

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
LIETUVOS ENERGETIKOS INSTITUTAS

MONIKA MAZIUKIENĖ

**VANDENS LAŠELIŲ SUDĖTINIŲ ŠILUMOS MAINŲ IR
FAZINIŲ VIRSMŲ PEREINAMŲJŲ PROCESŲ DRĖGNAME
ORE MODELIAVIMAS**

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija (T 006)

2019, Kaunas

Disertacija rengta 2014-2018 metais Kauno technologijos universiteto (Mechanikos inžinerijos ir dizaino) fakultete (Šilumos ir atomo energetikos katedroje) katedroje. Mokslinius tyrimus rėmė Lietuvos mokslo taryba.

Mokslinis vadovas:

Prof. habil. Dr. Gintautas MILIAUSKAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – T 006).

Redagavo: Aurelija Gražina Rukšaitė (Leidykla “Technologija”)

Energetikos ir termoinžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Habil. dr. Algirdas KALIATKA (Lietuvos energetikos institutas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – T 006) – **pirmininkas**;

Doc. dr. Jerzy KOWALSKI (Gdansko technologijos universitetas, Lenkija, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija –T 006);

Prof. dr. Gvidonas LABECKAS (Vytauto Didžiojo universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – T 006);

Dr. Raimondas PABARČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija –T 006);

Dr. Sigitas RIMKEVIČIUS (Lietuvos energetikos institutas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – T 0006).

Disertacija bus ginama viešame Energetikos ir termoinžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2019 m. rugpjūčio 28 d. 10 val. Kauno technologijos universiteto disertacijų gynimo salėje.

Adresas: K. Donelaičio g. 73-403, 44249 Kaunas, Lietuva.

Tel. (370) 37 300 042; faks. (370) 37 324 144; el. paštas doktorantura@ktu.lt.

Disertacijos santrauka išsiųsta 2019 m. liepos 28 d.

Su disertacija galima susipažinti internetinėje svetainėje <http://ktu.edu> ir Kauno technologijos universiteto bibliotekoje (K. Donelaičio g. 20, 44239 Kaunas) ir Lietuvos energetikos institute (Breslaujos g. 3, 44403 Kaunas).

ŽYMĖJIMAI: a – temperatūros laidumo koeficientas (m^2/s); B_T – Spoldingo šilumos pernešimo parametras; c_p – savitoji šiluma ($J/(kg \cdot K)$); D – difuzijos koeficientas, (m^2/s); Fo – Furje kriterijus; F_s – spinduliavimo šaltinio funkcija; g – garo srautas, (kg/s); I – lašelio fazinių virsmų režimų ciklo suskaidymą apibrėžiantis sveikas skaičius; I_{ω} – spektrinis spinduliuotės intensyvumas, ($W/(m \cdot ster)$); $I_{\omega 0}$ – juodo kūno spektrinis spinduliuotės intensyvumas, ($W/(m \cdot ster)$); J – lašelio radialinės koordinatės suskaidymą apibrėžiantis sveikas skaičius; k_c^- – šilumos konvekcijos lašelyje koeficientas; κ_{ω} – spektrinis šviesos sugerties rodiklis; L – garavimo šiluma, (J/kg); m_g – garo srauto tankis, ($kg/(m^2 \cdot s)$); M – spinduliavimo spektro suskaidymą skaitinėje schemoje apibrėžiantis sveikas skaičius; n – nario indeksas temperatūros gradientą aprašančių integralinių lygčių begalinėje eilutėje; N – begalinėje eilutėje įvertinamų narių skaičius; Nu – Nuselto kriterijus; n_{ω} – spektrinis lūžio rodiklis; $n_{\omega \kappa}$ – kompleksinis spektrinis lūžio rodiklis; p – slėgis, (Pa); Pe – Pekle kriterijus; Pr – Prandtlio kriterijus; q – šilumos srauto tankis, (W/m^2); R – lašelio spindulys, (m); R_{μ} – dujų pastovioji ($J/(kmol \cdot K)$); Re – Reinoldso kriterijus; r – radialinė koordinatė, (m); r_{ω} – spektrinis šviesos spindulio atspindžio lašelio paviršiuje koeficientas; χ_{ω} – sugerties koeficientas, (m^{-1}); T – temperatūra, (K); s – laisvai parinkta šviesos spindulio kryptis, (m); β_{ω} – Briusterio kampas, (rad); η – bematė radialinė koordinatė; λ – šilumos laidžio koeficientas, ($W/(K \cdot m)$); μ – molekulinė masė, ($kg/kmol$); ρ – tankis, (kg/m^3); τ – laikas, (s); w – greitis, (m/s).

INDEKSAI APAČIOJE: c – konvekcija; co – kondensacija; C – lašelio centras; dp – rasos taškas; e – pusiausviras garavimas; equ – ekvivalentinis; f – faziniai virsmai; fK – kontakto tarp fazių paviršius; g – dujos; gv – garo ir dujų mišinys; i – laiko indeksas skaitinėje schemoje; it – vykdomos iteracijos indeksas iteraciniame cikle; j – radialinės koordinatės indeksas skaitinėje schemoje; l – skystis; m – masės vidutinis parametras; nf – pusiausviras garavimas; R – lašelio paviršius; r – radiacinis; sat – sotus; sr – spinduliavimo šaltinis; v – garas; ω – spektrinis; Σ – suminis; 0 – pradinė būseną; ∞ – toli nuo lašelio; $*$ – kintamasis.

INDEKSAI VIRŠUJE: $^+$ – išorinė lašelio paviršiaus pusė; $^-$ – vidinė lašelio paviršiaus pusė; $^{\wedge}$ – vidutinė lašelio parametro vertė.

SANTRUMPOS: " c " – šildymas konvekcija; " $c+r$ " – sudėtinis šildymas konvekcija ir spinduliavimu; " k " – šildymas laidumu; " $k+r$ " – sudėtinis šildymas laidumu ir spinduliavimu; P – lašelio šilumos ir masės mainų parametro bendrasis žymėjimas; P_f – lašelio fazinių virsmų parametras; P_D – lašelio dinaminis parametras; P_T – lašelio terminės būsenos parametras; P_q – lašelio energinės būsenos parametras; \bar{P} – lašelio šilumos ir masės mainų bemačio parametro bendrasis žymėjimas; \bar{SMM} – Šilumos ir masės mainai.

PAGRINDINĖS SAŲOKOS: Lašelis – vandens tūris, kurio ekvivalentinės sferos spindulys yra $R_{equ} = \sqrt[3]{3M_l / (4\pi\rho)}$; Pusskaidris lašelis – ekvivalentinio skersmens sfera, kuri spektrinę spinduliuotę dalinai atspindi, sugeria ir praleidžia; „Lašo“ uždavinys – bendras disperguoto skysčio lašelių ŠMM tyrimų pavadinimas; Fazinių virsmų ciklas – nuosekli lašelio paviršiuje vykstančių fazinių virsmų režimų kaita; Sudėtiniai pereinamieji procesai – kondensaciniame ir pereinamajame į pusiausvirą garavimą režimuose vykstantys ir sąveikaujantys šilumokaitos ir fazinių virsmų procesai; Procesų sąveika – kartu vykstančių pernašos procesų intensyvumą apibrėžianti tarpusavio įtaka; Iteracinis ciklas – numatytais laiko momentais greičiausio nusileidimo metodu vykdomi iteraciniai skaičiavimai momentinei lašelio paviršiaus temperatūrai apibrėžti; Lašelio paviršiaus momentinė temperatūra – iteraciniame cikle apibrėžta lašelio paviršiaus temperatūra, kuriai esant apskaičiuotieji pritekantys ir nutekantys šilumos srautai skiriasi ne daugiau kaip 0,05 procento.

IVADAS

Šiandieninėje energetikoje svarbu plėtoti atsinaujinančiais energijos šaltiniais grindžiamas technologijas, siekiant sumažinti iškastinio kuro naudojimą ir jo neigiamą poveikį aplinkai. Biokuras kartu su kitais atsinaujinančiais energijos šaltiniais laikoma gera alternatyva iškastiniam kurui pakeisti. Tai akcentuoja ir ES atsinaujinančios energijos 2009/28/EC direktyva, o pramonėje 2001/80/EC direktyva, jose nurodoma sumažinti išmetamų teršalų kiekius iš kurą deginančių įrenginių. Tai svarbūs klausimai energetiškai darnios aplinkos vystymui, praktiniam industriniam pritaikymui bei jo modernizacijai.

Svarbią vietą tarp terminių technologijų užima skysčio išpurškimas. Dažniausiai išpurškiamas skystas kuras (kūryklos ir šiluminiai varikliai) ir vanduo. Skysčio išpurškimas yra pirmasis žingsnis link šiuolaikinių pernašos procesais mikro- bei nanosistemose grindžiamų technologijų. Jose labai padidinamas kontakto plotas tarp vientisos nešančiosios (dažnai dujos) ir diskrecinės (dažnai skysčio lašeliai ar kietos dalelės) terpių, ir tai užtikrina sparčią šilumos ir masės kaitą tarp fazių.

Sudėtiniai ŠMM pernašos procesai dvifaziuose lašelių ir juos nešančiuose dujų srautuose tarpusavyje intensyviai sąveikauja. Sąveikos intensyvumą apibrėžia keletas faktorių. Kaip svarbius galima numanyti fazinius virsmus visuomet lydintį Stefano hidrodinaminio srauto poveikį lašelių konvekciniam šildymui ir garavimui, lašelių slydimo dujų sraute įtaką jų išorinei šilumokaitai, taip pat skysčio priverstinės cirkuliacijos bei pusskaidriame skystyje sugeriamos spinduliuotės įtaką lašelių termininei būsenai.

Skysčio išpurškimo technologijoms būdinga pernašos procesų vyksmo dvifaziuose dujų ir lašelių srautuose sąlygų įvairovė. Tačiau procesus apibrėžiančių parametrų apskaičiavimo metodiką bendruoju atveju galima

įvardinti „lašo“ uždaviniu, kuris apima lašelių vidinių ir išorinių šilumos ir masės mainų bei jų paviršiuje vykstančių fazinių virsmų uždavinius.

Disperguojant vandenį „lašo“ uždavinį svarbu apibrėžti lašelių fazinių virsmų aspektu, kadangi jų intensyvumas nusako terminių technologijų efektyvumą. Išpurkšto vandens lašelius dujų srautas dažniausiai šildo, vyksta paviršinis garavimas arba ant lašelių kondensuojasi vandens garas. Dėl to lašelius supančios dujos aušta ir, kintant vandens garo koncentracijai jose, sausėja arba drėksta. Taigi lašelių paviršių apiplaunantis garo srautas yra svarbiausias įvairių skysčio išpurškimo technologijų parametras, kurį apibrėžia lašelių šilumos mainų procesų specifika ir fazinių virsmų režimų ciklo savitumai. Išpurkšto vandens lašelių fazinių virsmų cikle galima išskirti kondensacinį, pereinamojo ir pusiausviro garavimo režimus.

„Lašo“ uždavinys tirtas daugelio autorių darbuose. Šie tyrimai turi daugiau nei šimtmečio istoriją. Jau klasikiniiais tapę pavienio „lašo“ garavimo modeliai pateikti autorių Fuchs [1], Sirignano [2] bei Sazhin [3] ir kitų darbuose. „Lašo“ uždavinyje plačiai ištirtas lašelių pusiausviro garavimas. Lašelių pereinamojo garavimo režimo tyrimai irgi pasistūmėję į priekį, o kondensacinis režimas dėl savo sudėtingumo mažai tyrinėtas. Taigi pereinamųjų procesų tyrimai mokslinėje erdvėje laukiami ir skatintini. Trūksta sisteminio pernašos procesų sąveikos įvertinimo nuosekliai kintančiame lašelių fazinių virsmų režimų cikle.

Tyrimo objektas – Vandens lašelio pereinamieji sudėtiniai pernašos procesai nuosekliai kintančiuose fazinių virsmų režimuose.

Darbo tikslas – ištirti vandens lašelių šilumokaitos ir fazinių virsmų pereinamuosius procesus drėgno oro sraute, išryškinti jų sąveikos savitumus ir apibrėžiančiuosius faktorius.

Darbo uždaviniai:

1. Mokslinės literatūros analizės pagrindu pateikti vandens lašelių šilumos ir masės mainų procesų fizikinę interpretaciją, apibrėžiančią nuoseklų ir nepertraukiamą lašelio fazinių virsmų režimų ciklą.
2. Išanalizuoti lašelių energinės būsenos savitumus fazinių virsmų cikle ir pagrįsti Spoldingo pernašos parametro teorijos tinkamumą Stefano hidrodinaminio srauto įtakai įvertinti kondensaciniame režime, o „lašo“ matematiniam modelyje ir jo skaitinio sprendimo algoritme numatyti lašelių paviršiuje vykstančių fazinių virsmų režimų kaitos galimybę.
3. Temperatūros lauko gradientą lašelyje aprašančioje integralinių lygčių begalinėje eilutėje apibrėžti įvertintinų narių optimalų skaičių bei pagrįsti radialinės ir laiko koordinatų tinklę skaitinėje schemeje.

