

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

**Eimantas Murauskas**

**VANDENS LAŠELIŲ KONDENSACINIO FAZINIŲ VIRSMŲ  
REŽIMO MODELIAVIMAS DŪMŲ ŠILUMOS  
UTILIZAVIMUI**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Prof. habil. dr. Gintautas Miliauskas

**KAUNAS, 2015**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**  
**ŠILUMOS IR ATOMO ENERGETIKOS KATEDRA**

TVIRTINU  
Katedros vedėjas  
(parašas) Doc. Egidijus Puida  
(data)

**VANDENS LAŠELIŲ KONDENSACINIO FAZINIŲ VIRSMŲ  
REŽIMO MODELIAVIMAS DŪMŲ ŠILUMOS  
UTILIZAVIMUI**

Baigiamasis magistro projektas  
Terminžinerija (kodas 621E30001)M

**Vadovas**  
(parašas) Prof. habil. dr. Gintautas  
Miliauskas  
(data)

**Recenzentas**  
(parašas) Doc. Arvydas Adomavičius  
(data)

**Projektą atliko**  
(parašas) Eimantas Murauskas  
(data)

**KAUNAS, 2015**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

**Tvirtinu:** \_\_\_\_\_

Šilumos ir atomo energetikos (parašas, data)

katedros vedėjas

**doc. E. Puida**

(vardas, pavardė)

**MAGISTRANTŪROS UNIVERSITETINIŲ STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO  
UŽDUOTIS**

**Studijų programa TERMOINŽINERIJA**

Magistrantūros studijų, kurias baigus įgyjamas magistro kvalifikacinis laipsnis, baigiamasis darbas yra mokslinio tiriamojo arba taikomojo pobūdžio darbas (projektas). Jam atlikti ir apginti skiriama 30 kreditų. Šiuo darbu studentas parodo, kad yra pagilinęs ir papildęs pagrindinėse studijose įgytas žinias, turi pakankamai gebėjimų formuluoti ir spręsti aktualią problemą, turėdamas ribotą ir (arba) prieštaringą informaciją, geba savarankiškai atlikti mokslinius ar taikomuosius tyrimus ir tinkamai interpretuoti duomenis. Taip pat jis parodo, kad yra kūrybingas, geba taikyti fundamentines mokslo žinias, išmano socialinės bei komercinės aplinkos, teisės aktų ir finansines galimybes, turi informacijos šaltinių paieškos ir kvalifikuotos jų analizės, skaičiuojamųjų metodų ir specializuotos programinės įrangos bei bendrosios paskirties informacinių technologijų naudojimo, taisyklingos kalbos vartosenos įgūdžių, geba tinkamai formuluoti išvadas.

1. Darbo tema **Vandens lašelių kondensacinio fazinių virsmų režimo modeliavimas dūmų šilumos utilizavimui**

**Simulation of water droplets in condensing phase transition mode for flue gas heat recovery**

Patvirtinta 2015 m. gegužės mėn. 11 d. dekanų įsakymu Nr. ST17-F-11-2

2. Darbo tikslas *Sumodeliuoti kondensacinio ekonomizerio kontaktinio tipo sekcijoje išpurkšto vandens lašelių šilumos ir masės pernašos procesus nestacionariųjų fazinių virsmų režime dūmų šilumos utilizavimo esamų technologijos tobulinimo ir naujų kūrimo kontekste* .....

3. Darbo struktūra: *Literatūriniai duomenys apie dūmų šilumos utilizavimo technologijas, esamos situacijos įvertinimas, tyrimo uždavinių suformulavimas; Vandens lašelių fazinių virsmų matematinio modelio ir skaitinio tyrimo metodikos esmės atskleidimas; Drėgnuose išpurkšto vandens lašelių nestacionariųjų fazinių virsmų režimo skaitinio tyrimo optimizavimas ir kondensacinio fazinių virsmų režimo ir nestacionariojo garavimo režimo skaitinis modeliavimas; tyrimo rezultatų analizė ir apibendrinimas mokslinėmis išvadomis ir praktinėmis rekomendacijomis optimaliam vandens išpurškimui fazinių virsmų šilumos iš šalinamų dūmų apibrėžti* .....

4. Reikalavimai ir sąlygos **Ruošiant darbą vadovautis norminiais LR dokumentais, baigiamųjų darbų rengimo reikalavimais.** .....

5. Užbaigto darbo pateikimo terminas: **2015 m. 06 mėn. 01 d.**

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis.

Išduota studentui ..... **Eimantui Murauskui**

Užduotį gavau ..... **Eimantas Murauskas** ..... **2014.02.02**

(studento vardas, pavardė)

(parašas)

(data)

Vadovas prof. Gintautas Miliauskas .... **2014.02.02**

(pareigos, vardas, pavardė)

(parašas)

(data)



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

(Fakultetas)

EIMANTAS MURAUŠKAS

(Studento vardas, pavardė)

621E30001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Vandens lašelių kondensacinio fazinių virsmų režimo modeliavimas  
dūmų šilumos utilizavimui“

**AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA**

2015 gegužės 31

Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Eimanto Murauskio** baigiamasis projektas tema „VANDENS LAŠELIŲ KONDENSACINIO FAZINIŲ VIRSMŲ REŽIMO MODELIAVIMAS DŪMŲ ŠILUMOS UTILIZAVIMUI“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

Murauskas, E. Simulation of water droplets in condensing phase transition mode for flue gas heat recovery. *Masters degree project* supervisor Prof. habil. dr. Gintautas Miliauskas; Kaunas University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Design, Department of Thermal and Nuclear Energy.

Kaunas, 2015. 54 p.

### **SUMMARY**

This project presents liquid droplet heat and mass transfer intensity in combustion products. Methodology of the „droplet” problem solution was examined. Then particular heat transfer, condensation and evaporation problem solved where water drops were sprayed in the combustion products which is directly related with droplet and its surrounding calculations in wide range of temperatures. Influence of boundary conditions to heat transfer and evaporation intensity is shown. Numerical heat and mass transfer experiments were conducted for each group with four different sizes of droplet with cases of heat transfer by convection. For this numerical experiment program called „the drop” was used created by Kaunas University of Technology Department of Thermal and Nuclear energy. Results were graphically analyzed and described. Accuracy of the applied method was evaluated with energy fluxes imbalance diagrams and conclusions were made to enhance heat and mass transfer intensity depends on droplet dispersity, surrounding temperature and heat transfer method .Then particular heat transfer, condensation and evaporation problem solved where water drops were sprayed in the combustion products which is directly related with droplet and its surrounding calculations in wide range of temperatures. Influence of boundary conditions to heat transfer and evaporation intensity is shown. Numerical heat and mass transfer experiments were conducted for each group with four different sizes of droplet with cases of heat transfer by conduction. For this numerical experiment program called „the drop” was used created by Kaunas University of Technology Department of Thermal and Nuclear energy. Results were graphically analysed and described. Accuracy of the applied method was evaluated with energy fluxes imbalance diagrams and conclusions were made to enhance heat and mass transfer intensity depends on droplet dispersity, surrounding temperature and heat transfer method.

## TURINYS

<b>PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS</b> .....	7
<b>PUBLIKUOTI STRAIPSNIAI IR SKAITYTI PRANEŠIMAI KONFERENCIJOSE</b>	8
<b>ĮVADAS</b> .....	9
<b>1 FAZINIŲ VIRSMŲ ŠILUMOS UTILIZAVIMAS IŠ ŠALNAMŲ BOKURO DŪMŲ IR VANDENS IŠPURŠKIMO JOSE PRITAIKYMAS</b> .....	12
1.1 Šalinamų dūmų šilumos utilizavimas ir vandens įpuškimo pritaikymas .....	12
1.2 Kondensacinių ekonomizerių technologijos įdiegimo įmonėje AB „Šiaulių energija“ praktika.....	16
1.3 Išpurkšto vandens lašelių fazinių virsmų ciklas, jo režimai ir pagrindiniai parametrai. ....	20
<b>2 "LAŠO" MODELIS IR JO SKAITINIO SPRENDIMO METODIKA</b> .....	22
2.1 "Lašo uždavinio" esmė ir jo tyrimo patirtis. ....	22
2.2 Lašelio šilumos srautų balansas ir jo matematinis aprašymas. ....	24
2.3 Sprendimo algoritmas ir iteracinės skaitinės schemos tinklelio savitumai.....	33
<b>3 VANDENS LAŠELIŲ FAZINIŲ VIRSMŲ CIKLO MODELIAVIMAS IR REZULTATAI</b> .....	34
3.1 Skaitinės schemos patikimumas ir kontrolė.....	35
3.2 Slystančio lašelio šilumos ir masės mainų skaitinio tyrimo optimizavimas. ....	36
3.3 Vandens lašelių kondensacinio ir nestacionariojo garavimo režimų modeliavimo rezultatai ir jų įvertinimas fazinių virsmų utilizavimo iš drėgnų dūmų technologijų tobulinimo kontekste.....	40
<b>LITERATŪROS SĄRAŠAS</b> .....	52

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Dūmavamzdžio kondensacinio ekonomaizerio principinė schema .....	13
1.2 pav. Kondensacijos procesų ant sienelės ir lašelių atvejai.....	14
1.3 pav. Principinė kontaktinio kondensacinio ekonomaizerio schema .....	15
1.4 pav. Vandens purkštuko principinė schema .....	16
1.5 pav. Biokuro katilo šiluminė schema.....	17
1.6 pav. Kondensacinio ekonomaizerio trimatis vaizdas. Šaltinis [2].....	18
1.7 pav. Kondensacinio ekonomaizerio šiluminės galios priklausomybė nuo išmetamų iš katilo degimo produktų drėgmės bei temperatūros.....	19
1.8 pav. Kondensacinio ekonomaizerio rasos taško temperatūros priklausomybė nuo oro pertekliaus koeficiento. ....	20
2.1 pav. Vandens garo ir dūmų mišinio temperatūros kitimas lašelį gaubiančiame šiluminiame $\delta_s$ sluoksnyje. ....	25
2.2 pav. Lašelio paviršiaus geometrinė interpretacija.....	26
2.3 pav. Vandens garo dalinio slėgio garo ir dūmų mišinyje kitimas difuziniame pasienio sluoksnyje kondensaciniame fazinių virsmų režime. ....	27
2.4 pav. Vandens garo dalinio slėgio garo ir dūmų mišinyje kitimas difuziniame pasienio sluoksnyje garavimo režime. ....	27
2.5 pav. Šilumos srautų lašelio paviršiuje sietis kondensaciniame fazinių virsmų režime .	30
3.1 pav. Apskaičiuotų šilumos srautų lašelio paviršiuje disbalanso, išreiškiamo santykinę paklaida procentais, fazinių virsmų cikle kitimas Furje kriterijaus mastelyje, kai $Re_0=0$ . ...	35
3.2 pav. Apskaičiuotų šilumos srautų lašelio paviršiuje disbalanso, išreiškiamo santykinę paklaida procentais, fazinių virsmų cikle kitimas Furje kriterijaus mastelyje, kai $Re_0 = 50$ . ....	36
3.3 pav. Laidumo šildomų lašelių terminių ir fazinių virsmų parametrų funkcijų $P_T$ grafikai laiko (a) ir Furje kriterijaus masteliuose, kai $Re_0 = 0$ .....	38
3.4 pav. Konvekcija šildomų lašelių terminių ir fazinių virsmų parametrų funkcijų $P_T$ grafikai laiko (a) ir Furje kriterijaus masteliuose (b), kai $Re_0 = 20$ .....	39
3.5 pav. Lašelio slydimo dūmuose įtaka šilumos srautams lašelio paviršiuje nestacionariųjų fazinių virsmų režime. $R_0 = 75 \cdot 10^{-6}$ m. $q$ prasmė: (1) $q_c^+$ , (2) $q_f^+$ , (3) $q_c^-$ . ....	40
3.6 pav. Lašelio slydimo dūmuose įtaka lašelio paviršiaus temperatūros kitimui nestacionariųjų fazinių virsmų režime. $R_0 = 75 \cdot 10^{-6}$ m.....	41
3.7 pav. Lašelio slydimo intensyvumo dūmuose kitimas nestacionariųjų fazinių virsmų režime. $R_0 = 75 \cdot 10^{-6}$ m. ....	42
3.8 pav. Slystančio lašelio konvekcinio šildymo intensyvumo kitimas nestacionariųjų fazinių virsmų režime. $R_0 = 75 \cdot 10^{-6}$ m. $q_c^+$ , kW/m <sup>2</sup> .....	42
3.9 pav. Slystančio lašelio augimo kondensaciniame režime ir mažėjimo nestacionariojo garavimo režimuose dinamika. $R_0 = 75 \cdot 10^{-6}$ m. $R$ - mikrometrais.....	43
3.10 pav. Slystančio lašelio masės $M \equiv M_l \cdot 10^{10}$ kg augimas kondensaciniame režime ir mažėjimas nestacionariojo garavimo režime. $R_0 = 75 \cdot 10^{-6}$ m.....	44
3.11 pav. Lašelio slydimo įtaka garo srauto tankio jo paviršiuje dinamikai kondensaciniame režime ir nestacionariojo garavimo režimuose. $R_0 = 75 \cdot 10^{-6}$ m. $ m_{g,0}^+  = 0.0942$ kg/(m <sup>2</sup> s).....	44
3.12 pav. Lašelio slydimo intensyvumo dūmuose poveikis kondensacinio režimo trukmei $Fo_{ko} = a_0 \cdot \tau_{ko} / R_0^2$ , pagal $R_0 = 75 \cdot 10^{-6}$ m lašelio fazinių virsmų ciklo modeliavimo rezultatus.....	45

## **PUBLIKUOTI STRAIPSNIAI IR SKAITYTI PRANEŠIMAI KONFERENCIJOSE**

1. E. Murauskas, G. Miliauskas. Oro sraute garuojančių skysčių lašelių šilumos mainų intensyvumo įvertinimas. Šilumos energetika ir technologijos 2013. Straipsnio medžiaga. Kaunas, Kauno technologijos universitetas. „Technologija“ 2013, 6 P. (Skaitytas pranešimas ir publikuotas straipsnis)
2. E. Murauskas, G. Miliauskas. Simulation of water droplets in phase transition mode for heat recovery. Environmental Research, Engineering and Management. 2015. (Priimtas spaudai straipsnis).
3. E. Murauskas. Vandens lašelių kondensacinio režimo modeliavimas šilumos utilizavimo iš dūmų aspektu. Jaunųjų mokslininkų konferencija „Pramonės inžinerija 2015“. Kaunas. (Skaitytas pranešimas)



## IVADAS

Pasaulyje iškastinio kuro atsargos yra ribotos, todėl labai svarbus jo racionalus vartojimas pramonėje ir energetikoje. Energetikoje iškastinis kuras dažniausia yra deginamas šiluminės ir elektros energijos gamybai. Čia galima išskirti iškastinio kuro tausojimo, efektyvaus sudeginimo ir gamtosauginį aspektus. Efektyviausia iškastinis kuras tausojamas šilumos ir elektros energijos gamybą organizuojant atsinaujinančiųjų energijos šaltinių pagrindu. Tam tikrą indėlį čia gali įnešti hidro, saulės ir vėjo energetikos plėtojimas. Neabejotiną efektą duotų ir branduolinės energetikos vystymas, tačiau neapibrėžtumą iššaukia neapsisprendimas dėl jos tolimesnio vystymo perspektyvos politiniame lygmenyje. Todėl Lietuvos energetikos darnaus vystymosi šiuolaikiniame etape didžiausias dėmesį reikia skirti kuo platesnis vietinio biokuro panaudojimui šilumos ir elektros energijos gamybai. Šiuo atveju, kaip ir iškastiniam kurui, aktualiu išlieka kuro deginimo ir žemo potencialo šilumos utilizavimo iš dūmų sistemų efektyvumo didinimas. Žvelgiant plačiau, ne vien į ekonominę arba technologinę prasmę galime pastebėti ir gamtosauginį aspektą kuris tiek iškastinio tiek ir biokuro technologijose yra labai svarbus. Biokuro deginimo atveju azoto ir sieros junginių išmetimas pro kaminą dažniausia yra mažesnė problema nei iškastinio kuro atveju. Deginant biokurą neretai pasitaiko įvairių nedegių dalelių, tokių kaip smėlis, žemės ir kitų kurios perėjusios visą šilumos gavybos ciklą išlekia per kaminą ir tampa užterštumo kietosiomis dalelėmis priežastimi kuri yra labai aktuali didžiuose miestuose. Be to nenaudojant purškimo technologijų šilumos utilizavime atsiranda neigiamas šiluminio užteršimo poveikis gamtai. Visa tai susiję su žymiai aukštesnio drėgnumo degimo produktų susidarymu biokuro degimo procese nei iškastinio kuro deginimo atveju. Drėgmė deginant biokurą susidaro, kai patekęs kuras į kūryklą pradeda džiūti, o iš jo išgaruoja kure esanti drėgmė ir lakiosios medžiagos. Tarp jų sutinkamas ir vandėnėlis, kurį oksiduojant susidaro vandens garas. Tiesiogiai po kūryklos biokuro degimo produktus šalinant per kaminą būtų prarandami milžiniški šilumos kiekiai, kurie vandens fazinių virsmų šilumos pavidale yra sukaupti dūmuose. Taip pat gamtai grėstų šiluminis užteršimas. Todėl šiuo aspektu biokuro deginimas būtų ne tik neracionalus, bet netgi žalingas.

Fazinių virsmų šiluma iš šalinamų drėgnų biokuro dūmų tradiciškai utilizuojama kontaktiniuose kondensaciniuose ekonomazeriuose. Jie yra didelių gabaritų iš spalvotų metalų pagaminti įrenginiai, todėl yra labai brangūs ir jų diegimas reikalauja žymių finansinių investicijų. Dėl kondensacinio įrenginio brangumo kondensacinių technologijų sėkmingam plėtojimui iškyla jų kontaktinių ekonomazerių tobulinimo aktualumas.

Lygiagrečiai vertėtų ieškoti galimybių kurti naujas fazinių virsmų šilumos iš drėgnų dūmų utilizavimo technologijas. Aišku, jog jose kondensacinis procesas išliks esminiu, nes tik kondensacijos metu yra išskiriama garavimo procese dūmams fazinių virsmų šilumos pavidalu dūmams perteikta šiluminė energija. Būtų labai perspektyvu naujoje utilizavimo technologijoje išvengti spalvotų metalų vamzdelinis kondensatorių, kas leistų žymiai atpiginti naujų kondensacinių ekonomaizerių diegimą nedidelio našumo Lietuvoje vis dar plačiame katilinių tinkle.

Abiem aptartais esamų kondensacinių technologijų tobulinimo ir naujų kūrimo kontekstais yra labai svarbus optimalaus vandens įpurškimo proceso organizavimo aspektas.

Šiuo metu plačiai sutinkamuose praktikoje šilumos utilizavimo iš dūmų kontaktinio tipo kondensaciniuose ekonomaizeriuose vanduo tiesiogiai purškiamas į tekantį degimo produktų srautą viršutinėje įrenginio dalyje, kad vėliau užtikrinti patikimą vandens kondensavimą iš dūmų, kai jie teka vertikalių vamzdelių vidumi. Išpurškiamas vanduo pasiskirsto retinėje ir kartu su kondensato plėvele tekėdamas vamzdelių paviršiumi sudaro palankesnes stabilesnes hidrodinamines sąlygas šilumokaitos ir masės mainų procesams vamzdeliuose. Būtina prisiminti, jog dažnai kontaktinių kondensacinių ekonomaizerių praktikoje nepaisoma į vandens lašelių galimą išgaravimo, kai vandens lašelių temperatūra yra aukštesnė už dūmų drėgnumu apibrėžiamą rasos taško temperatūrą. Dėl to dūmai gali ataušti ir sudrėkti, todėl į vamzdelius įtekančių dūmų parametrai gali neatitikti į kondensacinį ekonomaizerį tiekiamų dūmų parametrus. Dūmų temperatūros ir drėgnumo galimiams pokyčiams apibrėžti būtinas gilus išpurškiamo vandens lašelių nestacionariųjų fazinių virsmų režimo dėsningumą pažinimas. Nestacionariųjų fazinių virsmų režimas savyje jungia lašelio kondensacinį ir nestacionariojo garavimo režimus. Esamų kontaktinio tipo kondensacinių ekonomaizerių technologijos patobulinimui svarbus yra vandens lašelio nestacionariojo garavimo režimo pažinimas ir jo pritaikymas optimaliems į vamzdelius patekančių dūmų parametrus apibrėžti. Tai susiję su naujo požiūrio į galimą dūmų parametrų reguliavimo kondensaciniame ekonomaizeryje išvystymu, kad vandens išpurškimu galima padidinti dūmų drėgnumą ir sudaryti palankias sąlygas termofikaciniam vandeniui pašildyti iki aukštesnės temperatūros.

