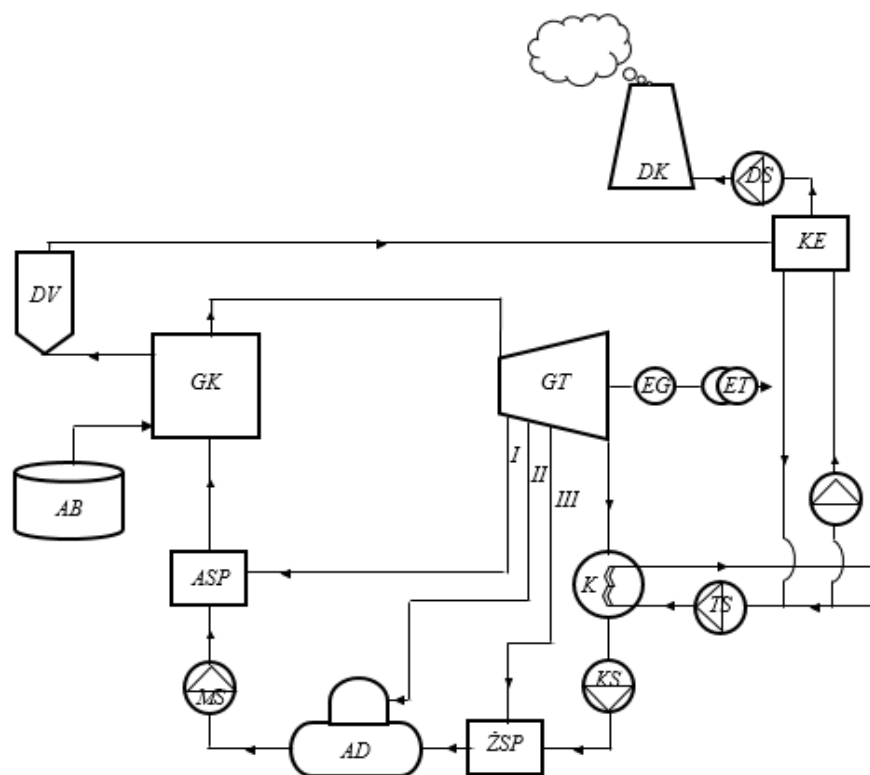
$$V_d = V_{s.d.} + V_{H_2O} \quad (1.9)$$

Deginant kietąjį kurą, vandens garas degimo produktuose atsiranda sudegus kuro vandeniliui, išgaravus drėgmei, taip pat jo patenka su atmosferos oru. Didelis vandens garo kiekis degimo produktuose yra nepageidaujamas, nes mažina kūryklos temperatūrą, dalis energijos deginant kurą išsekvojama vandeniui šildyti. Nors vanduo yra nepageidaujamas, tačiau jo išvengti nėra galimybės, kadangi didžiąją dalį biokuro sudaro vanduo (dažniausiai apie 40-50%). Akivaizdu, kad kure esančios šilumos negalima visiškai pilnai išnaudoti dėl atsirandančių įvairių nuostolių degimo procese, iš kurių didžiąją dalį sudaro iš katilo išeinančių dūmų išnešama šiluma. Iš katilo išeinančių dūmų temperatūra aukštesnė negu aplinkos oro, todėl dūmai išsineša kuro šilumos dalį į atmosferą. Šilumos nuostoliai su išeinančiais dūmais tuo didesni, kuo didesnis iš katilo išeinančių dūmų tūris ir kuo aukštesnė jų temperatūra. Šie nuostoliai gali siekti iki 10-15% [17]. Norint juos sumažinti reikia mažinti išeinančių dūmų temperatūrą, kuri dažniausiai siekia 120-180°C. Kadangi šios temperatūros daugiau sumažinti neįmanoma, siekiama panaudoti likusią šilumą. Šilumos atgavimui dažniausiai naudojami ekonomizeriai.

1.2. Šilumos atgavimui ir dūmų valymui naudojami įrenginiai - ekonomizeriai

Gaminant šilumą pirmiausia biokuras tiekiamas į degimo kamerą (žr. 1.3 pav.) Kietojo kuro kūryklos gali būti kelių rūšių: sluoksninės ar erdvinės. Degimo metu ant ardyno vyksta šie procesai [21]:

- Kai kuras patenka ant ardyno, kuro sluoksnio temperatūra pradeda kilti ir prasideda džiovinimo procesas
- Kai kuro temperatūra pakyla iki 100–105°C, išsiskiria lakiosios medžiagos (pirmiausia angliavandeniliai)
- Priklausomai nuo kuro rūšies, jis užsidega, esant 220–300°C temperatūrai
- Anglies degimas baigiasi esant 800–900°C temperatūrai ir pelenai nukrinta nuo ardyno



1.3 pav. Jėgainės pagrindinė schema. DV – dūmų valymo įrenginiai; AB – kuro talpykla; GK – garo katilas; ASP – aukšto slėgio pašildytuvas; MS – maitinimo siurblys; AD – atmosferinis deaeratorius; ŽSP – žemo slėgio pašildytuvas; GT – garo turbina; K – kondensatorius; KS – kondensacinis siurblys; TS – termofikacinis siurblys; EG – elektros generatorius; ET – elektros tinklas; DK – dūmų kaminas; DS – dūmų siurblys; KE – kondensacinis ekonomizaizeris.

Taip dūmų temperatūra kūrykloje pasiekia apie 900°C ar net 1000°C. Šie dūmai kaitiną vandenį, esantį garo katile, kuriame gaminamas aukštų parametrų garas. Jis suka garo turbiną ir gamina elektrą bei kondensatoriuje šildo termofikacinį vandenį. Tuo tarpu šilumą atidavę biokuro dūmai išvalomi dūmų valymo įrenginiuose, jei yra įrengtas kondensacinis ekonomizaizeris - atiduoda likutinę šilumą, ir dūmai pašalinami pro kaminą.

Vandens garuose sukauptas šilumos kiekis kartu su dūmų srautu išmetamas į aplinką - šie nuostoliai gali siekti 10-20% nuo pradinės kuro energijos. Taip pat didžiąją dalį biokuro (apie 40-60%) sudaro vanduo ir deginant drėgną kurą vandeniui išgarinti eikvojama šiluma, tačiau vanduo neišskiria energijos, mažina kūryklos temperatūrą. Dėl šių priežasčių bendras energijos gamybos naudingumas mažėja. Tam, kad užtikrinti būtiną šilumos energijos poreikį, reikia sunaudoti daugiau kuro. Nepaisant to, kad kuro drėgmė energijos gamybos procese sugeneruoja didelį kiekį nuostolių, jos visiškai pašalinti negalima. Tačiau įmanoma dūmuose sukaupią vandens garų energiją panaudoti.

1.2.1. Ekonomaizerių tipai

Išmetami dūmai turi didelį energijos kiekį vandens garų slaptosios garavimo šilumos ir dūmų šiluminės energijos pavidale. Dūmai, patekę į kondensacinį ekonomaizerį, auštant atiduoda savo šilumą, o pasiekę rasos tašką – kondensuojasi atiduodami slaptąją šilumą. Ekonomaizeriai yra dviejų tipų: korpusiniai - vamzdeliniai (1.4 pav.) ir kontaktiniai kondensaciniai (1.5 pav.) [24]. Vamzdeliniuose ekonomaizeriuose dūmai teka nedidelio diametro vamzdeliais, kuriuos apiplauna vanduo, išpurškiamas iš aukščiausio ekonomaizerio taško. Šilumos utilizavimas vyksta purškiant žemesnės temperatūros, nei esamas dūmų rasos taškas, vandenį per purkštukus.

Kontaktiniuose ekonomaizeriuose, dar kitaip vadinamais skruberiais, į tekančių karštų dūmų srautą tiesiogiai išpurškiamas techninis vanduo. Kontaktinį ekonomaizerį sudaro cilindro ar stačiakampio formos du lygiagretūs kanalai, kuriais keliauja dūmai. Ten jie kontaktuoja su skysčiu, kuris išpurškiamas purkštukų pagalba. Vandens lašeliai sukuria didelį šilumos mainų paviršiaus plotą, kuris reikalingas norint maksimaliai panaudoti degimo produktų šiluminį potencialą. Tuo tarpu vanduo, esantis degimo produktuose, kondensuojasi ir atiduoda slaptąją garavimo šilumą. Tokiu būdu slaptoji garavimo šiluma, kuri buvo naudota kuro drėgmei garinti, ir degimo proceso metu susidariusios drėgmės energija perduodama į kondensatą [25].



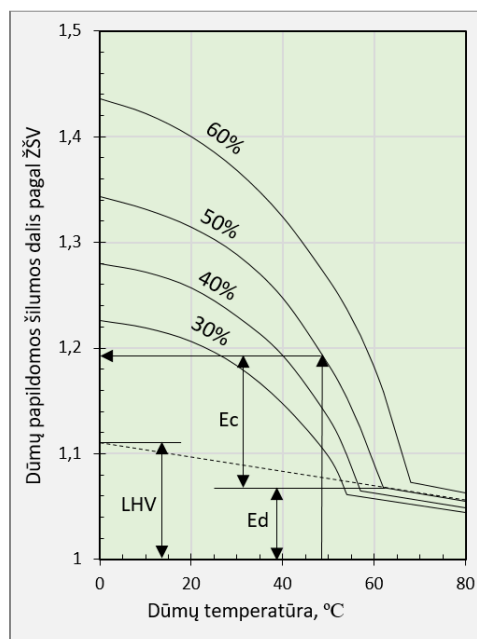
1.4 pav. Korpusinis – vamzdelinis ekonomaizeris [44]

Kontaktiniai ekonomaizeriai naudojami dažniau jėgainėse utilizuojant šilumą iš dūmų nei vamzdeliniai. Vienas iš kontaktinio ekonomaizerio svarių privalumų - įpurškiant vandenį dūmai yra išvalomi nuo stambių kietųjų dalelių, kurios nusodinamos. Jo dėka pašalinama 90-95% kietųjų dalelių, daugiau nei 90% SO_x [26]. Taip pat vamzdeliniuose ekonomaizeriuose temperatūrų skirtumas tarp išmetamų dūmų ir vandens yra mažas, o kondensacinio ekonomaizerio pagalba dūmai ataušinami nuo 180°C iki 40-50°C. Tad tam, kad užtikrinti vamzdelinio ekonomaizerio efektyvumą, reikalingas didesnis plotas, tuo pačiu tai padidina metalo sąnaudas konstrukcijai [27]. Tuo tarpu kontaktinio ekonomaizerio užimamas plotas yra mažesnis, jo efektyvumas didesnis, jį mažiau veikia rūgštiniai junginiai, kadangi dūmai tiesiogiai kontaktuoja su vandeniu.



1.5 pav. Kontaktinis kondensacinis ekonomizeris [44]

Naudojant ekonomizerį katilo naudingumo koeficientas viršija 100%. Taip yra todėl, kad efektyvumas skaičiuojamas pagal apatinį kuro šilumingumą ir neįvertinamas garų kondensacijos metu išgaunamas šilumos kiekis. Todėl drėgną biokurą naudojančio katilo naudingumo koeficientas gali pasiekti 110% ar net 120%. Tai reiškia, kad be jokių papildomų kuro sąnaudų ekonomizerio pagalba galima išgauti 20-25% šilumos [26]. 1.6 pav. parodyta, kaip priklauso šilumos atgavimo iš dūmų dalis pagal ŽŠV (žemutinė šilumos vertė) nuo dūmų ataušinimo temperatūros ir kuro drėgmės, kai iš katilo išeinančių dūmų temperatūra yra 150°C, oro pertekliaus koeficientas $\lambda=1,5$. Kaip galima matyti, kuo drėgnesnis kuras, tuo daugiau šilumos juose sukaupta su išeinančiais dūmais. Taip pat atgaunamos šilumos dalis ypač priklauso nuo dūmų ataušinimo temperatūros. Pavyzdys pateiktas



1.6 pav. Dūmų papildomos šilumos dalis, priklausomai nuo jų ataušinimo temperatūros ($\lambda=1,5$; $w=0,5$; $t_f=150^\circ\text{C}$) [24]

deginant 40% drėgmės kurą, kai iš katilo išeinantys 150°C temperatūros dūmai ataušinami iki 48°C, kondensacijos temperatūra 62°C, atgautos šilumos dalis pagal ŽŠV siekia beveik 20%.

Vertinant atgaunamos šilumos kiekį ekonomazeriuose pagrindinė charakteristika yra rasos taško arba kitaip vadinama kondensacijos temperatūra T_k . Kondensacijos metu garas virsta skysčiu. Kondensacija prasideda, kai dūmai pasiekia rasos tašką, - vandens garai, esantys dūmuose, virsta sočiais. Naudojant kondensacinį ekonomazerį tikslas yra pasiekti rasos taško temperatūrą įpurškiant į dūmus vandenį žemesnės temperatūros už rasos tašką [28].

1.3. Biokuro dūmų teršalų išmetimams taikomi apribojimai

Biokuro degimo metu išsiskiria medienoje esantys cheminiai elementai, tokie kaip siera, anglis, azotas, ir reaguoja su ore esančiu deguonimi. Naujai susidarę oksidai bei pelenai patenka į bendrą aukštos temperatūros dūmų srautą, kuris kūrykloje kaitina šilumos mainų paviršius, taip atiduoda energiją. Šiluminę energiją atidavę dūmai yra neberekalingi, todėl turi būti pašalinami į atmosferą. Tačiau dūmuose esantys komponentai yra toksiški, nuodingi ir juos būtina išvalyti.

Šalinamų dūmų teršalų leistinos ribinės vertės yra skirtingos ir priklauso nuo kuro rūšies, katilo galios bei katilo eksploatacijos pradžios metų. Ribojami yra NO_x , SO_2 , CO , kietosios dalelės. Naujų įrenginių (pagal 2010/75 Direktyvą [29]) pradėti eksploatuoti po 2016 m. sausio 1 dienos), kurie degina biokurą, į orą išmetamų teršalų ribinės vertės, priklausomai nuo katilo galingumo, pateiktos 1.3 lentelėje.

1.3 lentelė. Į orą išmetamų teršalų ribinės vertės pagal 2010/75 Direktyvą [29]

Bendra nominali šiluminė galia (MW)	SO_2 , mg/Nm ³	NO_x , mg/Nm ³	CO , mg/Nm ³	KD, mg/Nm ³
50–100	200	250	-	20
100–300	200	200		
> 300	150	150		

Jei apskaičiuotos teršalų koncentracijos dūmuose viršija 1.3 lentelėje pateiktas ribines vertes, taikomas mokestis už aplinkos teršimą [30]. Taršos tarifai pateikti 1.4 lentelėje. Tam, kad užtikrinti teršalų ribines vertes, išvengti papildomų mokesčių už aplinkos taršą bei saugant gamtą nuo taršos dūmų valymas yra privalomas.

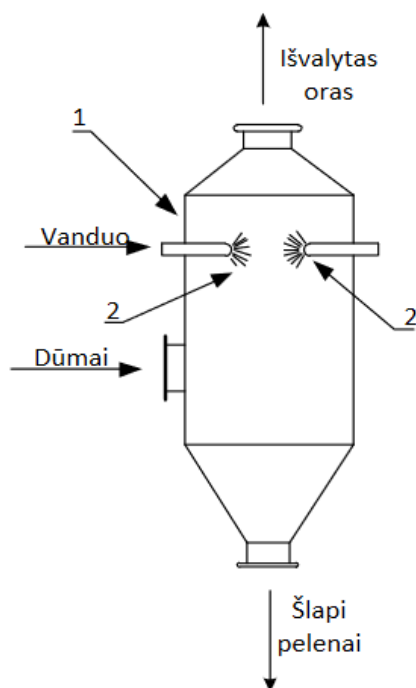
1.4 lentelė. Taršos tarifai viršijus ribines vertes [30]

Teršalai	Tarifas, Eur/t		
	2021 m.	2022 m.	2023 m.
SO_2 (sieros dioksidas)	204	204	204
NO_x (azoto oksidai)	384	384	384
Kietosios dalelės	16 000	19 500	22 500

1.4. Biokuro dūmų valymas skruberiuose

Kontaktinis kondensacinis ekonomaizeris, dar kitaip vadinamas skruberiu (1.7 pav.), pasižymi tuo, kad jame dūmai ir vanduo kontaktuoja tiesiogiai, todėl iš dūmų galima ne tik paimti likusią šilumos energiją, bet tuo pačiu juos išvalyti išpurškiant vandenį [31].

Dūmų valymas ekonomaizeryje svarbus ne tik aplinkosauginiu požiūriu, bet ir ekonominiu – dūmuose yra SO_2 junginių, kurie tirpsta vandenyje ir yra koroziškai agresyvūs [32]. Kadangi kondensaciniame ekonomaizeryje pasiekama rasos taško temperatūra, šie junginiai ištirpsta vandenyje ir nusėda ant šilumos mainų paviršių. Tokioje agresyvioje terpėje prasideda metalo paviršiaus korozija ir ilgainiui įrenginys tampa nebetinkamas naudoti, jį reikia remontuoti, eksploataavimo trukmė sumažėja. Tam, kad išvengti šio nepageidaujamo poveikio, į ekonomaizerio vidų kartu su vandeniu reikia įpurkšti SO_2 surišančias dūmų valymo priemones - katalizatorius, jog nevyktų reakciją su kondensacijos paviršiumi. Skruberio bokšte (1.7 pav.) paprastai yra 3-4 purškimo galvutės su purškstukais, per kuriuos smulkiu lašelių pavidalu išpurškiama vandeninė suspensija.



1.7 pav. Skruberio principinė schema [24]

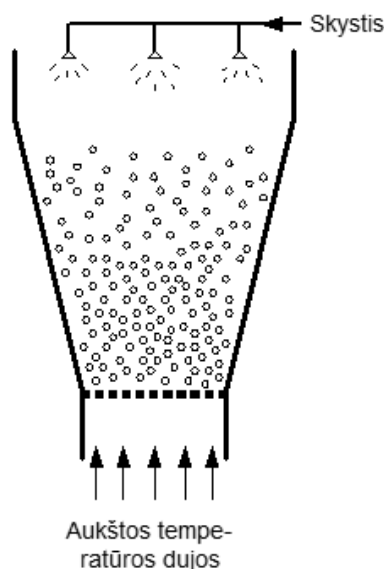
Į absorberį tiekiami degimo produktai sąveikauja su priešprieša kryptimi judančiais absorbento lašeliais. Sieros oksidams išvalyti iš dūmų naudojama klintys ar kalkės [33]. Šiuo šlapiu kalkių/klinčių skruberio metodu galima pašalinti iki 92-98% SO_2 , daugiau nei 50% kietųjų dalelių. SO_2 dujos tiesiogiai kontaktuoja su 95% $CaCO_3$ turinčia vandens-klinčių suspensija. Išvalyti dūmai patenka į lašų skirtuvą, po to į kaminą. Galutinis reakcijos metu susidarantis produktas yra gipsas, kurį galima panaudoti kaip statybinę medžiagą. Išvalant dūmus nuo sieros junginių vyksta šios reakcijos:



1.5. Išpurškiamo skysčio dispergavimas ekonomizaizeryje

Kontaktiniame kondensaciniame ekonomizaizeryje dūmai yra atvėsinami ir išvalomi išpurškiant vandenį lašelių pavidalu [34, 35]. Skysčio išpurškimas gan plačiai taikomas energetinėse technologijose: branduolinėje energetikoje, šilumos energetikoje, chemijos, biotechnologijos, medicinos ir kitose srityse. Pagal išpurškiamo skysčio prigimtį vyrauja skystasis kuras ir vanduo. Šilumos energetikoje skysčio išpurškimas naudojamas skystojo kuro išpurškimo vidaus degimo varikliuose ir kūryklose [36]. Gali būti išpurškiamas dyzelis, benzinai, mazutas ir kitas skystasis kuras. Kad gerai sudegtų, skystas kuras deginamas jį išpurškus – taip paspartinamas jo garavimas [17], kadangi dega ne skystis, o dega skysčio garo ir oro mišinys. Kuo kuro lašelis mažesnis, tuo greičiau jis įkaista ir užsidega, todėl lieka daugiau laiko jam degti. Tiesioginiu vandens įpurškimu į biokuro šalinamus dūmus grindžiamos kontaktinių kondensacinių ekonomizaizerių technologijos. Ekonomizaizeryje vandens garas kondensuojamas išpurškiamų vandens lašelių pagalba. Dūmų valymui naudojamas disperguotas vandens srautas, išvalomos kietosios dalelės, įvairūs oksidai.

Nors skysčio išpurškimas naudojamas įvairiose technologijose ir kraštinės sąlygos skiriasi, tačiau principas taikomas toks pat – siekiama padidinti šilumos mainų paviršių, kad procesai vyktų intensyviau. Skystį suskaidžius į smulkius lašelius padidėja kontaktas tarp skystos ir dujinės fazių, todėl skysčio išpurškimu paremtos technologijos yra efektyvesnės [37]. Pastebėta, kad smulkieji lašeliai iki rasos taško temperatūros pašyla labai sparčiai, o stambesniųjų pašilimo laikas žymiai ilgesnis [38]. Išpurškimui naudojami purkštukai, jų pagalba skystis išpurškiamas smulkių lašelių pavidalu ir kartu su dūmų srautu jie sudaro dvifazį srautą, dar kitaip vadinamą dispersiniu. Tai toks dvifazio srauto tekėjimas, kai nepertraukiamas dujų srautas užpildytas skystos fazės lašeliais.



1.8 pav. Principinė dispersinės džiovyklos schema [45]

Paprastai disperguotos fazės (vandens lašelių) tankis būna didesnis už vientisos fazės (dūmų), todėl svorio jėga, veikianti lašelį, viršija Archimedo jėgą, ir lašelis krenta žemyn. Disperguotam srautui susidaryti būtinos dvi sąlygos: dviejų skirtingų agregatinių būsenų (dujos, skystis, kietas medžiaga) medžiagos (fluido) buvimas sraute ir tarpfazinių paviršių sąveika abiejų fazių judėjime.

Galimi du ribiniai atvejai:

1. Pagrindinis nepertraukiamas srautas yra skysčio srautas, o dujų (garų) fazės būseną yra diskretinė.
2. Pagrindinis nepertraukiamas srautas yra dujų (garų) srautas, o skysčio fazės būseną yra diskretinė.