4. Numatyti skaitinio eksperimento kontrolės kiekviename iteraciniame cikle lašelio momentinei paviršiaus temperatūrai apibrėžti mechanizmą bei pagrįsti skaitinio tyrimo rezultatų patikimumą.
5. Sumodeliuoti lašelių šilimą ir fazinius virsmus drėgname ore vandens išpurškimo technologijoms būdingomis kraštinėmis sąlygomis, ištirti oro parametrų, lašelių dispersiškumo ir temperatūros bei šilumokaitos savitumo įtaką pereinamiesiems pernašos procesams ir išryškinti drėgno oro sraute išpurkšto vandens terminę būseną bei fazinius virsmus apibrėžiančius faktorius.
6. Skaitinio tyrimo rezultatus apibendrinti bemačiais parametrais, įgalinančiais iš anksto prognozuoti drėgnų dujų sraute įpurkšto vandens lašelių terminę būseną ir fazinius virsmus, kas svarbu optimalaus vandens išpurškimo inžinerinei praktikai.

Ginamieji disertacijos teiginiai:

1. Universalų lašelių fazinių virsmų režimams „lašo“ matematinį modelį užtikrina Stefano hidrodinaminio srauto įtaką įvertinančio Spoldingo parametro klasikinės išraiškos modifikavimas lašelio energinės būsenos kitimo pereinamuosiuose režimuose bei fazinių virsmų ir konvekcinio šildymo srautų santykiu išreikštos pataisos įvedimas ir jos sietis su lašelio temperatūros gradiento vektoriumi.
2. Nepertraukiamą lašelių terminę ir energinę būsenos kaitos fazinių virsmų režimuose skaitinį tyrimą užtikrina garo srautą iš neigiamo kondensaciniame į teigiamą garavimo režime numatantis modelis bei universalūs temperatūros lauko gradiento bei Spoldingo parametro modeliai.
3. Vandens lašelių pernašos procesus ir jų sąveiką drėgno oro sraute apibrėžiantys faktoriai yra oro drėgnumas, vandens ir oro temperatūros, lašelių dispersiškumas ir jų sudėtinė šilumokaita. Vandens parametrai apibrėžia pereinamuosius fazinių virsmų režimus, o oro parametrai apibrėžia lašelių pusiausviro garavimo temperatūrą ir greitį. Sudėtinei šilumokaitai svarbūs lašelių slydimas drėgno oro sraute ir spektrinis spinduliuotės sugėrimas juose.
4. Spinduliuotės srautas kondensaciniam fazinių virsmų režimui nėra reikšmingas. Tačiau pereinamojo garavimo režime jam veikiant susiformuojantis neigiamo gradiento temperatūros laukas sudaro prielaidas skysčio paviršiniam garavimui suaktyvėti ir išskiria du savitus šio režimo periodus. Pirmajame vandenį garina tik dalis išorine konvekcija lašeliui teikiamos šilumos. Antrajame vandenį garina visa išorine konvekcija lašeliui teikiama šiluma ir dalis spinduliavimu teikiamos šilumos. Pusiausviro garavimas prasideda tik į garavimą įsitraukus visam sugertos spinduliuotės srautui.

5. Kondensacinio režimo trukmė drėgno oro sraute slystančių lašelių paviršiuje pailgėja dėl trinties jėgų sukeltos priverstinės vandens cirkuliacijos, kadangi ji suintensyvina šilumos nuvedimą į lašelį, ir jų paviršiaus pašilimo iki rasos taško temperatūros laikas išauga.
6. Drėgno oro sraute įpurkšto vandens lašelių terminę būseną pereinamųjų fazinių virsmų metu galima prognozuoti pagal rasos taško ir pusiausviro garavimo temperatūras, normuotas išpurškiamo vandens temperatūros atžvilgiu.

Darbo mokslinis naujumas:

Lašelių energinės būsenos kitimo fazinių virsmų cikle savitumo apibrėžimu pagrįstas Stefano hidrodinaminio srauto įtaką Spoldingo pernašos parametru įvertinančios teorijos tinkamumas pereinamųjų fazinių virsmų kondensaciniam režimui.

Vandens lašelių šilumokaitos sąlygų kompleksinio įvertinimo pagrindu išryškintas galimas kondensacinio režimo trukmės pailgėjimas intensyviau slystantiems lašeliams.

Darbo praktinė nauda:

Praktinę naudą optimaliam vandens įpurškimui inžinerinėje praktikoje turi įvesti bemačiai $\bar{T}_{dp} = T_{dp}/T_{l,0}$ ir $\bar{T}_e = T_e/T_{l,0}$ parametrai. Moksliniu aspektu praktinę vertę turi išvystytas sisteminis požiūris į vandens lašelio fazinių virsmų režimų ciklą ir jo atžvilgiu optimizuota iteraciniu pagrindu veikianti programa.

Praktikai svarbus vandens lašelių pusiausviro garavimo temperatūros $T_e(\tau)$ priklausomybės nuo oro temperatūros ir drėgnumo parametų bei lašelių šilumokaitos sąlygų išryškėjimas ir apibrėžimas.

Darbo aprobavimas – disertacijos tema perskaityti pranešimai: tarptautinėse konferencijose užsienyje 3 pranešimai, tarptautinėse konferencijose Lietuvoje 1 pranešimas, respublikinėse konferencijose perskaityti 7 pranešimai.

Darbo publikavimas – Disertacijos tema paskelbta 9 publikacijų, iš jų 3 tarptautinėse ir 7 nacionalinėse „Clarivate Analytics“ duomenų bazėse „Web of Science Core Collection“ referuojamuose leidiniuose, 2 – registruotų tarptautinių mokslinės informacijos duomenų referuojamuose leidiniuose, 11 – tarptautinių ir Lietuvos konferencijų pranešimų medžiagoje.

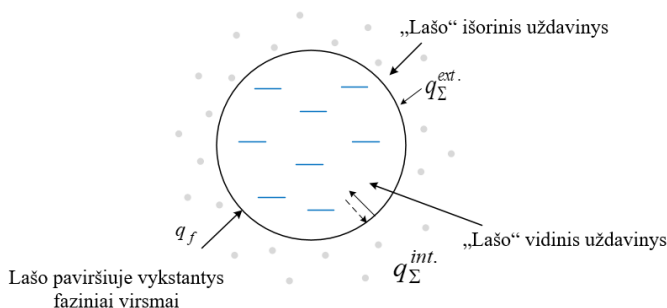
Disertacijos struktūra – Disertacijos darbą sudaro įvadas, literatūros apžvalga, metodologija, rezultatų ir išvadų skyreliai pateikti 100 puslapiuose, 52paveiksluose ir 111 literatūros šaltiniuose.

1. MOKSLINIŲ TYRIMŲ „LAŠO“ TEMA APŽVALGOS SANTRAUKA

Disertaciniame darbe pateiktoje mokslinių darbų „lašo“ tema apžvalgoje išanalizuota vandens išpurškimo technologijų įvairovė, apimanti oro kondicionavimo sistemas, ugnies fronto slopinimą, dujų aušinimą, drėkinimo sistemas žemės ūkyje, paviršių apdirbimą ir apsaugą dvifazių srautų užuolaidomis, vandens užšaldymą ir kristalizavimą aeroliuose, dujų turbinų ciklo efektyvinimą, šilumos atgavimą iš šalinamų dūmų bei išmetamų toksogenų mažinimą ir t. t. [4–18]. Kiekviena skysčio išpurškimo grindžiama technologija yra savita, tačiau jos optimalumas reikalauja gerai pažinti vykstančius šilumos ir masės mainų pernašos procesus, apibrėžti jų savitumus ir įvertinti kraštinių sąlygų įtaką jiems. Bendrieji pernašos procesų dėsningumai literatūroje žinomi ir apibrėžiami kaip „lašo“ uždavinys.

1.1. „Lašo“ ŠMM uždavinys

Sąlyginai išskiriami „lašo“ vidinis ir „lašo“ išorinis ŠMM uždaviniai. „Lašo“ išoriniu uždaviniu apibrėžiamas pernašos procesų tarp lašelių ir juos nešančio fluido srauto intensyvumas. „Lašo“ vidiniu uždaviniu apibrėžiamas pernašos procesų intensyvumas lašeliuose. „Lašo“ uždavinį galima traktuoti siaurąja arba plačiąją prasme. Pirmuoju atveju siekiama išgryninti lašelių pernašos procesų dėsningumus, todėl paneigiama lašelių šilumos ir masės mainų įtaka nešančiojo fluido srauto parametrų. Praktikoje tai atitinka atvejį, kai skysčio įpurškiamas nedaug, todėl lašelių šilumokaitos ir fazinių virsmų poveikis fluido srauto parametrų kitimo intensyvumas. Antruoju atveju apibrėžiamas ir fluido srauto parametrų kitimo intensyvumas. Kadangi visoms terminėms technologijoms svarbus parametras yra garo srautas g (kg/s), todėl galima sakyti, kad pagrindinis uždavinys yra apibrėžti lašelių paviršiuje vykstančius fazinius virsmus. Tačiau šio uždavinio negalima atsieti nuo „lašo“ vidinio ir išorinio uždavinių, todėl „lašo“ ŠMM uždavinį (1 pav.) svarbu nagrinėti kompleksiskai.



1 pav. „Lašo“ uždavinio interpretacija

Bendruoju atveju tiek lašeliuose, tiek ir dujose vyksta sudėtinė šilumokaita, šiluma pernešama konvekcija ir spinduliavimu. Todėl šilumokaitos intensyvumą dujose ir lašeliuose apibrėžia suminės šilumos srauto tankis, atitinkamai $q_{\Sigma}^{ext.} = q_r^{ext.} + q_c^{ext.}$ bei $q_{\Sigma}^{int.} = q_r^{int.} + q_c^{int.}$. Kadangi pusskaidrių skysčių spektriniais šviesos sugėrimo koeficientai yra baigtiniai dydžiai, todėl, aprašant šilumos srautų balansą lašelių paviršiuje, plačiai taikoma $q_{r,R}^{ext.} \approx q_{r,R}^{int.}$ prielaida.

„Lašo“ išorinių bei vidinių ŠMM uždaviniai yra glaudžiai susiję, ir jų sprendiniai įgalina apibrėžti lašelių paviršiuje vykstančių fazinių virsmų intensyvumą.

1.2. Lašelių faziniai virsmai

Terminių technologijų praktikai svarbu įvertinti lašelių paviršiuje vykstančių fazinių virsmų intensyvumą, kadangi skysčio garo srauto lašelio paviršiuje tankis apibrėžia išpurškimo technologijų efektyvumą. Garo srautas g generuojamas arba sukondensuojamas dujų kontakto su vandeniu paviršiuje. Vandens paviršiuje vykstančių fazinių virsmų intensyvumą nusako kondensacijos režime prie lašelio pritekančio, o garavimo režime nutekančio vandens garo srauto tankis, $\text{kg}/(\text{s m}^2)$, kuris apibrėžiamas garo srauto santykiu su kontakto tarp fazių paviršiaus plotu:

$$m_v = \frac{g_v}{A}. \quad (1)$$

Fazinių virsmų varomąją jėgą apibrėžia vandens garo dalinio slėgio prie lašelio ir dujose skirtumas. Kai žinomas difuzinio sluoksnio δ_D storis, tuomet garo srauto tankį geometriniu H matmeniu apibrėžiamame skysčio paviršiuje galima aprašyti Stefano formulės pagrindu [19]:

$$m_{v,H}(\tau) = \frac{\mu_v}{R_{\mu}} \frac{D_{vg}(\tau)}{T_{v,H}(\tau) \delta_D(\tau)} p \ln \frac{p - p_{v,\infty}(\tau)}{p - p_{v,H}(\tau)}. \quad (2)$$

Darbe [19] rekomenduojama difuzinio sluoksnio storį prilyginti lašelio spinduliui $\delta_D \approx R$. Drėgnose dujose esantis dalinis vandens garo slėgis įvertinamas pagal vandens garo dalinio slėgio ir dujų slėgio santykiu išreikštą garo tūrinę $\bar{p}_v = p_{vg} / p$ dujų mišinyje. Ant lašelio paviršiaus generuojamo (susikondensuojančio) vandens garo dalinis slėgis apibrėžiamas kaip lašelio paviršiaus temperatūros $p_{v,R} = p_{sat}(T_R)$ funkcija. Sočiojo garo ir temperatūros ryšiui $0 \div 95^\circ\text{C}$ intervale aprašyti pritaikoma aukšto pasikliautinumo Gerry empirinė koreliacija:

$$\lg p_s = 0,0141966 - 3,142305 \left(\frac{10^3}{T_s} - \frac{10^3}{T - 373,16} \right) + 8,2 \lg \left(\frac{373,16}{T_s} \right) - 0,0024804(373,16 - T_s). \quad \text{Fazinių}$$

virsmų šilumos srauto tankis išreiškiamas garo srauto tankio ir vandens fazinių virsmų šilumos sandauga:

$$q_f^{surface} = m_v \cdot L. \quad (3)$$

Lašelio paviršiuje vykstančių fazinių virsmų procesai susiję su kartu vykstančiais lašelio šilumokaitos procesais, todėl konkretizuoti ir „lašo“ išorinis bei vidinis uždaviniai.