Fazinių virsmų šilumos iš dūmų naujų technologijos vystymo kontekste taip pat svarbus yra vandens išpurškimo pritaikymo kontekstas. Šiuo atveju tyrėjų žvilgsnis krypsta į tiesioginį termofikacinio vandens išpurškimą į drėgnus dūmus kontaktinio tipo kondensaciniuose ekonomaizeriuose, kai vandens garas iš drėgnų dūmų kondensuojamas tiesiog ant lašelio paviršiaus ir pašildo vandenį lašelyje. Naujo tipo kontaktinių

ekonomaizerių technologijų vystymui svarbus yra vandens lašelio kondensacinio fazinių režimo pažinimas ir jo dėsningumų pritaikymas optimaliam vandens įpurškimui apibrėžti. Tokio tipo technologijos reikalautų griežtos lašelių terminės būsenos kontrolės ir savalaikio lašelių išvedimo iš kondensacinio ekonomaizerio jiems pašilus iki rasos taško temperatūros.

Taigi, vandens lašelių fazinių virsmų ciklo nestacionariųjų fazinių virsmų kondensacinio ir nestacionariojo garavimo režimų pažinimo svarba kondensacinių ekonomaizerių fazinių virsmų šilumai iš drėgnų dūmų utilizuoti technologijų tobulinimo ir vystymo kontekste yra neabejotina. Tam reikia nueiti nuoseklaus pažinimo kelia nuo paprasčiausių iki sudėtingiausių šilumos ir masės mainų išpurkšto vandens lašelių atvejų. Pagrindą šilumos ir masės pernašos procesų vyksmo sąlygų išpurkšto skysčio sistemose įvertinimui sudaro "vienišo lašelio" šilumokaitos ir masės procesų dėsningumų pažinimas. "Vienišo lašelio" atvejų tyrimai sudaro prielaidas išgryninti lašelio parametrų įtaką pernašos procesų dėsningumams, kadangi laikoma, jog įpurškiamas vanduo dūmų parametrų nepakeičia. Tik apibrėžus lašelio pernašos  $P$  parametrų kitimo fazinių virsmų cikle dėsningumus, galima nuosekliai įvertinti sudėtingesnių kraštinių sąlygų poveikį išpurkšto vandens lašelių fazinių virsmų ciklui.

Šiame darbe apsiribojama išpurkšto vandens lašelių nestacionariojo fazinių virsmų režimo tyrimu "vienišo lašelio" modelio atvejui atsižvelgiant į lašelio slydimo drėgnuose dūmuose faktorių. Darbui išskelti uždaviniai:

1. Aptarti fazinių virsmų šilumos iš biokuro dūmų utilizavimo technologiją ir išryškinti praktinius kondensacinių ekonomaizerių aspektus ir vandens išpurškimo juose pritaikymą.
2. Pateikti išpurkšto vandens fazinių virsmų ciklo tyrimo „Lašo“ uždavinio pagrindu metodiką ir išryškinti jos skaitinio tyrimo savitumus.
3. Įvertinti skaitinio eksperimento išpurkšto vandens plačiame lašelių dispersiškumo spektre optimizavimo lašelių fazinių virsmų ciklo optimalaus ištyrimo kelią.
4. Įvertinti skaitinės schemos patikimumą ir numatyti jo kontrolės mechanizmą.
5. Sumodeliuoti dūmuose slystančių lašelių fazinių virsmų ciklo nestacionarųjį režimą
6. Apibendrinti kondensacinio ir nestacionariojo garavimo režimų skaitinio tyrimo rezultatus ir juos įvertinti vandens įpurškimo optimalaus vykdymo esamų technologijų tobulinimo ir naujų kūrimo kontekste.
7. Numatyti pasiūlymus optimaliam vandens išpurškimui biokuro drėgnų dūmų fazinių virsmų šilumos utilizavimo technologijai tobulinti.

# 1 FAZINIŲ VIRSMŲ ŠILUMOS UTILIZAVIMAS IŠ ŠALINAMŲ BIOKURO DŪMŲ IR VANDENS IŠPURŠKIMO JOSE PRITAIKYMAS

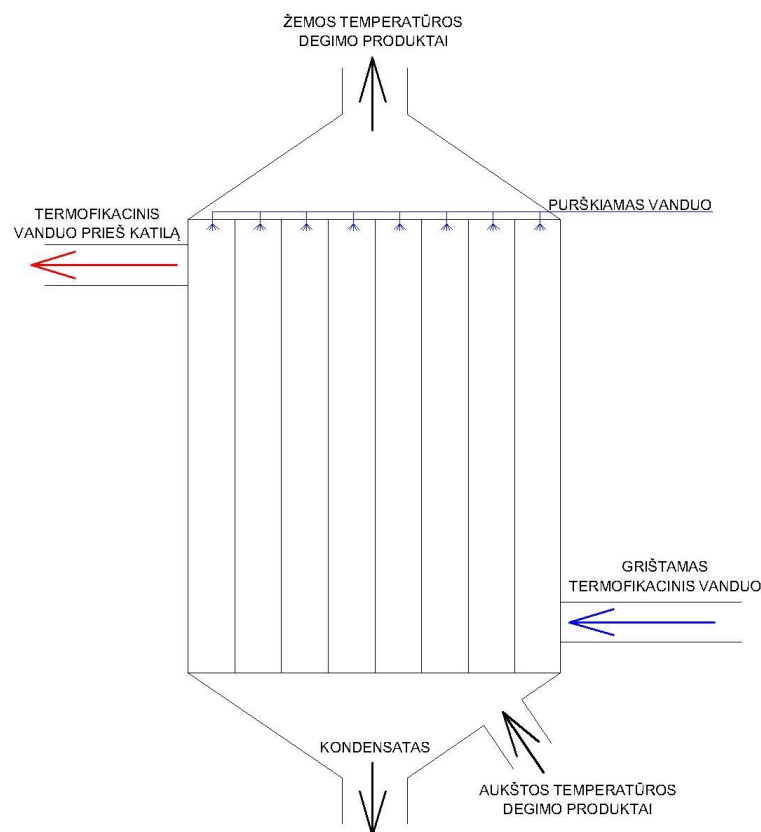
Vandens garas susidaro degant kure esančiam vandeniliui. Papildomai vandens garas dūmuose atsiranda išgaruojant kure esančiai drėgmei. Todėl kuro degimo produktuose - dūmuose - bus vandens garas. Jo koncentracija dūmų dujų mišinyje galima apibrėžti tūrine dalimi, išreiškiamo vandens garo dalinio  $p_{g,d}$  slėgio dūmuose ir dūmų  $p_d$  santykiu  $\bar{p}_{g,d} \equiv p_{g,d} / p_d$ . Deginant standartinio sąstato dujas, dūmų drėgnumas  $\bar{p}_{g,d} = 0.11$  [1] yra santykinai nedidelis. Lietuvos energetikoje plėtojant biokuro dedamąją katiluose susidarančių dūmų drėgnumas gali būti daug didesnis ir sudaryti 30–60 procentų dujų mišinyje. Todėl iš biokuro kūryklos išeinančiuose dūmuose yra sukaupti milžiniški šilumos kiekiai vandens fazinių virsmų šilumos pavidale ir juos šalinti tiesiogiai į atmosferą būtų neracionalu ekonomiškai ir nepriimtina ekologiškai dėl galimo atmosferos šiluminio užteršimo. Papildomai vandens garo dūmuose gali atsirasti dėl tikslingai įpurškiamo vandens į liepsną tam, kad sužeminti jos maksimalią temperatūrą ir sumažinti azoto NOx oksidų kiekį dūmuose.

Vandeniui išgarinti sunaudojama šiluminė energija todėl labai aktualu kuro energijos transformacijos proceso efektyvumui padidinti fazinių virsmų šilumą prieš pašalinant dūmus susigražinti. Tam pasitarnauja kondensaciniai ekonomizeriai, įgalinantys katilinės šiluminę galią gali padidinti iki 20% ir labai drėgno biokuro atveju netgi daugiau.

## 1.1 Šalinamų dūmų šilumos utilizavimas ir vandens įpurškimo pritaikymas

Fazinių virsmų šilumą iš dūmų galima atgauti tik priešingame vandens garavimo procesui, t.t. dūmuose esančio vandens garo kondensacijos procese. Tam dūmai privalo kontaktuoti su žemesnę už rasos taško  $T_r$  temperatūrą turinčiu paviršiumi. Tuomet prie paviršiaus šiluminiame pasienio sluoksnyje vandens garas kartu su dūmų dujų mišiniu ataušta iki rasos taško temperatūros ir kondensuojasi išsiskiriant fazinių virsmų šilumos srautui, kurio intensyvumą apibrėžia fazinių virsmų šilumos srauto tankis  $q_f$ , W/m<sup>2</sup>. Fazinių virsmų šilumos srauto intensyvumas priklauso nuo susikondensuojančio vandens garo srauto tankio  $m_g$ , kg/(m<sup>2</sup>s) ir vandens fazinių virsmų šilumos  $L$ , J/kg:  $q_f = m_g L$ . Drėgnų dūmų atveju kondensuojasi dideli garo srautai ir paviršiuje išsiskiria intensyvūs fazinių virsmų šilumos srautai, todėl paviršių būtina aušinti, jog iki rasos taško

temperatūros jis šiltų kuo ilgiau, kadangi paviršiumi pašilus iki rasos taško temperatūros prasidės kondensato išgarinimo procesas ir dūmas vėl bus gražinama dalis utilizuotos šilumos. Praktikoje aušinančiu fluidu dažnai pasitarnauja į katilinę iš vartotojų grįžtantis  $T_f'$  temperatūros vanduo, kuris teoriškai gali būti pašildomas iki dūmų drėgnumu apibrėžiamos temperatūros, atitinkančią sočio vandens garo temperatūrą prie dalinio vandens garo slėgio dūmuose:  $T_{f,max}'' \equiv T_{n,d}$ , kai  $T_{n,d} = T_{sot} | p_{g,d} |$ . Reikia pastebėti, jog iki šios temperatūros dūmai teoriškai gali pašilti tik priešsrovinio tipo šilumokaičiuose, nes kondensacinio proceso eigoje dūmų drėgnumas žemėja, o kartu žemėja ir rasos taško temperatūra. Taigi, dūmų pradinis drėgnumas apibrėžia teorinę paviršių aušinančio fluido pašildymo temperatūrą, todėl kondensacinės technologijos efektyvumui dūmų pradinis drėgnumas tampa labai svarbiu faktoriumi.

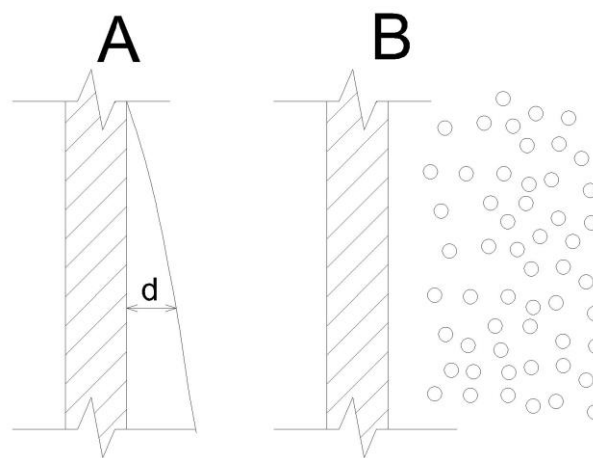


1.1 pav. Dūmavamdžio kondensacinio ekonomaizerio principinė schema

Kondensacinį ekonomaizerį dūmų fazinių šilumos utilizavimo technologijoje galima pritaikyti veikti tiesioginiame vandens ir dūmų kontakte (kontaktinio tipo ekonomaizeris), arba dūmus ir vandenį atskirti sienele (rekuperacinio tipo ekonomaizeris). Utilizavimo šiuolaikinėse technologijose sutinkami abu atvejai ir kiekvienas iš jų turi savo specifiką. Kadangi dūmuose yra agresyvių teršalų, todėl kondensaciniam procesui būdinga agresyvi

korozijos atžvilgiu aplinka, kas reikalauja brangių spalvotų metalų šilumokaičio. Kontaktinio tipo ekonomaizeryje dūmai kontaktuoja su išpurškiamu vandeniu tiesiogiai ir iškyla griežto technologinio proceso reguliavimo poreikis, o paviršiai turi būti apsaugoti nuo kontakto su dvifaziu dūmų ir lašelių srautu arba būti atsparūs korozijai.

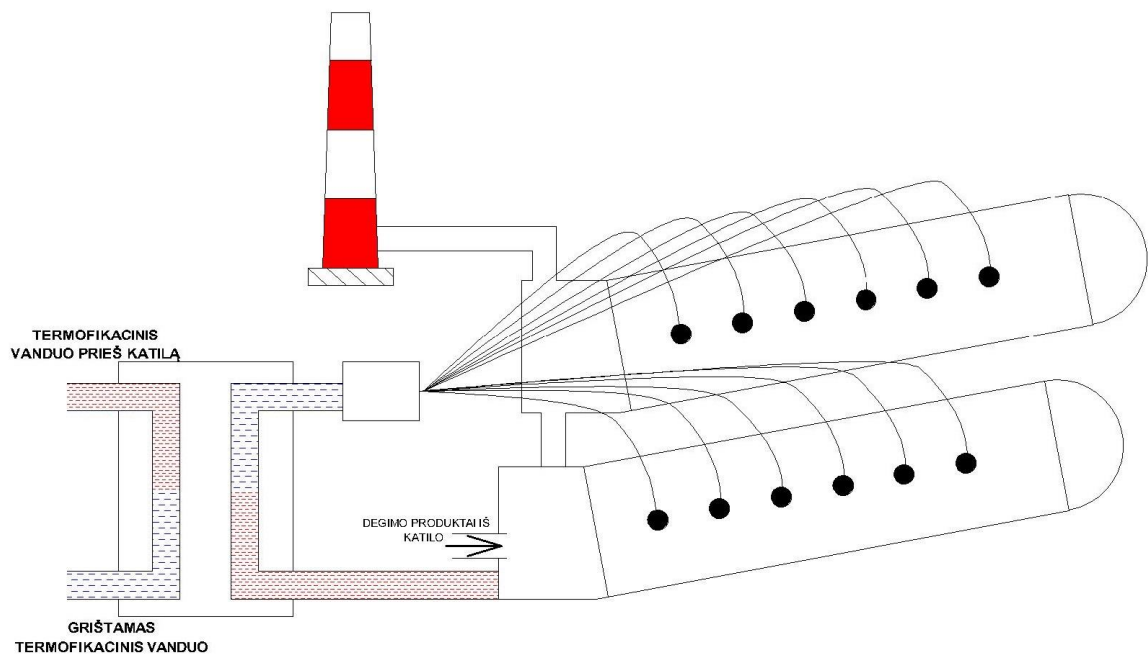
Taigi, šilumos utilizavimo technologijose galimas įvairių kondensatorių pritaikymas. Klasikinis yra spalvotų metalų pritaikymas (1.1 pav.). Šiuo atveju vanduo purškiamas tam, kad dūmuose esančio dalelės nepriliptu prie sienelių ir neužterštų šilumos mainų paviršiaus ir kartu pagerintų šilumos mainus tarp degimo produktų ir sienelės. Šio tipo kondensaciniame ekonomaizeryje galimi kondensacijos ant sienelių ir kondensacijos ant vandens lašelių A ir B atvejai atitinkamai (1.2 pav.).



1.2 pav. Kondensacijos procesų ant sienelės ir lašelių atvejai

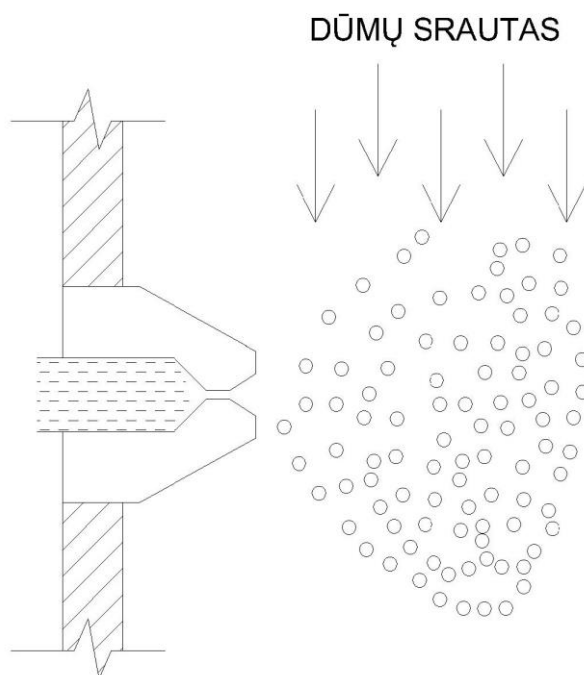
A atveju kondensacijai vykstant ant plėvelės šilumokaitos procesu stabdo plėvelės terminė varža, kurią apibrėžia tekančio vandens storis  $d$ . Šios varžos įtaka suminiai šilumos perdavimo varžai gal ir nėra didelė, tačiau stambioje energetikos įmonėje dirbančioje visus metus be sustojimų šis nežymus trukdis gali iššaukti juntamus nuostolius. Be to A atveju šilumos atidavimo koeficientas yra ženkliai mažesnis nei B atveju. Plėvelės terminė varža žymiai didesnę vaidmenį vaidina rekuperacinio tipo šilumokaičiuose, kur dūmai teka nedidelio skersmens vamzdeliuose, o garas kondensuojasi ant plėvelės. Tuomet kondensacijos režimo trukmę apibrėžia plėvelės pašilimas iki rasos taško temperatūros, kuri pagal vamzdžio ilgį žemėja, o kondensato plėvelė šyla ir jos temperatūra auga. Todėl tam tikrame vamzdelio aukštyje gali plėvelės paviršiaus ir rasos taško temperatūros susilyginti. Tuomet žemiau pagal vamzdį prasidės nenaudingas kondensato garinimo procesas, susijęs su utilizuotos šilumos dalies gražinimu į dūmus. Tai aktuali problema, į kurią šiuolaikinėse technologijose dar bandoma nekreipti dėmesio.

Norinti panaikinti arba iki minimumo sumažinti A režimo poveikį, vystomos B atveju grindžiamos technologijos. Tai užtikrina 1.3 pav. parodyta įrenginio principinės konstrukcijos schema.



1.3 pav. Principinė kontaktinio kondensacinio ekonomizerio schema

Šiuo atveju vanduo čia naudojamas kaip šilumos nešėjas, kuris tiesiogiai purškiamas į degimo produktus. Dėl suprojektuoto nuolydžio savitaka išpurkštas vanduo ir kondensatas nuteka žemyn į plokštelinį šilumokaitį kuriame ženkliai efektyviau nei rekuperacinio vamzdelinio tipo šilumokaičio atveju perduoda šilumą termofikaciniam vandeniui. Dūmai savo ruožtu teka ratu tada kyla aukštyn į antrinę purškimo kamerą kur tiekiamas vėsesnis vanduo tam, kad papildomai būtų utilizuojama fazinių virsmų šiluma, o purškiamo vandens temperatūra neviršytu rasos taško temperatūros.



1.4 pav. Vandens purkštuko principinė schema

Tam, kad užtikrinti kuo efektyvesnius šilumos ir masės mainus siekiant kuo efektyviau atgauti fazinių virsmų šilumą turi būti nuolatos palaikomas tam tikras optimalus lašelių dispersiškumas, grindžiamas vandens dispergatoriaus principu ir darbo režimu (1.4 pav.). Optimalaus vandens išpurškimo sąlygų apibrėžimas yra aktuali problema dūmų šilumos utilizavimo technologijoms tobulinti.