Dispergavimo procese skystis yra suskaidomas į didelį skaičių mažesnių tūrelių (1.8 pav.), kurie pereinamajame režime gali susilieti ar toliau skaidytis. Disperguoto skysčio technologijų efektyvumą apibrėžia dujų ir lašelių sraute vykstančių fazinių virsmų sparta. Fazinių virsmų procesai yra glaudžiai susiję su lašelių terminė būsena ir šilumokaita. Esminis disperguoto skysčio terminės būsenos savitumas yra tas, jog skystis lašeliuose neužverda, nors ir kaip intensyviai jie būtų šildomi. Aukštoje temperatūroje šylančių lašelių paviršiniai sluoksniai gali pasiekti skysčiui užvirti reikalingą soties būsenos temperatūrą, tačiau sąlygos visam skysčiui lašelyje užvirti nesusidaro [39].

2. Metodinė dalis

2.1. Sudėtinių ŠMM procesų sąveikos esmės paaiškinimas

Bendruoju atveju lašelių šilumokaita vyksta trimis būdais: šilumos laidumu (kondukcija), šilumos konvekcija ir šilumos spinduliavimu (šiluminė radiacija). Šilumos laidumo atveju šiluma plinta tiesiogiai per besiliečiančius paviršius, kurių temperatūra skirtinga. Konvekcijos metu šilumą perneša judantis skystis arba dujos, o spinduliavimo metu šilumą perneša elektromagnetinės bangos, sklindančios nuo spinduliuojančio kūno. Kartu su šiluma yra pernešama ir kūno masė. Masės mainai vyksta taip pat trimis galimais būdais: difuzija, konvekcija ir išspinduliavimu. Difuzija pasireiškia vienos medžiagos molekulėms skverbiantis pro kitos medžiagos molekules. Konvekcija – maišantis skirtingos koncentracijos medžiagoms, o spinduliavimo metu masė pernešama kvantais.

Temperatūra yra kūno būsenos parametras ir kartu apibūdina jo įšilimo laipsnį. Taip pat ji yra koordinatinių ir laiko funkcija:

$$T = f(x, y, z, \tau) \quad (2.1)$$

Temperatūros reikšmių visuma kūne tam tikru laiko momentu vadinama temperatūros lauku. Jis gali būti stacionarus ar nestacionarus, priklausomai ar nekinta, ar kinta laike. Taip pat temperatūros laukas gali būti vienmatis, dvimatis ar trimatis, jei temperatūra kinta viena, dviem ar trimis kryptimis.

Temperatūros pokyčio ir atstumo tarp izoterminių paviršių pokyčio normalės kryptimi santykio riba vadinama temperatūros gradientu:

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta T}{\Delta n} \right) = \frac{\partial T}{\partial n} = \text{grad } T \quad (2.2)$$

Temperatūros gradientas yra vektorius, kurio teigiama kryptis sutampa su temperatūros didėjimo kryptimi, matavimo vienetas [K/m]. Jei kūne yra temperatūros gradientas, tai pernešama ir šiluma. Q [J/s, W] – šilumos srautas, jis parodo pernešamos šilumos kiekį per kokį nors paviršių A . Pernešamos šilumos intensyvumą apibūdina šilumos srauto tankis q [W/m²], analogiškai aprašomas ir masės srauto tankis m [kg/s·m²]:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (2.3)$$

$$m = \frac{g}{A} \quad (2.4)$$

Pagrindinis šilumos mainų dėsnis apibūdinamas tokia išraiška:

$$Q = \frac{F_{var}}{F_{pas}} \cdot A_{\dot{m}} = \frac{\Delta T}{R_t} \cdot A_{\dot{m}}, \text{ W} \quad (2.5)$$

$$\text{arba } q = \frac{F_{var}}{R_{\dot{m}}}, \text{ W/m}^2 \quad (2.6)$$

Čia: F_{var} – varančioji jėga, kuri yra ΔT – temperatūrų skirtumas, K; F_{pas} – pasipriešinimo jėga, kuri yra R_t – terminė varža, $\frac{m^2 \cdot K}{W}$; $A_{\dot{m}}$ – šilumos mainų plotas, m².

Analogiškai apibrėžiamas ir masės mainų dėsnis:

$$q = \frac{F_{var}}{F_{pas}} \cdot A_{mm} = \frac{\Delta Y}{R_{mm}}, \text{ kg/s} \quad (2.7)$$

Čia: ΔY – varančioji jėga – koncentracijų skirtumas, R_{mm} – pasipriešinimo jėga – masės varža.

Kaip ir buvo minėta anksčiau, šiluma perduodama trimis būdais, todėl šilumokaitos procese perduodamą šilumą apibrėžia suminis šilumos srautas ir jo tankis:

$$Q_{\Sigma} = Q_k + Q_c + Q_r, \text{ W} \quad (2.8)$$

$$q_{\Sigma} = q_k + q_c + q_r, \text{ W/m}^2 \quad (2.9)$$

Kartu su šilumokaitos procesais gali vykti ir lašelio faziniai virsmai, kuriuos lydi masės pernašos procesai. Kaip ir minėta anksčiau, masė gali būti pernešama trimis būdais. Masės pernašą apibrėžia pernešamos masės srautas g , [kg/s], o intensyvumą nusako masės srauto ir ploto santykiu išreikštas masės srauto tankis m , [kg/(s·m²)]. Tuomet šilumokaitos procese perduodamą masę apibrėžia suminis masės srautas ir jo tankis:

$$g_{\Sigma} = g_d + g_c + g_r, \text{ kg/s} \quad (2.10)$$

$$m_{\Sigma} = m_d + m_c + m_r, \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2 \quad (2.11)$$

Įprastinėse technologijose radiacinės masės pernašos įtaką galima paneigti. Aukščiau esančiomis išraiškomis aprašomi sudėtinių šilumokaitos ir masės pernašos procesų srautai bei apibrėžtas jų sąveikos visumos rezultatas. Sąveikaudami skirtingos prigimties pernašos procesai vienas kitą veikia, todėl pakinta atskiro pernašos mechanizmo intensyvumas. Idealizuojant šį procesą ir darant prielaidą, kad sudėtiniai, kartu vykstantys procesai tarpusavyje nesąveikauja, jų atskiro pernašos mechanizmo iššauktas srautas būtų lygus atitinkamam srautui, jeigu jį iššauktų tik vienas atskirai vykstantis izoliuotas nuo kitų pernašos procesas. Sąlyginai tokį srautą išskyrus simboliu “0“, gausime tokias išraiškas sąveikos nebuvo atveju:

$$Q_{\Sigma}^0 = Q_k^0 + Q_c^0 + Q_r^0, \text{ W} \quad (2.12)$$

$$q_{\Sigma}^0 = q_k^0 + q_c^0 + q_r^0, \text{ W/m}^2 \quad (2.13)$$

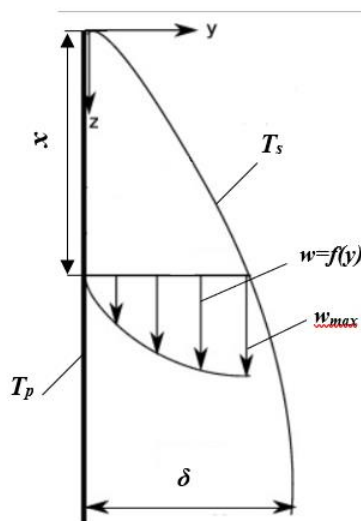
$$g_{\Sigma}^0 = g_d^0 + g_c^0 + g_r^0, \text{ kg/s} \quad (2.14)$$

$$m_{\Sigma}^0 = m_d^0 + m_c^0 + m_r^0, \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2 \quad (2.15)$$

Dėl sudėtinės vykstančios tarpusavio sąveikos pernašos procesų atveju, apskaičiuotieji srautai neatitinka: šilumos srautai $Q_{\Sigma} \neq Q_{\Sigma}^0$; $Q_k \neq Q_k^0$; $Q_c \neq Q_c^0$; $Q_r \neq Q_r^0$ ir masės srautai $g_{\Sigma} \neq g_{\Sigma}^0$; $g_d \neq g_d^0$; $g_c \neq g_c^0$; $g_r \neq g_r^0$. Neatitinka ir srautų tankiai. Todėl modeliuojant išpurkšto skysčio šilumokaitą ir fazinius virsmus į sudėtinių pernašos procesų sąveiką atsižvelgti yra būtina.

2.2. ŠMM procesų sąveikos savitumai kondensacinio ekonomaizerio technologijoje

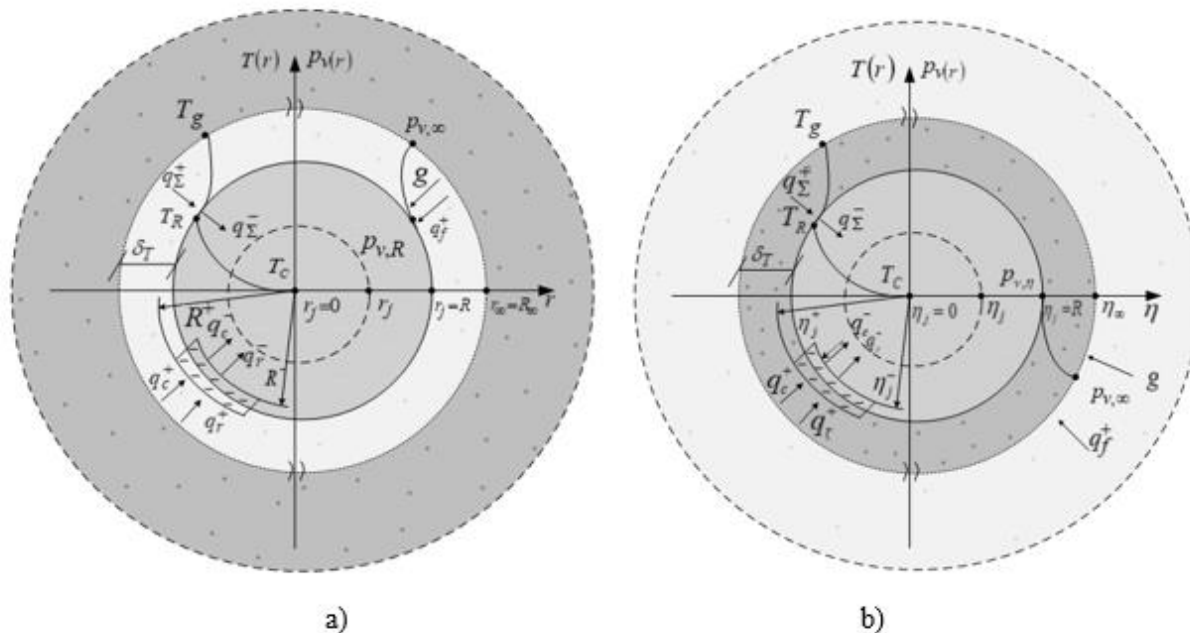
Šilumos atgavimui iš dūmų dažniausia naudojami dviejų tipo ekonomaizeriai: kontaktiniai ir rekuperaciniai. Rekuperaciniuose ekonomaizeriuose dūmai teka nedidelio diametro vertikaliais vamzdeliais iš kurių sudaryta bendra vamzdelių rinklė. Dūmai tekėdami vamzdelių vidumi yra apiplaunami vandens, kuris išpurškiamas iš aukščiausio ekonomaizerio taško. Tokie ekonomaizeriai nenaudoja papildomo šilumokaičio, kadangi vamzdelius, kurių vidumi teka dūmai, iš išorės apiplauna termofikacinis vanduo ir pats ekonomaizeris atlieka šilumokaičio funkciją. Rekuperaciniame ekonomaizeryje dūmai ir vanduo tiesiogiai nekontaktuoja – dūmai ataušinami per kontaktinį paviršių – vamzdžio sienelę. Svarbi yra kontakto T_k temperatūra tarp skystosios fazės (kondensato plėvelė arba vandens lašelis) ir dujinės fazės (biokuro dūmai). Ji apibrėžia skysčio paviršiuje vykstančių fazinių virsmų režimus. Kondensacinis režimas vyksta, kai dūmai kontaktuoja su paviršiumi, kurio temperatūra yra žemesnė už rasos taško T_{rt} temperatūrą ($T_k < T_{rt}$). Dūmai prie paviršiaus šiluminiame pasienio δ_T sluoksnyje ataušta nuo dūmų srauto T_d temperatūros. Vandens garas tampa sočiuoju ataušęs iki rasos taško T_{rt} temperatūros ir kondensuojasi ant skysčio paviršiaus. Susidaręs kondensatas suformuoja kondensato plėvelę ant kieto paviršiaus (2.1. pav.) arba įsilieja į vandens lašelį ir jį augina (2.2 pav.). Abiem atvejais vyks vandens paviršinis garavimas, kai plėvelės ar lašelio paviršius pašils virš rasos taško temperatūros t. y. kai $T_k > T_{rt}$. Todėl rekuperacinio ekonomaizerio atveju svarbūs yra gravitacinės kondensato plėvelės šilumos ir masės mainai, o kontaktinio kondensacinio ekonomaizerio atveju svarbūs yra įpurkšto vandens lašelių šilumos ir masės mainai. Nes šilumokaitos ir fazinių virsmų procesai apibrėžia tarpfazinio kontakto T_k temperatūrą.



2.1 pav. Kondensato plėvelė ant kondensacijos paviršiaus

Vertikalaus paviršiaus temperatūra 2.1 paveiksle pažymėta T_p , o kontakto tarp fazių temperatūra įvardinta T_s , numatant kad ji atitiks vandens garo soties būsenos temperatūrą. Pradiniame ruože, kuriame kondensato plėvelės dar nėra, vandens garas kondensuos tik tuomet, kai $T_p < T_s$. Tai įmanoma sienelę aušinant šaltesniu už T_s temperatūrą fluidu. Kontaktiniame kondensaciniame ekonomaizeryje dažnai tai būna grįžtantis termofikacinis vanduo. Garui kondensuojantis paviršių padengs žemyn tekanti kondensato plėvelė. Plėvelės tekėjimas gali būti laminarinis, banguotas ir turbulentinis [25]. Jei kondensacijos paviršius aukštas, laminarinis tekėjimas virs banguotu, o

apatinėje dalyje turbulentine. Susidariusi kondensato plėvelė atskiria dūmų srautą nuo paviršiaus, todėl suprastėja šilumos perdavimo intensyvumas. Per laminariškai tekančią plėvelę šiluma perduodama laidumu, kai teka banguotai – dalis perduodama konvekcija, o kai teka turbulentiškai – didžioji dalis šilumos perduodama konvekcija.



2.2 pav. Vandens lašelio šilumos ir masės mainų kondensacinio režimo (a) ir garavimo režimo (b) geometrinė interpretacija sudėtinio šildymo konvekcija ir spinduliavimu atveju [40]

Kitaip nei rekuperacinio tipo ekonomaizeryje, kontaktinio tipo ekonomaizeryje šiluma iš dūmų yra atgaunama kondensuojantis vandens garams ant išpurškiamo vandens lašelių paviršiaus. Kontaktiniuose kondensaciniuose ekonomaizeriuose labai svarbūs vandens lašelių šilumos ir masės mainai. Vandens įpurškimo dūmuose metu dalyvauja dviejų skirtingų fazių fluidai – skystis bei dujos, ir vyksta jų faziniai virsmai – skystis šyla ir garuoja, o dūmai vėsta ir kondensuojasi juose esantis vandens garas. Šie du skirtingų fazių fluidai sąveikauja dvifaziame sraute. Vandens išpurškimo, dar kitaip bendruoju atveju vadinamo dispergavimu, procese skystis yra suskaidomas į didelį skaičių mažesnių tūrelių. Disperguoto skysčio technologijų efektyvumą apibrėžia dujų ir lašelių sraute vykstančių fazinių virsmų sparta ir, palyginus su dideliu skysčio tūriu, labai išvystytas kontakto tarp skystosios ir dujų fazių paviršiaus plotas. Fazinių virsmų procesai yra glaudžiai susiję su lašelių termine būseną ir šilumokaita (2.2 pav.). Esminis disperguoto skysčio terminės būsenos savitumas yra tas, jog skystis lašeliuose neužverda, nors ir kaip intensyviai jie būtų šildomi [41]. Kondensacinių ekonomaizerių technologijose yra santykinai žema (palyginus su biokuro kūryklos dūmais) šalinamų dūmų temperatūra. Atitekantys šalinami dūmai kondensaciniame ekonomaizeryje ataušinami nuo apytiksliai 150°C iki apytiksliai 40°C temperatūros ir išmetami į aplinką. Jeigu dar papildomai pritaikomas šilumos siurblys, tai į atmosfera išmetamų dūmų temperatūra būna dar žemesnė. Todėl kondensacinio ekonomaizerio technologijoje šilumos mainai spinduliavimu nėra reikšmingi ir jų įtaka paneigiama.

Daroma pagrindinė prielaida: **šiluminės spinduliuotės įtaka sudėtinių šilumos ir masės mainų procesams yra nereikšminga ir numatoma, jog vyrauja konvekcinis šildymas ir difuzinius fazinius virsmus sustiprina konvekcine masės pernaša.**

Tuomet kondensacinių ekonomaizerių technologijoje pagrindiniu faktoriumi sudėtinių šilumos ir masės mainų procesų sąveikoje taps fazinius virsmus visuomet lydintis Stefano hidrodinaminis srautas [41].

Kondensacinėms technologijoms vystyti ir tobulinti svarbu apibrėžti Stefano hidrodinaminio srauto įtaką svarbiausiems kondensuotos terpės (kondensato gravitacinės plėvelės ir vandens lašelių) šilumos ir masės mainų parametrams. Tam būtina įvertinti sudėtinių šilumos ir masės mainų procesų sąveikos poveikį kondensato pernašą apibrėžiantiems parametrams. Labai svarbu išskirti pagrindinius pernašos parametrus ir orientuotis į jų jautrumą sąveikai įvertinimą.

2.3. Pagrindiniai kondensuotos terpės ŠMM dūmuose parametrai

Skysčio išpurškimo ir kondensato plėvelių technologijose, tuo pačiu ir šilumos atgavimo iš šalinamų dūmų kondensaciniuose ekonomaizeriuose, svarbūs yra skysčio fazinių virsmų P_f parametrai, kadangi jie apibrėžia įvykstančias dvifazio srauto sudėties transformacijas: skysčiui išgaruojant dujų srautas yra papildomai drėkinamas, o kondensuojantis vandens garui - išsausinamas. Dujų drėkinimo arba išsausinimo spartą apibrėžia nuo kondensuotos terpės sklindantis garo g_g [kg/s] srautas. Todėl **dvifaziame sraute vykstančių sudėtinių šilumos ir masės mainų pagrindiniu apibrėžiančiuoju parametru yra laikomas skysčio garo g_g srautas.** Be jo fazinių virsmų svarbiais parametrais dar įvardijamas garo srauto intensyvumą apibrėžiantis jo tankis m_g [kg/m²s] ir lašelio dispersiškumą, paviršiaus plotą bei tūrį apibrėžiantis lašelio skersmuo $2R$ [m].

Svarbu suvokti, jog skystosios fazės (lašelių arba kondensato plėvelės) fazinių virsmų procesas, tuo pačiu ir fazinių virsmų P_f parametrai, yra tarpiai susieti su skystosios terpės energine ir termine būseną bei dujų srauto temperatūra, drėgnumu ir tekėjimo greičiu. Kondensuotos terpės energinę būseną ir jos kitimą apibrėžia šilumos srautai kontakto tarp fazių paviršiuje. Todėl **konvekcines šilumos nuo dujų į lašelį srautas $q_{c,d}$ [W/m²], konvekcines šilumos skystyje srautas $q_{c,l}$ [W/m²] ir fazinių virsmų šilumos srautas q_f [W/m²] įvardijami svarbiais energiniais P_q parametrais.** Kondensuotos terpės terminę būseną apibrėžia jos temperatūros T_l laukas (kondensato plėvelės atveju jis dažniausia aprašomas $T(x, y, \tau)$ funkcija, o lašelio atveju dažniausia pritaikoma radialinės ir laiko koordinatų $T(r, \tau)$ funkcija). Šios funkcijos pritaikomos kontakto tarp fazių T_k temperatūros laikinei $T_k(\tau)$ funkcijai apibrėžti, numatant, kad T_k atitinka skystosios terpės paviršiaus temperatūrai (pvz. disperguotam vandeniui numatoma, jog T_k temperatūra yra lygi lašelio paviršiaus T_R temperatūrai). Todėl **pagrindiniu kondensato terpės terminiu P_T parametru laikoma jo paviršiaus temperatūra (lašelio atveju tai yra T_R temperatūra).**

Tolimesnėje analizėje numatoma orientuotis į sudėtinių šilumos ir masės mainų procesų sąveikos įvertinimą vandens išpurškimo kontaktinio ekonomaizerio technologijoje aspektu. Todėl žemiau aprašomas vandens lašelio šilumos ir masės mainų drėgnose dujose modelis ir aptariama jo skaitinio sprendimo metodika.

2.4. Vandens lašelio šilumos ir masės mainų modelis

Lašelių terminę būseną ir fazinius virsmus apibrėžia dujų sraute ir išpurkštame skystyje vykstančių sudėtinių pernašos procesų intensyvi tarpusavio sąveika aprašoma pagrindinių parametru $P_l(\tau)$ funkcijomis. Kaip jau minėta, terminių parametru $P_T(\tau)$ funkcijos yra susijusios su lašelio temperatūros lauko kitimu, energinių parametru $P_q(\tau)$ funkcijos yra susijusios su šilumos srautu lašelio paviršiuje kitimu, o fazinių virsmų parametru $P_f(\tau)$ funkcijos yra susijusios su garo srauto lašelio paviršiuje kitimu. Svarbu yra tai, jog kinta ne tik garo srauto lašelio paviršiuje intensyvumas, bet pakinta ir jo vektoriau kryptis, kai kondensacinis režimas keičiasi į garavimo režimą. Todėl lašelių sudėtinių šilumos ir masės mainų procesų sąveiką biokuro dūmų sraute tenka analizuoti nuosekliai kintančių kondensacinio – pereinamojo garavimo – pusiausviro garavimo fazinių virsmų režimų cikle:

$$\tau \equiv 0 \div \tau_{co} \div \tau_e \div \tau_f \quad (2.16)$$

Lašelio fazinių virsmų režimų ciklo (2.16) pradžia ($\tau=0$) sutapatinama su išpurkšto vandens lašelio susiformavimu dūmų sraute momentu, o pabaiga apibrėžiama lašelio išgaravimo momentui ($\tau=\tau_f$) Kondensacinis $0 \div \tau_{co}$ režimas yra svarbus vandens išpurškimo į drėgnų dujų srautą atveju ir jis vyks, kai susiformavusio lašelio paviršiaus temperatūra bus žemesnė už rasos taško temperatūrą. Lašelio pereinamasis $\tau_{co} \div \tau_e$ ir pusiausviro $\tau_e \div \tau_f$ garavimo režimai yra aktualūs praktiškai visoms skysčio išpurškimo technologijoms. Pusiausviro $\tau_e \div \tau_f$ garavimo režimas labai svarbus tuomet, kai technologija reikalauja kuo spartesnio skysčio išgarinimo, pavyzdžiui vandenį purškiant į kūryklos dūmus, ar skystąjį kurą į kūryklą ar vidaus degimo variklio cilindrą.