1.3. „Lašo“ vidinis uždavinys

„Lašo“ vidinis uždavinys – tai sudėtinės šilumokaitos uždavinys, kuriam svarbi spinduliavimo ir kitų šilumokaitos procesų pusskaidriame skystyje sąveika. Bendrą šilumokaitos lašelyje atvejį aprašo energijos ir judesio integralinių ir diferencialinių lygčių sistema. Ji analitiškai neišsprendžiama, o jos skaitinis sprendimas yra komplikotas. Todėl ieškoma alternatyvių sprendimo metodų. „Lašo“ uždavinyje tai – kombinuoti analitinio ir skaitinio tyrimo metodai, kai ieškoma galimų, dažniausiai integralinio tipo, analitinių sprendinių, kurių skaitinių sprendimo schemų konvergavimą būtų patogu kontroliuoti. „Lašo“ vidinio uždavinio atveju atspirties tašku laikomas sudėtinės šilumokaitos lašeliuose spinduliavimu ir laidumu atvejis. Nestacionarųjį temperatūros lauką laidumu ir spinduliavimu šildomame lašelyje aprašo energijos lygtis:

$$\rho_l c_{\rho,l} \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda_l \frac{\partial T}{\partial r} \right) + F_s, \quad (4)$$

čia: F_s yra spinduliavimo šaltinio funkcija – $F_s = -(1/r^2) \partial(r^2 q_r) / \partial r$, kuria atsižvelgiama į pusskaidriame skystyje sugeriamos spinduliuotės šilumos poveikį lašelio terminai būsenai [5]. Konkretizuojant spinduliavimo šaltinio funkciją, reikia įvertinti lokalinį spinduliuotės srautą lašelyje, kurį apibrėžiant tenka atsižvelgti į spektrinį spinduliuotės sugėrimo pusskaidriame skystyje pobūdį.

Spinduliuotės indėlį į pusskaidrių lašelių būseną galima įvertinti įvairiais spektrinės spinduliuotės modeliais: geometrine optikos teorija grįsta aproksimacija, elektromagnetinės bangos teorijos pagrindu sudarytais modeliais arba klasikine *Mie* teorija grindžiamais modeliais [19–22]. Pagal geometrinės optikos teoriją, spinduliuotės lokalinis srautas lašelyje gali būti aprašytas diferencialinių ir integralinių lygčių sistema [5, 23]:

$$q_r = \int_0^\infty \int_0^\pi \int_0^{2\pi} I_\omega \sin \Theta \cos \Theta d\Theta d\varphi d\omega, \quad (5)$$

$$\frac{\partial I_\omega}{\partial S} = \chi_\omega [n_\omega^2 I_{\omega 0} - I_\omega], \quad (6)$$

$$\chi_\omega = 4\pi k_\omega \omega, \quad (7)$$

$$\bar{n}_\omega = n_\omega - ik_\omega \quad (8)$$

Energijos ir spinduliavimo (4-8) lygčių sistema yra transcendentinė, ir ja aprašomi sferinio lašelio nestacionariojo temperatūros lauko ir lašelyje sklindančio lokalinio spinduliuotės srauto apibrėžimo uždaviniai sprendžiami atskirai. Sprendžiant (4) lygtį daromos prielaidos, kad lokalinis spinduliavimo srautas ir lašelio paviršiaus temperatūra yra apibrėžti parametrai. Tuomet (4) lygtis išsprendžiama įvedus pagalbinę funkciją $\theta(r, \tau) = r[T(r, \tau) - T_R(\tau)]$ ir pritaikius Dirichle vienalyčio pernašos uždavinio bendrąjį sprendinį, kurio pagrindu lašelio nestacionarusis temperatūros laukas sudėtinės šilumokaitos laidumo ir spinduliavimo atveju aprašomas begaline integralinių lygčių eilute [22]:

$$T(r, \tau) = T_R(\tau) + \frac{2}{r} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi r}{R} \int_0^{\tau} f_n \exp \left[-a \left(\frac{n\pi}{R} \right)^2 (\tau - \tau_*) \right] d\tau_* . \quad (9)$$

Išraiškoje (9) begalinės sumos nario f_n funkcija įvertinama lašelio šilimo sparta ir spinduliuotės sugėrimo jame intensyvumas:

$$f_n = (-1)^n \frac{R}{n\pi} \frac{dT_R}{d\tau} + \frac{1}{c_{p,l} \rho_l} \int_0^R q_r \cdot \left(\frac{n\pi r}{R} \cos \frac{n\pi r}{R} - \sin \frac{n\pi r}{R} \right) dr . \quad (10)$$

Sudėtinio "c+r" šildymo atveju taip pat galima pritaikyti sudėtiniam "k+r" atveju išvystytą metodiką. Tuomet vandens cirkuliacijos įtaka Furje šilumos laidumo dėsnyje įvertinama efektyviuoju šilumos laidžio koeficientu, kuris išreiškiamas vandens šilumos laidžio koeficiento ir konvekcijos pataisos koeficiento k_c^- sandauga: $\lambda_{ef} = \lambda_l \cdot k_c^-$. Konvekcijos pataisos koeficientą galima apibrėžti empirine priklausomybe nuo Pekle kriterijaus skysčiui pagal [23] metodiką: $k_c^-(\tau) = 1,86 + 0,86 \tanh[2,245 \lg(Pe_l(\tau)/30)]$. Tuomet į oro sraute slystantį vandens lašelį nuvedamas šilumos srautas aprašomas pagal modifikuotą Furje dėsnį:

$$q_c^{int.} = -\lambda_{ef} \frac{\partial T_R(r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=R} . \quad (11)$$

Kai lašelis dujose neslysta, tuomet į konvekcinę šilumos pernašą lašelyje atsižvelgti nebūtina, kadangi tuomet $k_c^- \equiv 1$, o dėl lašelio vidinių sluoksnių neizotermiškumo kylančios Archimedo jėgos yra nepakankamos savaiminei vandens cirkuliacijai lašelyje sukelti [24].

Lašelio fazinių virsmų ir vidinės šilumokaitos uždaviniai yra glaudžiai susiję su lašelio išorinės šilumokaitos uždaviniu.

1.4. „Lašo“ išorinis uždavinys

„Lašo“ išoriniame uždavinyje tenka atsižvelgti į lašelio judėjimą oro sraute. Tekančiame greičiu w_g dujų sraute lašeliai juda savitu greičiu. Lašelių slydimas dujų sraute apibrėžiamas jo ir dujų greičių skirtumu $\Delta w_{slipping} = |w_l - w_g|$. Slystančio lašelio greičio kitimas oro sraute aprašomas diferencialine lygtimi [25]:

$$\frac{dw_l(\tau)}{d\tau} = \frac{3}{16} \frac{\mu_g(\tau)}{\rho_l(\tau)} \frac{w_g(\tau) - w_l(\tau)}{R^2(\tau)} \text{Re}_\infty(\tau) C_l(\tau), \quad (12)$$

čia: $\text{Re}_\infty = 2R\rho_g \Delta w_l / \mu_{vg}$ – pagal modifikuotą formulę apibrėžtas Reinoldso kriterijus. Pilnojo C_l pasipriešinimo koeficientas įvertina trinties ir slėgio jėgų sukeltą pasipriešinimą ir aprašomas empirine išraiška [26]: $C_l = 24(1 + 0.2 \text{Re}^{0.63}) / (\text{Re} \cdot (1 + B_T)^{0.2})$.

Daugeliu praktikai svarbių atvejų lašelio konvekcinis šildymas, paneigus lašelio fazinių virsmų įtaką, apibrėžiamas Nuselto kriterijumi, kuris priklauso tik nuo Reinoldso ir Prandtlio kriterijų: $\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr})$. Tuomet galioja gerai žinomi kietos dalelės konvekcinės šilumokaitos atvejo modeliai [26]. Kai dalelė dujose neslysta ir $\text{Re} = 0$, tuomet galioja kietos dalelės atvejis, kuriam $\text{Nu} = 2$. Negraruojančio lašelio konvekcinio šildymo intensyvumas dažnai apibrėžiamas išraiška $\text{Nu} = 2 + 0,552 \text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3}$ [23]. Išorinis konvekcinis šildymas faziniuose virsmuose apibrėžiamas klasikiniu Niutono dėsnio $q_c^{ext.} = \alpha(T_v - T_{JK})$. Tuomet konvekcinės šilumos srautas nuo dujų, tenkantis negaruojančiam lašeliui:

$$q_c^{ext.} = \lambda_{vg} \frac{\text{Nu}_f}{2R} (T_g - T_{JK}) \quad (13)$$

Kai lašelio paviršiuje vyksta faziniai virsmai, Nu_f apibrėžiamas pagal kietos dalelės Nu kriterijaus lygtis, tačiau Spoldingo šilumos parametro funkcija B_T atsižvelgiama į Stefano hidrodinaminio srauto įtaką: $\text{Nu}_f \equiv \text{Nu} \cdot f_{B_T}$ [21]. Funkcija B_T tradiciškai apibrėžiama pagal klasikinį modelį $f_{B_T} = \ln(1 + B_T) / B_T$ arba pagal empirinės koreliacijos modelį $f_{B_T} = (1 + B_T)^{-0.7}$. Klasikinė funkcijos f_{B_T} forma gerai tinka silpno lašelių slydimo dujų sraute atveju. Empirinės koreliacijos modelis taikomas stipraus lašelių slydimo dujų sraute atveju. Spoldingo pernašos B_T parametro išraiška gerai žinoma pusiausviro garavimo atveju ir sudėtinio šildymo atveju "c+r" aprašyta išraiška [27]: $B_T = c_{p,vg} \cdot ((T_g - T_{JK}) / L) \cdot (1 + q_r / q_c)$. B_T parametro funkcijos pritaikymo metodika pereinamiesiems fazinių virsmų režimams nėra iki galo išvystyta.

1.5. Apžvalgos apibendrinimas

Sudėtinių pernašos procesų sąveikai skysčio išpurškimo technologijose įvertinti svarbus tam tikras sisteminis požiūris. Šį požiūrį pateikti ir išryškinti leidžia išpurkšto skysčio lašelių terminės ir energinės būsenų kompleksinė analizė. Ji įmanoma susietai analizuojant „lašo“ vidinio, šorinio ir fazinių virsmų uždavinių sprendinius, kai jie susiejami šilumos srautų balanso tarpfazinio kontakto paviršiuje sąlyga, reikalaujant pritekančių ir nutekančių šilumos srautų atitikimo, apibrėžiamo formalia išraiška:

$$\vec{q}_{\Sigma}^{ext} + \vec{q}_{\Sigma}^{int} + \vec{q}_f^{ext} \equiv 0. \quad (14)$$

Svarbu pastebėti, jog (14) išraiška vienareikšmiškai apibrėžia tarpfazinio kontakto paviršiaus momentinę temperatūrą T_R , kuri savo ruožtu tiesiogiai veikia šilumokaitos ir fazinių virsmų srautus ir užtikrina jų tarpusavio ryšį.

Apibendrinant literatūros apžvalgą galima teigti, jog:

- Konkrečias „lašo“ uždavinių skaitinio sprendimo schemas galima sudaryti tik konkretizavus (14) išraišką. Tačiau tam būtina disponuoti Spoldingo pernašos B_T parametro funkcijos pritaikymo metodika visiems galimiems lašelių paviršiuje vykstantiems fazinių virsmų režimams. Tačiau pereinamųjų fazinių virsmų režimui tokia metodika nėra išvystyta. Todėl iškyla lašelio fazinių virsmų režimų pilnam ciklui universalios Spoldingo pernašos parametro išraiškos poreikis. Tam svarbi šilumos srautų lašelyje kitimo fazinių virsmų ciklo režimuose energinė interpretacija.
- Būtina pastebėti, kad šilumos ir masės mainų procesus ir jų sąveiką reikia analizuoti lašelio paviršiuje vykstančių fazinių virsmų režimus sujungus lašelio fazinių virsmų cikle. Lašelio fazinių virsmų režimų ciklo pradžią patogiu susieti su skysčio išpurškimo $\tau = 0$ momentu, o pabaigą fiksuoti lašelių išgaravimo $\tau = \tau_f$ momentu. Tuomet nuoseklią vandens lašelių fazinių virsmų režimų kaitą galima apibendrinti išraiška:

$$\tau \equiv 0 \div \tau_{co} \div \tau_{nf} \div \tau_f. \quad (15)$$

- Lašelių fazinių virsmų ciklą sudarys kondensacinis ir pereinamasis į pusiausvirą garavimą režimai bei nusistovėjęs pusiausviro garavimo režimas, atitinkamai: $\tau \equiv 0 \div \tau_{nf}$ ir $\tau \equiv \tau_{nf} \div \tau_f$. Taigi pereinamųjų fazinių virsmų režimas bendruoju atveju jungia kondensacinį $\tau \equiv 0 \div \tau_{co}$ ir pereinamąjį į pusiausvirą garavimą $\tau \equiv \tau_{co} \div \tau_{nf}$ režimus.
- Lašelių šildymą apibrėžia šilumokaitos ir fazinių virsmų sudėtiniai procesai.

Jie vyksta intensyviai tarpusavyje sąveikaujant ir dar kintant šilumos ir masės mainų kraštinėms sąlygoms. Lašelio sudėtinių pernašos procesų sąveikai svarbi Stefano hidrodinaminio srauto, Knudseno sluoksnio, lašelių slydimo dujų sraute bei pusskaidriame skystyje sugeriamo šiluminės spinduliuotės srauto įtaka.