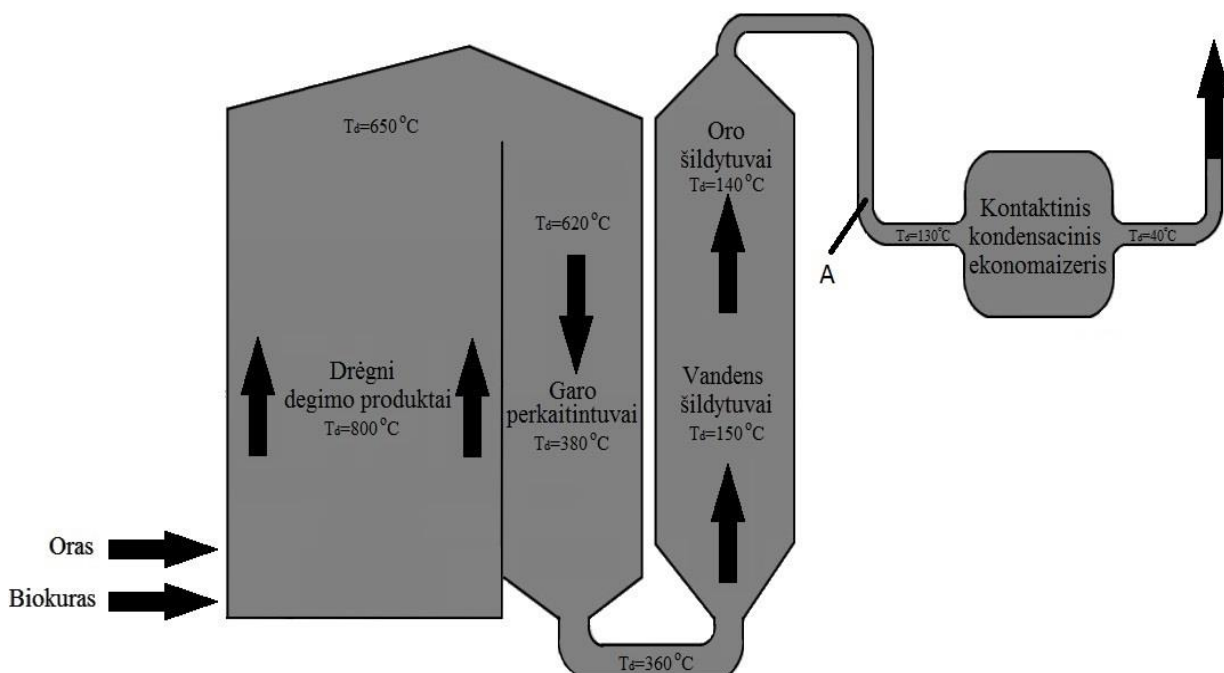
Kondensacinius ekonomaizerius efektyvu diegti netgi įprastinį gamtinį kurą deginančiose katilinėse. Aišku, jų efektyvumas nepalyginamai išauga pagrindiniu kuru katilinėje tapus biokurai. Tai iliustruosime kondensacinių ekonomaizerių įdiegimo įmonės AB "Šiaulių energija" praktika.

## 1.2 Kondensacinių ekonomaizerių technologijos įdiegimo įmonėje AB „Šiaulių energija“ praktika

Įmonėje AB „Šiaulių energija“ buvo sumontuotas 10MW kondensacinis ekonomaizeris ant dujas deginančių katilų kurių maksimali galia 200 MW. Projektas įdiegtas 2011 m. ir įmonei kainavo 3,6mln. Lt iš kurių apie 0,7 mln. Lt buvo gauta iš Lietuvos aplinkos apsaugos investicijų fondo (LAAIF). Per pirmus metus po paleidimo įrenginys utilizavo fazinių virsmų šilumos už 2,3 mln. Lt, sekančiais metais dėl to, kad jis buvo naudojamas tik šildymo sezono metu ir dėl naujos biokuro katilinės paleidimo ekonomaizeris pagamino šilumos už 1 mln. Lt. Šis įrenginys padidino kuro transformacijos efektyvumą 9%. Įmonėje atliktoje analizėje teigiama, kad per metus šis įrenginys sumažino



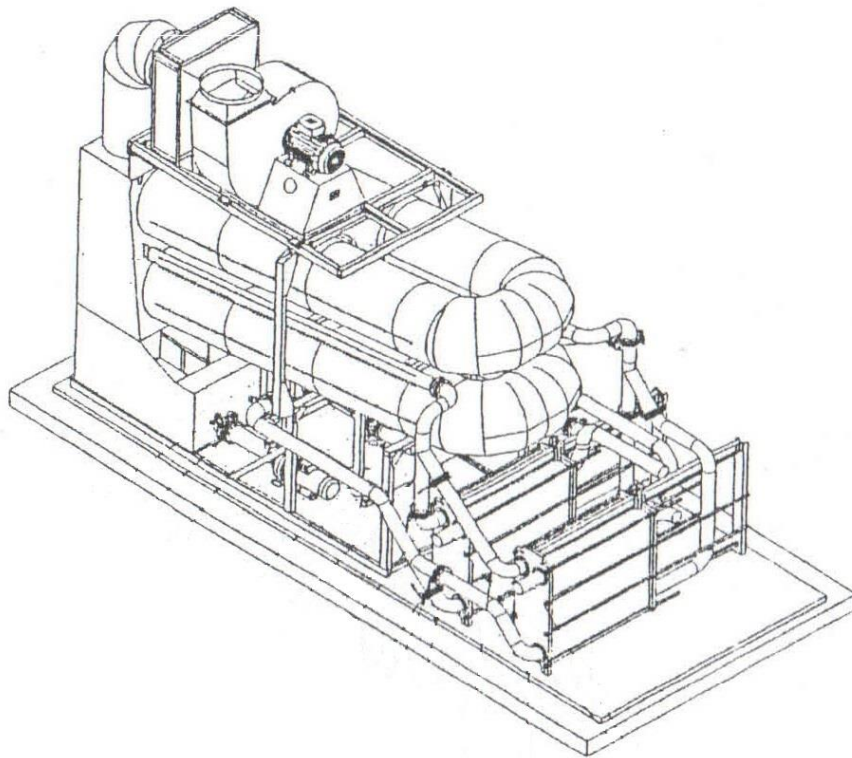
dujų suvartojimą beveik 3,16 mln. m<sup>3</sup>, išmetamo anglies monoksido kiekį sumažino beveik 8 t, azoto oksidų (NOx) sumažino 5,6 t. ir tai leido parduoti dalį taršos leidimų.



1.5 pav. Biokuro katilo šiluminė schema

Vėliau „Šiaulių energijoje“ buvo įrengta termofikacinė elektrinė su moderniu biokuru kūrenamu katilu (1.5 pav.), siekiant sumažinti šiluminės energijos kainą ir gaminti elektrą. Degant biokurui susidarę dūmai keliauja į konvekcinių vamzdžių pluoštą. Pirmoji šio pluošto dalis yra garo perkaitintuvai kuriuose garas perkaitinamas iki 460 °C temperatūros ir tiekiamas į turbiną. Ataušę iki 360 °C dūmai šildo vandenį vandens šildytuvuose iš kurių vandeniu tiekiamas į katilo būgną. Paskutinė konvekcinių pluošto dalį sudaro oro šildytuvai kuriuose šildomas degimui palaikyti skirtas oras.

Kadangi kuras tiekiamas į degimo kamerą nėra sausinamas ar valomas todėl gaunami dūmai kurių sudėtyje yra didelis vandens garo bei kietųjų dalelių kiekis. Siekiant galutinai išvalyti dūmus ir panaudoti pilną jų energinį potencialą AB „Šiaulių energija“ nusprendė įrengti kontaktinį dūmų ekonomizerį (1.6 pav.). Čia šilumos utilizavimas vyksta purškiant žemesnės temperatūros vandenį nei esamas dūmų rasos taškas per purkštukus išdėstyti ant vamzdžių į kuriuos tiekiami apie 130 °C temperatūros degimo produktai.

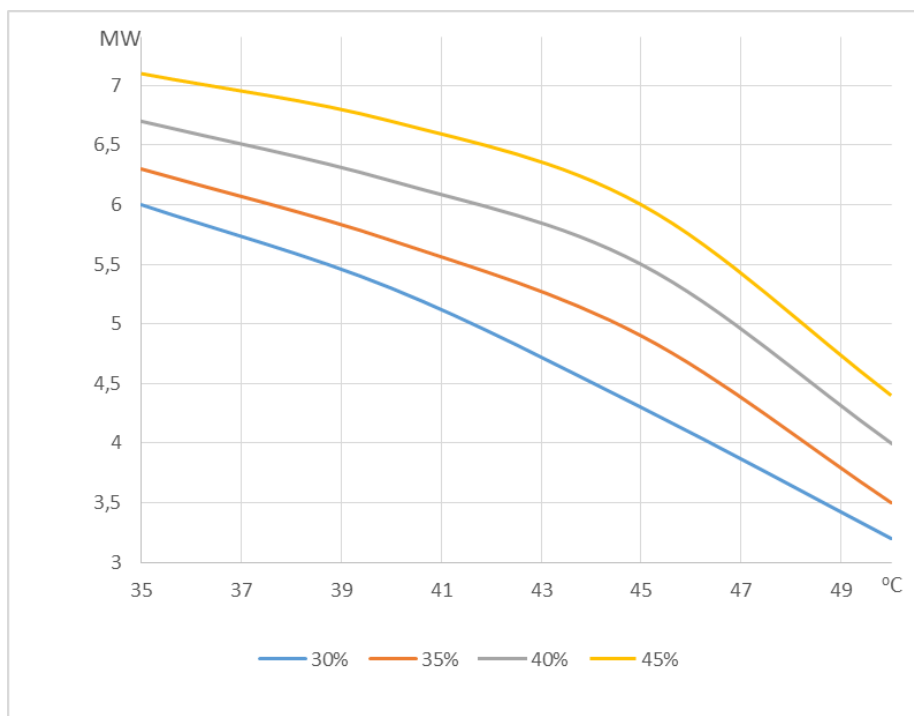


1.6 pav. Kondensacinio ekonomizerio trimatis vaizdas. Šaltinis [2]

Vandens lašeliai sukuria didelį paviršiaus plotą kuris reikalingas norint maksimaliai panaudoti degimo produktų šiluminį potencialą. Vanduo esantis degimo produktuose kondensuojasi ant vandens lašelių ir atiduota slaptąją garavimo šilumą kuri buvo panaudota išgarinti drėgmę esančia drėgname kure. Kondensacijos procesas vyksta tol kol degimo produktų rasos taško temperatūra tampa žemesnė už purškiamo vandens temperatūrą. Išpurškstas vanduo kartu su kondensatu keliauja į plokštelinį šilumokaitį ten atidavęs šiluminę energiją termofikatui keliauja į vandens valymo įrenginius. Dalis šilto termofikato yra purškama ant dūmų, o kita tiekama tolimesniam šildymui iki nustatytos temperatūros. Degimo produktai maždaug  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  su dūmsiurbiu išmetami per kaminą. Bendras abiejų kondensatorių šiluminis našumas  $12.4\text{ MW}$  ir tai sudaro 20% visos termofikacinės elektrinės galingumo.

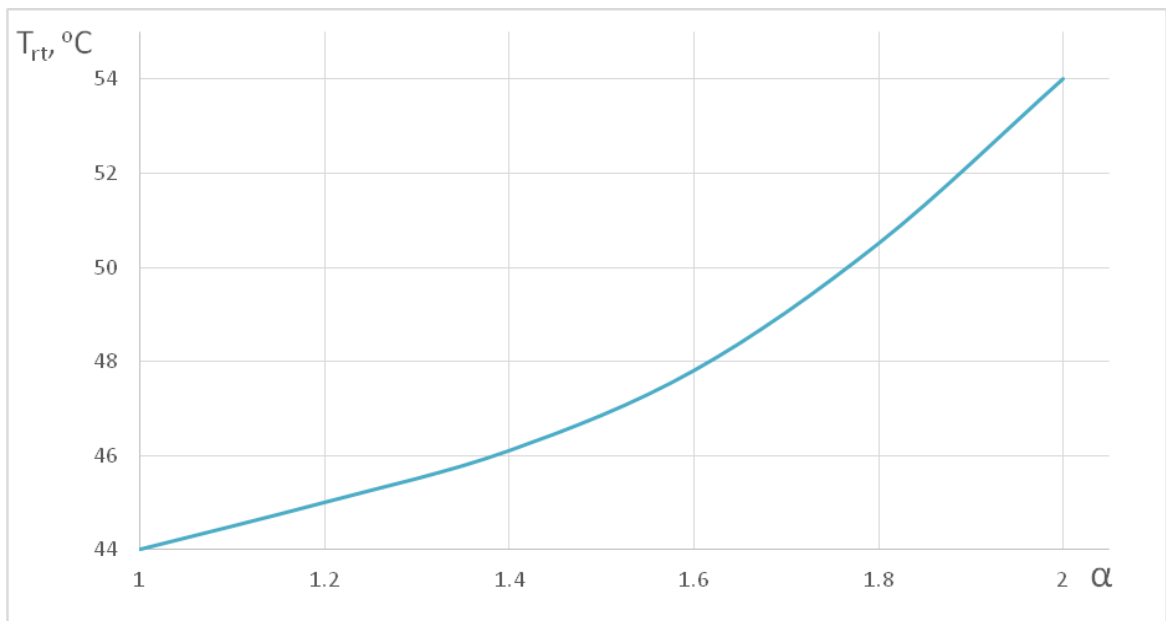
Vėliau buvo nuspręsta ištirti kaip šiluminę įrenginio galią keičia dūmų drėgnumas bei grįžtamo termofikacinio vandens temperatūra esant pilnam katilo apkrovimui. Degimo produktų drėgmei matuoti buvo naudojamas dūmų analizatorius. Po kiekvieno matavimo buvo fiksuojama grįžtamo šilumnešio temperatūra bei šiluminė pirmojo ekonomizerio galia. Tam, kad neiškreiptų rezultatų buvo sekamas deguonies kiekis dūmuose ir esant ženkliam jo pokyčiui rezultatai atmesti. Gauti rezultatai pavaizduoti grafiškai (1.7 pav.). Rezultatai akivaizdžiai parodo, kad mažinant grįžtamą termofikacinio vandens temperatūrą mes gauname teigiamą efektą tokį patį efektą pastebime ir didėjant dūmų drėgnumui. Verta

paminėti, kad norint padidinti degimo produktų drėgnį mes turime deginti drėgnesnį kurą, o tai mažina katilo efektyvumą ir pagamintos aukšto potencialo šiluminės energijos kiekį kas įtakoja pagaminamos elektros energijos kiekį. Priešingai nei dūmų drėgnumas žemesnė grįžtama termofikacinio vandens temperatūra didina bendrą katilinės efektyvumą.



1.7 pav. Kondensacinio ekonomizerio šiluminės galios priklausomybė nuo išmetamų iš katilo degimo produktų drėgmės bei temperatūros

Tačiau tam, kad nereikėtų perskaičiuoti ir pakeisti viso miesto šildymo prietaisų esančių daugiabučiuose kurie prie šilumos tinklų yra prijungti pagal priklausomą šilumos punkto schemą (maždaug 50% visų Šiaulių miesto daugiabučių) mums tenka didinti paduodamą temperatūrą ir mes gauname tokį patį neigiamą efektą kaip ir didinant dūmų drėgnumą. Įvertinus drėgmės ir grįžtamo šilumnešio temperatūros įtaką šiluminei galiai atsiranda poreikis įvertinti kaip oro pertekliaus poveikį kondensaciniam ekonomizeriui. Atlikus dūmų drėgnumo tyrimus gauta (1.8 pav.) priklausomybė.



1.8 pav. Kondensacinio ekonomazerio rasos taško temperatūros priklausomybė nuo oro pertekliaus koeficiento.

Rezultatai parodo, kad didinant perteklinį oro kiekį didėja ir rasos taško temperatūra, tiekiant per daug oro į kūryklą degimo produktai skiedžiami su oru todėl mažėja dūmų santykinis drėgnumas. Didinant oro pertekliaus koeficientas mes taip pat didiname elektrinius ir šiluminius nuostolius, nes perteklinis oras pašildomas ir išmetamas per kaminą bei stipriau apkraunama orapūtė. Šis rasos taško temperatūros kylimas mums aiškiai parodo tendenciją pagal kurią mažės mūsų kondensacinio ekonomazerio šiluminė galia atsiradus nesandarumams kūrykloje, sugedus oro tiekimo automatikai.

Taigi, galima apibendrintai teigti, jog vandens išpurškimas turi savo vietą tiek rekuperaciniai tiek ir kontaktiniais ekonomazeriais grindžiamose dūmų fazinių virsmų šilumos utilizavimo technologijose ir tinkamų sąlygų vandens išpurškimui apibrėžimas yra labai aktualus esamų technologijų optimizavimo ir naujų, kiek įmanoma pigesnių, vystymo aspektais.

### 1.3 Išpurškto vandens lašelių fazinių virsmų ciklas, jo režimai ir pagrindiniai parametrai.

Išpurškiant vandenį susidaro skirtingo stambumo lašeliai. Jų dispersiškumas priklauso nuo išpurškimo įrenginio charakteristikų, tačiau vyrauja konkrečiam purkštukui būdingi vidutinio dispersiškumo lašeliai, o smulkiųjų ir stambiųjų koncentracija yra mažiau. Todėl dažnai pernašos procesai išpurškto vandens lašelių sistemoje analizuojami vyraujančio dispersiškumo lašelių atžvilgiu. Tuomet visam lašelių ansamblui vidutinės šilumos ir masės pernašos parametru ( $P_{vid}$ ) vertės apibrėžiamos sprendžiant "lašo" vardu

žinomą šilumos ir masės mainų uždavinį vidutinio skersmens lašeliui. Kruopštesnės analizės atveju reikia atsižvelgti į lašelių individualaus dispersiškumo įtaką jų šilumos ir masės mainų parametrams. Tuomet išpurškiamo vandens lašeliai sugrupuojami į baigtinį ansamblių  $N_a$  skaičių, kurių kiekvienam numatomas individualus būdingas lašelių skersmuo, dažniausia apibrėžiamas lašelio dvigubu pradiniu spinduliu  $2R_0$ . Tuomet lašelių šilumos ir masės mainų parametrai  $P_a$  apibrėžiami kiekvienam ansambliui sprendžiant "lašo" uždavinį pagal būdingą individualų dispersiškumą. Išpurkšto skysčio lašelių  $P_{vid}$  parametrai apibrėžiami apibendrinant gautus individualius  $P_a$  sprendinius.

Išpurkšto vandens lašelių šilumos ir masės mainų intensyvumas lašelių fazinių virsmų eigoje kinta. Lašelių šilumos ir masės mainus patogiu sistemingai analizuoti fazinių virsmų galimus režimus apjungus fazinių virsmų cikle. Drėgnuose dūmuose išpurkšto vandens lašelių pilnas fazinių virsmų ciklas apjungia kondensacinį, nestacionariojo garavimo bei pusiausviro garavimo režimus [3]. Ciklui apibrėžti numatomi charakteringi laiko momentai:

$$\tau \equiv 0 \div \tau_{ko} \div \tau_{nf} \div \tau_f. \quad (1.1)$$

Pradinis  $\tau \equiv 0$  laiko momentas sutapatinamas su vandens išpurškimo į dūmų srautą laiko momentu. Kondensaciniam režimui vykti į drėgnus dūmus išpurškiamo vandens  $T_0$  temperatūra privalo būti žemesnė už rasos taško  $T_n$  temperatūrą. Laiko  $\tau_{ko}$  momentas atspindi fazinių režimų kaitą iš kondensacinio į nestacionariojo garavimo. Tai įvyksta, kai lašelio paviršius pašyla iki rasos taško temperatūros  $T_R(\tau \equiv \tau_{ko}) = T_n$ . Laiko  $\tau_{nf}$  momentas atspindi pusiausviro garavimo pradžią. Pusiausviro garavimo suvokiamas fazinių virsmų režimas, kai lašeliui suteikiama šiluminė energija garina vandenį. Laiko  $\tau_{nf}$  momentu lašelio paviršius pašyla iki pusiausviro garavimo sąlygą tenkinančios pusiausviro garavimo  $T_e$  temperatūros:  $T_R(\tau \equiv \tau_{nf}) \equiv T_e$ . Pusiausviro garavimo  $T_e$  temperatūra yra jautri lašelio šilumokaitos su dūmais sąlygoms [4]. Ciklo  $0 \div \tau_{nf}$  laikotarpis atspindi nestacionariųjų fazinių virsmų trukmę, kurią apibrėžia kondensacinis ir nestacionariojo garavimo režimai:  $\tau_{nf} = \tau_{ko} + \tau_{ng}$ . Pusiausviro garavimo režime lašelis išgaruojam, todėl fazinių virsmų ciklo pabaigą apibrėžia  $R(\tau \rightarrow \tau_f) \rightarrow 0$  sąlyga.