Fazinių virsmų režimo (2.16) cikle pasikeitimo iš kondensacinio į garavimo režimą aiškiai apibrėžia lašelio paviršiaus pašilimo iki rasos taško temperatūros momentas ir tuomet garo srautas įgauna nulinę vertę:

$$T_R(\tau = \tau_{co}) = T_{rt}; g_g(\tau = \tau_{co}) = 0 \quad (2.17)$$

Todėl lašelių šilumos ir masės mainų modelyje tyrime atraminiu laikomas lašelio momentinės paviršiaus temperatūros fazinių virsmų režimų ciklo (2.16) apibrėžimo uždavinys, kurį skaitiškai išsprendus $T_R(\tau)$ funkcijos atžvilgiu, lygiagrečiai apskaičiuojami ir visos kitos lašelio ŠMM parametru kitimą aprašančios $P(\tau)$ funkcijos.

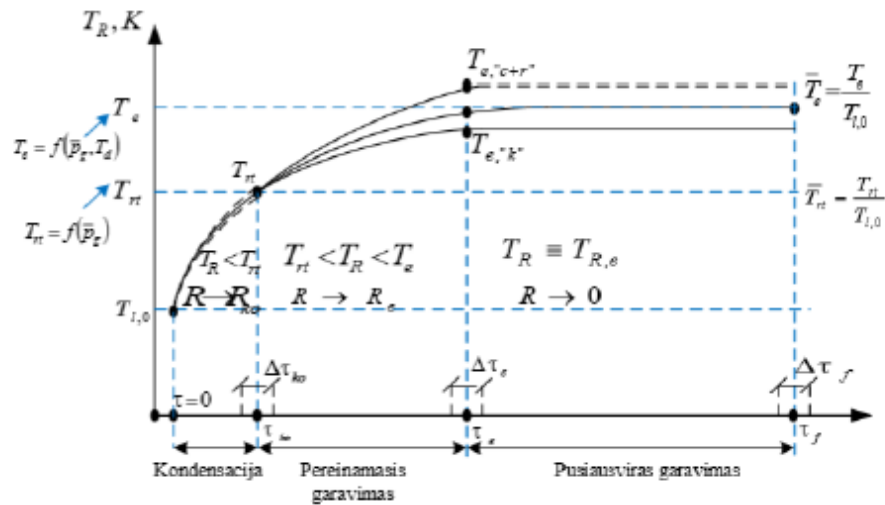
Sudarant matematinį modelį $T_R(\tau)$ funkcijai aprašyti, atsižvelgiama į tai, jog lašelio terminė būseną yra glaudžiai susijusi su jo energine būseną ir vykstančių fazinių virsmų režimais. Atsižvelgiama į tai, jog lašelio paviršiaus temperatūros kitimas atitinka mažo skysčio tūrelio šilimo dėsningumą, kurio specifiška yra ta, kad mažo tūrelio pusiausviro garavimo režimas prasideda prie žemesnės už soties būseną temperatūros, kai nusistovi šilumos balansas tarp dujų suteikiamo šilumos srauto q_d [W/m²] ir paviršinio garavimo šilumos srauto q_f [W/m²]. Pereinamųjų fazinių virsmų režime lašelio šilumokaitai ir faziniams virsmams taip pat galioja šilumos srautų lašelio paviršiuje balansas. Tačiau reikia įvertinti, kad lašeliui dujų teikiamas šilumos srautas ne tik garina, bet ir šildo vandenį lašelyje. Šylančio lašelio paviršiaus T_R temperatūra FVR cikle (2.16) kinta taip, kad prie paviršiaus nutekantys šilumos srautai atitiktų suteikiamam šilumos srautui. Bendruoju sudėtinio šildymo konvekcija ir spinduliavimu atveju, šilumos srautai lašelio paviršiuje kondensaciniame režime atitinka 2.2 pav. a geometrinę interpretaciją, o garavimo režime atitinka 2.2 pav. a geometrinę interpretaciją. Abi 2.2 pav. geometrines interpretacijas galima apibendrinti universaliala lašelio FVRC vektorine lygtimi:

$$\vec{q}_{\Sigma,d,R}(\tau) + \vec{q}_{\Sigma,l,R}(\tau) + \vec{q}_{f,R}(\tau) = 0 \quad (2.18)$$

Čia: $q_{\Sigma} = q_c + q_r$ yra konvekcijos q_c ir radiacijos q_r vidutiniais srautais apibrėžtas lašeliui išorinė šilumokaita suteikiamos šilumos vidutinis suminis srautas, W/m^2 ; R - lašelio paviršių nurodantis indeksas; d ir l yra lašelio paviršiaus puses link dujų ir link vidinių lašelio sluoksnių nurodantys indeksai atitinkamai. Lašelio šildymą (aušinimą) užtikrina lašelio išorinė šilumokaita, kurią apibrėžia lašeliui suteikiamos (nuvedamos) šilumos vidutinis suminis $q_{\Sigma,d}$ srautas. Skysčio lašelyje šilimą (aušinimą) užtikrina lašelio vidinė šilumokaita, kurią apibrėžia nuo lašelio vidinio paviršiaus nutekančios (į paviršių ištekančios) šilumos vidutinis suminis $q_{\Sigma,l}$ srautas. Vandens garo vidutinio srauto m_g , $[kg/m^2s]$ lašelio paviršiuje ir vandens fazinių virsmų šilumos L , $[J/kg]$ sandauga apibrėžia fazinių virsmų šilumos vidutinio srauto tankį q_f , $[W/m^2]$ lašelio paviršiuje:

$$q_f(\tau) = m_g(\tau)L(\tau) = \frac{g_g(\tau)}{4\pi R^2(\tau)}L(\tau) \quad (2.19)$$

Šilumos srautų balanso (2.19) lygtis aprašo lašelio paviršiaus temperatūros kitimą būdingais lašelio šildymo atvejais ir jį kokybiškai galima apibrėžti 2.3 paveikslą diagrama. Lašelio pusiausviro garavimo temperatūrą T_e apibrėžia dūmų T_d temperatūra ir X_g drėgnumas ir dar kiek daro įtaką lašelio šildymo procesas. Duotiems T_d ir X_g dūmų parametrams žemiausia T_e temperatūra bus lašelio šildymo laidumu atveju. Tiriamuoju konvekcinio šildymo atveju ji atitiks kokybiškai tarpinę kreivę (2.3 pav.)



2.3 pav. Lašelio paviršiaus temperatūros kitimo interpretacija lašelio šildymo laidumu, konvekcija ir sudėtinio šildymo atvejais pagal darbe [12] pateiktus apibendrinimus

Kadangi šiame tyrime kondensaciniam ekonomazeriui būdingose kraštinėse sąlygose spinduliavimo įtaka procesų sąveikai yra paneigta, todėl (2.18) lygtyje esantis suminis šilumos srautas prilyginamas konvekciniams ir šilumos srautų balanso lygtis įgauna paprastesnę formą:

$$\vec{q}_{c,d}(\tau) + \vec{q}_{c,l}(\tau) + \vec{q}_f(\tau) = 0 \quad (2.20)$$

Dujų suteikiamos konvekcinės šilumos srautas (2.20) išraiškoje aprašomas pagal modifikuotą šilumos atidavimo Nuselto dėsnį [41]:

$$\vec{q}_{c,d}(\tau) = \lambda_{gd}(\tau) \frac{Nu_0(\tau)}{2R(\tau)} [T_d(\tau) - T_R(\tau)] \cdot f_{B_T}(\tau)$$

$$Nu_0 = 1 + (1 + RePr)^{1/3} \cdot f(Re); f(Re \leq 1) = 1, f(1 < Re \leq 400) = Re^{0,077} \quad (2.21)$$

$$Re = 2R \frac{\rho_d |\Delta w_{sl}|}{\mu_{gd}}$$

Konvekcinio šilumos srauto kryptį apibrėžia dūmų ir lašelio paviršiaus temperatūrų skirtumas ir jis (2.20) išraiškoje laikomas teigiamu, kai $T_d > T_R$. Vandens garo ir dūmų dujų mišinio šilumos laidžio koeficientas (2.21) išraiškoje parenkamas pagal šiluminiam sluoksniui būdingą garo ir dujų mišinį:

$$\lambda_{gd} \equiv \lambda_{gd}(T_{gd}, X_{gd}), \text{ kai } T_{gd}(\tau) = T_R(\tau) + [T_d(\tau) - T_R(\tau)]/3$$

$$X_{gd}(\tau) = X_{g,R}(\tau) + [X_{g,R}(\tau) - X_{g,d}(\tau)]/3 \quad (2.22)$$

Spoldingo šilumos pernašos B_T parametro funkcija f_{B_T} (2.21) išraiškoje atsižvelgiama į Stefano hidrodinaminio srauto vaidmenį konvekcinėje šilumos pernašoje. Pataisos funkcija apibrėžiama pagal universalią lašelio FVR ciklui išraišką [41]:

$$f_{B_T} = \frac{\ln(1+B_T)}{B_T}, \text{ kai } B_T = c_{p,gd} \frac{T_d+T_R}{L} \frac{q_f}{q_{c,g}} \quad (2.23)$$

Garų srautas (2.19) išraiškoje aprašomas pagal metodiką [42]:

$$g_g = 2\pi R \rho_{gd} D_{gd} \ln(1 + B_M) \cdot f_{B_M}; f_{B_M} = \left[2 + B_M \frac{Sh_0 - 2}{(1+B_M)^{0,7} \ln(1+B_M)} \right]$$

$$Sh_0 = 1 + (1 + ReSc)^{1/3} f(Re); f(Re \leq 1) = 1, f(1 < Re \leq 400) = Re^{0,077} \quad (2.24)$$

$$Re = 2R \frac{\rho_g [\Delta w_{l-g}]}{\mu_{vg}}; B_M = \frac{Y_{v,R} - Y_{v,\infty}}{1 - Y_{v,R}}$$

Konvekcines šilumos srautas lašelyje apskaičiuojamas pagal modifikuotą Furje šilumos laidumo dėsnį:

$$q_{c,l}(\tau) = -\lambda_l(\tau) \left. \frac{\partial T(\tau,t)}{\partial r} \right|_{r=R} \cdot k_c(\tau) \quad (2.25)$$

Vandens cirkuliacijos įtaka (2.25) išraiškoje įvertinta efektyviuoju šilumos laidžio k_c parametru pagal metodiką [42], o temperatūros lauko lašelyje gradientas apibrėžiamas pagal sudėtinio šilumos plitimo spinduliavimu ir laidumu modelį [43], atsižvelgus, jog tiriamuoju atveju spinduliuotės srautas lašelyje yra prilygintas apytiksliai nuliui:

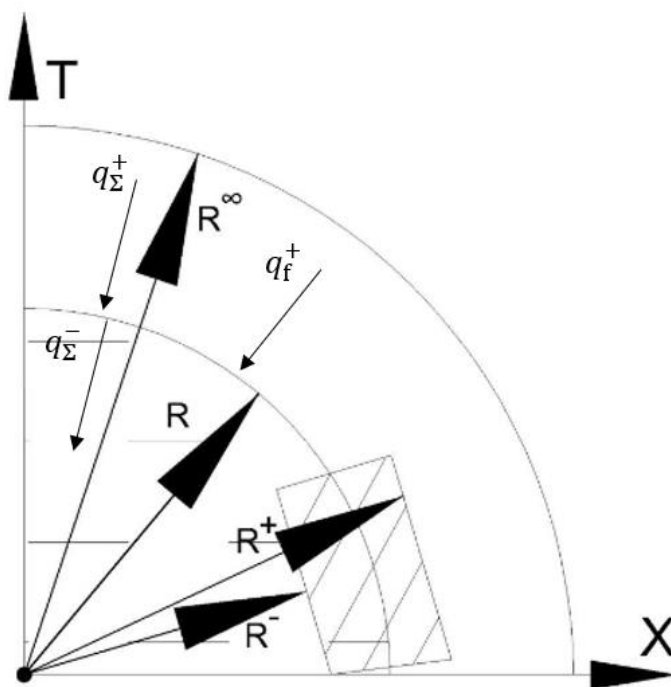
$$\left. \frac{\partial T(\tau,t)}{\partial r} \right|_{r=R} = \frac{2}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\tau} R \frac{dT_R}{d\tau} \exp \left[a \left(\frac{n\pi}{R} \right)^2 (\tau_* - \tau) \right] d\tau_* \quad (2.26)$$

Lašelio slydimas dūmų sraute ir fazinių virsmų dinamika apibrėžiama judesio ir garavimo diferencialinių lygčių sistema [41, 42]:

$$\frac{d}{d\tau} = \left[\frac{4}{3} \pi \rho_l(\tau) R^3(\tau) \right] = -g_g(\tau) \quad (2.27)$$

$$\frac{dw}{d\tau} = \frac{3}{16} \frac{\mu_g w_g - w_l}{\rho_l R^2} C_l Re_\infty; C_l = \frac{24 + 4,8 Re^{0,63}}{(1 + B_T)^{0,2} Re}$$

2.4.1. Šilumos srautų ryšio interpretacija kondensaciniame režime



2.4 pav. Šilumos srautų ryšio diagrama kondensaciniame režime

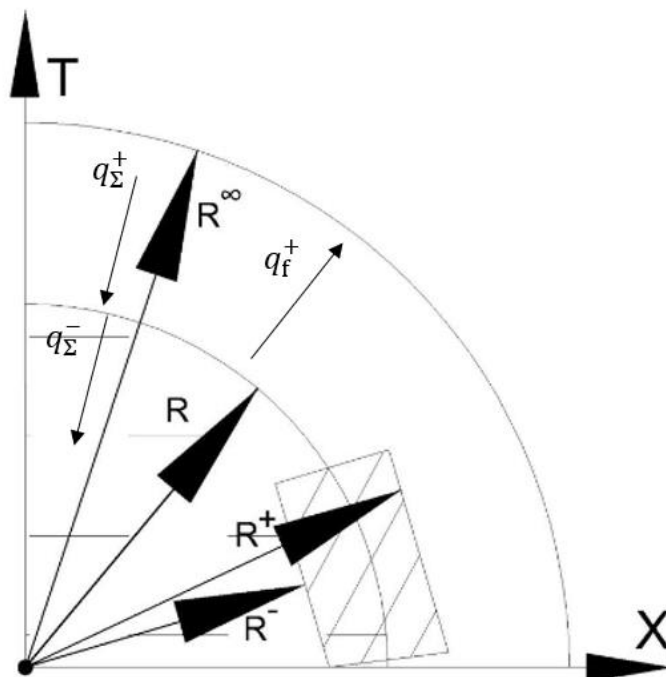
Lašelio spindulys 2.4 paveiksle apibrėžiamas kaip spindulys R , R^{+} - nurodo išorinę lašelio pusę, R^{-} - vidinę lašelio pusę, o R^{∞} apibrėžia orientacinį lašelį supančio garo ir dūmų mišinio sluoksnį. Priimama, kad $R \equiv |R^{+}| \equiv |R^{-}|$. Indeksas „+“ rodo, jog parametrai priklauso išorinėj lašelio daliai, „-“ – vidinei. 2.4 pav. parodo šilumos srautų kryptis kondensacinio režimo metu. Kondensaciniame režime ant lašelio paviršiaus susikondensuoja vandens garas ir išsiskyrusiu fazinių virsmų šiluma kartu su išorine konvekcija intensyviai šildo vandenį. Todėl (2.20) šilumos srautų balanso lygtis kondensaciniam režimui užrašoma algebrinėje formoje taip:

$$q_{c,l}(0 < \tau < \tau_{co}) = q_{c,d}(\tau) + q_f(\tau)$$

$$q_{c,l}(\tau = \tau_{co}) = q_{c,d}(\tau_{co}) \quad (2.28)$$

2.4.2. Šilumos srautų geometrinė ir fizikinė interpretacija garavimo režime

Pereinamojo garavimo režime (2.5 pav.) lašeliui suteikiamos konvekcinės šilumos srauto dalis garina vandenį, o likusi jo dalis vidine šilumos konvekcija nuvedama į lašelį ir šildo vandenį.



2.5 pav. Šilumos srautų ryšio diagrama garavimo režime

Todėl (2.20) šilumos srautų balanso lygtis pereinamojo garavimo režimui užrašoma algebrinėje formoje taip:

$$q_{c,l}(\tau_{co} < \tau < \tau_e) = q_{c,d}(\tau) - q_f(\tau) \quad (2.29)$$

Pusiausviro garavimo režime visas konvekcinis išorinės šilumos srautas garina lašelį. Todėl (2.20) šilumos srautų balanso lygtis pusiausviro garavimo režimui užrašoma algebrinėje formoje taip:

$$q_f(\tau \geq \tau_e) = q_{c,d}(\tau) \quad (2.30)$$

2.5. Skaitinio modeliavimo metodika

Lašelio fazinių virsmų režimų cikle (2.16) sąlyginai numatomas sveikas skaičius kontrolinių laikų I kiekis ir parenkamas toks laiko koordinatės kitimo $\Delta\tau$, [s] žingsnis, kad pereinamajame fazinių virsmų režime būtų fiksuojama apie 100 kontrolinių τ_i laikų. Tuomet sudaromas laiko skalės gradavimo tinklelis:

$$\tau_i = \tau_{i-1} + \Delta\tau, \text{ kai } \tau_{i=1} = 0; \Delta\tau = \frac{\tau_f}{(I-1)} \quad (2.31)$$

Reikia atsižvelgti į tai, kad fazinių virsmų režimų cikle (2.16) lašelio dydis kinta. Todėl įvedama bematė radialinė koordinatė - $\eta=r/R$ koordinatė, kuri visuose FVC (2.16) režimuose užtikrina, kad būtų bematis vienetinis lašelio spindulys. Parenkama $J = 41$ lašelio vidinių kontrolinių $A_{j=1 \div J}$ pjūvių, kurie apibrėžiami radialine η_j koordinate pagal schemą:

$$\eta_1 = 0, \eta_{1 < j < J} = \eta_{j-1} + \frac{1}{J-1}, \eta_j = 1 \quad (2.32)$$

Vandens lašelio šilimas ir faziniai virsmai biokuro dūmų sraute sumodeliuojami skaitiškai sprendžiant lašelio (2.16-2.32) matematinį modelį. **Šio modelio ir jo skaitinio sprendimo algoritmo universalumą vandens lašelių fazinių virsmų (2.16) ciklo kondensaciniame ir garavimo režimuose užtikrina tai, kad fazinių virsmų režimo kaitos iš kondensacinio į garavimą momentu vandens garo srautas lašelio paviršiuje autonomiškai pakeičia savo vektoriaus kryptį, t. y. jo pagal (2.24) išraišką apskaičiuotoji vertė iš neigiamos kondensaciniame režime tampa teigiama garavimo režime.** Tą užtikrina Spoldingo pernašos B_M parametro priklausomybė nuo vandens garo masinės $Y_{g,R}$ dalies dujų mišinyje prie lašelio ir masinės $Y_{g,d}$ dalies už difuzinio sluoksnio (t. y. dūmuose) skirtumo $Y_{g,R} - Y_{g,d}$. Kadangi kondensaciniame režime vandens garo koncentracija dūmuose yra didesnė negu prie lašelio, todėl vandens garas sklinda link lašelio, šiluminiame pasienio sluoksnyje ataušta iki rasos taško temperatūros ir kondensuojasi ant lašelio paviršiaus. Apskaičiuotasis B_M parametras yra neigimo ženklo dydis ir tai užtikrina neigiamo ženklo apskaičiuotąjį garo srautą, taigi, ir neigiamo ženklo fazinių virsmų šilumos srautą. Garavimo režimas prasideda lašelio paviršiu pašilus virš rasos taško temperatūros. Tuomet vandens garo koncentracija prie lašelio tampa didesne negu dūmuose už difuzinio sluoksnio. Todėl lašelio paviršiuje išsiskyręs vandens garas sklinda nuo lašelio, o šiluminiame pasienio sluoksnyje pašyla iki dūmų temperatūros. Kai garuoja daug vandens lašelių, dūmų drėgnumas gali juntamai išaugti, o dūmai ataušti. Todėl vandenį prieš kondensacinį ekonomizerį reikia išpurkšti taip, kad lašeliai kuo sparčiau išgaruotų. O kontaktiniame kondensaciniame ekonomizeryje vandenį reikia įpurkšti taip, kad kirsdami dūmų srautą lašeliai nespėtų pašilti virš rasos taško temperatūros. Tik tuomet dūmai bus išsausinami efektyviai. Taigi, visais vandens įpurškimo į šalinamų dūmų srautą atvejais reikia įvertinti lašelio šilimo ir fazinių virsmų procesų dėsningumus. Jiems įtaką daro sudėtinių pernašos procesų sąveika. Todėl numatyta pradžioje skaitiškai sumodeliuoti vandens lašelio kondensacinį ir pereinamojo garavimo režimą ir apibrėžti Stefano hidrodinaminio srauto, kuris visuomet lydi fazinius virsmus, vaidmenį konvekciniame šilumos ir garo pernašos procese. O po to įvertinti dūmų temperatūros prieš kondensacinį ekonomizerį ir jame įtaką vandens lašelio šilimui ir faziniams virsmams apsibrėžtose kraštinėse sąlygose.

Skaitinis tyrimas atliktas KTU Energetikos katedroje sukurta iteracinio skaičiavimo programa „LAŠAS“, kuria naudojantis pakanka apibrėžti kraštines ŠMM sąlygas pagal dūmų srauto ir į jį įpurškiamo vandens lašelių parametrus.