- Pusskaidriame lašelyje sugeriamas spinduliuotės srautas daro tiesioginę įtaką vidinių sluoksnių šilumai ir sudaro prielaidas lašelyje susiformuoti neigiamo gradiento temperatūros laukui. Lašelio terminėi būsenai fazinių virsmų cikle apibrėžti atraminis gali būti laikomas sudėtinio šildymo spinduliuavimu ir laidumu integralinis modelis.
- Lašelio slydimas dujų sraute suintensyvina konvekcinių šildymą ir sudaro prielaidas priverstinei skysčio cirkuliacijai lašelyje kilti. Šilumos konvekcijos lašelyje įtakai įvertinti tinka gerai žinoma efektyviojo šilumos laidumo teorija.
- Temperatūros ir slėgio šuoliai lašelių supančiame Knudseno sluoksnyje reikšmingi mažųjų / mikrono eilės lašelių faziniams virsmams, todėl analizei atlikti numatyta sąlyginė išpurkšto vandens lašelių dispersiškumo klasifikacija (smulkūs, kai $2R < 10 < 50$; vidutiniai $50 < 2R < 250$, stambūs $250 < 2R < 1000$, labai stambūs $2R > 1000$ mikrometrais) leidžia Knudseno sluoksnio įtaką tiriama lašelių faziniams virsmams paneigti.
- Stefano hidrodinaminis srautas paspartina difuzinio garavimo procesą ir slopina lašelio konvekcinių šildymą. Į Stefano hidrodinaminio srauto poveikį lašelio konvekciniam šildymui ir garavimui tradiciškai atsižvelgiama Spoldingo pernašos B parametro empirinėmis išraiškėmis.
- Lašelių faziniai virsmai ir šilumokaita fazinių virsmų režimuose yra savita. Bendras matematinis modelis, kuris tenkintų nuosekliai kintantį fazinių virsmų režimų ciklą, reikalauja kruopštaus įvertinimo.
- Svarbu numatyti ir sudaryti prielaidas visam ciklui universaliai matematiniam modeliui ir išvystyti patogią ir patikimą skaitinio modeliavimo metodiką. Tam svarbu pateikti visam fazinių virsmų ciklui patogią lašelio fizikinę interpretaciją, apimančią geometrinę, terminę ir energinę dedamąsias.

Asmenis autorės indėlis

Disertacija parengta dalyvaujant KTU Šilumos ir atomo energetikos katedros mokslinės grupės „Sudėtiniai pernašos procesai spinduliuojančiuose sistemose“ (vadovas prof. G. Miliauskas) veikloje ir yra tęstinis darbas. Jis grįstas dr. V. Šabano disertacijoje išvystyta pernašos procesų skaitinio modeliavimo vandens lašelių garavimo režimuose sudėtinės šilumokaitos spinduliuavimu ir laidumu atvejų patirtimi. Rezultatų analizei Furje laiko skalėje atlikti ir pereinamojo garavimo režimo trukmei apibrėžti pritaikytos dr. K. Norvaišienės disertacijoje pagrįstos ir įvardintos rekomendacijos. Minėtų disertacijų idėjos kūrybingai

išplėtotos visam vandens lašelių fazinių virsmų ciklui, akcentuojant kondensacinio režimo savitumus. Vykdomuose iteraciniuose cikluose lašelio paviršiaus momentinei temperatūrai apibrėžti įvesta nauja momentinio lašelio spindulio apibrėžimo pagal ankstesnės iteracijos skaičiavimo rezultatus metodika, jau tradicine tapusią $R_{i,it} = R_{i-1}$ prielaidą pakeičiant į $R_{i,it} = R_{i,it-1}$. Dėl spinduliuotės sugėrimo ir konvekcinės šilumokaitos procesų sąveikos pusskaidriame vandenyje lašelyje neigiamo gradiento temperatūros lauko susiformavimas susietas su lašelio paviršiuje vykstančių fazinių virsmų režimo energinio įvertinimo pasikeitimu ir garavimo proceso suaktyvėjimu. Pagrįstas kondensacinio režimo lašelio paviršiuje trukmės pailgėjimo ryšys su lašelio intensyvesniu slydimu drėgname ore.

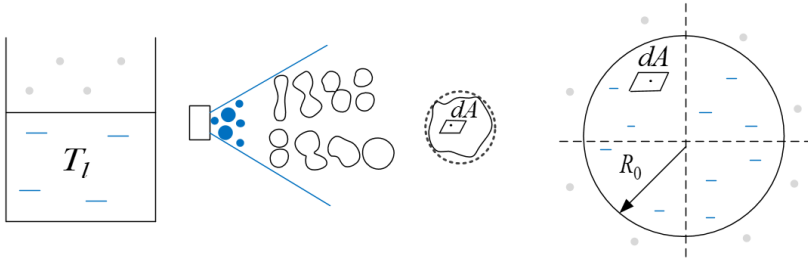
2. „LAŠO UŽDAVINIO“ SPRENDIMO METODIKA

Išpurkšto vandens lašelių šilimui ir faziniams virsmams apibrėžti svarbu užtikrinti pernašos procesų sąveikos įvertinimą visuose nuosekliai kintančiuose fazinių virsmų režimuose. Tam numatyta lašelio paviršiuje vykstančių fazinių virsmų atvejams universali fizikinė interpretacija, kuri susieja lašelio geometrinę, terminę ir energinę dedamąsias.

„Lašo“ uždaviniui apibrėžti daromos šios pagrindinės prielaidos: lašeliai yra sferinės formos tūreliai, kurie šildomi simetriškai, todėl galioja $\partial T(r, \tau) / \partial r|_{r=0} = 0$ sąlyga; lašelio paviršiaus temperatūros kitimą apibrėžia pernašos procesų sąveika, ir $T_R(\tau)$ funkcija užtikrina (14) išraiškos reikalavimą; vandens paviršiuje spektrinės spinduliuotės sugėrimas nėra reikšmingas, todėl lašelio paviršiaus pusėse spinduliuotės srautai tenkina $q_r^- \equiv q_r^+$ sąlygą; laisvoji konvekcija lašelio šildymo procese nereikšminga; d srauto nešamame lašelyje vanduo necirkuliuoja; Knudseno sluoksnio poveikis pernašos procesų sąveikai yra nereikšmingas; šilumos srautai lašelio paviršiuje tenkina pernašos procesų kvazistacionarumo sąlygą.

2.1. Lašelio geometrinė ir terminė interpretacijos

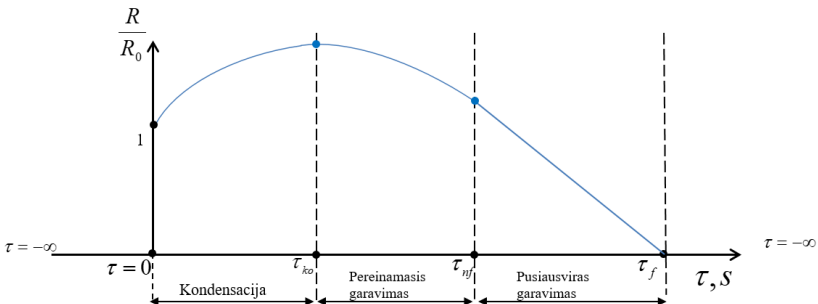
Disperguojant skystį didelis jo tūris išskaidomas į mažesnius tūrelius (2 pav.). Skysčio tūreliai gali susilieti ir vėl skaidytis [28], kol galiausiai susiformuoja dėsningos struktūros dvifazis skysčio lašelių ir dujų srautas, kurį galima apibrėžti pagal skirtingą $M_{l,i} = V_{l,i} \cdot \rho_{l,0}$ masę turinčių lašelių koncentraciją grupėse. Numatoma lašelio sferiškumo prielaida ir apibrėžiamas ekvivalentinės sferos spindulys $R_{equ,i} = \sqrt[3]{3M_{l,i} / (4\pi\rho_{l,0})}$. Lašelio fazinio virsmų 15 ciklo pradžia numatoma, kad $R(\tau = 0) = R_0 \equiv R_{equ}$.



2 pav. Skysčio dispergavimas ir lašelio geometrinė interpretacija

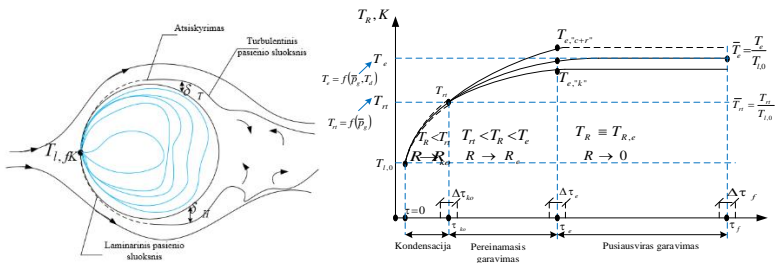
Fazinių virsmų (15) cikle vandens lašelio masė kinta tik dėl jo paviršiuje vykstančių fazinių virsmų, o lašelio tūris dar papildomai gali augti plečiantis šylančiam vandeniui. Lašelio fazinius virsmų apibrėžia ant paviršiaus susikondensuojantis arba generuojamas garo g , kg/s srautas. Sąlyginai kondensaciniame režime susikondensuojančio garo srautą numačius neigiamą, lašelio masės ir tūrio nuoseklų kitimą fazinių virsmų (15) cikle aprašo lašelio fazinių virsmų lygtis:

$$\frac{dM_l(\tau)}{d\tau} \equiv \frac{4\pi}{3} \frac{d[\rho_l(\tau)R^3(\tau)]}{d\tau} = -g(\tau) \quad (16)$$



3 pav. Lašelio spindulio kitimo dinamika lašelio fazinių virsmų režimų cikle

Lašelio fazinių virsmų (16) modelis leidžia numatyti kokybiškai dėsningą lašelio skersmens kaitą fazinių virsmų ciklo $\tau \equiv 0 \div \tau_f$ (15) režimuose (3 pav.). Tačiau fazinių virsmų režimų kaitai apibrėžti reikia atsižvelgti ir į lašelio terminę būseną. Todėl numatoma ir lašelio terminės būsenos kitimo interpretacija (4 pav.).



4 pav. Lašelio terminės būsenos interpretacija

Bendroju atveju dujų srautu aptekamo lašelio paviršiuje konvekcinės šilumokaitos sąlygos yra skirtingos, todėl atskirų elementarių paviršiaus plotelių temperatūra bus savita. Lašelio neizotermiško paviršiaus lokalinę T_{fk} temperatūrą bendroju atveju aprašys laiko ir erdvės koordinatčių $T_{fk}(\tau, X, Y, Z)$, čia X, Y ir Z yra tarpfazinio kontakto paviršių apibrėžiančios koordinatės. Numatoma lašelio paviršiaus terminę būseną apibrėžti vidutine visam paviršiu T_R temperatūra. Tuomet tarpfazinio paviršiaus vidutinė temperatūra apibrėžiama laikinės koordinatės $T_{fk}(\tau) \equiv T_R(\tau)$ funkcija. Bendroju atveju temperatūros susiskirstymą lašelyje aprašo laiko ir erdvės koordinatčių $T_l(\tau, X, Y, Z)$ funkcija. Numatoma lašelio vidinių sluoksnių vidutinės temperatūros samprata ir lašelio nestacionarusis laukas aprašomas laiko ir radialinės koordinatčių $T_l(\tau, r)$ funkcija, kuriai galioja simetriškumo $\partial T_l(\tau, r)/\partial r|_{r=0} = 0$ sąlyga. Tuomet lašelio terminės būsenos kitimas fazinių virsmų cikle apibrėžiamas neizotermiško lašelio masės vidutinės temperatūros $T_{l,m}(\tau)$ funkcija:

$$T_m(\tau) \equiv \int_0^R R^3(\tau) \rho_l(r, \tau) T(r, \tau) dr / \int_0^R R^3(\tau) \rho_l(r, \tau) dr. \quad (17)$$

Visas (15) ciklas bus tik tuomet, kai išpurškiamo vandens temperatūra bus žemesnė už rasos taško temperatūrą. Fazinių virsmų režimų ciklo pradžiai $\tau \equiv 0$, lašelio bematis santykinis R/R_0 skersmuo (spindulys) yra vienetinis. Lašeliui šylant ir kondensuojantis garui kondensaciniame režime, lašelio skersmuo išauga iki $2R_{co}$, todėl $R_{co}/R_0 > 1$. Kondensacinis fazinių virsmų režimas pasibaigia lašelio paviršiu pašilus iki rasos taško temperatūros: $T_R(\tau \equiv \tau_{co}) = T_{dp}$, kurią apibrėžia vandens dalinis slėgis drėgname ore $T_{dp} = T_{sat}(p_v, g)$. Pereinamajame garavimo režime lašelis pašyla iki pusiausvirą garavimą užtikrinančios T_e temperatūros, kurią apibrėžia oro temperatūra bei drėgnumas, ir dar kiek tai veikia lašelio šilumokaita (4 pav.). Laidumu šildomi lašeliai ("k" šilumokaitos atvejais) pusiausvirai garuoja esant žemiausiai $T_{e,"k"}$ temperatūrai. Sudėtingesniais už šildymą laidumu atvejais pereinamojo garavimo režime lašeliai pašyla iki

aukštesnės pusiausviro garavimo temperatūros: $T_{e, "c+r"} > T_{e, "c"} > T_{e, "k"}$.

Pusiausviro garavimo režime lašelių šilumokaitos kraštinės sąlygos kinta. Tam įtakos turės dėl pasipriešinimo jėgų poveikio slopstantis lašelių slydimas ore, o sudėtinio šildymo atveju spinduliuotės sugėrimas dėl garavimo mažėjančiuose lašeliuose susilpnėja. Todėl pusiausviro garavimo režime iš anksto numatyti lašelio terminės būsenos kitimo negalima. Galima tik teigti, kad pusiausviro garavimo režime lašelio terminė būseną kis tarp ribiniais "c+r" ir "k" atvejais apibrėžtų T_e temperatūrų (4 pav.).