Fazinių virsmų ciklą apibrėžiantys svarbiausi parametrai: dūmų temperatūra ( $T_d$ ) ir drėgnumas ( $\bar{p}_{g,\infty} \equiv p_{g,\infty} / p$ ), išpurškiamo vandens temperatūra  $T_0$  ir generuojamų lašelių dispersiškumas  $R_0$ , dūmų srauto ir išpurškiamo vandens pradinių debitų  $\bar{G}_0 \equiv G_{d,0} / G_{v,0}$  santykis bei vandens lašelių šilumokaitos sąlygos. Šių parametru visuma nulemia šilumos srautų lašelio paviršiuje dinamiką, apibrėžiančią lašelio paviršiaus temperatūros kitimą fazinių virsmų cikle. Funkcijos  $T_r(\tau)$  determinavimas yra raktas "lašo" uždaviniui išspėsti ir šilumos ir masės pernašos parametru  $P(\tau)$  funkcijoms apibrėžti. Pagrindiniai lašelio fazinio ciklo parametrai yra grupuojami į terminių  $P_T$ , energinių  $P_q$ , dinaminę  $P_d$  ir fazinių virsmų  $P_f$  grupes. Tarp terminių parametru, kurie susiję su lašelio terminiu režimu svarbiausiu laikomas nestacionariojo temperatūros lauko funkcija apibrėžiamas  $T(r, \tau)$  parametras, nusakantis lašelio sluoksnių temperatūros kitimą laike. Tarp energinių parametru, kurie susiję su lašelio energiniu režimu svarbiausiais laikomi suminės šilumos srauto ir fazinių virsmų šilumos srauto  $q_\Sigma$  ir  $q_f$  parametrai. Suminis šilumos srautas taikomas lašelio šildymui iš išorės intensyvumui nusakyti  $q_\Sigma^+ = q_c^+ + q_r^+$  ir vandens lašelyje šildymo intensyvumui  $q_\Sigma^- = q_c^- + q_r^-$  nusakyti. Fazinių garuojančio lašelio fazinių virsmų srautas tradiciškai laikomas teigiamo ženklo dydžiu, o kondensacinius atžvilgiu neigiamo ženklo dydžiu. Aišku, tai yra susitarimo reikalas. Dinaminiais lašelio parametrais apibrėžiamas lašelio judėjimas. Jiems priskiriamas lašelio greičio ir dūmų greičio skirtumu apibrėžiamas lašelio slydimo dūmuose  $\Delta w_l \equiv |w_l - w_d|$  greitis ir jo kitimo pagreitis. Faziniais parametrais aprašomas lašelio  $2R(\tau)$  skersmens,  $4\pi R^2(\tau)$  ploto ir  $4\pi R^3(\tau)/3$  tūrio kitimas fazinių virsmų cikle bei apibrėžiama garo srauto  $g_g(\tau)$  ir jo tankio  $m_g(\tau)$  dinamika lašelio paviršiuje atitinkami.

## 2 "Lašo" modelis ir jo skaitinio sprendimo metodika.

Lašelio šilumokaitos ir masės mainų procesų intensyvumo kitimą fazinių virsmų cikle nusakančių lašelio šilumos ir masės mainų parametru  $P(\tau)$  funkcijų apibrėžimas yra labai plačiai pasaulyje tiriama problema, kuri žinoma "lašo" uždavinio vardu.

### 2.1 "Lašo uždavinio" esmė ir jo tyrimo patirtis.

"Lašo" uždavinys savyje apjungia "lašo išorinį" ir "lašo vidinį" uždavinius. "Lašo išoriniu" uždaviniu suvokiama lašelio šilumokaitos ir masės mainų su jį nešančiu dujų

srautu intensyvumo apibrėžimas, o "lašo vidiniu" uždavinio tikslu laikomas lašelio terminės ir vidinės energinės būsenų apibrėžimas plačiame išpurkštam skysčiui būdingų graštinių sąlygų diapazone [5-36] ir kt.. Visumoje abu šie uždaviniai yra glaudžiai susiję ir jau daugiau kaip amžių yra intensyviai tiriami [5], tačiau ir [17] toliau išlieka aktualūs dėl plataus skysčio - tame tarpe ir vandens - išpurškimo grindžiamų terminių technologijų įvairovės ir plataus taikymo sričių spektro ir tyrimo metodų įvairovės [6]. "Lašo" tyrimų pradiniam etape didžiausią dėmesį tyrėjai skyrė lašelio konvekciniams šilumos mainams su aplinka ir jo garavimui, todėl pernašos procesus pačiame lašelyje dažniausia paneigdavo [5]. Vėliau tyrėjus pradėjo dominti ir procesai lašelyje, nes be jų įvertinimo nebuvo galima apibrėžti lašelio paviršiuje sąveikaujančių šilumos srautų intensyvumą [7]. Pastaruoju laikotarpiu "lašo" tyrimuose neapsieinama be dėmesio šilumos spinduliuotės savitumams [8-9], į kuriuos būtina atsižvelgti modeliuojant pernašos procesus aukštos temperatūros dujų ir skysčio lašelių dvifaziuose srautuose. Jie plačiai paplitę kuro deginimo sistemose vidaus degimo ir raketiniuose varikliuose, o energetikoje būdingi skystojo kuro deginimo kūryklose technologijose. Nors skysčio išpurškimo terminės technologijos labai savitos, tačiau šilumos ir masės pernašos procesų modeliavimo prasme jas apjungia skysčio lašelis, sudarantis "lašo uždaviniui" vieningą pagrindą. Sisteminiam požiūriui į "lašo" uždavinį buvo svarbus lašelio fazinių virsmų režimų apjungimas fazinių virsmų (1) ciklu ir sudėtinų pernašos procesų sąveikos įvertinimo jame metodikos išvystymas [9-14]. Sudėtiniam pernašos procesams vandens lašeliuose modeliuoti ir spinduliuotės poveikyje vykstančiai jų sąveikai pagal laidumo ir spinduliavimo [9] modelį prielaidas sudarė gilus vandens optinių - spektrinių charakteristikų pažinimas [15]. Konvekcinės pernašos lašelyje apibendrinimas efektyviojo šilumos laidumo teorija [16] sudarė prielaidas išplėtoti sudėtinio šilumos pernešimo lašelyje laidumu ir spinduliavimu apibrėžimo metodiką [9] šilumos balansui lašelyje sudaryti ir tuo atveju, kai skystis lašelyje cirkuliuoja. Tuomet konvekcinės pernašos dedamoji lašelyje apibrėžiama pagal modifikuotą Furje dėsnį [12]. Spoldingo šilumos pernašos parametro  $B_r$  teorija [17] ir jos pagrindu išvystytas Stefano hidridinaminį srauto įtaką garuojančio lašelio konvekcinio šildymo intensyvumui įvertinančių pataisos funkcijų mechanizmas [7] sudaro prielaidas inžineriniais metodais apibrėžti lašelio išorinio šildymo intensyvumą [7, 9, 16, 17] ir kt. Patraklus garo srauto lašelio paviršiuje aprašymas analitiniu modeliu [18], o Furje  $Fo = a_0 \cdot \tau / R_0^2$  laiko mastelio pritaikymas (1) ciklui ir jo transformacija į ciklą

$$Fo \equiv 0 \div Fo_{ko} \div Fo_{nf} \div Fo_f . \quad (2.1)$$

sudarė prielaidas lašelio pernašos parametro bemačių funkcijų universalumui lašelių dispersiškumo atžvilgiu pagrįsti [13], kai lašeliai šildomi laidumu.

Taigi, kokybiškai svarbiais žingsniais "lašo" uždavinio pažinimo kelyje ir praktikai svarbiais pasiekimais galima laikyti:

- Negaruojnačio kietos dalelės konvekcinio šildymo intensyvumo apibendrinimą kriterinėmis lygtimis;
- Stefano hidrodinaminio srauto poveikio lašelio garavimui ir konvekcinio šildymo intensyvumui apibrėžimą Spoldingo šilumos parametro teorija;
- Garo srauto tankio lašelio paviršiuje analitinį aprašymą Stefano srauto hidrodinaminį poveikį įvertinančiu algebriniu modeliu, įgalinantį atsižvelgti į savaimę frazinių virsmų režimų lašelių fazinių virsmų cikle (1) kaitą;
- Skysčio cirkuliacijos indėlio lašelio energinėje būsenoje įvertinimo efektyviojo šilumos laidumo teorija metodikos išvystymą;
- Nestacionariojo temperatūros lauko pusskaidriame lašelyje algebrinio - integralinio modelio išvystymą sudėtinės šilumokaitos laidumu ir spinduliavimu atveju;
- Fazinių virsmų (1) ciklo pervedimo į Furje laiko mastelį tikslingumo pagrindimą, užtikrinantį lašelio pernašos parametrų  $P(\tau)$  funkcijų grafikų nejautrumą laidumu šildomiems lašeliams, kai pritaikoma bematė šių funkcijų  $\bar{P}(Fo) = P(Fo)/P_0$  forma.

Remiantis pateikta lašo tyrimų patirtimi sudaroma lašelio energinės būsenos įvertinimo balansiniu būdu metodika.

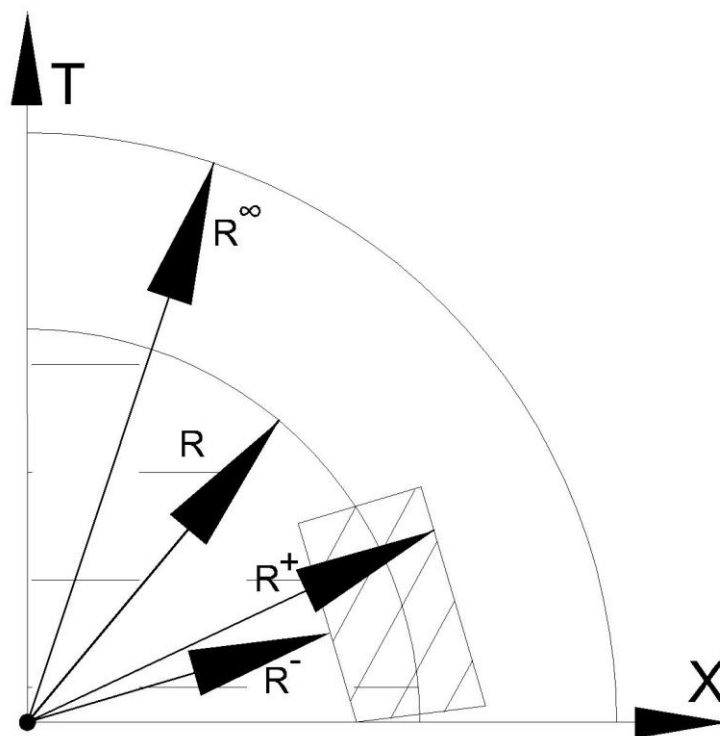
## 2.2 Lašelio šilumos srautų balansas ir jo matematinis aprašymas.

Į  $T_d$  temperatūros ir  $\bar{p}_g \equiv p_g / p_d$  dūmus  $T_0$  temperatūros vanduo išpurškiamas  $T_d > T_0$  sąlygomis (2.1 pav.), todėl tarp  $R_0$  apibrėžto dispersiškumo  $\Delta w_{l,0}$  greičiu dūmų sraute slystančių lašelių ir dūmų vyksta energinė sąveika, kurios intensyvumą bendruoju atveju apibrėžia suminės šilumos lašelio išoriniame paviršiuje, sąlyginai apibrėžiamame  $R^+$  spinduliu (2.2 pav.) tankis:

$$q_s^+(\tau) = q_c^+(\tau) + q_r^+(\tau). \quad (2.2)$$





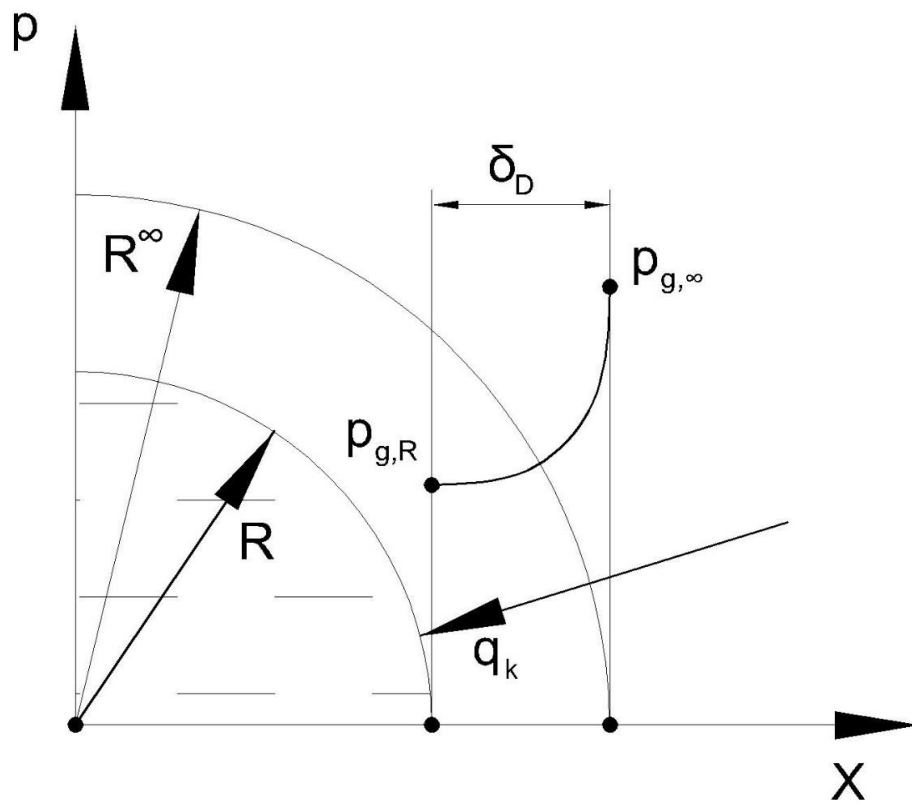


2.2 pav. Lašelio paviršiaus geometrinė interpretacija.

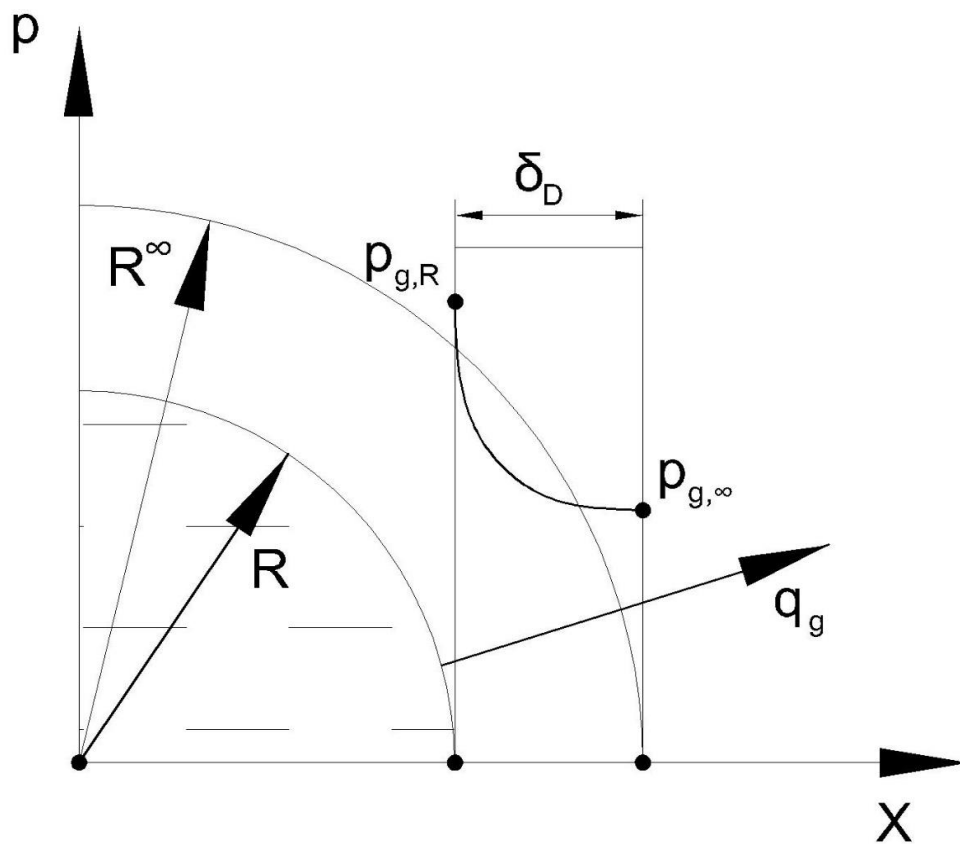
2.2 pav. schemoje numatyta, jog  $|R^+| \equiv |R^-| = R$ , o radialinė  $R^\infty$  koordinatė apibrėžia orientacinį lašelį supančio garo ir dūmų mišinio sluoksnį, kuriame garo ir dujų mišinio temperatūra išauga nuo lašelio paviršiaus  $T_R$  temperatūros iki dūmų  $T_d$  temperatūros, o garo slėgis mišinyje pakinta nuo lašelio paviršiaus temperatūra apibrėžiamo  $p_{g,R} = p_{\text{cot}}(T_R)$  slėgio iki dūmų drėgnumu apibrėžiamo garo dalinio  $p_{g,\infty}$  slėgio. Galima numanyti, jog kondensaciniame režime sluoksnyje  $\delta \equiv R^\infty - R$  vandens garo dalinis slėgis garo ir dūmų mišinyje nuo  $p_{g,\infty}$  išauga iki  $p_{g,R}$  slėgio (2.3 pav.), o garavimo režime nuo  $p_{g,R}$  slėgio sumažėja iki  $p_{g,\infty}$  slėgio (2.4 pav.).

Lašelio energinė būseną apibrėžia lašelio terminę būseną, kurios kitimą fazinių virsmų (1.1) cikle aprašo lašelio nestacionariojo temperatūros lauko radialinės lašelio koordinatės ir laiko  $T(r, \tau)$  funkcija. Šio funkcijos apibrėžimas yra pagrindinis "lašo vidinio" uždavinio tikslas, nes ji leidžia apibrėžti lašelio energinės būsenos įvertinimui labai svarbų lašelio temperatūros  $\text{grad}T_R$  gradientą:

$$\text{grad}T_R \equiv \left. \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right|_{r=R}. \quad (2.5)$$



2.3 pav. Vandens garo dalinio slėgio garo ir dūmų mišinyje kitimas difuziniame pasienio sluoksnyje kondensaciniame fazinių virsmų režime.



2.4 pav. Vandens garo dalinio slėgio garo ir dūmų mišinyje kitimas difuziniame pasienio sluoksnyje garavimo režime.

Lašelio  $2R(\tau)$  skersmuo fazinių virsmų (1.1) cikle kinta, todėl praktikoje nestacionariojo temperatūros lauko  $T(r, \tau)$  funkciją analizuoti labai nepatogu, o pateikti šios funkcijos grafinę interpretaciją labai sudėtinga tiek (1.1) tiek ir universalios laiko (1.2) fazinių virsmų cikluose. Todėl tradicinė radialinė  $r$  koordinatė "lašo" modelyje pakeičiama universalia bėmate  $\eta$  koordinate, kuri suformuojama bėgamąją lašelio  $r$  koordinatę sunormuojant su laike kintančio lašelio laikine funkcija:  $\eta = r/R(\tau)$ , kas tolygu  $\eta = r/R(Fo)$  atvejui. Tuomet pagal universalią  $\eta$  koordinatę apibrėžtas lašelio spindulys  $\eta_{r=R} = r_{r=R}/R(\tau) = 1$  įgauna pastovią vienetinę vertę, nekintančią tiek (2.1) tiek ir (2.2) fazinių virsmų ciklo formose. Tuomet šilumos srautų (2.2-2.4) išraiškose srautų aprašymas atitinka  $\eta = 1$  atvejį, o "+" ir "-" ženklų, kaip apibrėžiančių lašelio, pernašos  $P$  parametru priklausymą išorinei ir vidinei lašelio paviršiaus pusėms, išlieka.