3. Vandens lašo sudėtinių ŠMM procesų sąveikos įvertinimas kontaktinio ekonomizerio atveju

3.1. Kraštinės ŠMM procesų sąlygos

Skaitiškai modeliuojant į biokuro dūmų srautą įpurkšto vandens ŠMM procesus daroma **pagrindinė prielaida**, jog įpurškiama santykinai nedaug, palyginus su dūmų srautu, vandens, todėl **lašelių šilumos ir fazinių virsmų procesai dūmų parametru nepakeičia**. Modeliuojant programa „LAŠAS“ numatoma atsižvelgti į šias konkrečias kraštines sąlygas pagal dūmų ir vandens parametrus:

Biokuro šalinamų dūmų srautas apibrėžtas taip:

- Dūmų temperatūra $t_d=80$ °C ir 150°C
- Dūmų drėgnumas pagal vandens garo tūrinę dalį $X_{g,d}=0,3$
- Dūmų srauto tekėjimo greitis $w_d=10$ m/s

Įpurškiamas vanduo apibrėžtas taip:

- Vandens temperatūra $t_l=20$ °C
- Lašelių dispersiškumas pagal 2R skersmenį 100 mikrometrų
- Lašelio pradinė temperatūra $t_{R,0} = t_l$
- Lašelių pradinis greitis $w_{l,0}=50$ m/s
- Lašelio pradinis slydimo greitis $w_{sl,0}=40$ m/s

3.2. Modeliavimo rezultatų grafinė interpretacija ir analizė

Aptartose kraštinėse sąlygose atliktas skaitinis tyrimas programa „LAŠAS“, kuriame **orientuotasi į lašelio fazinių virsmų režimų biokuro dūmuose ciklo (2.16) kondensacinį ir pereinamojo garavimo režimą**, kadangi jie yra svarbiausi biokuro dūmų šilumos atgavimo kondensaciniame ekonomizeryje technologijoje. Skaitinio tyrimas vykdytas dviem etapais:

- **Pirmajame etape sumodeliuoti lašelio ŠMM procesai, kai neatsižvelgiama į Stefano hidrodinaminio srauto įtaką sudėtinių procesų sąveikoje.** Tuomet į programą „LAŠAS“ įtrauktos papildomos sąlygos: 1) išorinio konvekcinio šilumos srauto (2.21) išraiškos skaitinėje schemoje įvesta papildoma $f_{BT}=1$ sąlyga; 2) vandens garo srauto lašelio paviršiuje (2.24) išraiškos skaitinėje schemoje įvesta papildoma $f_{BM}=1$ sąlyga. Tai sudarė prielaidas paneigti Stefano hidrodinaminio srauto įtaką lašelio konvekcinei šilumos ir garo pernašai.
- **Antrajame etape išlaikytos pirmajame etape taikytos kraštinės sąlygos ir toks pat laiko kitimo žingsnis skaitinėje schemoje, tačiau (2.21) išraiškoje įvertinta tikroji $f_{BT}(\tau)$ funkcija, o išraiškoje (2.24) įvertinta tikroji $f_{BM}(\tau)$ funkcija.**

Visais modeliuotais atvejais pateikta 2.3 skyrelyje aptartų pagrindinių lašelio ŠMM parametrų $P(\tau)$ ir $P_0(\tau)$ funkcijų grafinė interpretacija. Ji išanalizuota dviem etapais. Pirmajame etape pradžioje palyginamuoju metodu įvertinti pagrindinių parametrų laikinių funkcijų grafikų skirtumai, kai atsižvelgiama į sąveiką arba ne (3.2.1 skyrelis). Po to, sąveikos įtaka įvertinama funkcijų santykinėje $P(\tau)/P_0(\tau)$ formoje ir apibrėžiama procentinis pagrindinių parametrų nukrypimas dėl sąveikos dinamikos pereinamųjų fazinių virsmų kondensaciniame ir garavimo režimuose.

3.2.1. Stefano hidrodinaminio srauto įtakos lašelio pereinamiesiems ŠMM procesams įvertinimas

Šiame skyrelyje 3.1-3.7 paveiksluose pateikti pagrindinių lašelio ŠMM parametrų $P(\tau)$ ir $P_0(\tau)$ funkcijų grafikai kondensaciniame ir pereinamojo garavimo režimuose. **Paveiksluose kreivėmis (1) atspindėti $P(\tau)$ funkcijų grafikai, kai įvertinama Stefano hidrodinaminio srauto įtaka sudėtinių pernašos procesų sąveikoje. Paveiksluose kreivėmis (2) atspindėti $P_0(\tau)$ funkcijų grafikai, kai neįvertinama Stefano hidrodinaminio srauto įtaka sudėtinių pernašos procesų sąveikoje.** Pagal juos galima apibrėžti pagrindinių lašelio ŠMM parametrų $\Delta P(\tau)=P(\tau)-P_0(\tau)$ skirtumą lašelio pereinamųjų fazinių virsmų režimuose.

Pagrindinių lašelio ŠMM parametrų $P(\tau)$ ir $P_0(\tau)$ funkcijų grafikai kondensaciniame režime pateikti 3.1; 3.3; 3.5 a; 3.6 a ir 3.7 a paveiksluose. Juose galima išskirti reikšmingiausius sąveikos laikotarpius ir apibrėžti konkretaus parametro absoliučius pokyčius sąveikos įtakoje kondensaciniame režime.

Lašelio fazinių virsmų kaita iš kondensacinio į garavimo režimą atsispindi 3.2 a ir 3.4 a paveiksluose, pagal kuriuos galima tiksliai apibrėžti režimo kaitos momentą ir sąveikos įtaką jam.

Pagrindinių lašelio ŠMM parametrų $P(\tau)$ ir $P_0(\tau)$ funkcijų grafikai pereinamojo garavimo režime pateikti 3.2 b; 3.4 b; 3.5 b; 3.6 b ir 3.7 b paveiksluose. Juose galima išskirti reikšmingiausius sąveikos laikotarpius ir apibrėžti konkretaus parametro absoliučius pokyčius sąveikos įtakoje pereinamojo garavimo režime.

3.1 a. pav. pavaizduotas garo srauto g_g kitimas kondensacinio režimo metu. Laikas $\tau=0$ s žymi lašelių įpurškimo į dūmų srautą laiką. Kondensacinis režimas pereina į pereinamojo garavimo režimą, kai $g_g=0$ kg/s – maždaug 0,015s. Iki šio momento garo srauto reikšmės yra neigiamos. Taip yra todėl, kad išorinio konvekcinio srauto $q_{c,d}$ ir fazinių virsmų q_f energija naudojam lašeliui šildyti, nes lašelio temperatūra žemesnė nei rasos taško. Todėl vandens garas prie paviršiaus kondensuojasi, o fazinių virsmų srauto kryptis yra link lašelio ir įgauna neigiamą reikšmę. Vertinant Stefano hidrodinaminio srauto įtaką garo srauto reikšmei, didžiausias skirtumas tarp reikšmės su sąveika ir be jos yra pradinio įpurškimo $\tau=0$ s momentu (3.1 b. pav.). Be sąveikos $g_g^2 = -0,1843 \cdot 10^{-7} \text{ kg/s}$, su sąveika $g_g^1 = -0,1779 \cdot 10^{-7} \text{ kg/s}$, $\Delta g_g = 0,0064 \cdot 10^{-7} \text{ kg/s}$ - tai reiškia, kad kondensacija vyksta ne taip intensyviai, kaip numato režimas be sąveikos įvertinimo. Nuo maždaug $\tau=0,0025$ s garo srauto reikšmės panašios ir iki kondensacinio režimo pabaigos Stefano hidrodinaminio srauto sąveikos įvertinimas skaičiavimo tikslumui nedaro didelės įtakos.

Kondensacinio režimo pradžioje garo srautas be sąveikos buvo didesnis nei garo srautas su sąveika, tačiau pereinant iš kondensacinio režimo į pusiausvirojo garavimo režimą (3.2 a. pav.) garo srautas su sąveika turi didesnę reikšmę, nei be sąveikos. Tai lemia, kad kondensacinio režimo pabaiga pasiekama greičiau, apie $\tau=0,01536$ s, kai įvertinama sąveika, o be sąveikos $\tau=0,01596$ s arba 0,0006 s vėliau. Pasiekus pereinamąjį garavimo režimą (3.2 b. pav.) garo srauto g_g vertės įgauna teigiamą

reikšmę. Taip yra todėl, kad vandens lašelis buvo intensyviai šildomas ir pasiekė rasos taško temperatūrą, tad dalis suteikiamo šilumos srauto $q_{c,d}$ šildo lašelį, o kita dalis garina vandenį, tad garo srauto kryptis pasikeičia ir fazinių virsmų srautas q_f įgauna teigiamą vertę, prasideda paviršinis garavimas. Pereinamojo garavimo režime, įvertinus Stefano hidrodinaminio srauto įtaką, garo srautas turi didesnę reikšmę, nei be sąveikos įvertinimo, tad garavimo intensyvumas yra didesnis. Artėjant prie pusiausvirojo garavimo, skirtumas tarp garo srauto su sąveika ir be mažėja. Pusiausvirojo garavimo režimas vyksta maždaug 0,036s ir garo srauto reikšmė nusistovi ties maždaug $0,001 \cdot 10^{-7}$ kg/s.

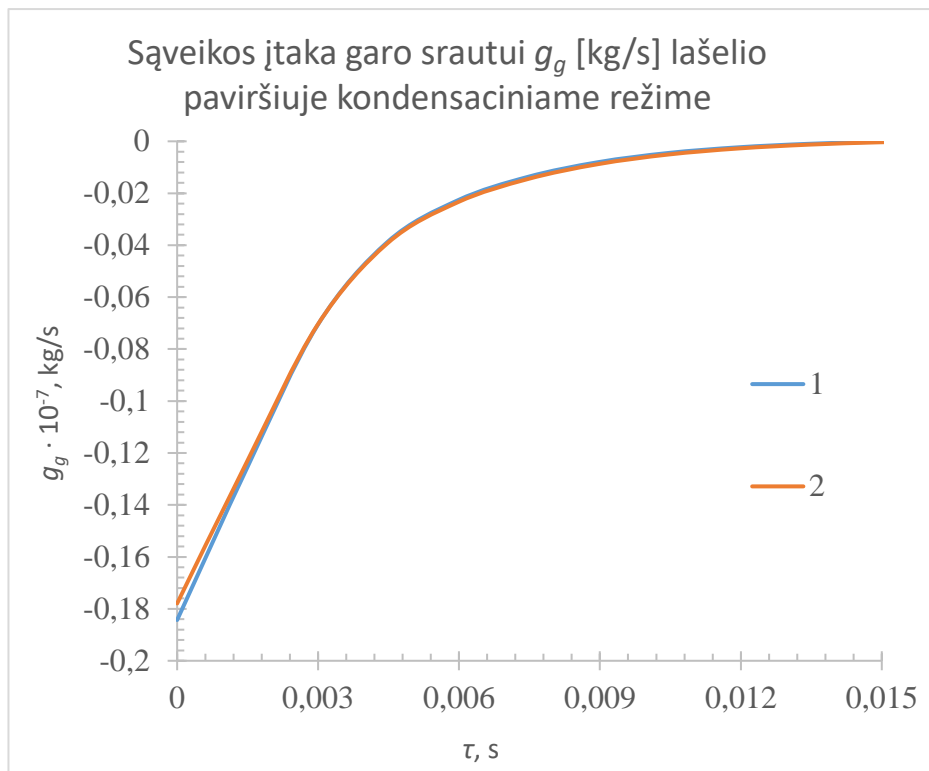
Vertinant garo srauto tankį m_g su sąveiką ar be, galima pastebėti, kad kondensacinio režimo pradžioje (3.3 a. pav.) garo srautas įvertinus sąveiką turi mažesnę reikšmę ($-0,57 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), nei be sąveikos ($-0,55 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), tad pradžioje kondensacijos procesas ant lašelio paviršiaus vyksta ne taip intensyviai. Toliau, besibaigiant kondensaciniam režimui (3.3 b. pav.), garo srauto tankis su sąveikos įvertinimu yra didesnis, nei be sąveikos – kondensacijos procesas vyksta intensyviau. Iki kondensacinio režimo pabaigos garo srauto tankio reikšmės taip pat turi neigiamą reikšmę, pereinant iš kondensacijos režimo į pereinamojo garavimo garo srauto tankis lygus nuliui, o prasidėjus pereinamajam garavimui įgauna teigiamas vertes (3.4 a. pav.). Taip pat, kaip ir garo srautui, garo srauto tankis įvertinus Stefano hidrodinaminio srauto įtaką rodo, kad pereinamojo garavimo režimas prasidės anksčiau, nei neįvertinus sąveikos, 0,0002s anksčiau. Prasidėjus pereinamojo garavimo režimui, iš pradžių (3.4 b. pav.) garavimo intensyvumas yra labai didelis ir pasiekus maksimalią reikšmę, maždaug apie $\tau=0,0123\text{s}$, intensyvumas po mažu slopsta kol galiausiai garo srauto tankis pasiekia nusistovėjusią reikšmę ir daugiau nebekinta – prasideda pusiausvirojo garavimas. Garo srauto tankis su sąveiką turi mažesnę reikšmę ($0,0357 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) po piko pasiekimo, nei be sąveikos įvertinimo ($0,0362 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), tad garavimas yra mažiau intensyvus pereinant į pusiausvirojo garavimo režimą, pasiekus pusiausvirojo garavimo režimą garo srauto tankis nusistovi ties maždaug $0,02 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ reikšme.

3.5 a ir b paveiksluose vertinama Stefano hidrodinaminio srauto įtaka dujų konvekciniam srautui $q_{c,d}$. Viso proceso metu dūmų suteikiamas garo konvekcinis srautas mažėja – dūmai atiduoda šilumą, taip pat viso proceso metu konvekcinis srautas įvertinus sąveikos įtaką turi didesnes reikšmes, nei neįvertinus – šilumos atidavimo procesas vyksta intensyviau. Kondensacinio režimo metu (3.5 a pav.) šiluma atiduodama intensyviausiai lašeliui sušildyti – su sąveikos įvertinimu $q_{c,d}=170,2 \text{ kW}/\text{m}^2$ įpurškimo momentu, be sąveikos $q_{c,d}=140,9 \text{ kW}/\text{m}^2$. Garavimo režimo metu (3.5 b pav.) skirtumas tarp apskaičiuotų reikšmių yra mažesnis ir procesas nebe toks intensyvus lašeliui šildyti ir garinti – su sąveikos įvertinimu $q_{c,d}=8,02 \text{ kW}/\text{m}^2$, be sąveikos $q_{c,d}=7,8 \text{ kW}/\text{m}^2$. Toliau sekant pusiausvirojo garavimo režimui konvekcinio srauto reikšmė nusistovi ties maždaug $6,65\text{-}6,67 \text{ kW}/\text{m}^2$ riba ir nebekinta.

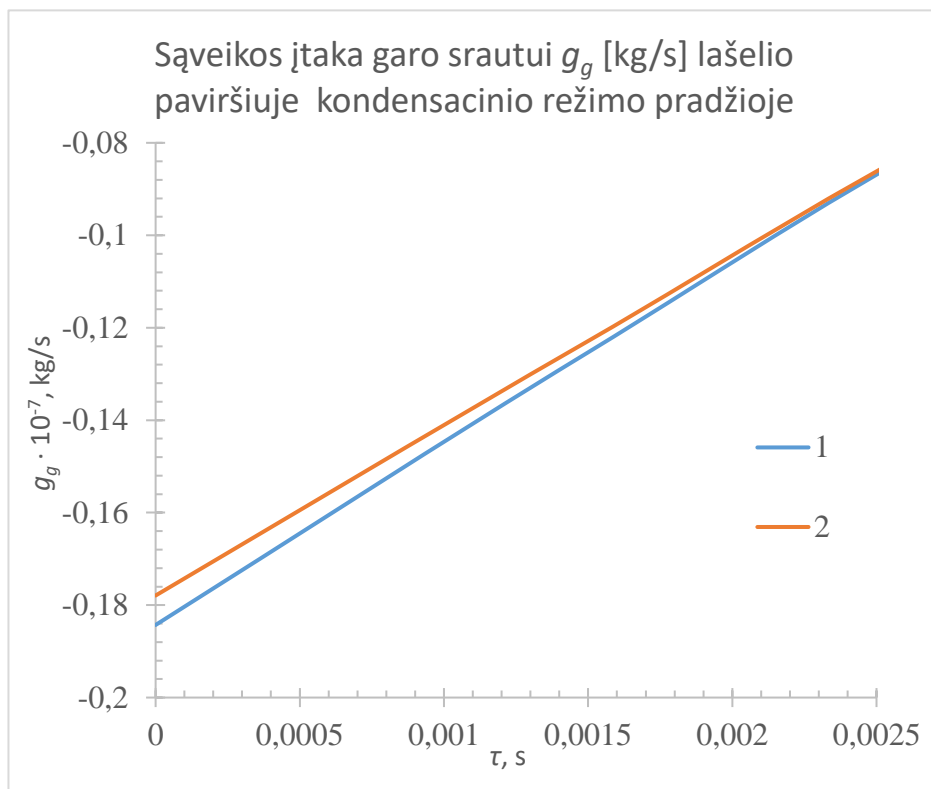
Vertinant Stefano hidrodinaminio srauto įtaką lašelio konvekciniam srautui $q_{c,l}$ (3.6 a ir b pav.) skirtumas tarp verčių su sąveikos įvertinimu ir be yra mažesnis. Lašelio įpurškimo momentu konvekcinio srauto lašelyje be sąveikos įvertinimo reikšmė yra didesnė ir lygi $-1388,2 \text{ kW}/\text{m}^2$, su sąveika $-1437,9 \text{ kW}/\text{m}^2$, ir kondensacinio proceso metu šis skirtumas vis mažėja (3.6 a. pav.). Konvekcinis rautas lašelyje intensyviausiai kinta nuo lašelio įpurškimo momento iki maždaug $\tau=0,004\text{s}$. Kondensacijos metu konvekcinio lašelio šilumos rauto reikšmės taip pat yra neigiamos vertės, nes lašelis šildomas ir jam suteikiama šiluma, kai $q_{c,l}=0 \text{ kW}/\text{m}$ – pasibaigia kondensacinis procesas ir prasideda pereinamasis garavimas, maždaug 0,015-0,016 s. Pereinamojo garavimo metu (3.6 b pav.) konvekcinio šilumos srauto su sąveikos įvertinimu reikšmės yra didesnes – procesas

vyksta intensyviau, pasiekia maksimalią vertę $q_{c,l}=7,17 \text{ kW/m}^2$, be sąveikos iki $7,0 \text{ kW/m}^2$, ir toliau mažėja, kol pasiekia nusistovėjusią vertę pusiausvirojo režimo metu $5,65 \text{ kW/m}^2$ ir nebekinta.

3.7 a ir b paveikslai vertina sąveikos įtaką lašelio paviršiaus temperatūra $t_R, ^\circ\text{C}$. Vandens įpurškimo momentui lašelių paviršiaus temperatūra yra 20°C . Didžiausias temperatūros pokytis pastebimas kondensacinio režimo metu (3.7 a pav.), nei garavimo (3.7 b pav.), ypač kondensacijos pradžioje – lašelių temperatūra nuo 20°C iki 60°C pakyla per maždaug $0,005\text{s}$ ir toliau kyla, bet nebe taip intensyviai. Įvertinus sąveikos poveikį temperatūros su sąveika yra didesnės kondensacijos proceso viduryje apie 1°C nei be sąveikos vertinimo. Kondensacijos proceso pabaigoje $t_R=69,22^\circ\text{C}$ su sąveika, be sąveikos $t_R=69,16^\circ\text{C}$ (3.7 b pav.). Toliau sekant pereinamojo garavimo režimui (3.7 b pav.) skirtumas tarp temperatūros su sąveika ir be yra minimalus, paviršiaus temperatūra kinta nežymiai, kol galiausiai nusistovi ties $69,55^\circ\text{C}$ ir prasideda pusiausvirasis garavimas.

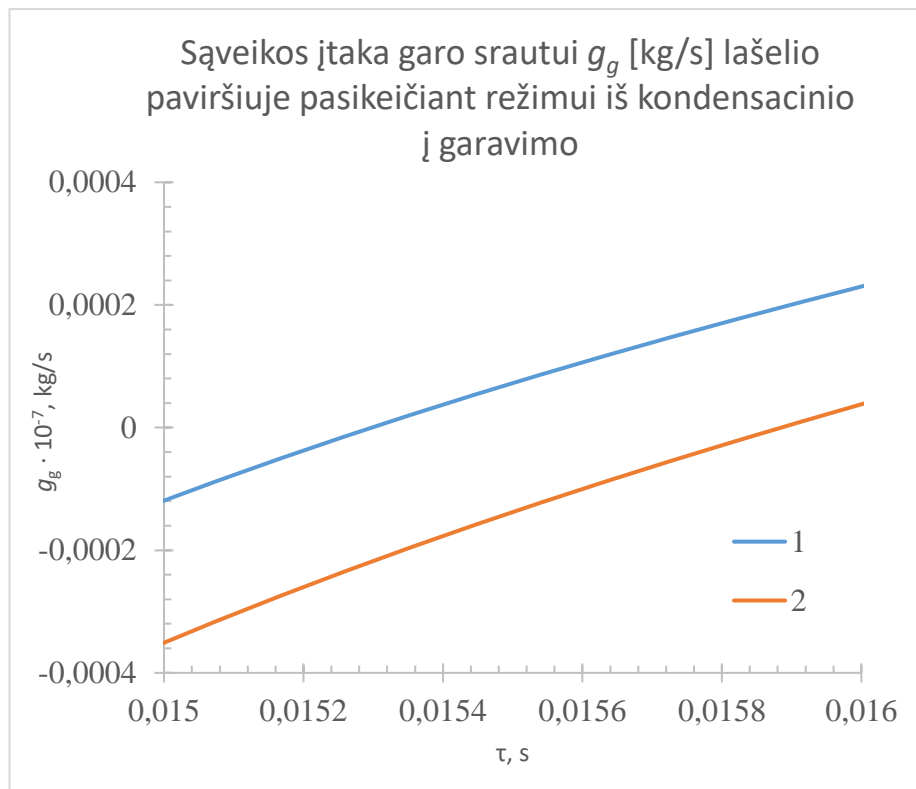


a)

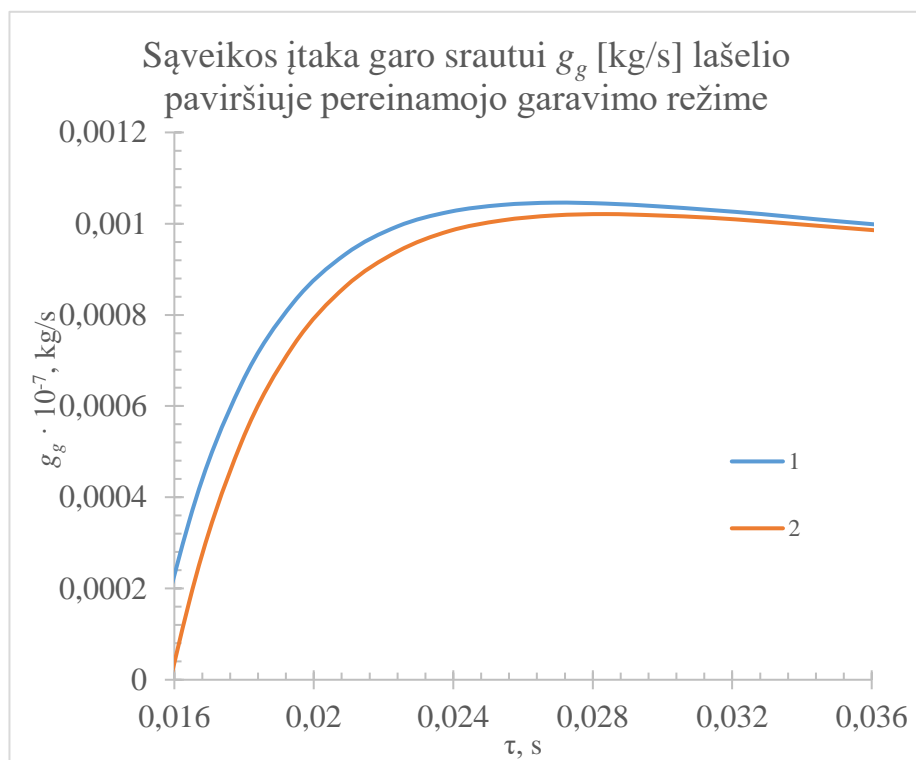


b)

3.1 pav. Stefano hidrodinaminio srauto įtaka apskaičiuotam garo srautui g_g lašelio paviršiuje kondensaciniame režime (a) ir jo pradinėje stadijoje (b), kai 20°C temperatūros 100 μm pradinio skersmens vandens lašelis šyla 80°C temperatūros ir $X_g=0,3$ dūmų sraute, o pradinis slydimo greitis yra 40 m/s.