Pereinamojo garavimo pradžioje lašelio tūrio kitimui turės įtaką du priešingi faktoriai: dėl tolimesnio šilimo besiplečiantis vanduo skatins tūrio augimą, o prasidėjęs paviršinis garavimas sudarys prielaidą lašelio tūriui mažėti. Todėl lašelio tūris pereinamojo garavimo režimo pradžioje dar gali kažkiek paaugti, kol garavimas persvers vandens plėtimosi efektą. Galima nuspėti, kad pereinamojo garavimo pabaigoje lašelio tūris bus artimas pradiniam, todėl $R_e/R_0 \approx 1$ (3 pav.). Pusiausviro garavimo režime lašelis nuosekliai mažėja iki išgaruoja, todėl $R_f/R_0 = 0$.

Taigi lašelio fazinių virsmų (15) ciklo režimuose lašelio tūris ir terminė būseną kis dėsningai. Fazinių virsmų kaitai apibrėžti yra labai svarbūs lašelio paviršiaus temperatūros aprašančios $T_R(\tau)$ funkcijos kitimo dėsningumas ir jos atitikimas rasos taško T_{dp} ir pusiausviro garavimo T_e temperatūroms fazinių virsmų režimų kaitos momentais. Lašelio paviršiaus temperatūros $T_R(\tau)$ funkciją apibrėš (14) lygties sprendiniai, kuriuos bendruoju atveju įmanomi gauti tik iteraciniu skaitiniu metodu, kadangi šilumos srautams apibrėžti momentinė lašelio paviršiaus temperatūra privalo būti determinuota. Todėl (14) formaliai šilumos srautų balansą lašelio paviršiuje aprašančiai išraiškai apibrėžti reikalinga kruopšti lašelio energinės būsenos kitimo fazinių virsmų režimo (15) cikle analizė.

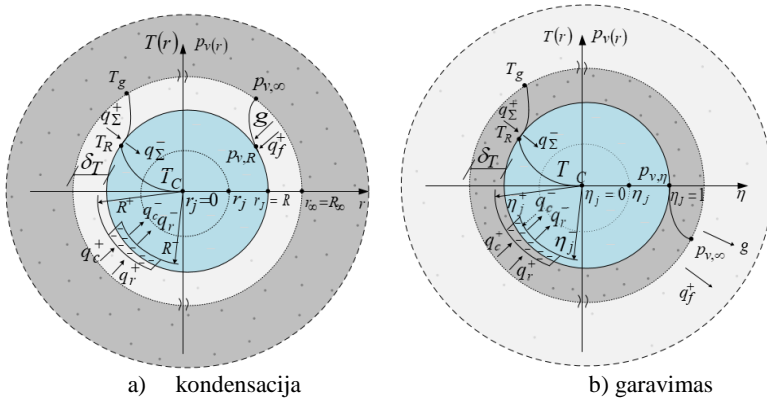
2.2. Lašelio energinė interpretacija

Lašelio energinės būsenos kitimo savitumui fazinių virsmų cikle (15) išryškinti lašelio ekvivalentiniu R_{equ} spinduliu apibrėžtame lašelio paviršiuje sąlyginai išskirtos vidinė ir išorinė pusės, kurios apibrėžtos R^+ ir R^- spinduliais, numatant, kad $|R^-| \cong |R^+|$. Lašelio šildymo intensyvumą sudėtinės šilumokaitos atveju apibrėžia lašelio išoriniam paviršiui teikiamos šilumos suminio srauto tankis, bendruoju atveju turintis radiacinę, konvekcinę ir laidumo dedamąsias:

$$q_{c+r, \Sigma}^+(\tau) \equiv q_{c+r}^+(\tau) = q_{c+r, r}^+(\tau) + q_{c+r, c}^+(\tau) + q_{c+r, k}^+(\tau). \quad (18)$$

Ore slystančio lašelio paviršiuje kylančios trinties jėgos sukelia vandens cirkuliacija, todėl bendruoju atveju šilumos nuvedimo į lašelį intensyvumą apibrėžia nuo vidinio paviršiaus sklindantis šilumos suminio srauto tankis, taip pat turintis radiacinę, konvekcinę ir laidumo dedamąsias:

$$q_{c+r}^{\Sigma}(r, \tau) \equiv q_{c+r}^{\Sigma}(r, \tau) = q_{c+r}^{\Sigma}(r, \tau) + q_{c+r}^{\Sigma}(r, \tau) + q_{c+r}^{\Sigma}(r, \tau). \quad (19)$$



5 pav. Fazinių virsmų proceso lašelio paviršiuje interpretacija a) kondensaciniame ir b) garavimo režime

Daroma prielaida, kad ekvivalentinio skersmens lašelį supa δ_T storio šiluminis ir δ_D difuzinis pasienio sluoksniai, kurie yra simetriški lašelio centro atžvilgiu ir užtikrina apskaičiuotuosius vidutinius lašelio paviršiuje sąveikaujančių pernašos procesų sukeltus šilumos srautus (5 pav.). Šiluminiame pasienio sluoksnyje vandens garo ir oro mišinio temperatūra susilygins su lašelio paviršiaus temperatūra.

Difuziniame sluoksnyje vandens garo dalinis slėgis susilygins su T_R temperatūra apibrėžtu sočiuoju vandens garo slėgiu. Tačiau garo slėgio kitimas difuziniame sluoksnyje priklausys nuo fazinių virsmų režimo: kondensaciniame režime vandens garo dalinis slėgis ore bus didesnis nei prie lašelio, todėl difuziniame sluoksnyje garo slėgis sumažės iki $p_{v,R}$ (5 pav. a), o garavimo režime vandens garo dalinis slėgis prie lašelio bus didesnis, ir difuziniame sluoksnyje garo slėgis sumažės iki $p_{v,g}$ (5 pav. b). Vandens garo dalinių slėgių $|p_{v,d} - p_{v,R}|$ skirtumas apibrėš lašelio paviršiuje vykstančių fazinių virsmų varomąją jėgą ir nulems garo srauto kryptį: kondensaciniame režime vandens garas tekės link lašelio ir ant jo kondensuos, o garavimo režime vandens garas bus generuojamas paviršinio garavimo procese ir sklis tolyn nuo lašelio.

Fazinių virsmų šilumos srauto tankis q_f , W/m^2 apibrėžiamas garo srauto tankio m_v , $kg/(m^2s)$ ir vandens garavimo šilumos L , J/kg sandauga. Garo srauto tankį aprašius pagal Shorino-Kuzikovskio koreliaciją [19], sudaromas fazinių virsmų (15) ciklui universalus fazinių virsmų šilumos srauto modelis:

$$q_f^+ \equiv m_v^+ L = L \frac{D_{vg} \mu_v}{T_{vg,R} R_{\mu} R} \left[P_{v,R} - P_{v,\infty} + \frac{\mu_v}{\mu_g} \left(p \ln \frac{p - P_{v,\infty}}{p - P_{v,R}} - P_{v,R} + P_{v,\infty} \right) \right]. \quad (20)$$

Svarbu tai, jog (20) išraiška aprašomas fazinių virsmų šilumos srauto modelis užtikrina apskaičiuotąjį neigiamą srautą kondensaciniame režime ir teigiamą garavimo režime. Tai užtikrina Stefano logaritmas (20) išraiškoje, kuris, beje, pateikia nulinę garo srauto vertę pereinant iš kondensacinio į garavimo režimą (tuomet lašelis pašyla iki rasos taško temperatūros, todėl $P_{v,\infty} \equiv P_{v,g} = P_{v,R}$ ir $m_v = 0$).

Šilumos konvekcijos srauto lašelyje tankis apibrėžiamas atsižvelgus į temperatūros lauko gradiento kitimą fazinių virsmų (15) ciklo režimuose. Lašelio temperatūros lauko gradientą $\partial T(\tau, r) / \partial r$ sudėtinio šildymo spinduliavimo ir laidumu atvejui aprašius išraiškos (9) pagrindu ir pritaikius $r \equiv R^-$ sąlygą, šilumos konvekcijos srauto lašelyje tankis apibrėžiamas universaliumi (15) fazinių virsmų ciklui modeliu:

$$q_c^- = -\lambda_{ef} \frac{2\pi}{R} \sum_{n=1}^{\infty} n(-1)^n \int_0^{\tau} f_n \exp \left[-a \left(\frac{n\pi}{R} \right)^2 (\tau - \tau_*) \right] d\tau_*. \quad (21)$$

Svarbu tai, jog išraiškų (10, 21) sistema ne tik apibrėžia neigiamo ženklo apskaičiuotąjį konvekcinės šilumos srautą temperatūros lauko lašelyje teigiamo gradiento atveju, bet ir užtikrina savaiminį šio srauto vektoriaus krypties pokytį veikiant sugertai spinduliuotei susiformavus neigiamo gradiento temperatūros laukui pereinamajame garavimo režime.

Numačius, jog oro temperatūra bus aukštesnė už lašelio temperatūrą ($T_g > T_R$), šiluminiame sluoksnyje vandens garo ir oro mišinys visuomet atauš iki T_R temperatūros, o temperatūrų $T_g - T_R$ skirtumas apibrėš šilumokaitos varomąją jėgą visuose fazinių virsmų režimuose. Garuojančiam lašeliui Nuselto Nu_{λ} kriterijų aprašius pagal Abramzon-Sirignano koreliaciją [23], konvekcinės šilumos srauto tankis apibrėžiamas pagal modifikuotu Niutono dėsnio grįstą modelį:

$$q_c^+ = \lambda_{vg} \frac{T_g - T_R}{2R} \cdot \left[2 \frac{\ln(1 + B_T)}{B_T} + 0,57 \frac{Re^{1/2} Pr^{1/3}}{(1 + B_T)^{0,7}} \right]. \quad (22)$$

Stefano hidrodinaminio srauto įtaką įvertinantis Spoldingo šilumos parametras gerai žinomas pusiausvirai garuojančio lašelio konvekcinio šildymo atveju [2]:

$$B_{T, "c", e} = c_{p, \text{vg}} \frac{T_g - T_R}{L}. \quad (23)$$

Sudėtinio šildymo atveju tenka atsižvelgti į spinduliuotės indėlį pusiausviro garavimo energetiniame balanse [29]:

$$B_{T, "c+r", e} = c_{p, \text{vg}} \frac{T_g - T_R}{L - q_r / m_{v, e}^+}. \quad (24)$$

Pereinamuosiuose fazinių virsmų režimuose B_T modelyje papildomai reikia atsižvelgti į tai, kad lašeliui teikiamos šilumos sudėtinis srautas ne tik garina, bet ir šildo vandenį. Tam būtina kruopščiai įvertinti lašelio energinės būsenos kitimą fazinių virsmų ciklo režimuose ir atsižvelgti į garavimą skatinančius šilumos srautus.

Kondensaciniame fazinių virsmų režime vandenį lašelyje šildo sugerta spinduliuavimo šiluma bei visa dujų konvekcinė šiluma ir dar prisideda lašelio paviršiuje susikondensavusio vandens garo fazinių virsmų šiluma, todėl:

$$\begin{aligned} q_{\Sigma}^-(\tau \equiv 0 \div \tau_{co}) &= q_r^-(\tau \equiv 0 \div \tau_{co}) + q_c^+(\tau \equiv 0 \div \tau_{co}) + q_f^+(\tau \equiv 0 \div \tau_{co}); \\ q_c^-(\tau \equiv 0 \div \tau_{co}) &= q_r^-(\tau \equiv 0 \div \tau_{co}) + q_c^+(\tau \equiv 0 \div \tau_{co}). \end{aligned} \quad (25)$$

Pereinamajame į pusiausvirą garavimą režime dalis išorinės konvekcijos šilumos jau dalyvauja vandens garinimo procese, ir garavimo šiluma yra proporcinga išorinės ir vidinės konvekcinės šilumos srautų skirtumui, todėl:

$$\begin{aligned} q_{\Sigma}^-(\tau \equiv \tau_{co} \div \tau_e) &= q_r^-(\tau \equiv \tau_{co} \div \tau_e) + q_c^-(\tau \equiv \tau_{co} \div \tau_e) \\ q_f^-(\tau \equiv \tau_{co} \div \tau_e) &= q_c^+(\tau \equiv \tau_{co} \div \tau_e) - q_c^-(\tau \equiv \tau_{co} \div \tau_e). \end{aligned} \quad (26)$$

Būtina pastebėti, jog sudėtinio šildymo atveju pereinamajame garavimo režime τ_{nf}^* laiko momentu lašelyje susiformuoja neigiamo gradiento temperatūros laukas [29], ir tai sudaro prielaidas sugertam spinduliuotės srautui vidine šilumos konvekcija dalinai ištekėti į lašelio paviršių ir pradėti dalyvauti paviršiniame vandens garinimo procese. Taigi τ_{nf}^* laiko momentu konvekcinės šilumos srauto vektoriaus kryptis pakinta, kartu pasikeičia ir q_c^- srauto energinė prigimtis: laikotarpiu $\tau \equiv \tau_{co} \div \tau_{nf}^*$ vidinės šilumos konvekcinis srautas atitinka vandenį šildančią išorinės konvekcijos srauto dalį, o $\tau \equiv \tau_{nf}^* \div \tau_e$ laikotarpiu jau atitinka vandenį garinančią spinduliuotės srauto dalį, todėl:

$$\begin{aligned} q_c^-(\tau \equiv \tau_{co} \div \tau_{nf}^*) &= q_c^+(\tau \equiv \tau_{co} \div \tau_{nf}^*) - q_f^+(\tau \equiv \tau_{co} \div \tau_{nf}^*); \\ q_c^-(\tau \equiv \tau_{nf}^* \div \tau_e) &= q_f^+(\tau \equiv \tau_{nf}^* \div \tau_e) - q_c^+(\tau \equiv \tau_{nf}^* \div \tau_e). \end{aligned} \quad (27)$$

Pusiausviras garavimas prasideda tik į garavimą įsitraukus visam sugertos spinduliuotės srautui, todėl:

$$\begin{aligned} q_f^+(\tau \equiv \tau_e \div \tau_f) &= q_c^+(\tau \equiv \tau_e \div \tau_f) + q_c^-(\tau \equiv \tau_e \div \tau_f), \\ q_\Sigma^-(\tau \equiv \tau_e \div \tau_f) &= q_c^-(\tau \equiv \tau_e \div \tau_f) - q_r^-(\tau \equiv \tau_e \div \tau_f) \approx 0. \end{aligned} \quad (28)$$

Būtina pastebėti, jog šilumos srautų $q_c^-(\tau \equiv \tau_e \div \tau_f) - q_r^-(\tau \equiv \tau_e \div \tau_f)$ skirtumas įvertina pusiausvirai garuojančio ir galimai aušimo procese prarandamos lašelio entalpijos indėlių srautų energetiniame balanse.