Būtina pabrėžti, jog lašelio terminės būsenos apibrėžimui yra labai svarbi nestacionariojo temperatūros lauko  $T(\eta, \tau)$  funkcijos vertė ribinės  $\eta \equiv 1$  koordinatės atvejui, apibrėžianti lašelio paviršiaus temperatūros kitimo  $T(\eta, \tau)|_{\eta=1} \equiv T_r(\tau)$  funkciją. Lašelio paviršiaus temperatūros  $T_r(\tau)$  funkcija yra labai svarbi faziniams režimams (1.1) arba (2.1) formos cikluose apibrėžti. Kondensaciniam režimui vykti būtina sąlyga, kad lašelio paviršiaus temperatūra būtų žemesnė už rasos taško temperatūrą:  $T_r(\tau \equiv 0 \div \tau_{ko}) < T_{rt} = T_{sot}(p_{g,\infty})$ . Nestacionariojo garavimo režime lašelio paviršius pašyla nuo rasos taško iki pusiausviro garavimo sąlygas užtikrinančios  $T_{R,e}$  temperatūros. Pusiausviro garavimas prasideda nuo to momento, kai dūmų teikiama šiluma lašeliui tik garina vandenį, o vanduo lašelyje jau nešildomas.

Lašelio paviršiaus temperatūros kitimą apibrėžia lašelio paviršiuje vykstanti energijos srautų sąveika. Jos dėka kiekvienu laiko momentu lašelio paviršiaus temperatūra užtikrina, jog prie lašelio paviršiaus pritekantys ir nuo paviršiaus nutekantys šilumos srautai privalo atitikti. Reikia atsižvelgti į šilumos pritekėjimą ir nutekėjimą tiek dūmų tiek ir vandens lašelyje atžvilgiu. Apibrėžiant lašelio paviršiaus temperatūrą reikia atsižvelgti ne tik į srautų dydį, bet ir jų vektorių kryptį. Todėl bendroji šilumos srautų sąlyga aprašanti lygtis pateikiama vektorinėje formoje:

$$\vec{q}_{\Sigma}^+(\tau) + \vec{q}_{\Sigma}^-(\tau) + \vec{q}_f^+(\tau) = 0. \quad (2.6)$$

Galima matyti, jog (2.6) formos šilumos srautų balanso išraiška sudaryti skaitinei schemai  $T_r(\tau)$  funkcijai apibrėžti netinka. Tam būtina konkretnės formos išraiška, kurioje atsispindėtų į (2.6) išraišką įeinantys šilumos srautų tankių matematiniai. Jiems sudaryti daromos prielaidos:

- vandens išpurškimui galioja  $T_0/T_w < 1$ , todėl kondensacinis fazinių virsmų režimas yra galimas ir pilnai fazinių virsmų ciklai (1.1) ir (2.1) formose galioja;
- į dūmus išpurškiant vandenį susiformuoja sferinės formos didesni nei mikrono eilės lašeliai, todėl juos supančiame molekulos laisvojo kelio eilės storio Knudseno sluoksnyje skysčio garo ir slėgio šuoliai yra nereikšmingi  $\Delta T_{kn} \cong 0$ ;  $\Delta p_{kn} \approx 0$  todėl jų įtaka pernašos procesų intensyvumui paneigiama;
- lašeliai šildomi simetriškai, todėl  $\partial T(r \equiv 0, \tau) / \partial r \equiv 0$ ;
- dūmų spinduliuotės poveikis lašeliui yra nereikšmingas, todėl apsuptis šilumokaita šilumą lašeliui teikia vyraujant konvekciniam šildymui konvekcija, kurios intensyvumą nusako lašelio slydimo greičiu apibrėžtas pradinis Reinoldso  $Re_0 = 2\rho_d \Delta w_{l,0} R_0 / \mu_{gd,0}$  kriterijus, kartu apibrėžiantis pradinį lašelio konvekcinio šildymo  $Nu_f$  intensyvumą.
- Kai pradinis lašelio slydimo greitis dūmų atžvilgiu yra nulinis, tuomet  $Re_0 = 0$  ir lašeliai šildomi laidumu, kai negaruojančio lašelio atveju  $Nu = 2$ ;
- dūmuose slystantiems lašeliams Archimedo jėgų įtaka šilumos plitimui lašelyje yra neįtampa, todėl šilumos plitimą lašelyje apibrėžia slystančio lašelio paviršiuje veikiančių trinties jėgų iššaukta vandens priverstinė cirkuliacija.
- į dūmus įpurškiamas nežymus vandens kiekis, todėl lašelių šilimas ir jų paviršiuje vykstantys faziniai virsmai dūmų parametrų nepakeičia, o šilumos nuostoliai kondensatoriuje yra nežymūs, todėl dūmų temperatūra ir drėgnumas nepakinta.

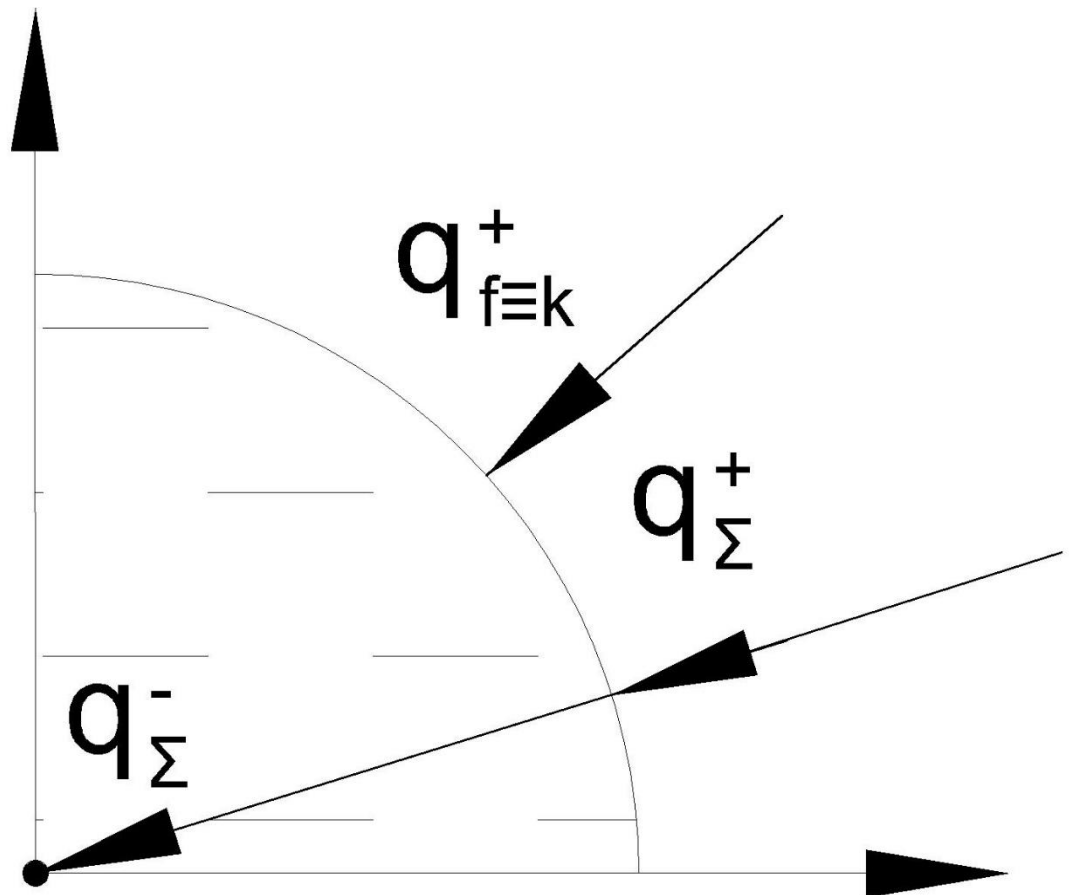
Numatytomis prielaidomis "lašo" uždavinyje orientuojamasi į slydimo poveikio lašelio fazinių virsmų ciklui pirminį įvertinimą eliminuojant tam galimą dūmų parametrų kitimo įtaką. Tokio tyrimo apibendrinti rezultatai gali būti laikomi atraminiais ir sudaro prielaidas sistemingam sudėtinių pernašos procesų dėsningumą ištyrimui tolimesniuose tyrimuose apibrėžiant nuosekliai sudėtingumo prasme griežtinamas kraštines sąlygas. Tik toks "lašo"

uždavinio nuoseklaus sprendimo kelias sudaro galimybę įvertinti atskirų faktorių vaidmenį sudėtinių pernašos procesų dūmų sraute išpurkšto vandens lašelių sistemose.

Įvertinus numatytas prielaidas ir nutarus prie lašelio paviršiaus pritekančius srautus laikyti teigiamo ženklo parametrais, (2.6) išraiška pateikiam lygtimi:

$$q_c^+(\tau) + q_c^-(\tau) - q_f^+(\tau) = 0. \quad (2.7)$$

Kondensaciniame fazinių virsmų režime išraiška (2.7) atspindi 2.5 pav. pateiktą šilumos srautų ryšio schemą, kai  $q_r^- \equiv q_r^+ \approx 0$ .



2.5 pav. Šilumos srautų lašelio paviršiuje sietis kondensaciniame fazinių virsmų režime

Aiškiai matosi (2.5 pav.), jog kondensaciniame fazinių virsmų režime vandenį lašelyje šildo visa jam išorine konvekcija suteikta šiluma kartu su kondensacijos procese išsiskiriančia fazinių virsmų šiluma. Išsiskiriančios šilumos srauto tankiui aprašyti pritaikomas garo srauto tankio analitinis modelis [17]:

$$q_{f=ko}^+ = L \cdot m_g^+ = L \cdot \frac{D_{gd} \mu_g}{8314 T_R R} p \ln \frac{p - p_{g,\infty}}{p - p_{g,R}}. \quad (2.8)$$

(2.8) išraiškoje:  $D_{gd}$  yra vandens garo difuzijos dūmuose koeficientas,  $\mu_g$  yra vandens garo molekulinė masė, aplinkos slėgis priimtas  $p = 0.1 \text{ MPa}$ , o vandens garo prie lašelio paviršiaus dalinis slėgis prilygintas pagal lašelio paviršiaus  $T_R$  temperatūrą apibrėžtam vandens sočiojo garo slėgiui. Apibrėžti fazinių virsmų šilumos srauto tankį pagal (2.8) yra labai patogu, kadangi joje garo srauto tankio  $m_g^+(\tau)$  funkcija, kuriai kondensaciniame režime  $p_{g,R}(\tau < \tau_{ko}) < p_{g,\infty}$  sąlyga užtikrina neigiamo ženklo vertę, o lašelio paviršiui pašilus iki rasos taško temperatūros įgauna nulinę vertę dėl  $p_{g,R} = p_{g,\infty}$  būtinos sąlygos, todėl toliau augant lašelio temperatūrai jau įgauna teigiamo ženklo vertę dėl  $p_{g,R}(\tau > \tau_{ko}) > p_{g,\infty}$ . Taigi (2.8) lašelio fazinių virsmų modelis užtikrina savaiminę fazinių virsmų režimo kaitą iš kondensacinio į nestacionariojo garavimo, kuriame šilumos srautų sietį galima atspindėti 2.5 pav., jame pakeitus fazinių virsmų šilumos srauto vektoriaus kryptį. Kintant fazinių virsmų režimams  $T_d > T_R$  sąlyga tenkinama, todėl konvekcinės šilumos srautą galima vienareikšmiškai apibrėžti pagal šilumos atidavimo Niutono dėsnio pagrindu sudaromą konvekcinio šilumos srauto tankio išraišką:

$$q_c^+ = \lambda_{gd} \frac{Nu}{2R} (T_d - T_R) \cdot f_{B_r}. \quad (2.9)$$

(2.9) Nuselto kriterijus negaruojančiam lašeliui ( $Nu$ ) aprašomas empirine išraiška [16]:

$$Nu = 2 + 0.552 \text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3}. \quad (2.10)$$

Lašelio konvekcinio šildymo intensyvumą įtakoja fazinius virsmus lydintis Stefano hidrodinaminio srautas: kondensaciniame režime stiprina, o garavimo režime slopina. Į tai atsižvelgiama Spoldingo šilumos  $B_r$  parametro  $f_{B_r}$  funkcija pagal [12] aptartą metodiką.

Į lašelį nuvedamos šilumos intensyvumą galima apibrėžti išorinės konvekcinės šilumos srauto ir fazinių virsmų šilumos srauto skirtumu:

$$q_c^-(\tau) = q_c^+(\tau) - q_f^+(\tau). \quad (2.11)$$

Prisiminus, jog kondensaciniame režime pagal (2.8) išraišką apskaičiuotas fazinių virsmų šilumos srautas bus neigiamo ženklo dydis, todėl (2.11) išraiška užtikrins, kad apskaičiuotasis į lašelį nuvedamos šilumos srautas atitiktų konvekcinės išorinės šilumos ir fazinių virsmų šilumos srautų sumai. Nestacionariojo garavimo režime (2.10) išraiška atspindės konvekcinės šilumos dalį, kuri šildo skystį, o kita jos dalis jau vandenį garins. Aišku (2.11) išraiška nors ir puikiai apibrėžia šilumos srautų ryšį, tačiau jos taisyti (2.7) išraiškai konkretizuoti negalima. Tam būtina į lašelį nuvedamą šilumos srautą aprašyti pagal "lašo vidinio" uždavinio sprendinius. Tenka atsižvelgti į temperatūros lauko lašelyje gradiento kitimą fazinių virsmų cikle ir konvekcinės šilumos lašelyje srautas apibrėžiamas pagal modifikuotą šilumos plitimo laidumu Furje dėsnį:

$$q_c^- = -\lambda_{ef} \left. \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right|_{r=R}. \quad (2.12)$$

(2.12) išraiškoje efektyviuoju šilumos laidumo koeficientu  $\lambda_{ef} = k_c^- \cdot \lambda_l$  atsižvelgiama į šilumos pernešimo lašelyje suaktyvėjimą dėl vandens cirkuliacijos, o efektyviojo šilumos laidumo parametras apibrėžiamas pagal [16] metodiką Peklė ir Prandtlio kriterijų skysčiui funkcija:

$$k_c^- = 1.86 + 0.86 \tanh[2.245 \log_{10}(Pe_{l/30})], \quad (2.13)$$

užtikrinančia šilumos plitimo dėl skysčio cirkuliacijos suintensyvėjimo lašelyje apibrėžimą  $\pm 2\%$  pasikliautimumu [16]. Gradientas (2.11) išraiškoje aprašomas pagal šilumos plitimo laidumu ir spinduliavimu modelį [9], kai  $q_r = 0$ :

$$\left. \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right|_{r=R} = \frac{2}{R^2} \pi \sum_{n=1}^{\infty} n \int_0^{\tau} \frac{R}{n\pi} \frac{dT_R}{d\tau'} \exp\left[-a\left(\frac{n\pi}{R}\right)(\tau - \tau')\right] d\tau'. \quad (2.14)$$

Pagal išraiškas (2.8), (2.9), (2.12) ir (2.14) pertvarkyta (2.7) lygtis tampa vienareikšmiškai lašelio paviršiaus temperatūros  $T_r(\tau)$  funkcijos atžvilgiu apibrėžtu funkcionalu:

$$\lambda_{gd} \frac{Nu}{2R} (T_d - T_R) \cdot f_{Br} - L \cdot \frac{D_{gd} \mu_g}{8314 T_R R} p \ln \frac{p - p_{g,\infty}}{p - p_{g,R}} + \lambda_{ef} \left. \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right|_{r=R} = 0. \quad (2.15)$$



Tarus, jog lašelio paviršiaus temperatūros  $T_R(\tau)$  jau yra apibrėžta, lašelio fazinių virsmų dinamiką iteraciniame cikle galima aprašyti išraiška:

$$\frac{1}{3} \frac{d(\rho_l R^3)}{d\tau} = -R \frac{D_{gd} \mu_g}{8314 T_R} p \ln \frac{p - P_{g,\infty}}{p - P_{g,R}}. \quad (2.16)$$

(2.14) ir (2.16) lygčių sistemą tenka spręsti skaitiniu metodu.

### 2.3 Sprendimo algoritmas ir iteracinės skaitinės schemos tinklelio savitumai.

Sudarant (2.14) ir (2.16) lygčių sistemos skaitinio sprendimo algoritmą tenka atsižvelgti į tai, kad griežtu vertinimu kiekviena iš šių lygčių turi vienareikšmišką sprendinį tik tuomet, kai jau žinomas kitos lygties sprendinys. Todėl iteracinio tipo algoritmas yra neišvengiamas. Pagrindiniu parametru, kurio vertė apibrėžiama konkrečiu laiko  $\tau_i$  momentu vykdomame iteraciniame  $it \equiv 1 \div IT$  cikle, numatoma tą momentą atitinkančios lašelio paviršiaus  $T_{R,i}$  temperatūra.

Modeliuojamame cikle apibrėžiamas laisvai parenkamam sveikam  $I$  skaičiumi apibrėžiamas kontrolinis laiko intervalas  $0 \div \tau_I$ . Apibrėžiamas pastovaus dydžio laiko žingsnis laiko tinkleliui sudaryti:

$$\Delta \tau_i = \frac{\tau_I}{I-1}, \text{ kad } \sum_{i=2}^I (\tau_i - \tau_{i-1}) \equiv \tau_I. \quad (2.17)$$

Kiekvienam laiko  $\tau_i$  momentui vykdomame iteraciniame  $it \equiv 1 \div IT$  cikle apibrėžiama šylančio lašelio paviršiaus temperatūra

$$T_{R,i} \equiv T_{R,i,it=IT}, \quad (2.18)$$

pagal kurią apskaičiuoti  $IT$  iteracijoje šilumos srautai lašelio paviršiuje užtikriną energijos balansui lašelio paviršiuje keliamą aukšto tikslumo sąlygą

$$\left( 1 - \frac{q_{\Sigma,i,IT}^+}{q_{c,i,IT}^- - q_{f,i,IT}^+} \right) \cdot 100\% < 0.02\%. \quad (2.19)$$

Kad apskaičiuoti nestacionariojo temperatūros lauko gradientą pagal (2.14) išraišką, lašelio vienetinis bematis spindulys suskaidomas į  $J-1$  sveiką skaičių dalių taip, kad tenkinti reikalavimą:

$$\sum_{j=2}^J (\eta_j - \eta_{i-1}) \equiv 1_i. \quad (2.20)$$

Kiekvienai tarpinei iteracijai iteraciniame  $it \equiv 1 \div IT$  cikle reikalingi, bet dar nežinomi lašelio šilumos ir masės mainų pernašos procesų parametrai apibrėžiami pagal sąlygą:

$$P_{i,it} \equiv P_{i,it-1}. \quad (2.21)$$

Lašelio pernašos parametrai patikslinami po kiekvienos iteracijos.

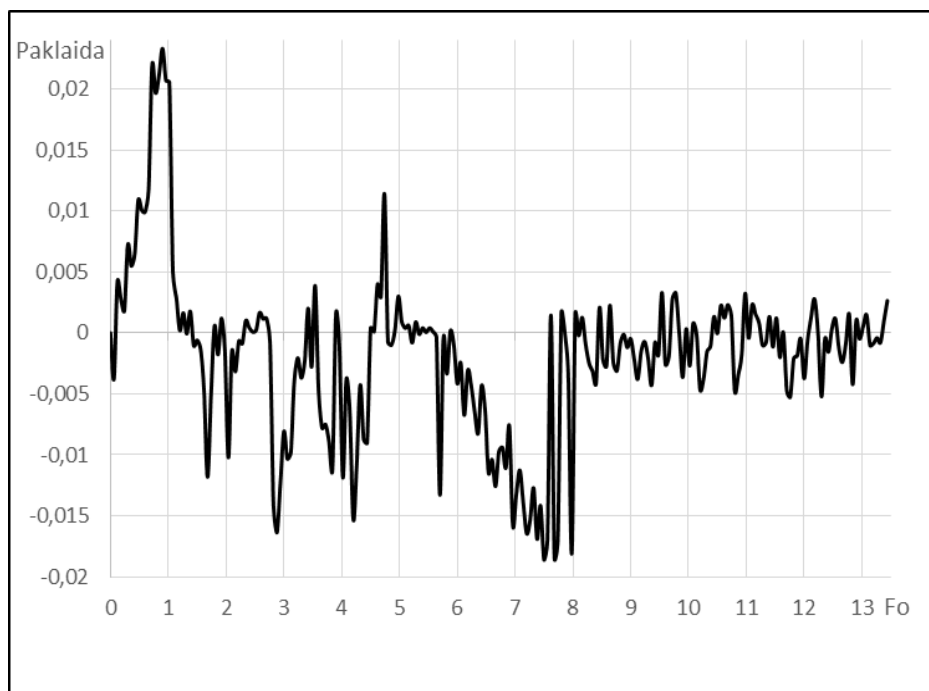
### 3 Vandens lašelių fazinių virsmų ciklo modeliavimas ir rezultatai.