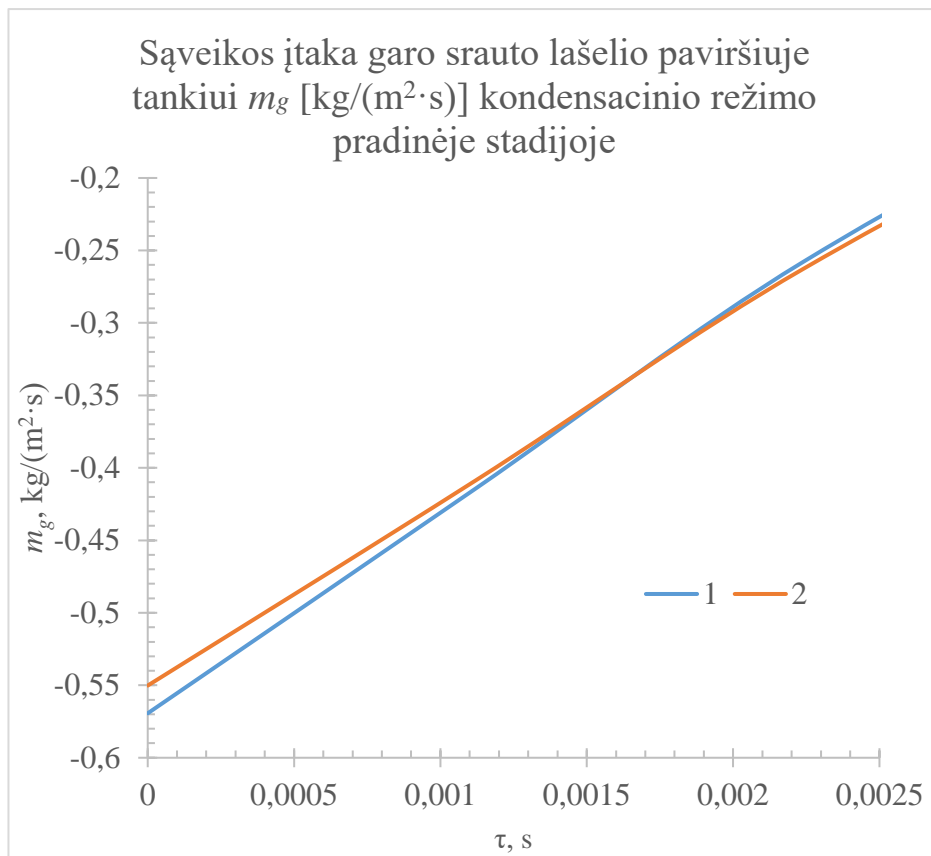


a)

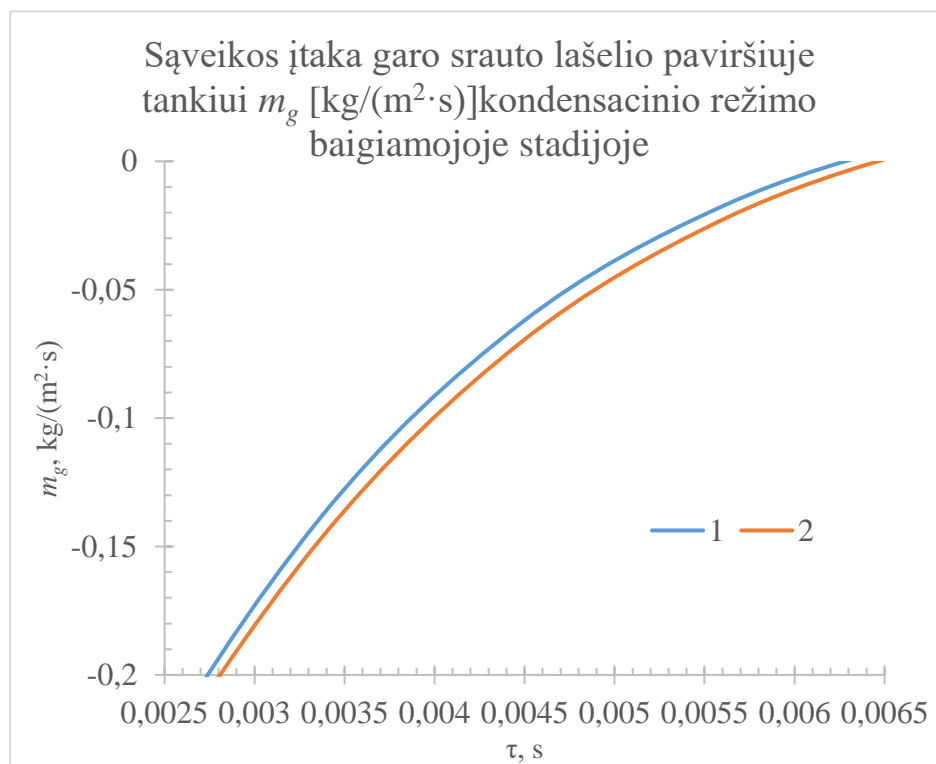


b)

3.2 pav. Stefano hidrodinaminio srauto įtaka apskaičiuotajam garo srautui g_g lašelio paviršiuje režimų kaitos iš kondensacinio į garavimą laikotarpiu (a) ir pereinamojo garavimo režime (b) kai 20°C temperatūros $100\ \mu\text{m}$ pradinio skersmens vandens lašelis šyla 80°C temperatūros ir $X_g=0,3$ dūmų sraute, o pradinis slydimo greitis yra $40\ \text{m/s}$.

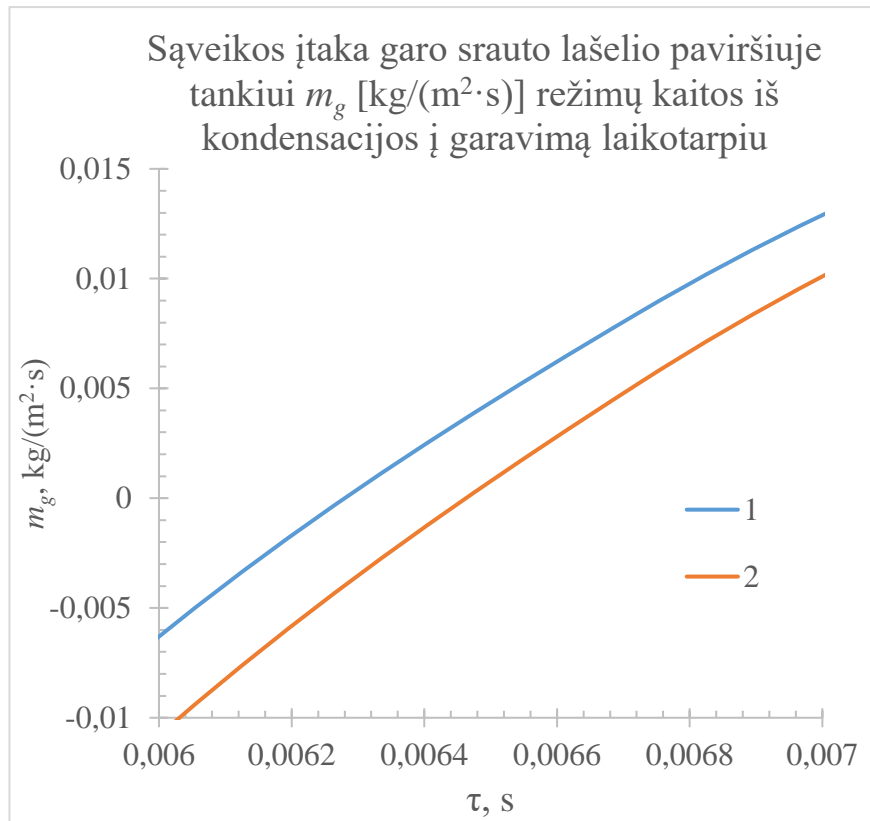


a)

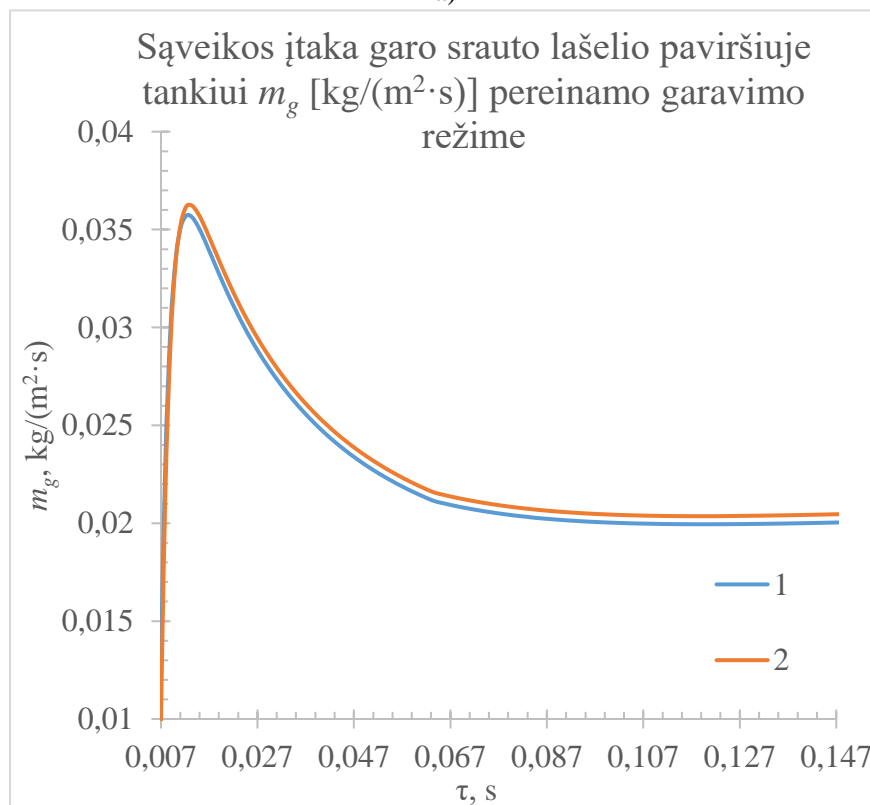


b)

3.3 pav. Stefano hidrodinaminio srauto įtaka apskaičiuotajam garo srauto tankiui m_g lašelio paviršiuje kondensacinio režimo pradžioje (a) ir jo pabaigoje (b), kai 20°C temperatūros 100 μ m pradinio skersmens vandens lašelis šyla 150°C temperatūros ir $X_g=0,3$ dūmų sraute, o pradinis slydimo greitis yra 40 m/s.

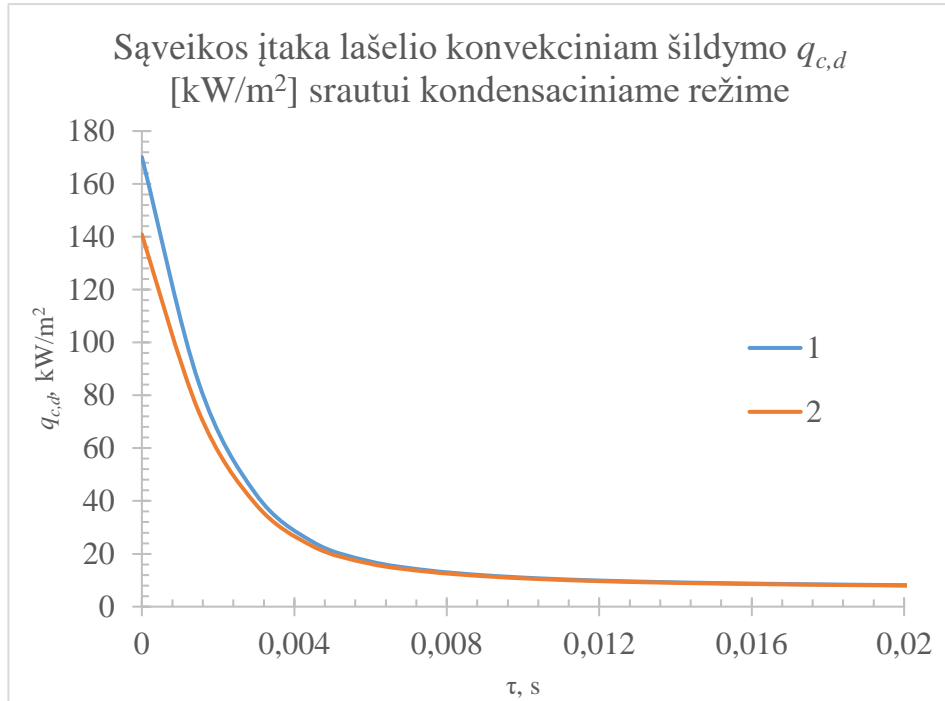


a)

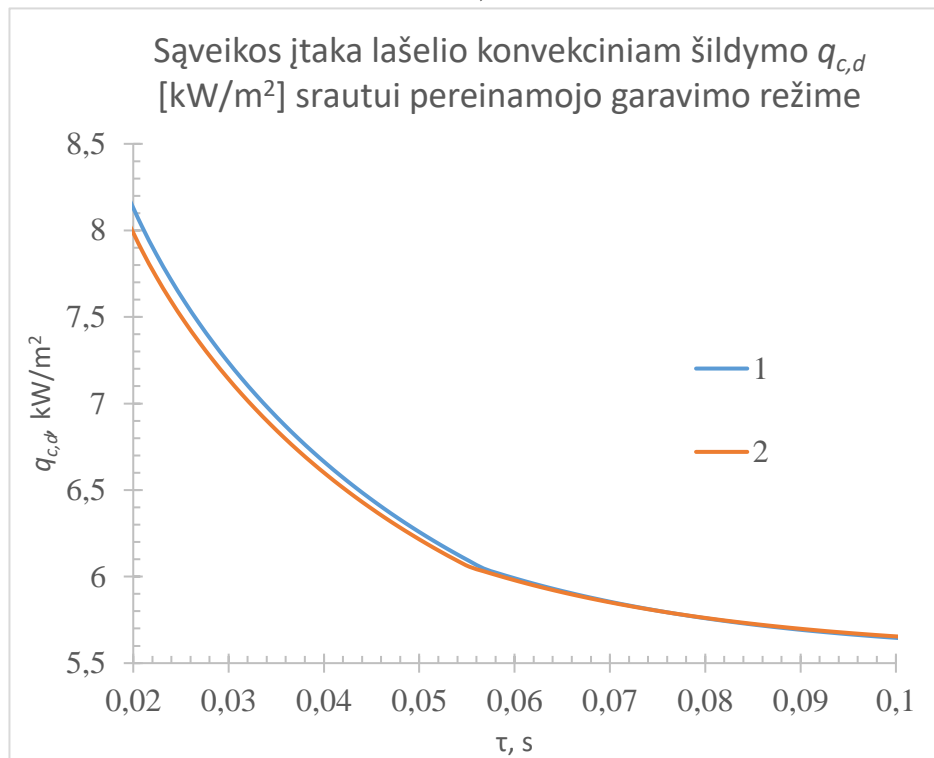


b)

3.4 pav. Stefano hidrodinaminio srauto įtaka apskaičiuotajam garo srauto tankiui m_g lašelio paviršiuje keičiantis fazinių virsmų režimui (a) ir pereinamajame garavimo režime (b), kai 20°C temperatūros 100 μm pradinio skersmens vandens lašelis šyla 150°C temperatūros ir $X_g=0,3$ dūmų sraute, o pradinis slydimo greitis yra 40 m/s.

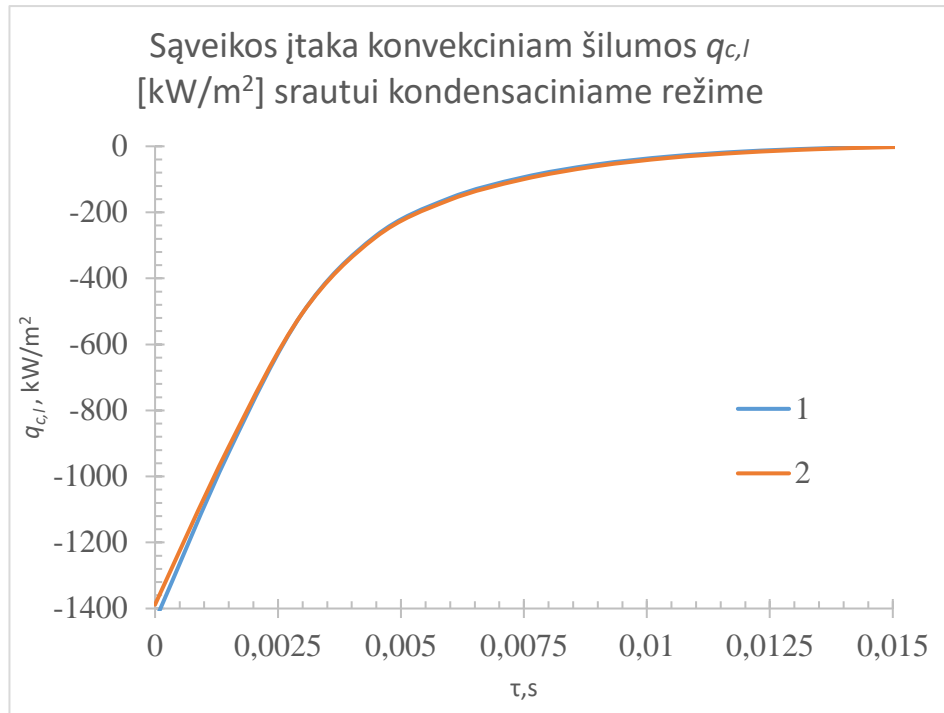


a)

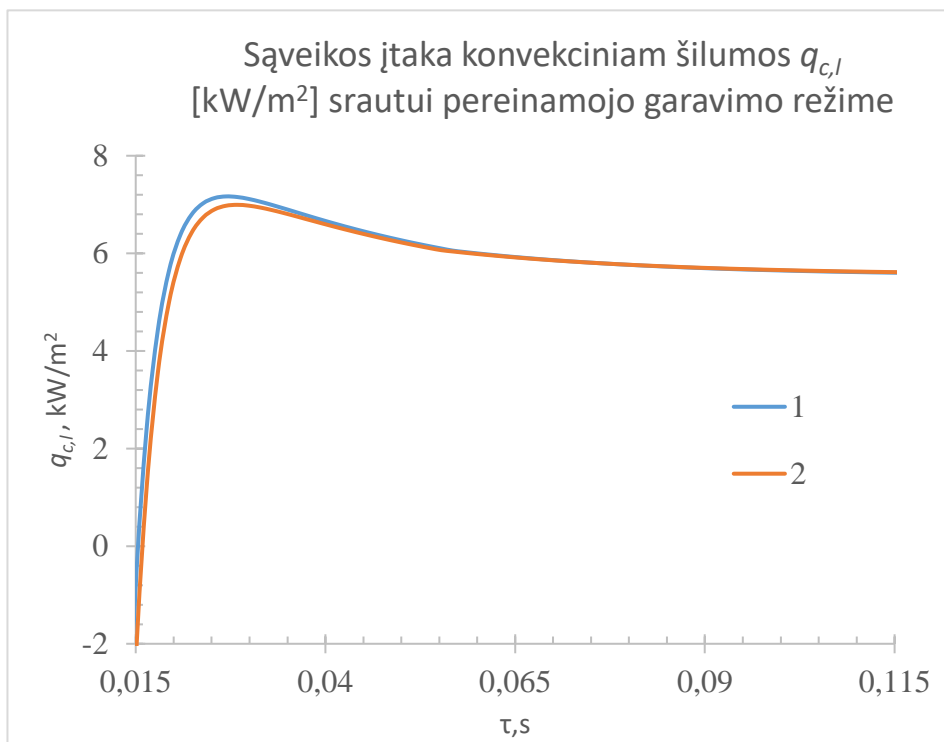


b)

3.5 pav. Stefano hidrodinaminio srauto įtaka apskaičiuotajam konvekcinio šilumos srautui $q_{c,d}$ kondensaciniame (a) ir pereinamajame garavimo režime (b), kai 20°C temperatūros 100 μm pradinio skersmens vandens lašelis šyla 150°C temperatūros ir $X_g=0,3$ dūmų sraute, o pradinis slydimo greitis yra 40 m/s.