Išraiškomis (25–28) apibendrintas lašelio energinės būsenos kitimo (15) ciklo režimuose įvertinimas sudaro prielaidas universaliai Spoldingo pernašos parametro aproksimacijai sudaryti. Galima pastebėti, jog platesne prasme išraiškoje (24) esančią $q_r(\tau)$ funkciją galima traktuoti kaip visus, išskyrus išorinę šilumos konvekciją, faziniuose virsmuose dalyvaujančius šilumos srautus apibrėžiančią $q(\tau)$ funkciją: $q(\tau) \equiv q_f^+(\tau) - q_c^+(\tau) = m_v^+(\tau)L(\tau) - q_c^+(\tau)$. Tuomet jau klasikine pusiausviram garavimo režimui tapusi (24) išraiška analitiškai pertvarkoma į visam (15) ciklui universalią Spoldingo pernašos parametro formą:

$$B_T(\tau) = \frac{c_{p,vg}(\tau)}{L(\tau)} \frac{T_g - T_R(\tau)}{1 - \frac{q(\tau)}{m_{v,e}^+(\tau)L(\tau)}} = B_{T, "c"}(\tau) \frac{q_f^+(\tau)}{q_c^+(\tau)}. \quad (29)$$

Pastebėjus, jog fazinių virsmų srautą apibrėžia suminių šilumos srautų lašelio paviršiaus pusėse skirtumas: $q_{f,l}^+(\tau) = q_{\Sigma,g}^+(\tau) - q_{\Sigma,l}^-(\tau)$, (29) išraiška $q_r^-(\tau) \equiv q_r^+(\tau)$ pagal prielaidą transformuojama į pereinamajam garavimo režimui žinomą išraišką [29]:

$$B_T(\tau) \equiv B_{T, "c"}(\tau) \left[1 + \frac{q_c^-(\tau)}{q_c^+(\tau)} \right] = B_{T, "c"}(\tau) \left[1 - k_c^-(\tau) \lambda_l(\tau) \frac{\partial T_l(r, \tau)}{\partial \tau} \Big|_{r=R} / q_c^+(\tau) \right], \quad (30)$$

kurioje aiškiai atsispindi lašelio energinės ir terminės būsenų ryšys.

Atsižvelgus į parinktus šilumos srautų (20–22, 28) modelius, formali šilumos srautų balanso (14) išraiška transformuojama į visam (15) fazinių virsmų ciklui universalų šilumos srautų balanso lašelio paviršiuje modelį:

$$\left(q_r^+ - q_r^- \right) + \frac{\lambda_{vg} Nu_f}{2R} (T_v - T_R) - k_c^- \lambda_l \frac{\partial T_r}{\partial r} \Big|_{r=R} - m_v L = 0. \quad (31)$$

(30) sąlygoje slypi integralinių ir algebrinių lygčių sistema, kuri kartu su parinktu universalium (15) ciklui lašelio fazinių virsmų (16) modeliu vienareikšmiškai

apibrėžia lašelio paviršiaus temperatūros kitimą aprašančią $T_R(\tau \equiv 0 \div \tau_f)$ funkciją, kai lokalinį spinduliuotės srautą aprašanti $q_r(\tau, r)$ funkcija yra apibrėžta. Numatant, kad (16, 31) lygčių sistemą bus galima išspręsti tik skaitiškai iteraciniu metodu, $q_r(\tau, r)$ funkcija apibrėžiama selektyviai parinktais kontroliniais laiko momentais kaip radialinės koordinatės funkcija $q_r(\tau \equiv \tau_i, r)$ pagal geometrinę optiką grindžiamą integralinį modelį [22]. Skaičiavimams atlikti reikalingas lašelio ekvivalentinis $2Ri$ skersmuo, ir jo momentinis temperatūros $T(\tau, r)$ laukas parenkami kaip žinomi parametrai τ_{i-1} laiko momentui.

2.3. „Lašo“ uždavinio skaitinio sprendimo metodika

„Lašo“ uždaviniui skaitiškai išspręsti pritaikomas iteracinio ciklo metodas lašelio paviršiaus momentinei $T_{R,i}$ temperatūrai apibrėžti. Iteracinio skaičiavimo neišvengiamumą apibrėžia tai, kad tam tikru laiko momentu τ_i šilumos srautus galima apskaičiuoti tik apibrėžtiems $T_{R,i}$ ir R_i parametrams. Be to, ir šilumos srautai $q_{c,i}^+$ ir $q_{f,i}^+$ jau turi būti apibrėžti, kad galima būtų pagal (29) išraišką apskaičiuoti $B_{T,i}$ parametą. Taigi (31) išraiška yra transcendentinė lygtis, kurios sprendinys lašelio paviršiaus temperatūros $T_{R,i}$ atžvilgiu yra įmanomas tik iteraciniais skaičiavimais.

2.3.1. Iteracinio ciklo paaiškinimas

Iteracinis ciklas

$$it \equiv it = 1 \div it = IT \quad (32)$$

vykdomas visais iš anksto lašelio fazinių virsmų (15) cikle išskirtais laiko kontroliniais τ_i momentais, kuriems apibrėžti (15) cikle tenka numatyti konkretų kontrolinių taškų I skaičių. Numačius laiko koordinatės kitimo $\Delta\tau_i$ žingsnio pastovumą visuose lašelio fazinių virsmų režimuose, bendruoju atveju $\Delta\tau_i$ apibrėžiamas tik tarus lašelio fazinių virsmų τ_f trukmę:

$$\Delta\tau_i = \frac{\tau_f}{I-1}; \text{ kai } \sum_{i=2}^I (\tau_i - \tau_{i-1}) = \tau_f. \quad (33)$$

Teigiama, jog visi lašelio ŠMM parametrai pradinio laiko $\tau_{i=1} = 0$ momentu yra determinuoti. Apibrėžus galimą lašelio paviršiaus temperatūros kitimo $T_{R,min} \div T_{R,max}$ intervalą, iteracinis (32) ciklas greičiausio nusileidimo metodu nuosekliai

vykdomas kiekvienam kontroliniam τ_i laikui, pradedant nuo $\tau_{i=2}$. Lašelio paviršiaus apskaičiuotąja $T_{R,i}$ temperatūra laikoma (32) ciklo baigiamajai IT iteracijai parinkta $T_{R,i, it = IT}$:

$$T_{R,i} \equiv T_{R,i, it = IT} ; \text{ kai } \left| 1 + \frac{q_{c,i, it = IT}^- - q_{f,i, it = IT}}{q_{c,i, it = IT}^+} \right| \times 100\% < \delta_{leis} = 0,05\% .(34)$$

Pernašos procesų lašelyje lokaliniams parametrams apibrėžti ekvivalentinės sferos R spindulyje išskiriamas J skaičius kontrolinių taškų ir radiacinėmis r_j koordinatėmis apibrėžiama J kontrolinių koncentrinų pjūvių:

$$\Delta r_j = \frac{R}{J-1} ; \text{ kai } \sum_{j=2}^J (r_j - r_{j-1}) = R . \quad (35)$$

Praktiškai apibrėžti laiko ir radialinės koordinatės tinklėlių skaitinėje schemoje pagal (33) ir (35) išraiškas yra nepatogu, kadangi lašelio spindulys fazinių virsmų (15) cikle kinta, o šio ciklo fazinių virsmų režimų trukmės gali smarkiai skirtis. Be to, išlieka skaitinės schemos stabilumo neapibrėžtumas garo srautui lašelio paviršiuje pereinant nulinę vertę, kondensaciniam režimui keičiantis į garavimo režimą. Šioms problemoms spręsti įvedama universali radialinė η koordinatė bei pritaikoma universalus fazinių virsmų ciklo su vienodos vienetinės trukmės režimais idėja [30]. Universalio radialinės koordinatės sudaroma radialinė r koordinatė normuojant su lašelio ekvivalentinio matmens kitimą aprašančia laikine $R(\tau)$ funkcija:

$$\eta = \frac{r}{R(\tau)} . \quad (36)$$

Universalios radialinės koordinatės atveju lašelio centrą apibrėžia $\eta = 0$ vertė, o lašelio paviršius apibrėžia $\eta = 1$ vertė (5 pav. b), todėl visame lašelio fazinių virsmų (15) cikle išlieka pastovus vienetinis lašelio bematis spindulys. Tai leidžia skaitinėje schemoje užtikrinti lašelio radialinės koordinatės kintantį tinklėlių pagal universalios radialinės koordinatės atveju apibrėžtą pastovų kitimo žingsnį:

$$\Delta \eta_j = \frac{1}{J-1} ; \rightarrow \eta_{j>1+j} = \eta_{j-1} + \Delta \eta_j ; \rightarrow \Delta r_{i,j} = \Delta \eta_j R_i ; r_{i,j>1+j} = r_{i,j-1} + \Delta r_{i,j} .(37)$$

Universaliam fazinių režimų ciklui sudaryti įvedama modifikuotu Furje Fo kriterijumi pagrįsta universalus laiko skalė ir (15) ciklas pertvarkomas:

$$Fo = \frac{a_0}{R_0^2} \cdot \tau; \rightarrow Fo \equiv 0 \div Fo_{co} \div Fo_e \div Fo_f. \quad (38)$$

Lašelių fazinių virsmų ciklo (38) Furje kriterijaus laiko skalėje privalumas yra išryškintas lašelių "k" šilumokaitos atveju [31]. Konkrečiam lašeliui bet kurio terminės būsenos P_T parametro (nestacionariojo temperatūros $T_\eta(Fo)$ lauko, jo charakteringų $T_{\eta=0}(Fo); T_{\eta=1}(Fo); T_m(Fo)$ temperatūrų bei gradientų $\text{grad}T_\eta(Fo)$) funkcijos $P_T(Fo)$ grafikas yra universalus lašelių dispersiškumo atžvilgiu. Lašelių energinių bei fazinių virsmų P_q ir P_f parametrų atitinkamai $P_q(Fo)$ ir $P_f(Fo)$ funkcijų grafikai neįtraukiant lašelių dispersiškumui tampa tik juos pateikus normuota $\bar{P}_q(Fo) = P_q(Fo)/P_{q,0}$ ir $\bar{P}_f(Fo) = P_f(Fo)/P_{f,0}$ forma [30]. Tai sudaro prielaidas optimizuoti skaitinį modeliavimo procesą: pakanka sumodeliuoti laisvai parinkto lašelio fazinių virsmų (38) ciklą, po to individualių a_0/R_0^2 daugiklių pagrindu apibrėžti (15) fazinių virsmų ciklą norimam lašelių dispersiškumui bei konkretizuoti pageidaujama $P(\tau)$ funkcijų grafikus. Tiesa, sudėtingesniais šilumokaitos atvejais dar reikia pagrįsti "k" šilumokaitos atvejo metodikos pritaikomumą.

Ciklo (38) pagrindu galima sudaryti universalų vienetinės režimų trukmės fazinių virsmų ciklą:

$$\bar{Fo} = \frac{Fo}{Fo_n} \cdot \rightarrow \bar{Fo} \equiv 0 \div 1 \div 2 \div 3. \quad (39)$$

Tam atskiriems režimas pritaikomas skirtingas normuojantis Fo_n kriterijus: kondensaciniam režimui $Fo_n \equiv Fo_{co}$ ir $\bar{Fo} = 0 \div 1$; pereinamajam garavimo režimui $Fo_n \equiv Fo_{nf} - Fo_{co}$ ir $\bar{Fo} \equiv 1 + (Fo - Fo_{co}) / (Fo_{nf} - Fo_{co}) = 1 \div 2$; pusiausviram garavimo režimui $Fo_n \equiv Fo_f - Fo_{nf}$ ir $\bar{Fo} \equiv 2 + (Fo - Fo_{nf}) / (Fo_f - Fo_{nf}) = 2 \div 3$ [30]. Tuomet laiko tinklėlių (15) ciklo skaitinėje schemoje galima sugraduoti pagal universalus (39) ciklo pirmajam režimui apibrėžtą žingsnį:

$$\Delta \bar{Fo} = \frac{1}{I_{co} - 1}; \rightarrow \Delta Fo = \Delta \bar{Fo} \cdot Fo_{co}; \rightarrow \Delta \tau = \frac{\Delta Fo}{a_0 / R_0^2}; \rightarrow \tau_{i>1} = \tau_{i-1} + \Delta \tau. \quad (40)$$

Jei lašelio fazinių virsmų ciklas prasideda pereinamojo garavimo režimu, tuomet (40) schemoje $\Delta \bar{Fo} = 1 / (I_{nf} - 1)$ ir $\Delta Fo = \Delta \bar{Fo} \cdot Fo_{nf}$.