Skaitiniam modeliavimui pasirinkto biokuro deginimo technologijoms būdinga biokuro katilo dūmų  $T_d = 400$  K temperatūra ir numatytas vidutinio lygio  $\bar{p}_{g,\infty} \equiv 0.3$  drėgnumas. Kondensacinio fazinių virsmų ciklo tikėtina ilgiausios trukmės fazinių virsmų režimui apibrėžti numatytas šalto  $T_0 = 278$  K temperatūros vandens į dūmus įpurškimo atvejis. Numatytas laisvai parenkamas išpurškiamo vandens lašelių dispersiškumas, apibrėžiamas pradiniu lašelių  $2R_0$  skersmeniu. Lašelių slydimas dūmuose apibrėžiama laisvai parenkamomis modifikuotos formos Reinoldso  $Re_0 \equiv 2R \cdot |w_l - w_d| \cdot \rho_d / \mu_{gd}$  kriterijaus vertėmis, apatinę ribą apibrėžus lašelio šildymo laidumu  $Re = 0$  sąlyga ir intensyviausią slydimą apribojus  $Re_0 = 100$  sąlyga. Lašelio fazinių virsmų cikle numatyta įvertinti  $I = 201$  laiko momentų užtikrinat galimybę įvykdyti 200 iteracinių ciklų lašelio paviršiaus  $T_{r,i}$  temperatūroms apibrėžti ir lygiagrečiai kitiems pernašos parametrams  $P_i$  apskaičiuoti. Lašelio  $T_{i,j}$  temperatūra laiko  $\tau_i$  momentais lokaliniuose  $\eta_j$  pjūviuose apskaičiuota lašelio vienetinį spindulį tolygiai sudalinus į  $J - 1$  dalį, kai  $J = 41$  ir (2.14) išraiškoje esančioje begalinėje integralinių lygčių sumoje įvertinus  $N = 101$  narį. Laiko ir radialinės koordinatų tinklelio gradavimui pasitelkta darbe [3] pateiktomis rekomendacijomis ir pasinaudota šiame darbe taikyta metodika laiko žingsniui apibrėžti. Jos esmė ta, jog pradžioje modeliuojamas kondensacinis fazinių virsmų režimas ir

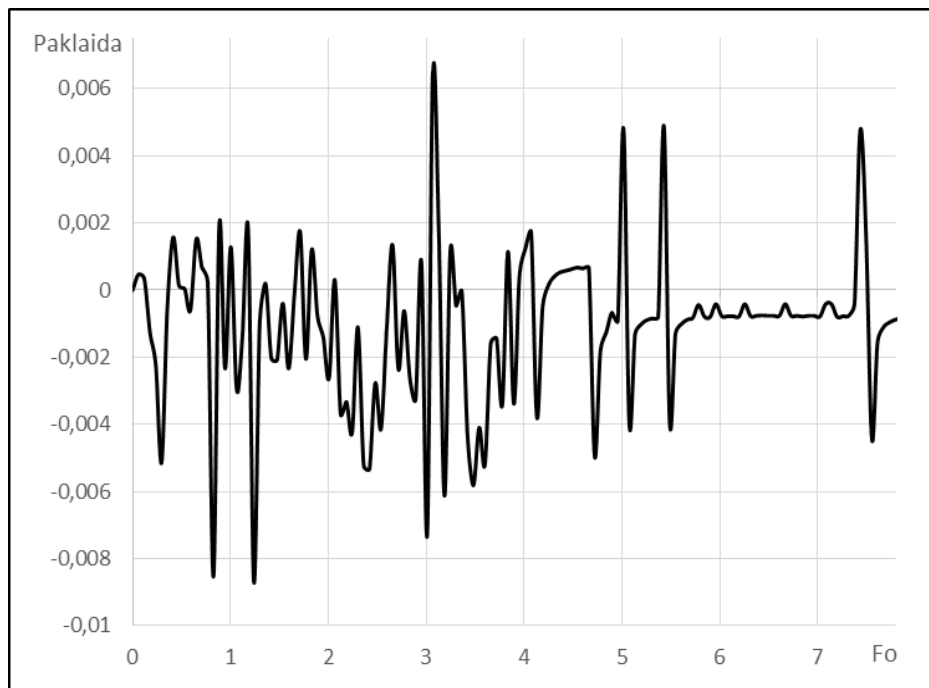
apibrėžiama jo trukmė Furje laiko mastelyje. Keliamas reikalavimas, kad kondensacinis režimas pasibaigtų numatytam laiko žingsnių  $I_{ko}$  skaičiui ir užtikrintų kuo artimesnę rasos taško temperatūrai lašelio paviršiaus  $T_{R,i=I_{ko}}$ , tačiau pageidautina šiame cikle rasos taško temperatūrą neviršyti, kad išvengti su garo srauto nuline verte susijusių galimų iteracinės schemas nestabilumo efektų. Apibrėžus kondensacinio trukmę nusakantį  $Fo_{ko}$  kriterijų, pagal jį užtikrinantį  $\Delta Fo = Fo_{ko} / (I_{ko} - 1)$  buvo apibrėžiamas laiko žingsnis  $\Delta \tau = \Delta Fo \cdot R_0^2 / a_0$ , kai  $I_{ko} = 21$ .

### 3.1 Skaitinės schemas patikimumas ir kontrolė

Kiekvieno skaitinio eksperimentu metu buvo kontroliuotas (2.19) reikalavimo tenkinamas kiekviename iteraciniame cikle lašelio paviršiaus temperatūrai apibrėžti. Skaitinės schemas kontrolės rezultatai buvo apibendrinami grafiškai išvedami individuali kontrolė. Pateikiamais ribinių Reinoldso kriterijų  $Re_0 = 0$  (3.1 pav.) ir  $Re_0 = 50$  (3.2 pav.) atvejų paklaidų procentine išraiška pavyzdžiai pagrindžiama, jog taikyta vandens lašelių fazinių virsmų ciklo modeliavimo metodika užtikrina labai aukštą lašelio pernašos  $P_i$  parametrų apskaičiavimo patikimumą.



3.1 pav. Apskaičiuotų šilumos srautų lašelio paviršiuje disbalanso, išreiškiamo santykine paklaida procentais, fazinių virsmų cikle kitimas Furje kriterijaus mastelyje, kai  $Re=0$ .



3.2 pav. Apskaičiuotų šilumos srautų lašelio paviršiuje disbalanso, išreiškiamo santykine paklaida procentais, fazinių virsmų cikle kitimas Furje kriterijaus mastelyje, kai  $Re_0 = 50$ .

Kontrolės pavyzdžiai pateikti 3.1-3.2 paveiksluose pagrindžia, jog numatytas 0.1 % reikalavimas srautų atitikimo paklaidai buvo užtikrintas su atsarga. Paklaidos inžineriniuose skaičiavimuose yra labai svarbus veiksnys į kurį būtina atsižvelgti siekiant maksimalaus tikslumo, metodo tyrimo ir jo rezultatų pripažinimo tinkamais. Tinkamas paklaidų įvertinimas yra labai svarbus rezultatų patikimumui. Kaip manome iš paveikslų 3.1 ir 3.2 maksimali galima paklaida buvo ne didesnė nei 0.1 procento, todėl galime laikyti taikytą lašo fazinių virsmų ciklo modeliavimo metodiką patikima.

### **3.2 Slystančio lašelio šilumos ir masės mainų skaitinio tyrimo optimizavimas.**

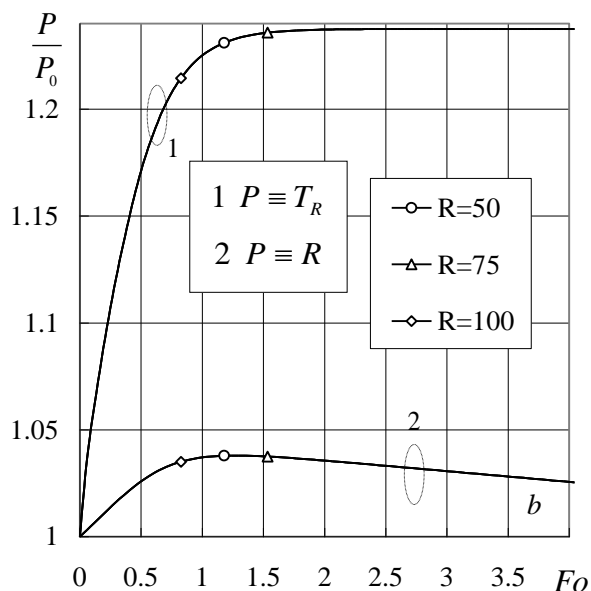
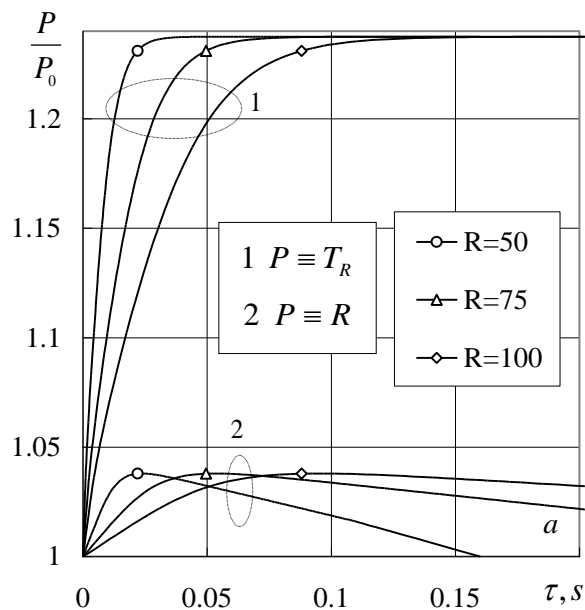
Numatyti galimybę optimizuoti vandens lašelių fazinių virsmų ciklo skaitinio modeliavimo galimybę būtų labai racionalu, kadangi vandens optimalioms išpurškimo sąlygoms apibrėžti iškyla poreikis lašelių fazinių virsmų ciklą ištirti gana plačiose biokuro technologijoms būdingose kraštinėse sąlygose. Jų įvairovę apibrėžia išpurškiamo vandens ir drėgnų dujų srauto parametrų galima kombinacijų gausa. Svarbūs dujų temperatūros ir drėgnumo bei įpurškiamo vandens temperatūros ir lašelių dispersiškumo parametrai. Ypač daug skaitinių eksperimentų ir didelio mašininio laiko reikalautų galimo plataus vandens išpurškimo dispersiškumo įvertinimas. Laidumu šildomiems lašeliams yra žinoma

galimybė stipriai, iki vieno skersmens lašelio fazinių virsmų ciklo ištyrimo, sumažinti modeliavimo atvejus [3]. Tam būtina skaitinį eksperimentą praveisti Furje kriterijumi apibrėžtame (2.1) cikle, kadangi lašelių parametrų funkcijos normuotoje  $\bar{P}(Fo) = P(Fo)/P_0$  formoje sudarytų  $\bar{P}(Fo)$  funkcijų grafikai laidumu šildomiems lašeliams yra nejautrūs lašelių dispersiškumui [12].

Galima pastebėti, jog šildymas laidumu yra ribinis slystančio lašelio šildymo atvejis, kai lašelio slydimo greitis yra nulinis ir tuomet  $Re_0 = 0$ . Išpurškiamo vandens lašelius galima apjungti į ansamblius pagal jų skirtingą dispersiškumą ir pradinį greitį, kurie užtikrina vienodą  $Re_0$  kriterijaus vertę. Kadangi, kaip jau yra pagrįsta [3], visiems lašeliams  $Re_0 \cong 0$  ansamblyje fazinių virsmų ciklas Furje kriterijaus laiko mastelyje yra vienodas, todėl galima manyti, jog ir kituose  $Re_0 > 0$  kriterijumi apibrėžtuose lašelių ansambliuose turėtų galioti funkcijų  $\bar{P}(Fo) = P(Fo)/P_0$  universalumas visiems to ansamblio su vienodu Reinoldso pradiniu kriterijumi susijusiems lašeliams. Tai patvirtinus pakaktų skaitinį modeliavimą apriboti laisvai parinkto skersmens lašeliui apibrėžtam  $Re_0$  atvejui. Pravestu skaitiniu eksperimentu pradžioje patvirtinti  $Fo$  mastelio privalumai laidumu šildomiems lašeliams, tarus, jog  $Re_0 = 0$ .

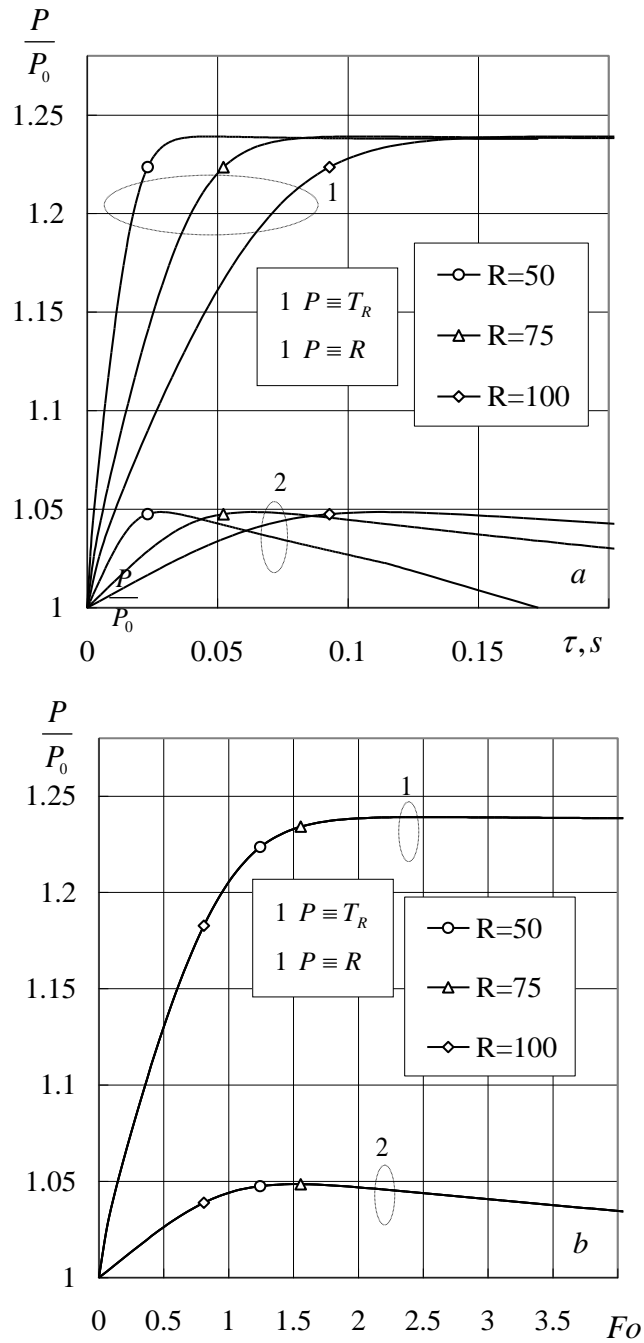
Furje  $Fo$  laiko mastelio universalumas išpurkšto vandens lašelių garavimo atveju pagrįstas, kai jie šildomi laidumu ( $Re_0 \cong 0$ ). Nors lašelių apskaičiuotosios temperatūros ir fazinių virsmų parametrai yra jautrūs lašelių dispersiškumui realaus laiko cikle (3.3 pav. a), tačiau Furje laiko mastelyje pasireiškia lašelių terminių parametrų netgi dimensinių  $P_T(Fo)$  funkcijų nejautrumas lašelių dispersiškumui (3.3 pav. b), o faziniams parametrams tai galioja jų bematės formos  $\bar{P}_f(Fo)$  funkcijų grafikams (3.3 pav. b).

Šie apibendrinimai ir kitiems laidumu šildomų lašelių parametrams (pvz. energiniams ir dinaminiais parametrams) tik reikia sudaryti kaip ir faziniams parametrams bematės formas  $\bar{P}_q(Fo)$  ir  $\bar{P}_d(Fo)$  funkcijas.



3.3 pav. Laidumo šildomų lašelių terminių ir fazinių virsmų parametrų funkcijų  $P_T$  grafikai laiko (a) ir Furje kriterijaus masteliuose, kai  $Re_0 = 0$ .

Labai svarbu, kad modeliuojant Reinoldso  $Re_0 = 20$  apjungtų skirtingo skersmens  $2R_0 \cdot 10^6: 100; 150$  ir  $200$  m skersmenų lašelių grupėje pavykom patvirtinti slystančių lašelių pernašos parametrų  $\bar{P}(Fo)$  funkcijų universalumą (3.4 pav. b), nors šių funkcijų grafikų jautrumas lašelių dispersiškumui realaus laiko fazinių virsmų cikle yra labai ryškus (3.4 pav. b).



3.4 pav. Konvekcija šildomų lašelių terminių ir fazinių virsmų parametų funkcijų  $P_T$  grafikai laiko (a) ir Furje kriterijaus masteliuose (b), kai  $Re_0 = 20$ .

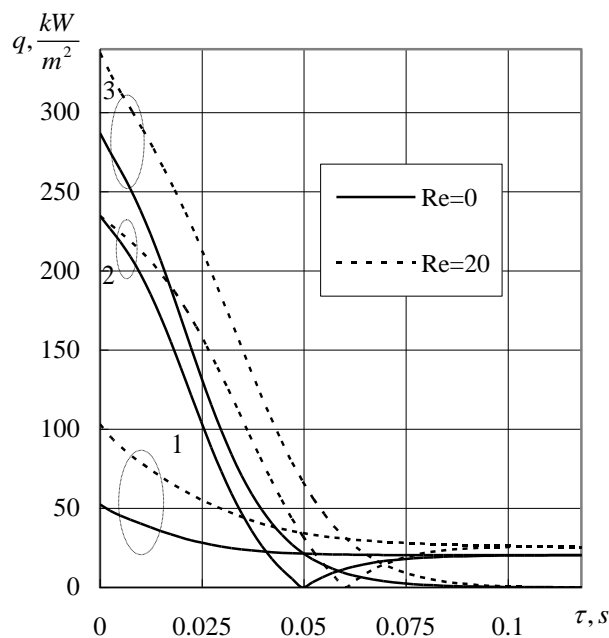
Patvirtinta, jog lašelių pernašos parametų bematės formos  $\bar{P}(Fo)$  funkcijų grafikų universalumas lašelių dispersiškumo atžvilgiu pagal vienodą pradinį Reinoldso  $Re_0$  kriterijų apjungtam slystančių lašelių ansambliui galioja.

Taigi, atskiroje Reinoldso kriterijaus vienoda verte apjungtoje lašelių grupėje skaitinį eksperimentą galima sumažinti iki vieno laisvai parinkto skersmens lašelio fazinių virsmų ciklo sumodeliavimo.

Todėl tolimesnis skaitinis eksperimentas optimizuotas ir vykdytas apibrėžto skersmens lašeliui Furje kriterijumi išreikštame fazinių virsmų (2.1) cikle. Apibendrinti (2.1) ciklo rezultatai įgalina pateikti konkrečius vertinimus ir skirtingo dispersiškumo lašeliams (1.1) fazinių virsmų cikle realaus laiko mastelyje.

### 3.3 Vandens lašelių kondensacinio ir nestacionariojo garavimo režimų modeliavimo rezultatai ir jų įvertinimas fazinių virsmų utilizavimo iš drėgnų dūmų technologijų tobulinimo kontekste.

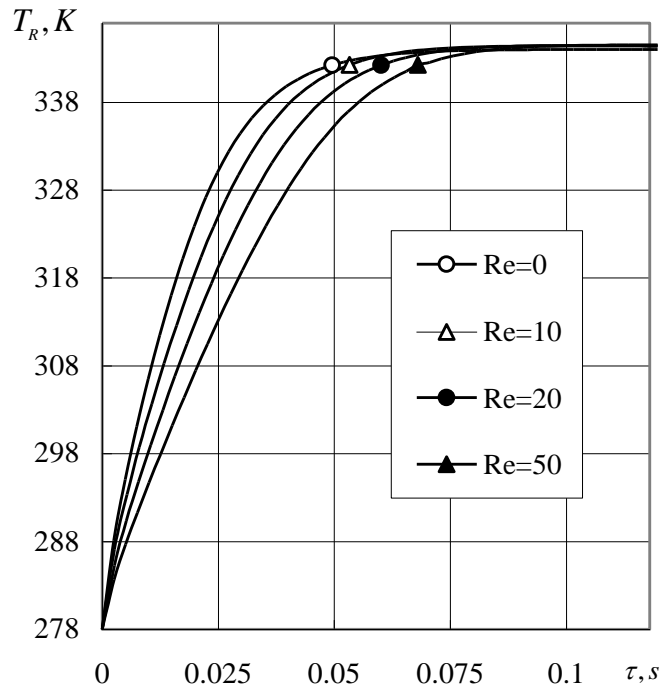
Kondensaciniame fazinių virsmų režime lašelis šildomas išorine konvekcija ir susikondensuojančio garo fazinių virsmų šiluma (3.5 pav.), todėl lašelio paviršius gana sparčiai pašyla iki rasos taško  $T_r$  temperatūros (3.6 pav.), kurią nurodo taškai ant 3.5 ir 3.6 paveikslų kreivių.