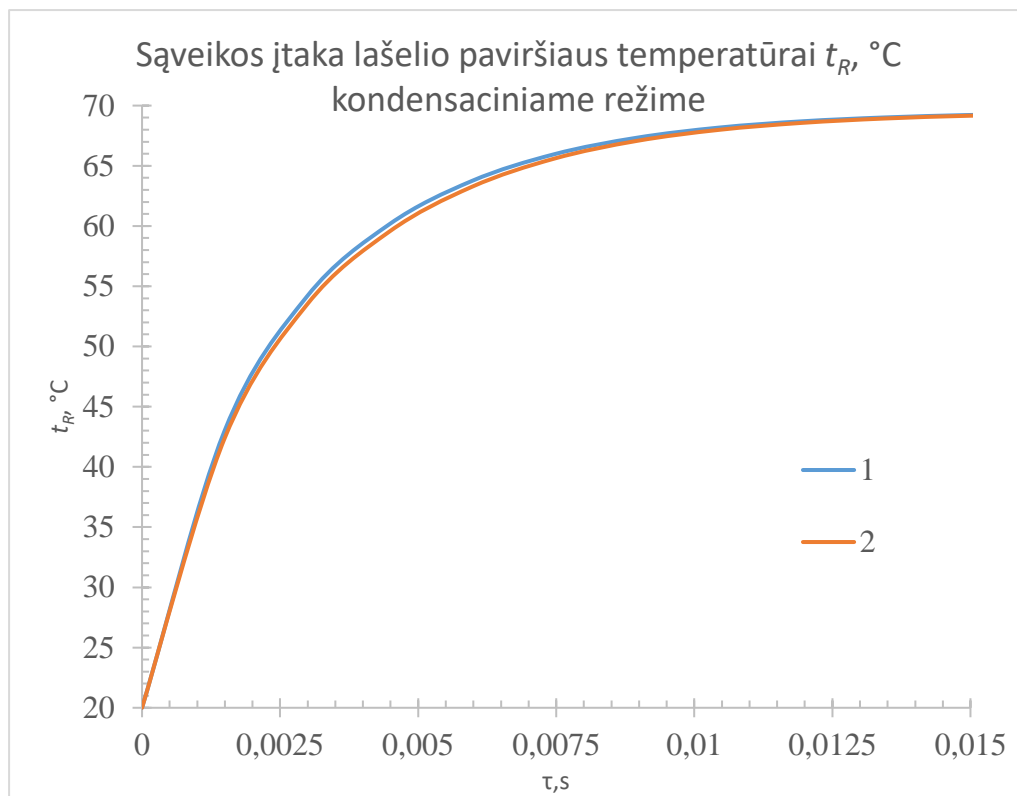


a)

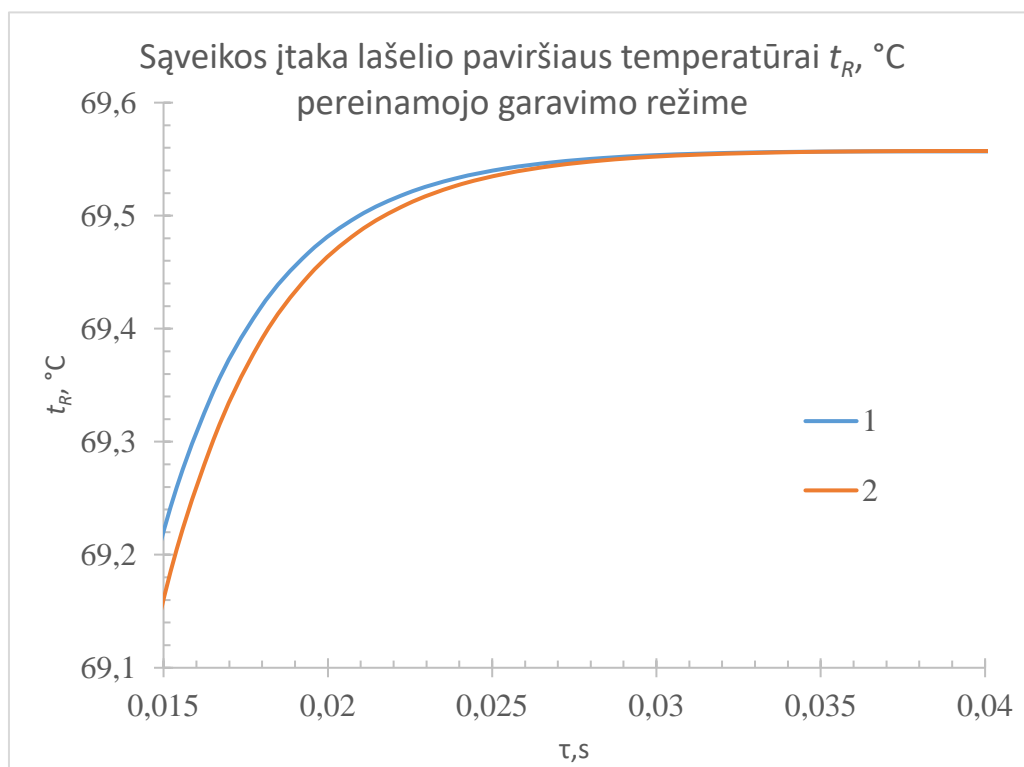


b)

3.6 pav. Stefano hidrodinaminio srauto įtaka apskaičiuotajam konvekciniam šilumos srautui $q_{c,l}$ lašelyje kondensaciniame režime (a) ir pereinamajame garavimo režime (b), kai 20°C temperatūros 100 μm pradinio skersmens vandens lašelis šyla 150°C temperatūros ir $X_g=0,3$ dūmų sraute, o pradinis slydimo greitis yra 40 m/s.



a)



b)

3.7 pav. Stefano hidrodinaminio srauto įtaka apskaičiuotajai 20°C temperatūros 100 μm pradinio skersmens vandens lašelio paviršiaus temperatūrai kondensaciniame (a) ir pereinamojo garavimo (b) režime, kai lašelis šyla $X_g=0,3$ drėgnumo 150°C temperatūros dūmuose ir pradinis slydimo greitis yra 40 m/s.

3.2.2. Stefano hidrodinaminio srauto įtakos lašelio ŠMM parametrų $P(\tau)$ ir $P_0(\tau)$ funkcijoms procentinis įvertinimas pereinamųjų fazinių virsmų režime

Stefano hidrodinaminio srauto įtakai vandens lašelių sudėtinų ŠMM procesų sąveikoje drėgnuose biokuro dūmuose išryškinti atlikta apskaičiuotųjų $P(\tau)$ ir $P_0(\tau)$ funkcijų santykio kitimo fazinių virsmų režimų (2.16) ciklo kondensaciniame ir pereinamojo garavimo režimuose procentinė analizė pagal metodinę formulę:

$$\bar{P}(\tau) = \left[1 - \frac{P(\tau)}{P_0(\tau)} \right] \times 100\% \quad (2.33)$$

Pagrindinių lašelio ŠMM parametrų $\bar{P}(\tau)$ funkcijų grafikai kondensaciniame ir pereinamojo garavimo režimuose pateikti 3.8-3.10 paveikslų grafikuose.

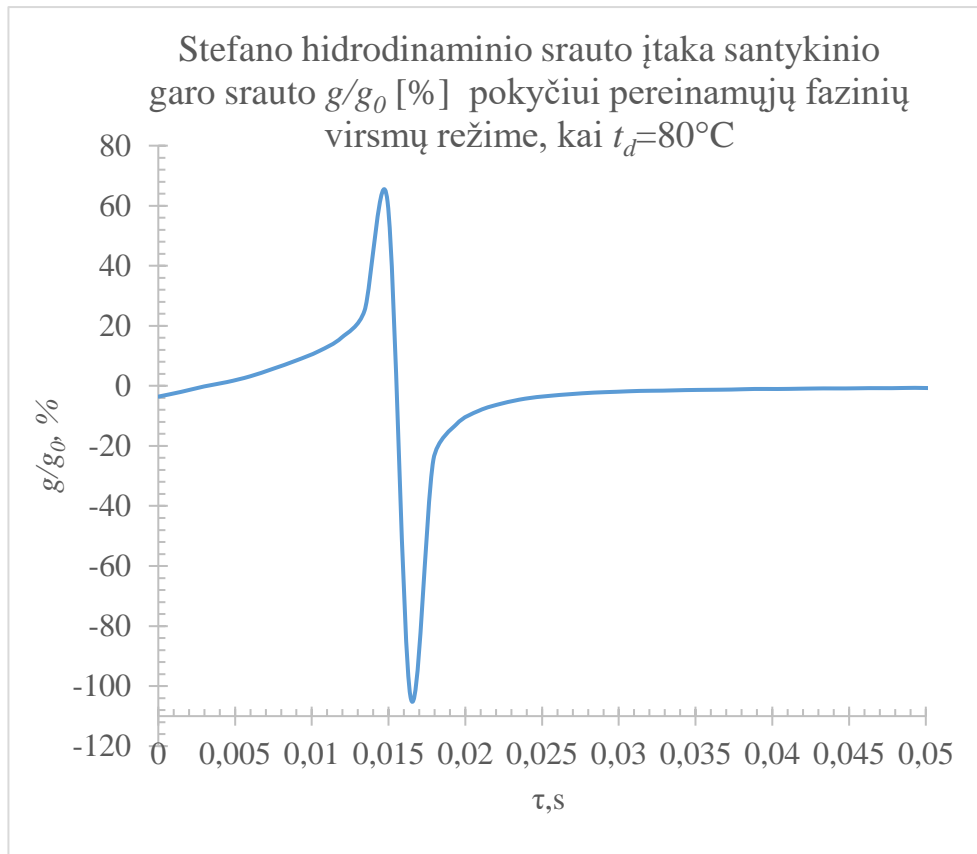
3.8 a pav. pavaizduota Stefano hidrodinaminio srauto įtaka santykiniam garo srautui, kai dūmų temperatūra yra 80°C. Iki kondensacinio režimo pabaigos garo srautas neįvertinus sąveikos g_{g0} yra didesnis, nei garo srautas įvertinus sąveiką g_g , ir kondensacinio režimo pabaigoje pasiekia maksimalų skirtumą 61,4%, kai $\tau=0,015s$, $g_{g0} = -0,0004 \cdot 10^{-7}$ kg/s, $g_g = -0,0001 \cdot 10^{-7}$ kg/s. Tai reiškia, kad kondensacijos procesas iš tiesų nėra toks intensyvus, kaip numato rezultatai neįvertinus Stefano hidrodinaminio srauto sąveikos. Tačiau prieš pasikeičiant režimams nuo $\tau=0,015s$ skirtumas tarp garo srautų pradeda mažėti ir pasikeičia taip, kad garo srautas su sąveikos įvertinimu įgauna didesnę reikšmę – kondensacija pasibaigia ir pereinamasis garavimas prasideda anksčiau. Prasidėjus pereinamajam garavimui, garo srautas įvertinus sąveiką yra didesnis nei be sąveikos du kartus ir pasiekia maksimalų skirtumą 103,5%, kai $\tau=0,016s$ $g_{g0} = 0,00017 \cdot 10^{-7}$ kg/s, $g_g = 0,00034 \cdot 10^{-7}$ kg/s. Tad pereinamojo garavimo režimas vyksta intensyviau, nei numatoma skaičiuojant be sąveikos įvertinimo. Iki pasiekiant pusiausvirąjį garavimo režimą, skirtumas tarp garo srautų mažėja ir galiausiai išnyksta – pusiausvirojo garavimo režime skirtumo tarp garo srauto su sąveika ar be beveik nėra (<1%) ir g_g pasiekia $0,00078 \cdot 10^{-7}$ kg/s reikšmę. Tokią pat Stefano hidrodinaminio srauto sąveikos įtaką garo srautui galima matyti ir kai dūmų temperatūra yra 150°C (3.8 b pa.), tačiau ji žymiai mažesnė. Kondensacinio režimo metu maksimalus skirtumas siekia 23,2% ($g_{g0} = -0,00762 \cdot 10^{-7}$ kg/s, $g_g = -0,00586 \cdot 10^{-7}$ kg/s), pereinamojo garavimo režimo metu garo srautas su sąveika maksimaliai didesnis 62,2%, nei garo srautas be sąveikos ($g_{g0} = 0,001734 \cdot 10^{-7}$ kg/s, $g_g = 0,002813 \cdot 10^{-7}$ kg/s), o pasiekus pusiausvirąjį garavimo režimą skirtumas siekia 1,8% tarp garo srautų.

Stefano hidrodinaminio srauto sąveika paviršiaus temperatūrų t_R skirtumui daro mažą įtaką (3.9 a ir b pav.). Tiek 80°C, tiek 150°C dūmuose didžiausias skirtumas tarp paviršiaus temperatūrų yra įpurškimo pradžioje – temperatūra su sąveika 80°C dūmuose didesnė 1,5%, prie 150°C 2,0%, kai $t_R=42,98^\circ\text{C}$, $t_{R0}=42,35^\circ\text{C}$ ir $t_R=42,52^\circ\text{C}$, $t_{R0}=41,67^\circ\text{C}$ atitinkamai. Po to šis skirtumas mažėja, iki kol baigiasi kondensacinis režimas, - tada lašelio paviršiaus temperatūros nesiskiria, vertinama sąveiką ar ne.

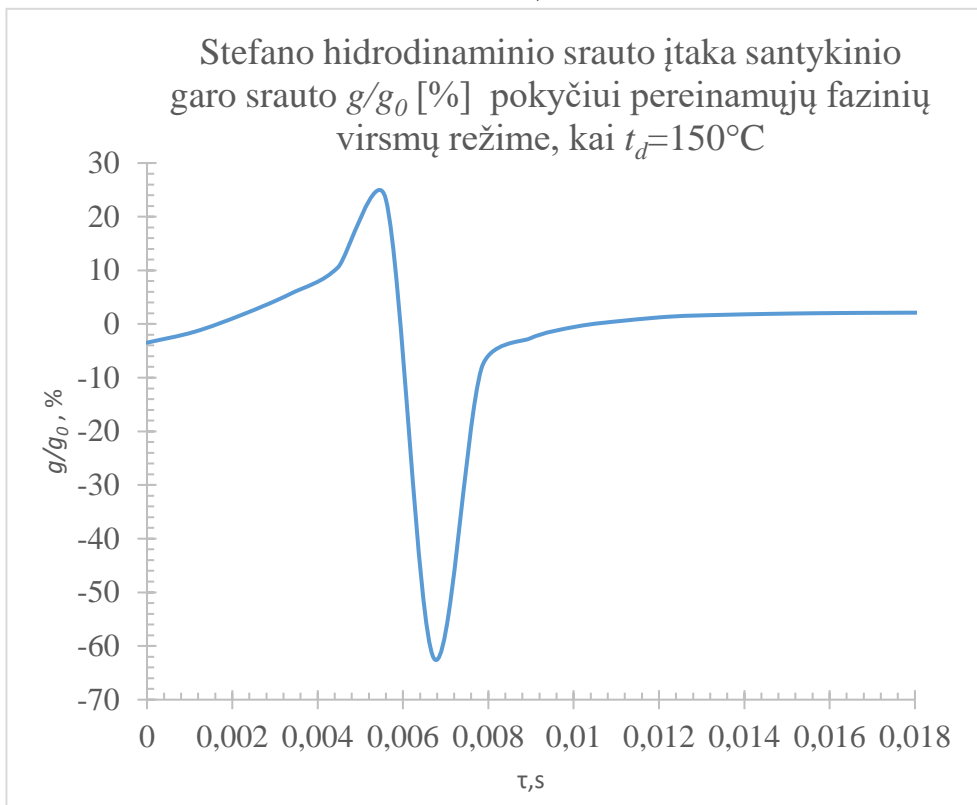
Vertinant Stefano hidrodinaminio srauto įtaką lašelio skersmeniui $2R$ 3.10 a ir b pav. matyti, kad skysčio įpurškimo momentu tiek 80°C, tiek 150°C temperatūros dūmuose lašelio skersmuo su sąveikos įvertinimu yra didesnis – 0,06% ir 0,04% atitinkamai. Toliau tęsiantis kondensaciniam režimui skirtumas mažėja ir prie 80°C dūmų temperatūros pasiekus pereinamąjį garavimo režimą nusistovi – skirtumas siekia 0,01% ir beveik nebekinta. Kitaip yra su 150°C temperatūros dūmais – kondensacinio režimo metu skirtumas mažėja, kol galiausiai pasiekia pereinamojo garavimo režimą ir lašelio diametras be sąveikos įvertinimo pasidaro didesnis, nei su sąveika – maksimalus skirtumas

0,04%, bet toliau skirtumas vėl mažėja. Vertinant bendrai viso proceso metu skirtumas tarp lašelių skersmens su sąveika ir be jos yra nykstamai mažas – šimtosios procento dalys.

Didžiausias skirtumas tarp dūmų suteikiamo konvekcinio srauto $q_{c,g}$ su sąveika ir be jos (3.11 a ir b pav.) yra lašelio įpurškimo pradžioje – prie skirtingų dūmų temperatūrų konvekcinis srautas su sąveika yra 21% didesnis, nei be sąveikos. Tai reiškia, kad iš tiesų konvekcinis dūmų šilumos rautas yra didesnis, nes skaičiuojant be sąveikos poveikio. Kondensacinio režimo metu skirtumas mažėja. Prie 80°C temperatūros dūmų pereinamojo garavimo metu skirtumas tarp konvekcinį srautų vis dar mažėja, bet nežymiai, o pasiekus pusiausvirąjį garavimą beveik išnyksta – skirtumas siekia 0,28% ir toliau kinta tik šimtosiomis procento dalimis. Prie 150°C temperatūros dūmų kondensacijos metu skirtumas taip pat mažėja, tačiau pereinamojo garavimo metu konvekcinis dūmų šilumos srautas be sąveikos tampa didesnis, nei su sąveika – apie 2%, ir pasiekus pusiausvirojo garavimo režimą skirtumas nebekinta.

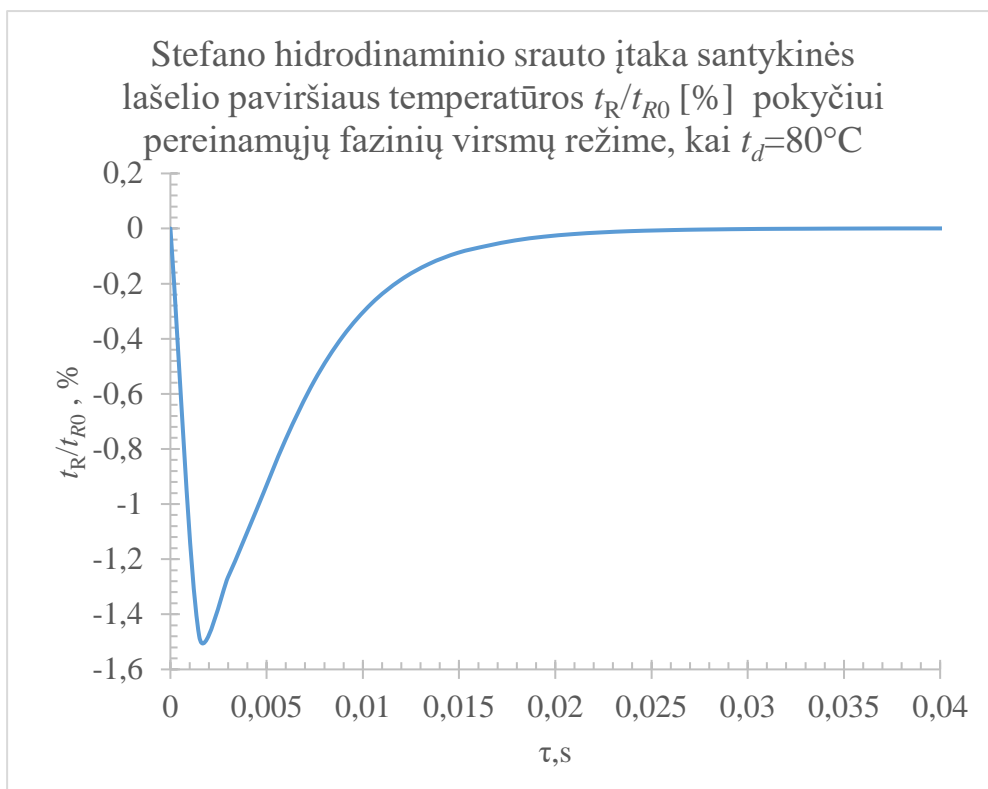


a)

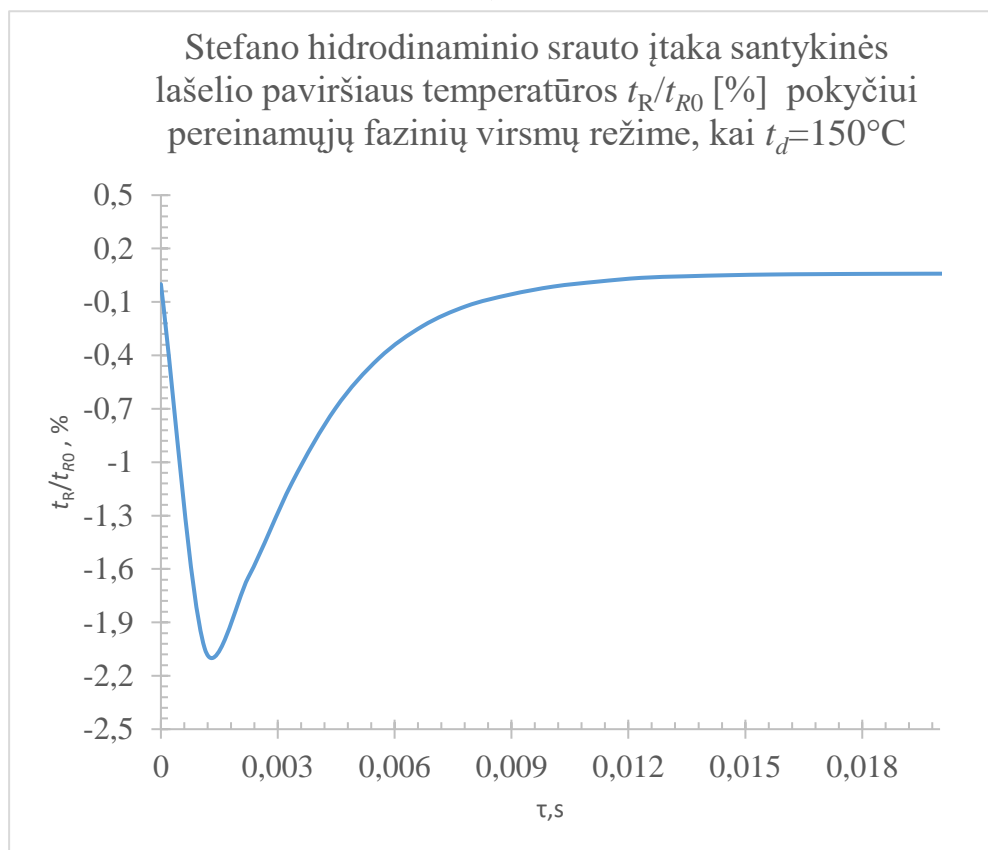


b)

3.8 pav. Stefano hidrodinaminio srauto įtaka garo srauto lašelio paviršiuje procentiniam pokyčiui, kai 20°C temperatūros $100\ \mu\text{m}$ pradinio skersmens vandens lašelis šyla $X_g=0,3$ drėgnumo $80\ ^\circ\text{C}$ (a) arba 150°C (b) temperatūros dūmuose ir pradinis slydimo greitis yra $40\ \text{m/s}$