2.3.2. Skaitinė schema

Skaitinė schema sudaroma lašelio fazinių virsmų (16) lygties ir šilumos srautu lašelio paviršiuje balanso (31) lygčių sistemos pagrindu. Pritaikius (33) išraišką, laiko koordinatės integralas (9) išraiškoje bei, pritaikius (35) ir (36) išraiškas, radialinės koordinatės integralas (10) išraiškoje pakeičiami baigtinėmis integralų sumomis:

$$\int_0^{\tau} f_n \exp \left[-a \left(\frac{n\pi}{R} \right)^2 (\tau - \tau_*) \right] d\tau_* = \sum_{i=2}^I \hat{f}_{n,i} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \exp \left[-a \left(\frac{n\pi}{R} \right)^2 (\tau - \tau_*) \right] d\tau_* ; (41)$$

$$\hat{f}_{n,i} = \frac{f_{n,i-1} + f_{n,i}}{2} ;$$

$$\int_0^{R_i} q_r \left(\frac{n\pi r}{R} \cos \frac{n\pi r}{R} - \sin \frac{n\pi r}{R} \right) dr = R_i \int_0^1 q_r \cdot (n\pi\eta \cdot \cos n\pi\eta - \sin n\pi\eta) d\eta = (42)$$

$$= R_i \sum_{j=2}^J \hat{q}_{r,i,j} \int_{r_{j-1}}^{r_j} (n\pi\eta \cdot \cos n\pi\eta - \sin n\pi\eta) d\eta ;$$

$$q_{r,i,j} = \frac{q_{r,i,j-1} + q_{r,i,j}}{2} .$$

Tuomet integralai (41) ir (42) išraiškose lengvai išsprendžiami analitiškai. Lokaliniame spinduliuotės $q_{r,i,j}$ srautui lašelio vidiniuose r_i pjūviuose apskaičiuoti pritaikoma darbe [25] išsamiai aprašyta metodika.

Lašelio ŠMM $P_{i>1}$ parametrą apskaičiuoti nuosekliai, pradedant $\tau_{i=2}$ laiku, vykdomi iteraciniai $it \subset 1 \div IT$ ciklai ir τ_i laiko momentais lašelio paviršiaus momentinės $T_{R,i}$ temperatūros apibrėžiamos pagal (31) išraiškos pagrindu sudarytą skaitinę schemą:

$$\left(q_{r,J,i}^+ - q_{r,J,i}^- \right) + \lambda_{vg,i} \frac{T_g - T_{J,i,it}}{2R_{i,it-1}} \cdot \left[2 \frac{\ln(1 + B_{T,i,it})}{B_{T,i,it}} + 0,57 \frac{\text{Re}_{i,it}^{1/2} \text{Pr}_{i,it}^{1/3}}{(1 + B_{T,i,it})} \right] - (43)$$

$$- \frac{D_{vg,i,it} \mu_v}{T_{J,i,it} R_{\mu,i,it-1}} \left[p_{v,J,i,it} - p_{v,\infty} + \frac{\mu_v}{\mu_g} \cdot \left(p \ln \frac{p - p_{v,\infty}}{p - p_{v,R,i,it}} - p_{v,R,i,it} + p_{v,\infty} \right) \right] = q_{c,J,i,it}^- .$$

Skaitinėje (43) schemoje:

$$\begin{aligned}
q_{c,J,i,it}^- &= -2k_{c,i,it}^- \lambda_{J,i,it} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{n\pi}{R_{i,it-1}^2} \\
&\times \sum_{ii=2}^i \left[(-1)^n \frac{\hat{R}_{ii}}{n\pi} \frac{T_{J,ii} - T_{J,ii-1}}{\tau_{ii} - \tau_{ii-1}} + \frac{f_{q_r,i,ii}}{\hat{\rho}_{l,ii} \hat{c}_{p,l,ii} \hat{R}_{ii}} \right] \\
&\times \frac{1}{\hat{a}_{l,ii}} \left(\frac{\hat{R}_{ii}}{n\pi} \right)^2 \left\{ \exp \left[\hat{a}_{l,ii} \frac{n^2 \pi^2}{\hat{R}_{ii}^2} (\tau_{ii} - \tau_i) \right] - \exp \left[\hat{a}_{l,ii} \frac{n^2 \pi^2}{\hat{R}_{ii}^2} (\tau_{ii-1} - \tau_i) \right] \right\}; \\
\hat{\rho}_{l,ii} &= 0,5(\rho_{l,ii} + \rho_{l,ii-1}); \hat{c}_{p,l,ii} = 0,5(c_{p,l,ii} + c_{p,l,ii-1}); \hat{a}_{l,ii} = 0,5(a_{p,l,ii} + a_{l,ii-1})
\end{aligned} \tag{44}$$

Lašelio paviršiaus $T_{R,i,it}$ temperatūra iteracijai parenkama, o reikalingi parametrai apibrėžiami kaip $R_{i,it} \equiv R_{i,it-1}$, $q_{c,i,it}^+ \equiv q_{c,i,it-1}^+$ ir $q_{f,i,it}^+ \equiv q_{f,i,it-1}^+$. Lašelio matmuo patikslinamas po kiekvienos it iteracijos:

$$\begin{aligned}
R_{i,it}^3 &= R_{i-1}^3 - \frac{R_{i-1}^2 + R_{i,it-1}^2}{\rho_{l,m,i-1} + \rho_{l,m,i,it}} \\
&\div \left(3 \frac{m_{v,i-1}^+ + m_{v,i,it}^+}{2} + \frac{R_{i-1} + R_{i,it-1}}{4} \frac{\rho_{l,m,i,it} - \rho_{l,m,i-1}}{\tau_i - \tau_{i-1}} \right) (\tau_i - \tau_{i-1})
\end{aligned} \tag{45}$$

Svarbių parametų skaitinės schemos:

$$\begin{aligned}
B_{T,i,it} &= \frac{c_{p,gd,i,it} (T_d - T_{R,i,it})}{L_{i,it}} \left(1 - \frac{q_{c,i,it}^-}{q_{c,i,it}^+} \right); \\
k_{c,i,it}^- &= 1,86 + 0,86 \tanh \left(2,225 \log_{10} \frac{Pe_{l,i,it}}{30} \right); \\
Pe_{l,i,it} &= (R_{i,it-1}^2 \Delta w_{l,i,it}^2 / 8) \cdot (\rho_g / a_{l,i,it} \mu_{l,i,it}) \cdot C_{F,i,it}; \\
Re_{i,it} &\equiv 2R_{i,it-1} \Delta w_{l,i,it} \rho_g / \mu_{vg,i,it}; \\
w_{l,i,it} &= w_{l,i-1} + \frac{3}{8} \rho_d \frac{\hat{C}_{l,i,it} \Delta \hat{w}_{l,i,it} |\Delta \hat{w}_{l,i,it}|}{\hat{R}_{i,it} \hat{\rho}_{l,i,it}} (\tau_i - \tau_{i-1}); \\
C_{l,i,it} &= 24 + 4,8 \text{Re}_{i,it}^{0,63} / (1 + B_{T,i,it})^{0,2} \cdot \text{Re}_{i,it}; \\
\Delta \hat{w}_{l,i,it} &= 0,5(w_{l,i-1} + w_{l,i,it}) - w_d; \hat{C}_{l,i,it} = 0,5(C_{l,i-1} + C_{l,i,it}); \\
\hat{R}_{i,it} &= 0,5(R_{i-1} + R_{i,it-1}); \hat{\rho}_{l,i,it} = 0,5(\rho_{l,i-1} + \rho_{l,i,it})
\end{aligned} \tag{46}$$

Pateiktos skaitinės schemos yra universalios visam fazinių virsmų (15) ciklui.

3. TYRIMO REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

Išpurkšto vandens lašelio geometrinei, terminai ir energinei būsenai drėgname ore apibrėžti modeliuojamas fazinių virsmų režimų ciklas (15) skirtingomis vandens lašelių ŠMM kraštinėmis sąlygomis. Pradžioje pagrindžiamas skaitinės schemos tinklelio gradavimas ir modeliavimo rezultatų patikimumas.

3.1. Skaitinės iteracinės schemos tinklelio pagrindimas

Skaitinės iteracinės schemos funkcionalumas ir lašelio fazinių virsmų skaitinio modeliavimo rezultatų patikimumas priklauso nuo tinkamo laiko, radialinės ir spinduliavimo spektro sugradavimo pagal I , J ir M parametrus. Be to, svarbu apibrėžti optimalų įvertintinų narių N_{op} skaičių nestacionarųjų temperatūros lauką aprašančioje begalinėje integralinėje lygčių (9) eilutėje, kadangi skaitinė schema su begaliniu narių skaičiumi negalima.

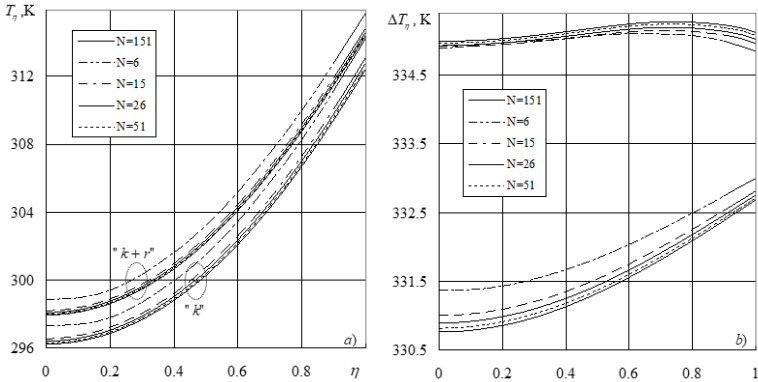
Sudėtinės lašelio šilumokaitos atveju, apskaičiuojant lokalinį spinduliuotės $q_{r,i,j}$ srautą, laikomasi darbe [22] pateiktų rekomendacijų. Įvertintinas spinduliuotės spektras apibrėžiamas šviesos bangos ilgiais $l_{\min} = 0,8 \mu m$ ir $l_{\max} = 200 \mu m$, kadangi optiniams efektams lašelio paviršiuje ir šviesos sugėrimo koeficientui lašelyje apibrėžti reikalingas vandens kompleksinis spektrinis lūžio rodiklis šiame bangų ilgyje yra kruopščiai ištirtas [32]. Sugraduojant spinduliuotės spektrą atsižvelgta, kad vandens kompleksinio lūžio spektrinio rodiklio sugėrimo ir lūžio dedamosios kinta pagal labai sudėtingas ir daug ekstremumo taškų trumpų bangų srityje turinčias kreives [32]. Todėl šviesos spindulio suintegravimą pagal spinduliavimo bangos ilgį trumpųjų bangų spektro dalyje reikia sutankinti. Tam šviesos bangų $l_{\min} \div l_{\max}$ intervalas pakeičiamas į banginio skaičiaus kitimo intervalą $\omega_{\min} = 1/l_{\max} \div \omega_{\max} = 1/l_{\min}$, kurio nekintantis žingsnis

$$\Delta\omega = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{M - 1}, m^{-1} \quad (47)$$

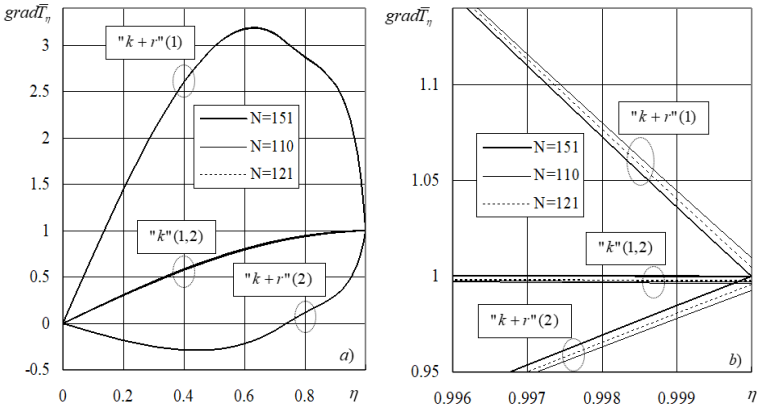
užtikrina netiesinį ir labai smarkai sutankintą spinduliavimo spektro sugradavimą pagal bangos ilgį. Tai sudaro prielaidas, apskaičiuojant lokalinį spinduliuotės srautą pagal (5-8) sistemos pagrindu sudarytą modelį [22], kruopščiai atsižvelgti į optinių spektrinių šviesos efektų (atspindys išoriniame ir vidiniame paviršiuje, lūžis pereinant iš oro į vandenį, sugėrimas vandenyje, pilnas vidinis atspindys krintant kampu didesniu už Briusterio kampą) įtaką. Atliekant skaitinius tyrimus taikytas $M = 101$ parametras parinktas atsižvelgus į $M > 80$ darbo [32] rekomendaciją bei įvertinus išaugusį šiuolaikinių kompiuterių skaičiavimo greitį. Tačiau dėl iteracinių skaičiavimo specifikos apskaičiuojant spinduliuotės srautą it_i

iteraciniam ciklui taikyta $q_{r,i,j,it} \equiv q_{r,i-1,j}$ sąlyga, o $q_{r,i,j}$ apibrėžtas iteraciniam ciklui pasibaigus. Parametrams N ir J apibrėžti pritaikytas vienodas metodas. Jis grįstas tuo, jog, įvertinant daugiau begalinės eilutės narių ir smulkesniu $\Delta\eta$ žingsneliu suskaidant universalų vienetinį lašelio spindulį pagal (37) schemą, (9–10) išraiškų pagrindū apibrėžiami lašelio terminiai parametrai bus apskaičiuojami tiksliau.