3.5 pav. Lašelio slydimo dūmuose įtaka šilumos srautams lašelio paviršiuje nestacionariųjų fazinių virsmų režime.  $R_0 = 75 \cdot 10^{-6}$  m.  $q$  prasmė: (1)  $q_c^+$ , (2)  $q_f^+$ , (3)  $q_c^-$ .

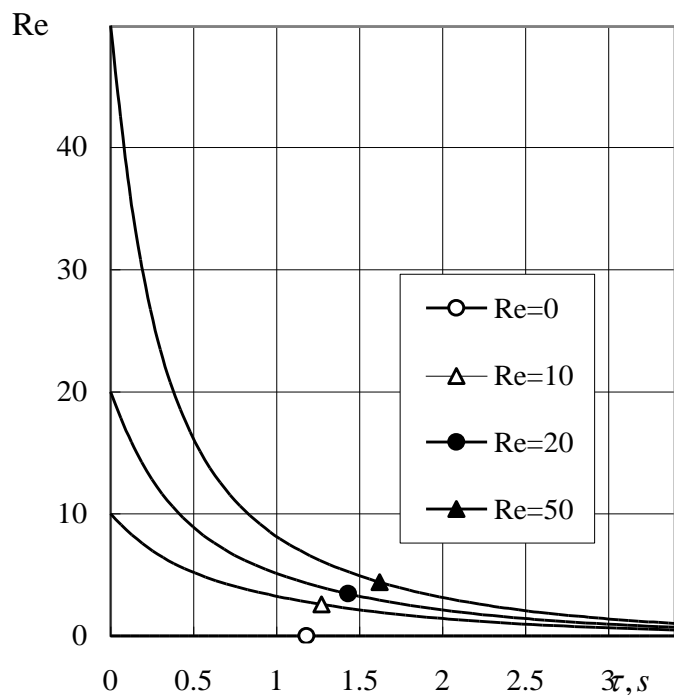
Fazinių virsmų srautas kondensaciniame režime sumažėja iki nulio, o vandens lašelyje šildymo intensyvumas kondensacinio režimo pabaigoje tampa lygiu konvekcinio šildymo intensyvumui. Konvekcinio šildymo šilumos srautas nežymiai, tačiau nuosekliai mažėja (3.5 pav.). Tam įtakos turi šilumokaitos varančiosios jėgos, apibrėžiamos dūmų temperatūros ir augančios lašelio paviršiaus temperatūros (3.6 pav.)  $T_d - T_R$  skirtumu, mažėjimas. Tam tikrą poveikį turi ir kondensacijos proceso bei vandens plėtimosi proceso metu augantis lašelio matmuo.



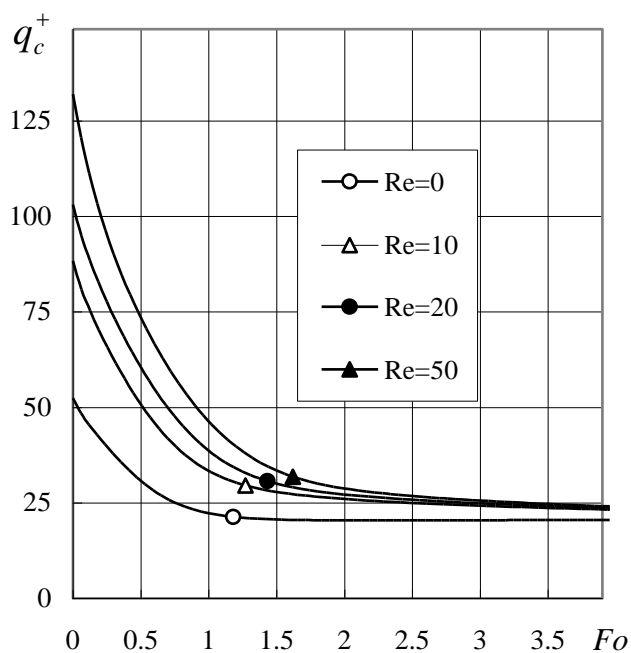


3.6 pav. Lašelio slydimo dūmuose įtaka lašelio paviršiaus temperatūros kitimui nestacionariųjų fazinių virsmų režime.  $R_0 = 75 \cdot 10^{-6}$  m.

Slystančio lašelio paviršiuje kyla trinties jėgos. Jų poveikyje lašelio slydimo intensyvumas dūmuose slopsta ir tai akivaizdžiai atspindi Reinoldso kriterijaus dinamika nestacionariųjų fazinių virsmų režime (3.7 pav.). Būtina pastebėti, jog intensyviausias slystančio lašelio slydimo slopimas tenka kondensaciniam fazinių virsmų režimui. Tai iššaukia lašelio konvekcinio šildymo sumažėjimą (3.8 pav.), kurį lemia Reinoldso sumažėjimas, šilumokaitos varančiosios jėgos sumažėjimas lašeliui šylant ir tam tikrą poveikį turi lašelio matmens augimas kondensaciniame fazinių virsmų režime lašeliui augant dėl jo paviršiuje susikondensuojančio iš dūmų vandens garo ir dar dėl šylančio vandens plėtimosi (3.9 pav.).



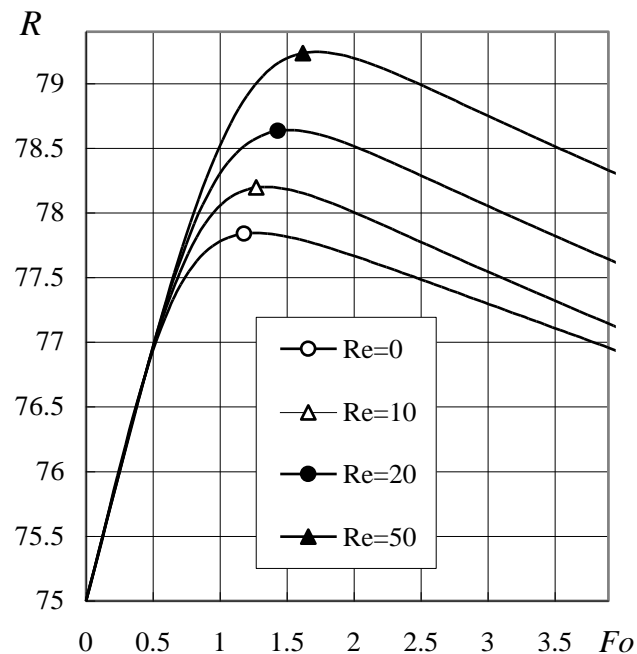
3.7 pav. Lašelio slydimo intensyvumo dūmuose kitimas nestacionariųjų fazinių virsmų režime.  $R_0 = 75 \cdot 10^{-6}$  m.



3.8 pav. Slystančio lašelio konvekcinio šildymo intensyvumo kitimas nestacionariųjų fazinių virsmų režime.  $R_0 = 75 \cdot 10^{-6}$  m.  $q_c^+$ , kW/m<sup>2</sup>.

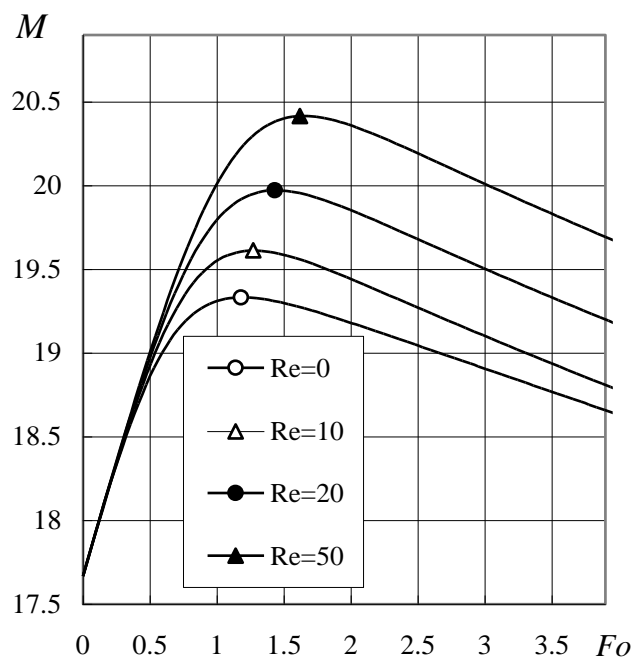
Pradinis slydimas juntamai įtakoja pradinį konvekcines šilumos srauto tankio  $q_{c,0}^+$ , kW/m<sup>2</sup> vertę. Ji yra 53.39; 88.38; 103.03 ir 131.97, kai pradinis  $Re_0$  yra 0; 10; 20 ir 50

atitinkamai. Kondensaciniame režime konvekcinio šildymo intensyvumas sumažėjimas yra esminis ir fazinių virsmų režimo kaitos momentu  $q_c^+(Fo \equiv Fo_{co})$ , kW/m<sup>2</sup> 21.33; 29.56; 30.71 ir 31.84, kai pradinis  $Re_0$  yra 0; 10; 20 ir 50 atitinkamai. Šias vertes apibrėžia taškais išskirti kondensacinio režimo kaitos į nestacionarųjį garavimą momentai 3.8 pav.

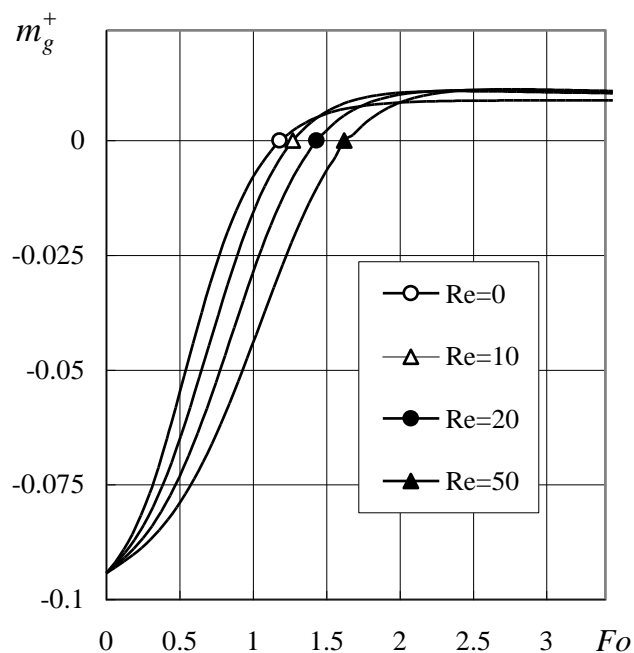


3.9 pav. Slystančio lašelio augimo kondensaciniame režime ir mažėjimo nestacionariojo garavimo režimuose dinamika.  $R_0 = 75 \cdot 10^{-6}$  m.  $R$  - mikrometrais.

Lašelis kondensaciniame režime sparčiai auga dėl jo paviršiuje iš dūmų kondensuojamo vandens garo. Aiškiai matosi (3.9 pav.), jog lašelio pradinis slydimo intensyvumas sudaro prielaidas lašeliui žymiai daugiau išaugti kondensaciniame fazinių virsmų režime: lašelio spindulys nuo pradinio 75 mikrometrų spindulio kondensaciniame fazinių virsmų režime išauga iki 77.84; 78.2; 78.63 ir 79.23 mikrometrų, kai pradinis  $Re_0$  yra 0; 10; 20 ir 50 atitinkamai. Prasidėjus nestacionariojo garavimo režimui išgaravęs vanduo sudaro prielaidas lašeliui mažėti. Tačiau nestacionariojo garavimo režime lašelis dar pašyla iki pusiausviro garavimo temperatūros (3.4 pav. a), todėl tam tikrą laiką vandens plėtimasis dar persveria vandens išgaravimo faktorių. Todėl nestacionariojo garavimo pradžioje lašelis dar truputį paauga, tačiau greitai garavimo ir plėtimosi priešingo poveikio lašelio matmeniui susilygina (tai nurodo maksimumo taškas  $R$  kitimo kreivėse) ir lašelio spindulys nuo to momento pradeda mažėti (3.9 pav.). Aišku lašelio augimas sudaro prielaidas ir lašelio masei išaugti kondensaciniame režime (3.10 pav.).



3.10 pav. Slystančio lašelio masės  $M \equiv M_l \cdot 10^{10}$  kg augimas kondensaciniame režime ir mažėjimas nestacionariojo garavimo režime.  $R_0 = 75 \cdot 10^{-6}$  m.



3.11 pav. Lašelio slydimo įtaka garo srauto tankio jo paviršiuje dinamikai kondensaciniame režime ir nestacionariojo garavimo režimuose.  $R_0 = 75 \cdot 10^{-6}$  m.

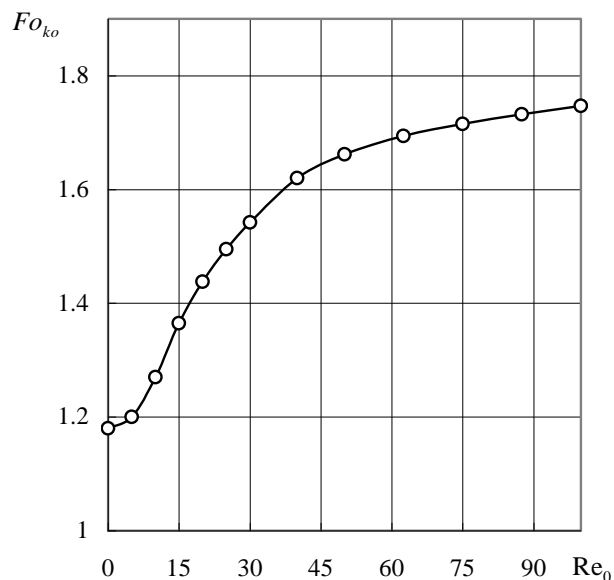
$$|m_{g,0}^+| = 0.0942 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s}).$$

Aiškiai matosi (3.10 pav.), jog lašelio pradinis slydimo intensyvumas sudaro prielaidas lašelio masei  $M \equiv M_l \cdot 10^{10}$  kg (padidinta  $10^{10}$  kartų) daugiau išaugti

kondensaciniame fazinių virsmų režime: lašelio masė  $M \equiv M_l \cdot 10^{10}$  kg nuo pradinės 19.332 vertės kondensaciniame fazinių virsmų režime išauga iki 19.332; 19.61; 19.97 ir 20.42, kai pradinis  $Re_0$  yra 0; 10; 20 ir 50 atitinkamai. Aišku, lašelio plėtimasis šylant vandeniui jokios įtakos lašelio masės augimui neturi, o jį iššaukia tik garo paviršiuje susikondensavęs kondensatas. Labai svarbu tai, jog susikondensuojančio garo srautą lašelio paviršiuje apibūdinantis vandens garo srauto tankis (jį kondensaciniame režime sąlyginai laikome neigiamo ženklo dydžiu) taip pat jautrus pradiniam lašelio slydimui dūmuose (3.11 pav.). Savaime aišku, jog kondensacinio režimo eigoje jis sumažėja iki nulio, o po to pradeda augti.

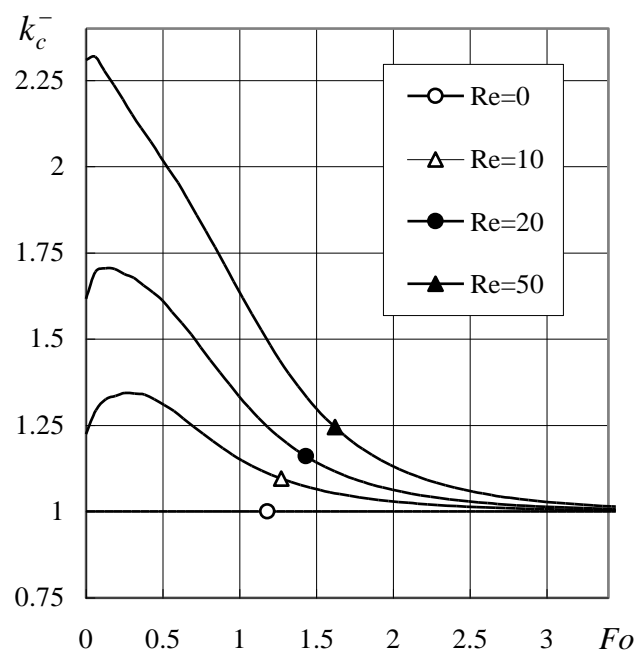
Tampa aišku, jog lašelio slydimas yra labai svarbus faktorius, turintis juntamą įtaką kondensacinio fazinių virsmų režimo lašelio paviršiuje trukmei. Į šį faktorių verta atkreipti dėmesį organizuojant vandens įpurškimo fazinių virsmų šilumos iš dūmų kontaktinio tipo kondensacinių ekonomizerių technologijose.

Lašelio pradinio slydimo modeliuotame lašelių fazinių virsmų cikle, kai 278 K temperatūros vanduo išpurškiamas į 400K temperatūros ir  $\bar{p}_{g,\infty} = 0.3$  santykinio drėgnumo dūmuose ir susiformuoja 150 mikrometrų skersmens lašelis, įtaka kondensacinio fazinio režimo trukmei apibendrinta 3.12 pav. grafiku.



3.12 pav. Lašelio slydimo intensyvumo dūmuose poveikis kondensacinio režimo trukmei  $Fo_{ko} = a_0 \cdot \tau_{ko} / R_0^2$ , pagal  $R_0 = 75 \cdot 10^{-6}$  m lašelio fazinių virsmų ciklo modeliavimo rezultatus.

Ilgesnę intensyviau slystančio lašelio kondensacinio režimo trukmę galima paaiškinti lašelio terminės būsenos savitumu, kurį apibrėžia vandens cirkuliavimo lašelyje intensyvumas, kurį apibrėžia efektyviojo šilumos laidumo  $k_c^-$  parametras, ryškiai priklausantis nuo lašelio slydimo intensyvumo (3.13 pav.). Pradiniu momentu konvekcinę pernašą lašelyje apibrėžiantis  $k_c^-$  parametras yra 1; 1.224; 1.617 ir 2.309, kai pradinis  $Re_0$  yra 0; 10; 20 ir 50 atitinkamai. Kondensaciniame fazinių virsmų režime konvekcinę pernašą lašelyje apibrėžiantis  $k_c^-$  parametras sumažėja (išskyrus šildymo laidumu atvejį, kur visame fazinių virsmų cikle turi vienetinę vertę) iki 1; 1.095; 1.16 ir 1.245, kai pradinis  $Re_0$  yra 0; 10; 20 ir 50 atitinkamai.



3.13 pav. Lašelio slydimo intensyvumo dūmuose poveikis vandens cirkuliacijos iššauktos konvekcinės pernašos intensyvumą apibrėžiančiam efektyviojo šilumos laidumo  $k_c^-$  parametru.  $R_0 = 75 \cdot 10^{-6}$  m.

Galima numanyti, jog vandeniui lašelyje cirkuliuojant intensyviau, lašelis šils tūryje tolygiau. Tuomet lašelio centrinių sluoksnių šildymui reikia sueikvoti didesnę dalį lašeliui teikiamos šiluminės energijos, todėl lašelių paviršinių sluoksnių šilimas sulėtėja. Tuomet lašelio paviršius iki rasos taško temperatūros šyla ilgiau ir intensyviau slystančio lašelio kondensacinio fazinių virsmų režimo trukmė išauga.