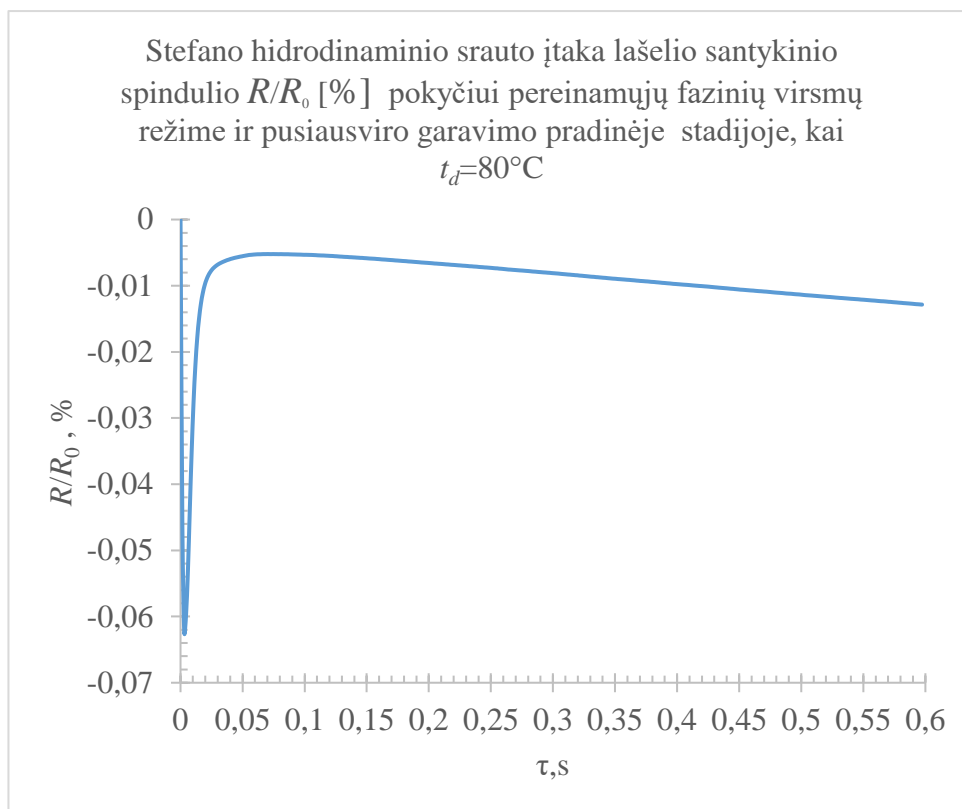


a)

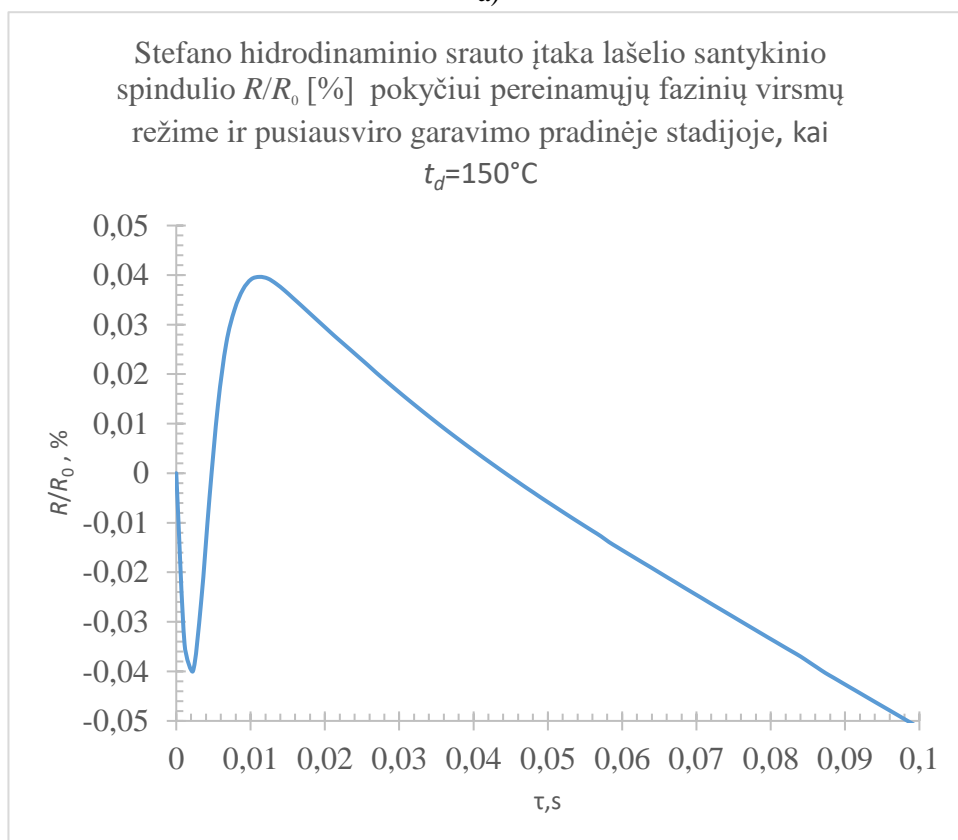


b)

3.9 pav. Stefano hidrodinaminio srauto įtaka lašelio paviršiaus temperatūros procentiniam pokyčiui, kai 20°C temperatūros $100\ \mu\text{m}$ pradinio skersmens vandens lašelis šyla $X_g=0,3$ drėgnumo 80°C (a) arba 150°C (b) temperatūros dūmuose ir pradinis slydimo greitis yra $40\ \text{m/s}$

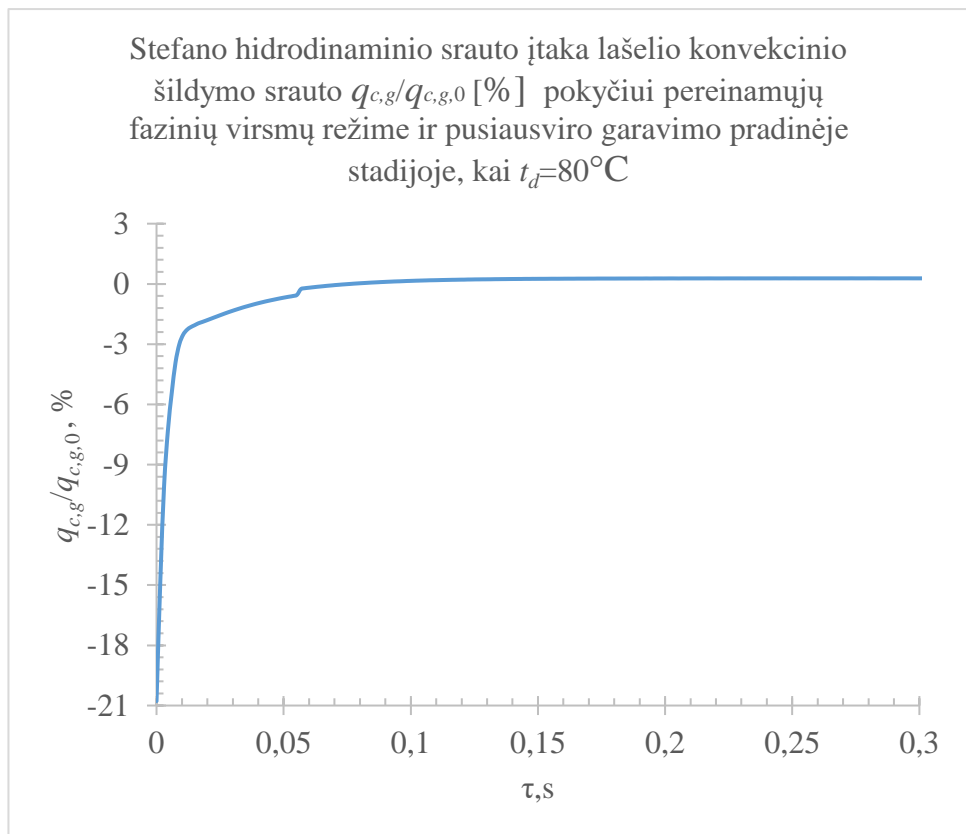


a)

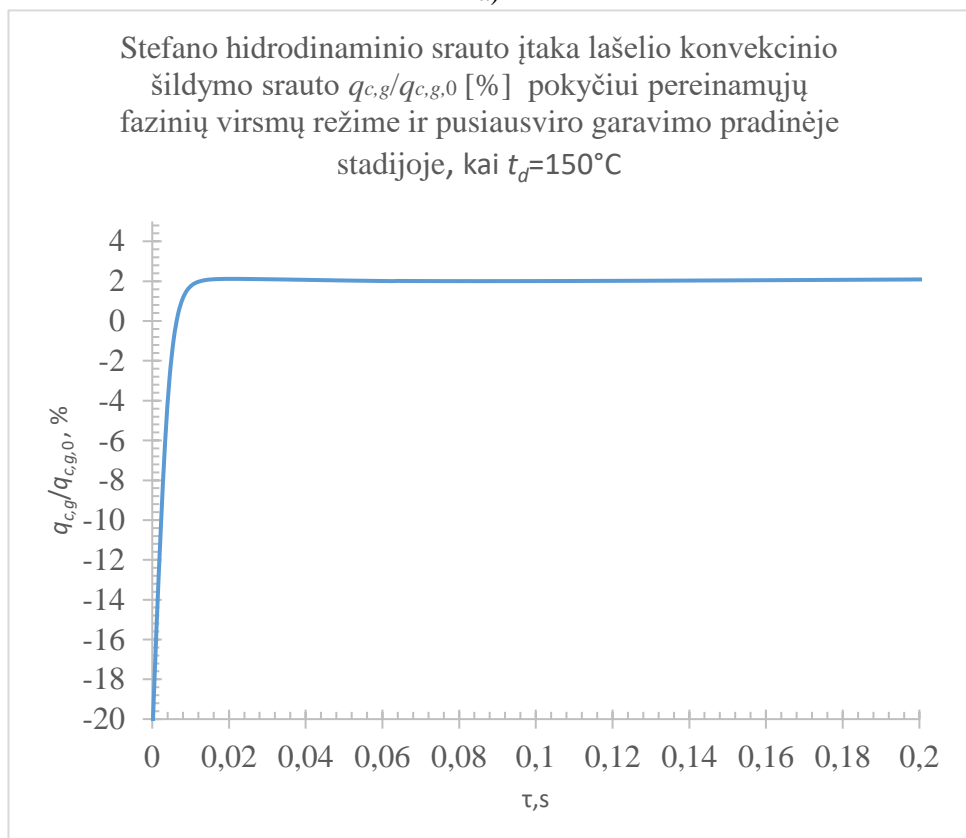


b)

3.10 pav. Stefano hidrodinaminio srauto įtaka lašelio skersmens procentiniam pokyčiui, kai 20°C temperatūros $100 \mu\text{m}$ pradinio skersmens vandens lašelis šyla $X_g=0,3$ drėgnumo 80°C (a) arba 150°C (b) temperatūros dūmuose ir pradinis slydimo greitis yra 40 m/s



a)



b)

3.11 pav. Stefano hidrodinaminio srauto įtaka lašelio konvekcinio šildymo srauto procentiniam pokyčiui, kai 20°C temperatūros $100 \mu\text{m}$ pradinio skersmens vandens lašelis šyla $X_g=0,3$ drėgnumo 80°C (a) arba 150°C (b) temperatūros dūmuose ir pradinis slydimo greitis yra 40 m/s

3.2.3. Drėgnų dūmų temperatūros įtakos vandens lašelių pagrindiniams ŠMM parametrms kondensacinio ekonomaizerio technologijoje įvertinimas

Šiame skyrelyje pateikiama vandens lašelių pagrindinių ŠMM parametrų (garo srauto, jo tankio, lašelio paviršiaus ploto, lašelio paviršiaus temperatūros ir konvekcinės šilumos srauto bei fazinių virsmų šilumos srauto) $P(\tau)$ laikinės funkcijos, kai vanduo įpurškiamas į 150°C temperatūros dūmų srautą prieš kondensacinį ekonomaizerį arba įpurškiamas pačiame kondensaciniame ekonomaizeryje į 80°C temperatūros dūmų srautą (3.12-3.16 pav.). Taip pat pateikiamas vandens lašelio greičio kitimo grafikas 3.17 paveiksle, kuriuo pagrindžiamas spartus lašelio slydimo dūmuose greičio slopimas, kas sudaro prielaidas Reinoldso kriterijui mažėti, taigi, ir lašelio konvekcinio šildymo intensyvumui silpnėti kondensaciniame režime.

Biokuro dūmų temperatūros įtaka lašelio paviršiaus temperatūrai t_R pavaizduota 3.12 paveiksle. Vanduo tiek į 80°C, tiek į 150°C temperatūros dūmus įpurškiamas 20°C, tačiau lašelio paviršius išyla nevienodai. Didesnė lašelio temperatūra pasiekama prie 150°C dūmų – 69°C temperatūra keičiantis režimams iš kondensacinio į pereinamojo garavimo ir 71,4°C temperatūra pusiausvirojo garavimo režimo metu. Lašelio paviršiaus temperatūra t_R nuo įpurškimo momento intensyviai didėja ir 80°C temperatūros dūmuose, tačiau kondensacinio režimo pabaigoje lašelio paviršius išyla iki 69,2°C temperatūros, o maksimali temperatūra pusiausvirojo garavimo režimo metu 69,6°C.

Garų srauto kitimas priklausomai nuo dūmų temperatūros pavaizduotas 3.13 paveiksle. Garų srautas g_g įpurškimo momentu 80°C temperatūros dūmuose yra didesnis, nei 150°C temperatūros – prie 80°C $g_g = -0,1843 \cdot 10^{-7}$ kg/s, prie 150°C $g_g = -0,1789 \cdot 10^{-7}$ kg/s. Toliau tęsiantis kondensaciniam režimui garų srautas 150°C temperatūros dūmuose didesnis ir režimas iš kondensacijos į garavimą pereina greičiau – prie 0,006 s, tuo tarpu 80°C dūmuose garų srautas ne toks intensyvus ir kondensacijos režimas baigiasi po 0,015 s.

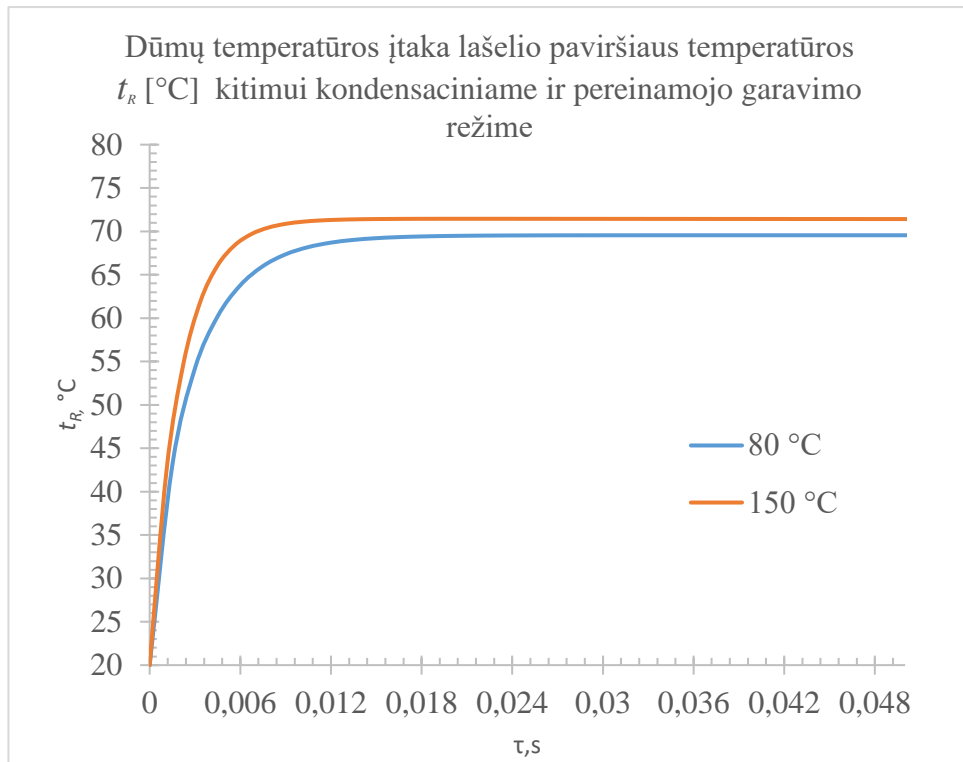
Garų srauto tankio kitimas nuo dūmų temperatūros pavaizduotas 3.14 paveiksle. Įpurškimo momentu garų srauto tankis 80°C temperatūros dūmuose didesnis nei 150°C – $m_g = -0,587$ kg/(m²·s) ir $-0,569$ kg/(m²·s) atitinkamai. Tačiau toliau tęsiantis procesui, 150°C temperatūros dūmuose garų srauto tankis didesnis ir kondensacijos režimas pasibaigia greičiau, pereinamojo garavimo režime įgauna didesnę reikšmę, nei 80°C temperatūros dūmuose, – 0,021 kg/(m²·s), o prie 80°C $m_g = 0,0024$ kg/(m²·s).

Lašelius įpurškiant į 150°C dūmus jiems yra suteikiamas didesnis konvekcinis srautas (3.15 pav.). Įpurškimo momentu 150°C temperatūros dūmai suteiks 363,5 kW/m² šilumos srautą, 80°C temperatūros dūmai – 170,2 kW/m². Kondensacijos metu šilumos srautas intensyviai mažėja ir galiausiai pusiausvirojo garavimo režime suteikiamas konvekcinis srautas 150°C temperatūros dūmuose bus 48,1 kW/m², o 80°C – 5,66 kW/m² – 8,5 kartų mažesnis.

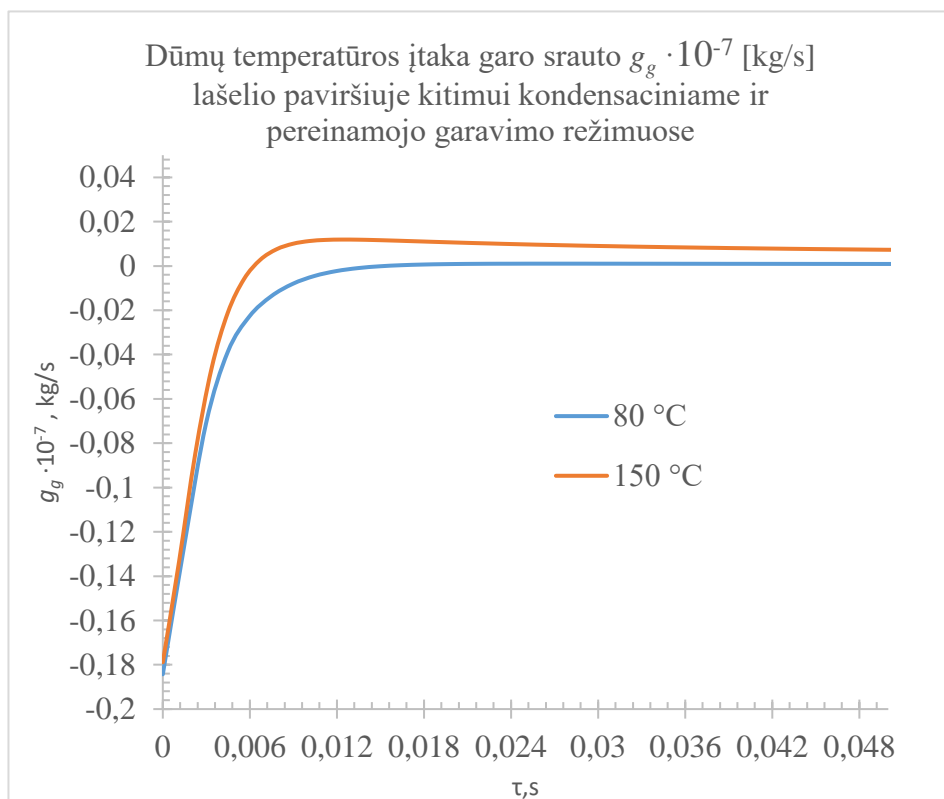
Dūmų temperatūros įtaka lašelio greičiui pavaizduota 3.16 paveiksle. Įpurškus vandenį buvo užsiduotas lašelio greitis 50 m/s. Tačiau 80°C dūmuose lašeliai yra stabdomi greičiau – kai $\tau = 0,005$ s lašelių greitis $w_l = 12,9$ m/s, o 150°C – 20,2 m/s, tad karštesniuose dūmuose lašeliai kondensacijos režimo metu 1,5 karto greitesnis. Baigiantis pereinamojo garavimo režimui ir pereinant į pusiausvirojo tiek 80°C, tiek 150°C temperatūros dūmuose lašeliai juda 10 m/s greičiu.

Įpurškimo metu Reinoldso kriterijus didesnis 80°C temperatūros dūmuose – 197, 150°C – 155. Vykstant kondensaciniam režimui Reinoldso kriterijus mažėja. 80°C temperatūros dūmuose

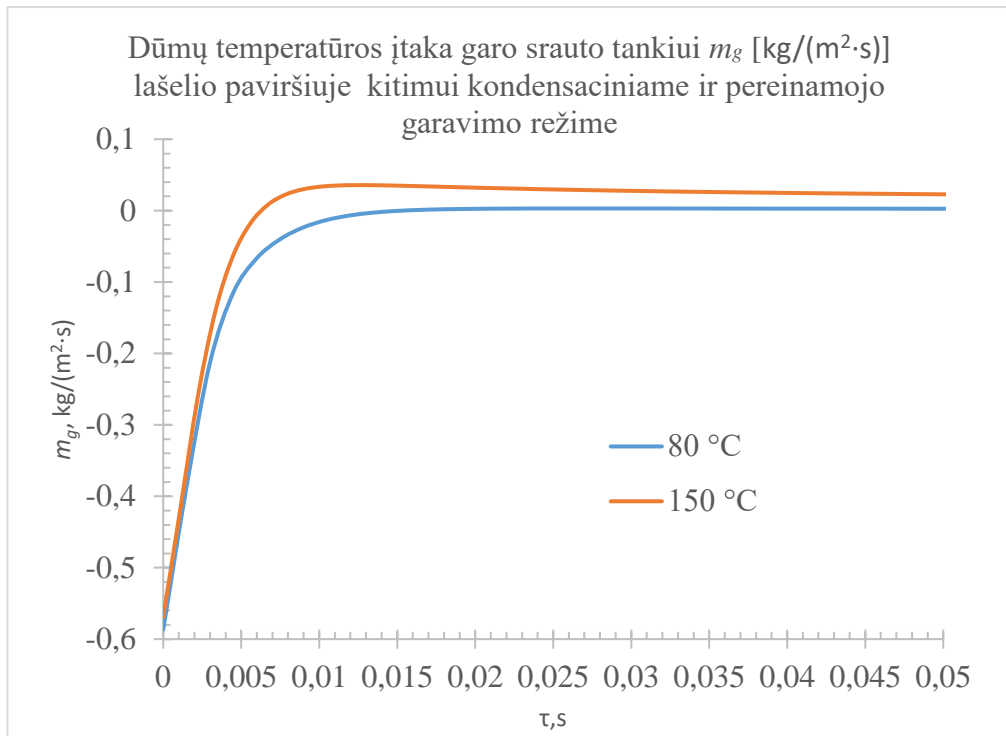
kondensacijos pabaigoje $Re=8$, o 150°C dūmuose kondensacijos pabaigoje $Re=41$. Tai rodo, kad šio režimo metu lašelių greitis mažėja, nes Re tiesiogiai priklauso nuo lašelių greičio w_l . Reinoldso kriterijus tiesiogiai daro įtaką konvekcinio srauto intensyvumui g_c , todėl kondensacinio režimo metu galima pastebėti visų šių parametrų mažėjimą.