Įdėmiau paanalizavus 3 12pav. grafiką galima pastebėti, jog juntamiausią santykinį kondensacinio fazinių virsmų režimo pailgėjimą užtikrina lašelių pradinio slydimo didinimas iki  $Re_0 \approx 50$  vertės. Galima numanyti, jog didinant lašelių intensyvumą

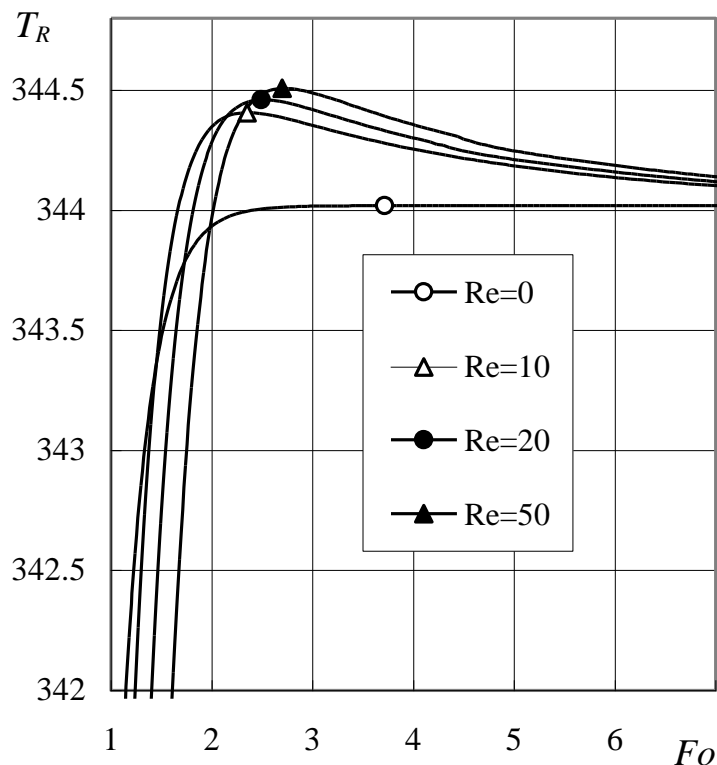
didės ir purkštukuose suvartojama energija, todėl optimalaus pradinio slydimo apibrėžimui bus reikalinga ateityje numatyta išsamesnio energinio įvertinimo studija.

Šiame darbe apsiribojama orientacine  $Re_0 \equiv 30 \div 50$  vandens išpurškimo kontaktinio tipo kondensaciniuose ekonomaizeriuose technologijose rekomendacija.

Kaip jau buvo aptarta įvadinėje dalyje, rekuperacinio tipo kondensaciniuose ekonomaizeriuose vanduo išpurškiamas viršutinėje jų dalyje tikslu užtikrinti palankesnes sąlygas gravitacinei plėvelei vamzdeliuose. Kartu buvo pastebėta, jog tinkamai organizavus vandens išpurškimą galima siekti padidinti dūmų drėgnumą iki jiems patenkant pro retinę į vamzdelių vidų, kad paaukštinti rasos taško temperatūrą ir sudaryti geresnes sąlygas termofikacinio vandens pašildymui. Tuomet vandens lašelių fazinių virsmų cikle tampa garavimo režimas, užtikrinantis papildomą dūmų sudrėkimą. Tam būtų pageidautinas aukštesnės temperatūros vandens išpurškimas, netgi gal būtų naudinga išvengti kondensacinio fazinių virsmų režimo, nes vandens lašelių kelio laikas iki retinės yra ribotas. Šiame darbe nestacionariojo garavimo režimo ir pusiausviro garavimo režimo savitumai analizuoti pagal aukščiau aptarto fazinių virsmų ciklo 278K temperatūros įpurškiamo vandens rezultatus. Analizėje nurodomos  $Re_0$  vertės atitinka kondensacinio režimo pradžios sąlygas. Nestacionariojo garavimo pradžia jas galima apibrėžti pagal 3.7 pav. Nestacionariojo garavimo pradžioje šiuo atveju  $Re_{0,ng} \equiv Re_{ko}$  ir yra 0; 2.59; 3.45 ir 4.41, kai pradinis  $Re_0$  yra 0; 10; 20 ir 50 atitinkamai. Taigi, žemiau analizuojami nestacionariojo garavimo režimo ir pusiausviro garavimo režimo pradinės stadijos rezultatai atspindi silpno pradinio slydimo atvejį, tačiau aukščiau pateiktos  $k_c^-$  parametro vertės kondensacinio režimo pabaigoje dar rodo juntamą šilimos konvekcijos dedamąją lašelio vidiniame energiniame balanse. Galima numatyti, kad ir nedidelės  $Re_{0,ng} \equiv Re_{ko}$  vertės kokybine prasme atspindės ir stipresnio slydimo atvejus, tačiau intensyvesniais slydimo garavimo stadijoje atvejais stebime efektai kiekybine prasme bus dar ryškesni.

Nestacionariojo garavimo režime lašeliai pašyla iki pusiausviro garavimo sąlygas užtikrinančios temperatūros ir pradeda aušti (3.14 pav.). 3.14 pav. grafikuose taškai ant kreivių jau atspindi pusiausviro garavimo pradžią. Reikia pastebėti, jog pusiausviro garavimo pradžia yra susitarimo reikalas, kad prie šios būsenos artėjama asimptotiškai ir galimi šio režimo pradžios apibrėžimo pagal energinę arba terminę lašelio būsenas [3]. Reikia suvokti, jog lašelio pernašos procesams garavimo režimo kaitos momento apibrėžimas įtakos neturi, o turi tik fizikinės interpretacijos aspekto svarbą. Šiame darbe laikyta, jog pusiausviro garavimas prasideda lašelio paviršiui pašilus iki aukščiausios temperatūros, kurią ir nurodo taškai 3.14 pav. Lašelis pašyla iki aukščiausios temperatūros,

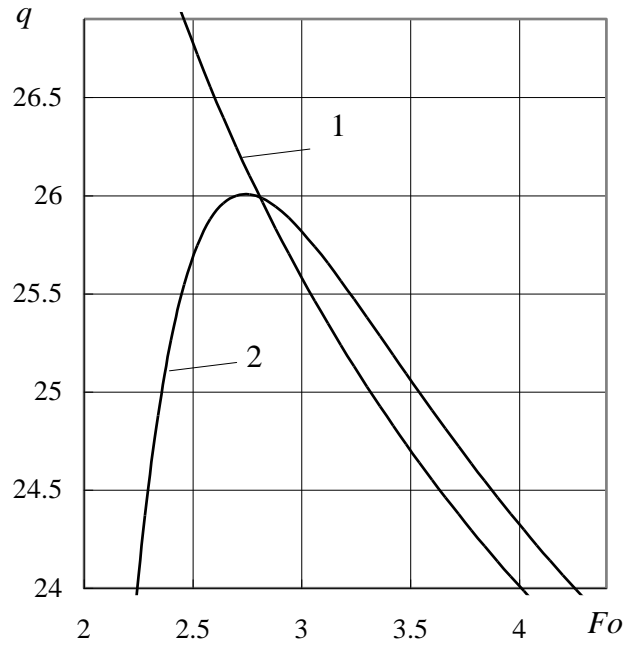
kuri yra 344.2K 344.1K; 344,46K ir 344.51K, kai pradinis  $Re_0$  kondensacinio režimo pradžioje yra 0; 10; 20 ir 50 atitinkamai. Laidumu šildomų lašelių temperatūra pusiausviro garavimo režime nepakinta, o slystančių lašelių atveju nuosekliai artėja prie jos (3.14 pav.).



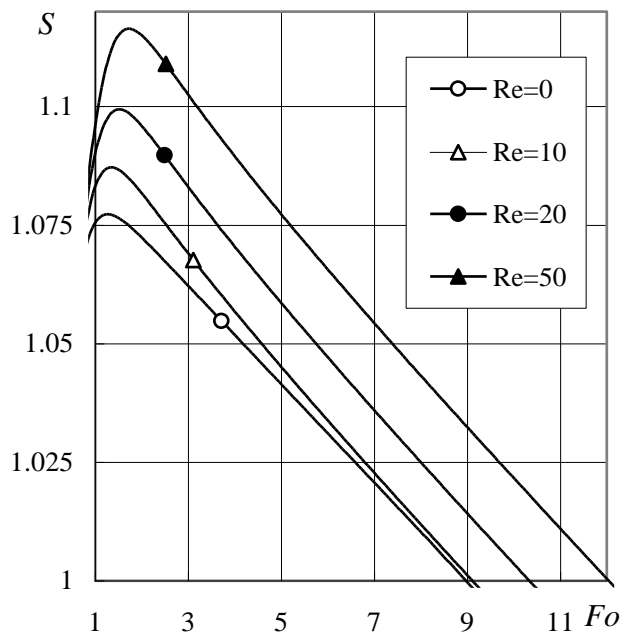
3.14 pav. Slydimo intensyvumo dūmų sraute įtaka vandens lašelio terminės būsenos kitimui nestacionariojo garavimo režime ir pusiausviro garavimo režimo pradinėje stadijoje.  $R_0 = 75 \cdot 10^{-6}$  m.

Lašelio energinės būsenos interpretacijos aspektu galima išskirti tai, jog pusiausviro garavimo režime dalyvaujanti šiluminė energija viršija lašeliui išorine šilumokaita teikiamą šiluminę energiją (3.15 pav.). Prielaidas tam sudaro garavimo procese dalyvavimas auštančio lašelio entalpijos  $q_h$ , apibrėžiamas garavimo šilumos srauto ir konvekcinės šilumos srauto tankių skirtumu  $q_h \equiv q_f^+ - q_c^+$ .





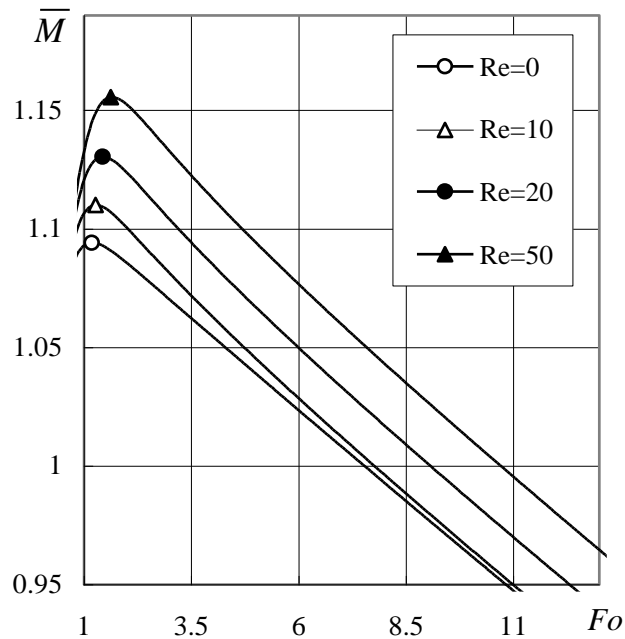
3.15 pav. Auštančio lašelio entalpijos indėlis vandens pusiausviro garinimo procese.  $R_0 = 75 \cdot 10^{-6}$  m.  $q$ , kW/m<sup>2</sup> prasmė: (1)  $q \equiv q_c^+$ , (2)  $q \equiv q_f^+$ .



3.16 pav. Lašelio santykinio ploto  $\bar{s} \equiv R^2 / R_0^2$  kitimas nestacionariojo garavimo režime ir pusiausviro garavimo pradinėje stadijoje.  $R_0 = 75 \cdot 10^{-6}$  m.

Vandens garavimo intensyvumas nestacionariojo garavimo režime kinta nežymiai, o pusiausviro garavimo režime pradeda augti. Tam prielaidas sudaro sparčiai mažėjantis

lašelio paviršiaus plotas (3.16 pav.), ko pasekmėje šilumos ir masės procesų srautų tankis neabejotinai išauga.



3.17 pav. Lašelio santykinės masės  $\bar{M} \equiv M/M_0$  kitimas nestacionariojo garavimo režime ir pusiausviro garavimo pradinėje stadijoje.  $R_0 = 75 \cdot 10^{-6}$  m.

Lašelio paviršiaus plotas (3.16 pav.) ir lašelio masė (3.17 pav.) pusiausviro garavimo režime mažėja tiesiškai. Todėl rekuperacinių kondensatorių technologijose vandens įpurškimą organizuoti taip, kad lašeliai kuo ilgiau keliautų iki retinės ir ilgiau galėtų vykdyti pusiausviro garavimo režimą. Tai sudarytų prielaidas dūmus iki jiems patenkant į vamzdelius daugiau sudrėkinti.

### Išvados.

1. Pagal vienodą pradinį Reinoldso  $Re_0$  kriterijų apjungtam slystančių lašelių ansamblui bematėje  $\bar{P} \equiv P/P_0$  formoje pateiktų šilumos ir masės pernašos parametrų  $\bar{P}(Fo)$  funkcijų grafikai yra nejautrūs lašelių dispersiškumui.
2. Reinoldso kriterijaus vienoda  $Re_0$  verte apjungtoje dūmuose slystančių lašelių grupėje skaitinį eksperimentą galima sumažinti iki vieno laisvai parinkto skersmens lašelio fazinių virsmų ciklo sumodeliavimo Furje  $Fo \equiv a_0 \cdot \tau / R_0^2$  kriterijaus laiko mastelyje. Cikle apibrėžus dominančių pernašos  $P$  parametrų

santykinius  $P(Fo)/P_0$  pokyčius, vieno lašelio ciklo modeliavimo rezultatus galima išplėsti bet kokiam lašelių dispersiškumo spektrui, apibrėžiant parametru kitimą realiame laike aprašančias  $P(\tau)$  funkcijas.

3. Vandeniui slystančiame lašelyje cirkuliuojant jis tūryje šyla tolygiau, paviršinių sluoksnių šilimas sulėtėja ir intensyviau slystančio lašelio paviršius iki rasos taško temperatūros šyla ilgiau ir kondensacinio fazinių virsmų režimo trukmė išauga.
4. Tobulinant fazinių virsmų šilumos iš drėgnų biokuro dūmų utilizavimo kontaktinio tipo kondensaciniuose ekonomaizeriuose technologijose verta atsižvelgti į lašelių slydimo faktorių ir vandens įpurškimą organizuoti taip, kad lašelių slydimas būtų optimalus. Pagal šio darbo rezultatus optimalus būtų vandenį disperguoti  $Re_0 \approx 30 \div 50$  sąlygomis.
5. Rekuperacinio tipo kondensaciniais ekonomaizeriais grindžiamose fazinių virsmų šilumos iš drėgnų biokuro dūmų utilizavimo technologijose vandens įpurškimą vertėtų organizuoti taip, kad užtikrinti kuo ilgesnį pusiausviro garavimo režimą iki lašeliai kartu su dūmais pritekės iki vamzdelių puošto viršutinės retinės. Tai sudarytų prielaidas dūmus iki jiems patenkant į vamzdelius daugiau pridrėkinti, paaukštinti rasos taško temperatūrą ir turėti galimybę termofikacinį vandenį pašildyti iki aukštesnės temperatūros.

## Literatūros sąrašas

1. Gimbutis G., Kajutis K., Krukonis V., Pranckūnas A., Švenčianas P. Šiluminė technika. Vilnius: Mokslas, 1993.
2. E. Murauskas. Profesinės praktikos ataskaita. Kaunas 2013.
3. Miliauskas G. 2014. Grynojo skysčio lašelių fazinių virsmų režimų universalusis ciklas. 1. Ciklo sudarymo metodas ir pernašos procesų skaitinio modeliavimo metodika, *Energetika* 60-2: 77–95.
4. Miliauskas G.; Sinkunas S. 2008. Influence of droplets heating manner to the sprayed liquid thermal state, CHT'08: proceedings of the Int. Symposium of the Advances in Computational Heat Transfer (Morocco): 1–17.
5. Fuchs NA. Evaporation and Droplet Growth in Gaseous Media. London: Pergamon Press, 1959.
6. Sazhin S.S. Advanced models of fuel droplet heating and evaporation. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2006. Vol. 32. P 162–214.
7. W. A. Sirignano, Dynamics and transport processes of sprays, Cambridge University Press, 1999.
8. Tseng C. C., Viskanta R. Enhancement of water droplet evaporation by radiation absorption. *Fire Safety Journal*. 2006. Vol. 41. P. 236–247.
9. Miliauskas G. 2001. Regularities of unsteady radiative-conductive heat transfer in evaporating semitransparent liquid droplets, *Int. J. Heat Mass Transfer* 44: 785–798.
10. Miliauskas G.J, Sinkunas S., Miliauskas G.G. Evaporation and condensing augmentation of water droplets in flue gas // *In. J. of Heat and Mass Transfer*, 2010, Vol. 53, p. 1220-1230.
11. Miliauskas G. Interaction of the transfer processes in semitransparent liquid droplets. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 2003 Vol. 46. P. 4119–41138.
12. G. Miliauskas, V. Sabanas. Interaction of transfer processes during unsteady evaporation of water droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2006. Vol. 49. P. 785–798.
13. G. Miliauskas, V. Sabanas, R. Bankauskas, G. Miliauskas, V. Sankauskaite. The peculiarities of sprayed liquid's thermal state change, as droplets are heated by conduction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008. Vol. 51. P. 4145–4160.
14. Miliauskas G., Norvaišienė K. Garuojančių lašelių sudėtinės pernašos nestacionariųjų procesų sąveikos sisteminis įvertinimas // *Energetika = Power engineering = Энергетика* Vilnius: Lietuvos mokslų akademijos leidykla. 2013, T. 59, Nr. 1, p. 26-41.

15. G.M. Hale, M.R. Query. Optical constants of water in the 200-nm to 200- $\mu$ m wavelength region. *Applied Optics*. 1973. Vol. 12. P. 555–562.
16. Abramzon B., Sirignano W. A. 1989. Droplet vaporization model for spray combustion calculations, *Int. J. of Heat and Mass Transfer* 32: 1605–1618.
17. D.B. Spalding. Convective mass transfer. London: E. Arnold publ., 1963.
18. Zuev V.E., Kopitin U.D., Kuzikovskii A.V. 1982. Nonlinear optical effects in aerosols, Novosibirsk, Nauka. 237 p.
19. Kuzma-Kichta, Yu. A. Drops. Prieiga internete: <http://www.thermopedia.com/content/17>.
20. Communication from the commission to the council and the European Parliament: Thematic Strategy on air pollution//COM (2005) 446, Brussels.
21. Jon Birger Skjærseth, Jørgen Wettestad. Making the EU Emissions Trading System: The European Commission as an entrepreneurial epistemic. *Global Environmental Change*. 2010 Vol. 20, P. 314-321.
22. Van der Burgt M.J., Top hat: a smart way to get over 60% efficiency in simple cycle // *Modern power systems*, 2004, August: 19-25.
23. Buinevičius, K., Puida, E. Reduction of NO<sub>x</sub> concentrations in boiler flue gas by injecting selective reagents. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. 2005. Vol.13, P.91–96.
24. Hong-Zeng Yu. Froude-modeling-based general scaling relationships for fire suppression by water sprays. *Fire Safety Journal*. 2012, Vol. 47, P.1-5.
25. Jy-Cheng Chang, Chih-Ming Lin, Sheng-Lung Huang. Experimental study on the extinction of liquid pool fire by water droplet streams and sprays. *Fire Safety Journal*. 2007, Vol. 42, P. 295-309.
26. Defu, Che, Yaodong, Da, Zhengning, Zhuang. Heat and Mass Transfer Characteristics of Simulated High Moisture Flue Gases. *Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005. Vol. 41, P. 250–256.
27. Kalpokaitė-Dičkuvienė R. Temperatūros įtaka mazuto degimui ant paviršiaus. *Energetika* 2007.
28. Buinevičius K., Černiauskas E., Norinkevičiūtė R., Plečkaitienė R., Kure esančio azoto perėjimo į NO<sub>x</sub> tyrimai. *Mokslas - Lietuvos ateitis*. 2011.
29. Jakobs H. R., Direct contact heat exchangers. Prieiga per internetą: <http://www.thermopedia.com/content/700/>.
- 30.

31. Miliauskas G., Talubinskas J., Adomavicius A., Puida E. The thermal state and hydrodynamics of evaporating hydrocarbon droplets. 1. A possibility of natural circulation of the liquid in the droplet. *Mechanika*. 2012. Vol. 18. No. 2. P. 170–176.
32. Sazhin S. Modeling of heating, evaporation and ignition of fuel droplets: combined analytical, asymptotic and numerical analysis. *J. of Physics: Conference Series*. 2005. Vol. 22. P. 174-193.
33. Shorin S.N. *Teploperedacha*. Moskva. Vishaja Shkola. 1664.
34. Brazdeikis L. Biomassės deginių slaptosios šilumos įvertinimas. *Žemės ūkio inžinerija. Mokslo darbai*, 2012, 44(2.3).
35. Miliauskas G.; Maziukienė M. Modelling of heat and mass transfer processes in phase transformation cycle of sprayed water into gas. 1. The calculation peculiarities of droplet phase transformation parameters, *Mechanics*, 2015, Vol. 6, P. 550-558
36. E. Murauskas, G. Miliauskas. Simulation of water droplets in phase transition mode for heat recovery. *Environmental Research, Engineering and Management*. 2015. (spaudoje).