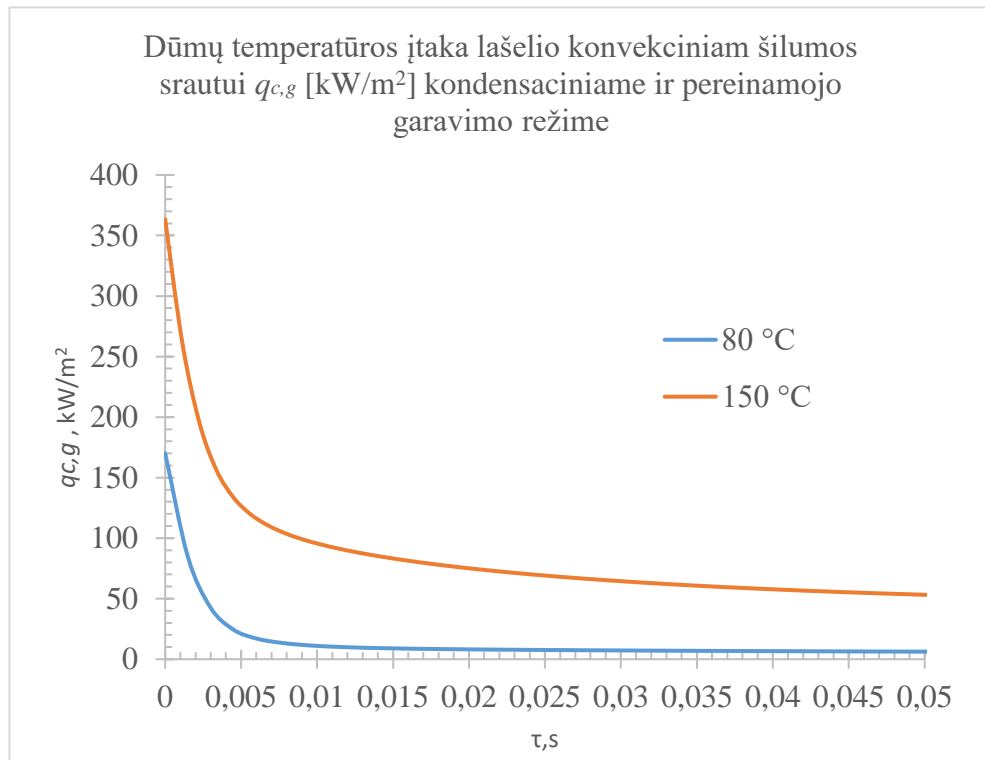
3.12 pav. Biokuro temperatūros įtaka lašelio šilimui, kai 20°C temperatūros 100 μm pradinio skersmens vandens lašelis šyla $X_g=0,3$ drėgnumo 80°C (1) arba 150°C (2) temperatūros dūmuose ir pradinis slydimo greitis yra 40 m/s



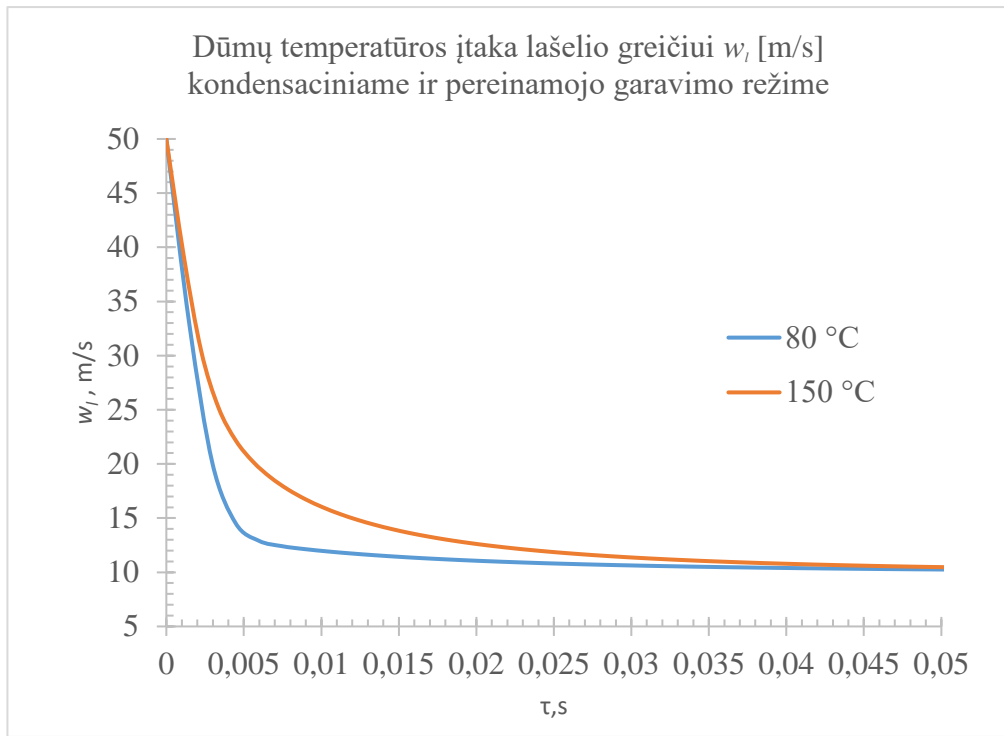
3.13 pav. Biokuro temperatūros įtaka garo srautui lašelio paviršiuje, kai 20°C temperatūros 100 μm pradinio skersmens vandens lašelis šyla $X_g=0,3$ drėgnumo 80°C (1) arba 150°C (2) temperatūros dūmuose ir pradinis slydimo greitis yra 40 m/s



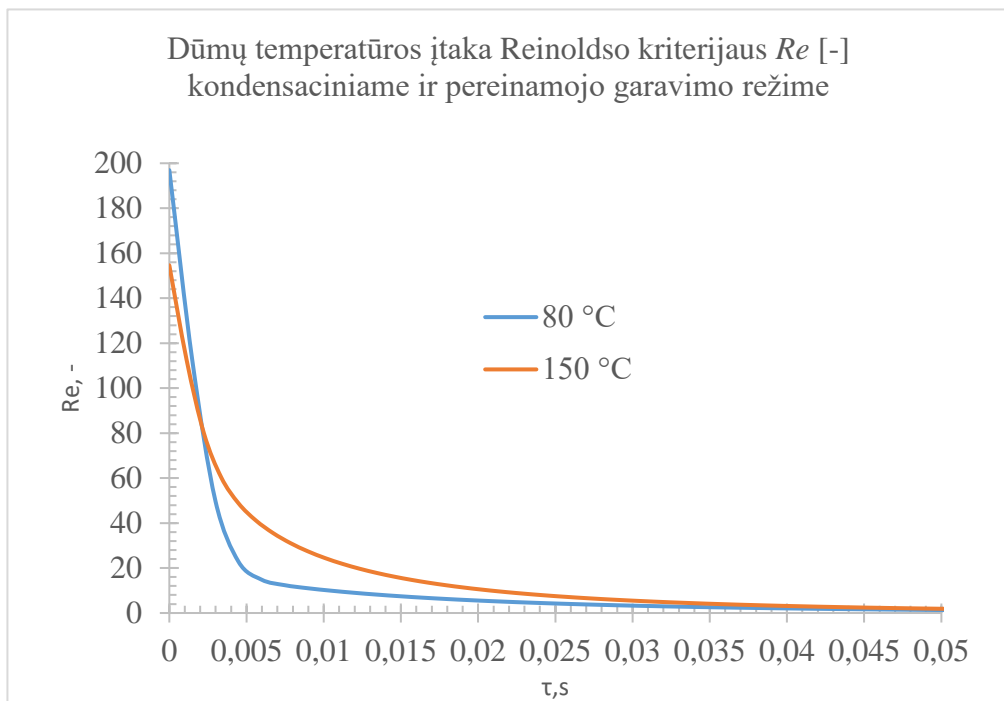
3.14 pav. Biokuro temperatūros įtaka garo srauto lašelio paviršiuje tankiui, kai 20°C temperatūros 100 μ m pradinio skersmens vandens lašelis šyla $X_g=0,3$ drėgnumo 80°C (1) arba 150°C (2) temperatūros dūmuose ir pradinis slydimo greitis yra 40 m/s



3.15 pav. Biokuro temperatūros įtaka konvekciniam šilumos srautui, kai 20°C temperatūros 100 μ m pradinio skersmens vandens lašelis šyla $X_g=0,3$ drėgnumo 80 °C (1) arba 150°C (2) temperatūros dūmuose ir pradinis slydimo greitis yra 40 m/s



3.16 pav. Biokuro dūmų temperatūros įtaka lašelio judėjimo greičiui, kai 20°C temperatūros 100 μm pradinio skersmens vandens lašelis šyla $X_g=0,3$ drėgnumo 80°C (1) arba 150°C (2) temperatūros dūmuose ir pradinis slydimo greitis yra 40 m/s



3.17 pav. Dūmų temperatūros įtaka Reinoldso kriterijaus dinamikai, kai 20°C temperatūros 100 μm pradinio skersmens vandens lašelis šyla $X_g=0,3$ drėgnumo 80 °C (1) arba 150°C (2) temperatūros dūmuose ir pradinis slydimo greitis yra 40 m/s

Išvados

Sudarius vandens lašelio šilimo ir garavimo biokuro dūmų sraute matematinį modelį, aptarus jo skaitinio išsprendimo metodiką, apibrėžus būdingas vandens įpurškimui kondensacinio ekonomizaierio technologijoje kraštines sąlygas, atlikus skaitinį tyrimą KTU EK programa „LAŠAS“, pateikus rezultatų grafinę interpretaciją ir atlikus jos išsamią analizę galima padaryti tokias apibendrinančias išvadas:

1. Įvertinus Stefano hidrodinaminio srauto įtaką skaičiavimo rezultatams pastebėta, kad lašelių fazinių virsmų P_f parametrai (garo srautas ir jo tankis) vandens įpurškimo į drėgnus dūmus momentu ir kondensacijos režimo metu turi mažesnę reikšmę, nei neivertinus sąveikos – tai reiškia, kad kondensacija dėl sąveikos vyksta ne taip intensyviai, maksimalus garo srauto g_g sumažėjimas siekia 61,4% 80°C temperatūros dūmuose ir 23,2% 150°C temperatūros dūmuose. Dėl sąveikos kondensacinio režimo trukmė sumažėja.
2. Kondensacijos pabaigoje garo srautas lygus nuliui, o garavimo režime veikiant sąveikai įgyja didesnę vertę (80°C temperatūros dūmuose maksimalus garo srauto skirtumas siekia 103,5%, o 150°C dūmuose – 62,2%), tad garavimas vyksta intensyviau ir, įvertinus sąveiką, pusiausviro garavimo režimas pasiekiamas greičiau.
3. Įvertinus Stefano hidrodinaminio srauto įtaką energetiniams P_q parametrams pastebėta, kad dūmų suteikiamas konvekcinės šilumos srautas $q_{c,d}$ įpurškimo metu su sąveika yra didesnis 21% ir mažėja viso proceso metu, kol pasiekiamas pusiausviris garavimas ir reikšmės susilygina. Vertinant lašelyje konvekcinių šilumos srautą $q_{c,l}$ pastebėta, jog kondensacinio ir pereinamojo garavimo režimo metu šilumos srautas su sąveika turi didesnes vertes, nei be sąveikos – procesai intensyvesni.
4. Vertinant terminius parametrus P_t pastebėta, kad esant sąveikai skirtumas tarp apskaičiuotųjų lašelio paviršiaus temperatūrų įpurškimo pradžioje didėja, vėliau iki kondensacijos režimo pabaigos – garavimo režimo pradžios mažėja, kol galiausiai pusiausvirojo garavimo režime susilygina. Didžiausias skirtumas vandens įpurškimo pradžioje 80°C dūmuose siekia 1,5%, o 150°C dūmuose – 2%. Taigi su sąveikos įvertinimu apskaičiuotoji t_R pradinėje fazinių virsmų stadijoje yra aukštesnė, vėliau skirtumas mažėja, o pusiausviro garavimo režime tampa nereikšmingu.
5. Vertinant dūmų temperatūros įtaką lašelių ŠMM parametrams fazinių virsmų proceso metu pastebėta, kad visi P_f , P_q , P_t parametrai turi didesnes reikšmes 150°C temperatūros dūmuose, nei 80°C. Tai reiškia, kad lašelio paviršiaus temperatūra yra aukštesnė, suteikiamas didesnis konvekcinis šilumos srautas, todėl kondensacijos ir garavimo procesai yra intensyvesni.
6. 150°C temperatūros dūmuose vykstantys intensyvesni fazinių virsmų procesai daro įtaką dūmuose slystantį lašelį veikiančioms trinties pasipriešinimo jėgoms, taigi ir lašelio judėjimo dinamikai, todėl Reinoldso Re kriterijus įgyja didesnę reikšmę. Dėl šios priežasties konvekcinės pernašos procesai 150°C temperatūros dūmuose vyksta intensyviau, nei 80°C temperatūros dūmuose.

Literatūros sąrašas

1. *Evaporation and droplet growth in gaseous media*. Fuchs, N.A. London : Pergamon Press, 1959 m.
2. Levich, V.G. *Physicochemical hydrodynamics*. Englewood Cliffs : PrenticeHall, 1962.
3. Spalding, D.B. *Convective mass transfer; an introduction*. London : Edward Arnold Ltd., 1963.
4. Sirignano, William A. *Fluid Dynamics and Transport of Droplets and Sprays*. Cambridge : University Press, 2000.
5. Sazhin, S.S. *Droplets and Sprays*. Springer : Heidelberg, 2014.
6. Volkov, R.S., et al. Experimental investigation of consecutive water droplets falling down through high-temperature gas zone. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016 m., 95, p. 184-197.
7. Fujita, A., Kurose, R. ir Komori, S. Experimental study on effect of relative humidity on heat transfer of an evaporating water droplet in air flow. *International Journal of Multiphase Flow*. 2010 m., 34, p. 244-247.
8. Santangelo, P. E. Characterization of high-pressure water-mist sprays: Experimental analysis of droplet size and dispersion. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2010 m., 34, p. 1353-1366.
9. Yoshida, A., et al. Experimental study of suppressing effect of fine water droplets on propane/air premixed flames stabilized in the stagnation flowfield. *Fire Safety Journal*. 2013 m., 58, p. 84-91.
10. Ramanauskas, V., et al. Experimental investigation of water droplet heating in humidified air flow. 2019 m., 25, p. 434-441.
11. Harpole, G.M. Radiative absorption by evaporating droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1980 m., 23, p. 17-26.
12. Miliauskas, G. Regularities of unsteady radiative-conductive heat transfer in evaporating semitransparent liquid droplet. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2001 m., 44, p. 785-798.
13. Tseng, C.C. ir Viskanta, R. Enhancement of water droplet evaporation by radiation absorption. *Fire Safety Journal*. 2006 m., 41, p. 236-247.
14. Brewster, M.Q. Evaporation and condensation of water mist/cloud droplets with thermal radiation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015 m., 88, p. 695-712.
15. Jin, Z.-C., et al. Numerical investigation of evaporation and radiation absorption of a non-spherical water droplet under asymmetrically radiative heating. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019 m., 140, p. 66-79.
16. Dombrovsky, L. A., et al. Two-step method for radiative transfer calculations in a developing pool fire at the initial stage of its suppression by a water spray. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018 m., 127, p. 717-726.
17. Gimbutis, G., Kajutis, K. ir Krukoniš, V. ir kt. *Šiluminė technika*. Vilnius : "Mokslas", 1993.
18. Oficialus statistikos portalas. *Lietuvos aplinka, žemės ūkis ir energetika*. [Tinkle] [Cituota: 2021 m. balandis 9 d.] <https://osp.stat.gov.lt/lietuvos-aplinka-zemes-ukis-ir-energetika-2020/energetika/atsinaujinantys-energijos-istekliai>.
19. Jonynas, R, et al. Renewables for district heating: The case of Lithuania. 2020 m. Lapkritis 15 d., T. Volume 211.
20. Faktų apie Europos Sąjungą suvestinės. *Atsinaujinančioji energija*. [Tinkle] Europos Parlamentas, 2020 m. lapkritis. [Cituota: 2021 m. balandis 9 d.] Valstybės narės privalo perkelti

persvarstyta direktyva į nacionalinę teisę iki 2021 m. birželio 30 d. Persvarstyta direktyva įsigalios nuo 2021 m. liepos 1 d..

21. Vares, Villu, Kask, Ulo ir Muiste, Peter ir kt. *Biokuro naudotojo žinynas*. Vilnius : Žara, 2007. ISBN 978-9986-34-180-2.

22. Šilumos vartotojo vadovas. [Tinkle] 2011 m. [Cituota: 2020 m. gegužė 18 d.] https://www.google.lt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwiAi6Sz9b3pAhVGyKYKHTsRC8QQFjAAegQIAxAB&url=https%3A%2F%2Fwww.lsta.lt%2Ffiles%2Fleidiniai%2FSILUMOS_vartotojo_vadovas%2FSilumos_vartotojo_VADOVAS.pdf&usg=AOvVaw1tCjiFTH5uRm5d1kh50rlx.

23. *Biokuro savybės, jų įtaka degimo procesui ir deginimo technologijoms*. Puida, E. Vilnius : Tarptautinė biomasės energetikos konferencija, 2014.

24. Ekonomizer. [Tinkle] Science Direct. [Cituota: 2020 m. gegužės 25 d.] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/economizer>.

25. *Šiluminė technika*. Jazdauskas, A. 2, s.l. : LŠTA, LIŠTIA, 2010 m. ISSN 1392 - 4346.

26. Buinevičius, K. Biokuro katilai pramonės įmonėms. [Tinkle] [Cituota: 2020 m. gegužės 25 d.]

27. *Experimental study of natural gas combustion flue gas waste heat recovery system based on direct contact heat transfer and absorption heat pump*. ZHOU, Xian, et al. Minneapolis, MN, USA : International Conference on Energy Sustainability collocated with the ASME, 2013. ES2013-18316.

28. *An investigation of the performance of compact heat exchanger for latent heat recovery from exhaust flue gases*. SHI, Xiaojun, et al. s.l. : International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011 m., T. 54. 606-615.

29. Europos parlamento ir tarybos direktyva 2010/75/ES. *dėl pramoninių išmetamųjų teršalų (taršos integruotos prevencijos ir kontrolės) (nauja redakcija)*. [Tinkle] 2010 m. lapkričio 24 d. [Cituota: 2021 m. balandis 20 d.] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX%3A32010L0075>.

30. Lietuvos respublikos mokesčio už aplinkos teršimą įstatymas Nr. VIII-1183. [Tinkle] 1999 m. gegužės 13 d. d. [Cituota: 2021 m. balandžio 21 d.] <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.80721/asr>.

31. Energy education. *Wet scrubber*. [Tinkle] [Cituota: 2021 m. balandis 28 d.] https://energyeducation.ca/encyclopedia/Wet_scrubber.

32. *Evaluation of the Impact of H₂O, O₂, and SO₂ on Postcombustion CO₂ Capture in Metal–Organic Frameworks*. Jiamei Yu, Yuguang Ma, and Perla B. Balbuena. 21, Texas 77842-3122, United States : Langmuir, 2012 m., T. 28. DOI: 10.1021/la3009514 .

33. Srivastava, R. K. ir Jozewicz, W. Flue Gas Desulfurization: The State of the Art. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2011 m. gruodis 27 d., T. 51, 12, p. 1676-1688.

34. *CFD based parametric analysis of gas flow in a counter-flow wet scrubber system*. DANZOMO, Bashir Ahmed, et al. 10:1, s.l. : Momentum, 2013 m.

35. *Performance evaluation of wet scrubber system for industrial air pollution control*. DANZOMO, Bashir Ahmed, et al. 12, s.l. : ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2012 m., T. 7. 1669-1677.

36. *Deginimo procesų tyrimai Lietuvos energetikos institute*. [Tinkle] Lietuvos energetikos institutas. [Cituota: 2020 m. gegužės 19 d.] http://www.lei.lt/_img/_up/File/atvir/pub_apie_lei/2013/Deginimo_proces.pdf.

37. *Grynojo skysčio lašelių fazinių virsmų režimų universalusis ciklas*. Miliauskas, G. 2, Kaunas : Lietuvos mokslų akademija, 2014 m., T. 60.
38. *Drėgnose dujose šylančių vandens lašelių šilumos ir masės mainai pereinamųjų fazinių virsmų režime*. Maziukienė, M. ir Miliauskas, G. Vilnius : Aplinkos apsaugos inžinerija, 2017. ISBN 978-609-476-072-3.
39. G.V. Kuznetsov, M.V. Piskunov, R.S. Volkov, P.A. Strizhak. Unsteady temperature fields of evaporating water droplets exposed to conductive, convective and radiative heating. *Applied Thermal Engineering*. 2018 m., 131, p. 340-355.
40. G. Miliauskas, M. Maziukienė H. Jouhara, R. Poškas. Investigation of mass and heat transfer transitional processes of water droplets in wet gas flow in the framework of energy recovery technologies for biofuel combustion and flue gas removal. *Energy*. 2019 m., 173, p. 740-754.
41. G. Miliauskas, V. Ramanauskas, M. Maziukiene. The interaction of the complex transfer processes in the phase transformations regimes of a water droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021 m., T. 169, 120761.
42. B. Abramzon, W. A. Sirignano. Droplet vaporization model for spray combustion calculations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1989 m., T. 32, p. 1605-1618.
43. Miliauskas, G. Regularities of unsteady radiative-conductive heat transfer in evaporating semitransparent liquid droplet. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2001 m., 44, p. 785-798.
44. Enerstena. *Ekonomaizeriai ir kodensato valymo sistema ECONERG*. [Tinkle] Enerstena. <https://www.enerstena.lt/lt/ekonomaizeriai-ir-kodensato-valymo-sistema-econerg>.
45. Liutikas, N. ir Gudzinskas, J. *Termohidromechanika*. Kaunas : Technologija, 2001. 9955090502.