Atliktas $T_0 = 290\text{K}$ temperatūros 300 mikrometrų skersmens vandens lašelio pereinamųjų fazinių virsmų režimo 0,1 MPa slėgio ir 1000 K temperatūros drėgname $\bar{p}_{v,\infty} = 0,25$ ir sausame ore skaitinis tyrimas " k " ir " $k+r$ " šilumokaitos atvejais.

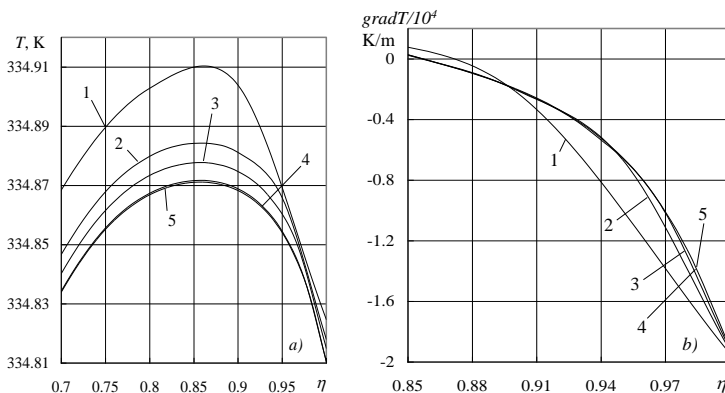


6 pav. Parinkto N įtaka lašelio apskaičiuotajai temperatūrai, kai $\bar{F}o = 0,2$ (a) ir $\bar{F}o = 1$ (b). $\Delta T_\eta = T(\eta, Fo, N = 151) - T(\eta, Fo, N)$. $\bar{p}_{v,\infty} = 0,25$



7 pav. Parinkto N įtaka temperatūros lokaliniam gradientui lašelyje (*a*) ir jo paviršiniuose sluoksniuose (*b*). Šildymo laikas \bar{Fo} : (1) 0,2, (2) 1. $grad\bar{T}_\eta \equiv gradT(\eta, N) / gradT(\eta=1, N=151)$. $gradT_{"k"}(\eta=1, N=151)$, K/m: (1) 412124,1, (2) 41457,2; $gradT_{"k+r"}(\eta=1, N=151)$, K/m: (1) 386942,2, (2) -28314,7. $\bar{p}_{v,\infty} = 0,25$

Teigta, jog spinduliuoja oro temperatūros juodas šaltinis. Parametrai M ir I išlaikyti pastoviais ($M = 101$, $I = 41$, kai $Fo_{nf,"k"} \equiv 0,7$), o parametrais N ir J buvo varijuota dvejopai. Pirmu atveju parinkus $J = 61$, o N nuosekliai didintas ir apibrėžtas $N_{op} = 121$. Antruoju atveju $N = 121$, o J nuosekliai didintas ir apibrėžtas $J_{op} = 41$.



8 pav. Lašelio radialinės koordinatės gradavimo įtaka temperatūros laukui lašelyje *a*) ir jo gradientui *b*) lašelio terminės būsenos kitimo pereinamajame periode, kai J : (1) 11; (2) 21; (3) 31; (4) 41; (5) 61; $Fo = 0,84$; $\bar{p}_{v,\infty} = 0$

Palyginamajam apskaičiuoto nestacionariojo temperatūros lauko (6 pav.) ir jo gradiento (7 pav.) rezultatų įvertinimui atlikti pasirinkti intensyviam pradiniam šilumui ir baigiamajam pereinamojo garavimo režimui atstovaujantys $\bar{Fo} = 0,2$ ir $\bar{Fo} = 1$ laiko momentai. Pradinėje intensyvaus šilimo stadijoje lašelis sudėtinio šildymo atveju šyla sparčiau, tačiau kokybiškai temperatūros susiskirstymas lašelyje "k" ir "k+r" šilumokaitos atvejais yra toks pat (6 pav. a). Tačiau baigiamajame pereinamųjų fazinių virsmų stadijoje "k+r" šilumokaitos atveju lašelis pašyla ryškiau iki aukštesnės temperatūros (6 pav. b), ir iš esmės pakinta jo temperatūros lauko gradientas (7 pav.).

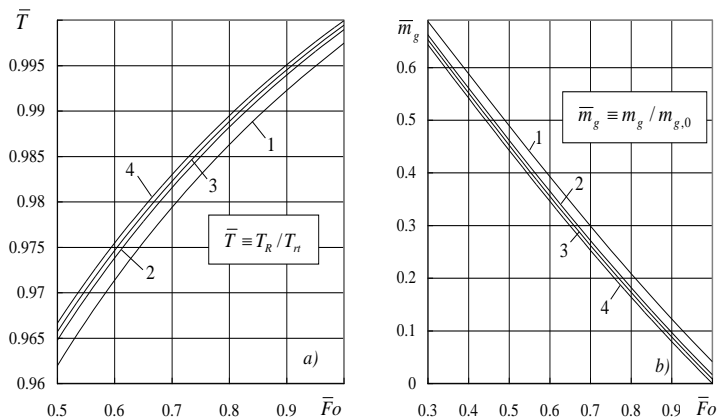
Išryškinant begalinėje sumoje įvertinamų narių įtaką apskaičiuotosioms $T(\eta, Fo, N)$ funkcijoms, N nuosekliai didintas nuo 5 iki 151. Atliekant palyginamąją apskaičiuotosios lašelio terminės būsenos analizę atraminiau laikytas

modeliavimo atvejis, kai $N=151$. Parinktas skaičius N turi didelę įtaką apskaičiuotajai lašelio terminio būsenai visame modeliuotame fazinių virsmų cikle. Tačiau didesniems N apskaičiuotojo temperatūros lauko $T(\eta, Fo, N)$ grafikai sparčiai artėja prie funkcijos $T(\eta, Fo, N=151)$ grafiko (6 pav. a), ką taip pat patvirtina ir $\Delta T_\eta = T(\eta, Fo, N=151) - T(\eta, Fo, N)$ kitimas (6 pav. b). Kai $N=101$, tuomet $\Delta T_\eta < 0,04 K$ pradinėje šilimo stadijoje ir $|\Delta T_\eta| < 0,02 K$ baigiamojoje pereinamojo garavimo stadijoje. Optimalia pripažinta $N=121$ vertė, užtikrinanti $\Delta T_\eta < 0,01 K$ sąlygą (6 pav. b) bei didelį gradiento apskaičiavimo pasikliautinumą (7 pav.).

Radialinės koordinatės sudalinimas analizuotas lašelio " $k+r$ " šilumokaitos sausame ore atveju (8 pav.). Sudalinimų skaičius J keistas nuo 11 iki 61, kai $N=121$, $I=41$, $M=101$. Radialinė koordinatė graduota tiesiškai: $\eta_j = (j-1)/(J-1)$, kai $j=1 \div J$. Dalinimų skaičiaus J įtaka apskaičiuotosioms terminių parametrų temperatūros lauko $T(\eta, Fo, J)$ (8 pav. a) ir jo gradiento $\text{grad}T(\eta, Fo, J)$ (8 pav. b) funkcijoms gana ryški esant mažesnėms J vertėms. Tačiau, esant $J=41$ ir daugiau, apskaičiuotųjų $P_T(\eta, Fo, J)$ funkcijų grafikai praktiškai sutampa su funkcijos $P_T(\eta, Fo, J=61)$ grafiku (8 pav.). Todėl optimaliu pripažintas radialinės koordinatės gradavimo $J=41$ atvejis.

Tikėtis apibrėžti visiems galimiems vandens lašelių fazinių virsmų ciklo atvejams optimalų laiko koordinatės tinklelio gradavimą nerealu, kadangi atskirų režimų trukmės realiame laike gali labai skirtis. Čia labai svarbus išpurškiamo vandens temperatūros faktorius. Kaip jau aptarta, fazinių virsmų režimų kaitai labai svarbios yra rasos taško T_{dp} temperatūra ir lašelių pusiausviro garavimo T_e temperatūra. Apibrėžiant laiko koordinatės tinklelį pagal (40) schemą reikia atsižvelgti, kuriai iš šių temperatūrų yra artimesnė į drėgną orą įpurškiamo vandens T_0 temperatūra. Jeigu $T_0 < T_{dp}$, tuomet būtina įvertinti, jog, keičiantis lašelio paviršiuje fazinių virsmų režimui iš kondensacinio į garavimo režimą, garo srautas lašelio paviršiuje pakeičia kryptį, pereinamas nulinę vertę. Todėl laiko $\tau_i \approx \tau_{co}$ momentu vykdomame iteraciniame cikle parenkama $T_{J,i,it}$ temperatūra gali pradėti svyruoti rasos taško T_{dp} temperatūros atžvilgiu ir (34) sąlyga gali tapti praktiškai neįgyvendinama. Todėl pradžioje tenka kondensacinį režimą modeliuoti individualiai ir būtina apibrėžti tokį laiko kitimo jame žingsnį, kad, perėjus į nuoseklų viso ciklo modeliavimą, būtų išvengta aptarto neapibrėžtumo. Čia iškyla tam tikra dilema, kadangi parinktas laiko kitimo žingsnis privalo ne tik užtikrinti ir kitų režimų sumodeliavimą priimtinomis mašininio skaičiavimo laiko sąnaudomis, bet ir pakankamai kruopščiai leistų apibrėžti pernašos procesų sąveiką kondensaciniame fazinių virsmų režime.

Bendram pažinimui suvokti sumodeliuotas 150 mikrometrų skersmens 290 K temperatūros vandens lašelio kondensacinis režimas 1000 K temperatūros $\bar{p} = 0,25$ drėgnumo ore "k" šilumokaitos atveju. Pradžioje, (40) laiko koordinatės schemoje numačius $I = 61$ vertę, apibrėžta pakankamai tiksli kondensacinio režimo $Fo_{co,"k"} = 0,1583$ trukmė, kai lašelio paviršius pašyla iki rasos taško temperatūros. Po to įvertinta mažesnės I vertės įtaka apskaičiuotajai lašelio paviršiaus temperatūros $\bar{T}(\bar{Fo}) \equiv T_R(Fo/Fo_{co,"k"})/T_{dp}$ funkcijai (9 pav. a) bei bemačio garo srauto tankio $\bar{m}_v(\bar{Fo}) \equiv m_v^+(Fo/Fo_{co,"k"})/m_{v,0}^+$ funkcijai (9 pav. b), kai I parametras kas dešimt mažinamas iki 11 (9 pav.).

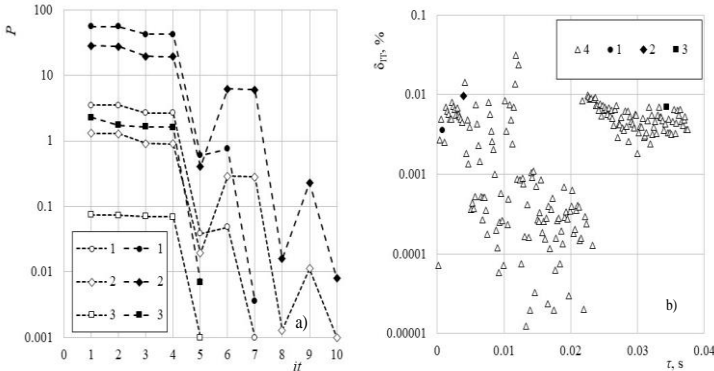


9 pav. I parametro laiko koordinatės gradavimo (40) schemoje įtaka apskaičiuotajai lašelio paviršiaus temperatūrai (a) ir apskaičiuotajam vandens garo srauto tankiui (b) kondensaciniame fazinių virsmų režime "k" šilumokaitos atveju. I : (1) 11, (2) 21, (3) 31, (4) 61

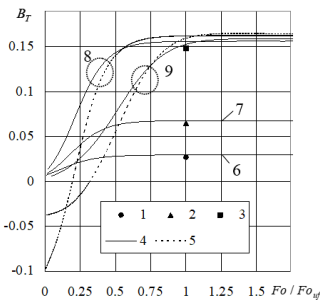
Atlikto skaitinio eksperimento rezultatais patvirtinta (9 pav.), kad, parametą I parenkant tarp 20 ir 30, pasiekiami artimi $I = 61$ gradavimo atvejui kondensacinio režimo modeliavimo rezultatai. Todėl tolimesniems skaitiniams tyrimams numatyta kūrybingai taikyti artimą $I_{co} = 21$ laiko tinklelio gradavimo pagal (40) schemą atvejį, papildomai kontroliuojant nuoseklaus perėjimo į garavimo režimą užtikrintumą ir visam fazinių virsmų ciklo sumodeliuoti reikalingo mašininio skaičiavimo laiko priimtimumą, kas ypač aktualu sudėtinio šildymo atvejais.

3.2. Skaitinės schemos kontrolė ir patikimumas

Greičiausio nusileidimo metodu vykdomų iteracinių $it \equiv 1$ to IT ciklų ir jų kontrolės pavyzdžiai pateikti 10 pav. Analogiška (34) reikalavimo tenkinimo kontrolė vykdyta visais vandens lašelių fazinių virsmų skaitinio modeliavimo atvejais. Lašelio paviršiaus momentinė temperatūra $T_{R,i,it=IT}$ baigiamojoje iteracijoje IT turi užtikrinti, kad apskaičiuoti šilumos srautai atitiktų sąlygos (31) keliamą reikalavimą, o didžiausia paklaida būtų 0,05% .



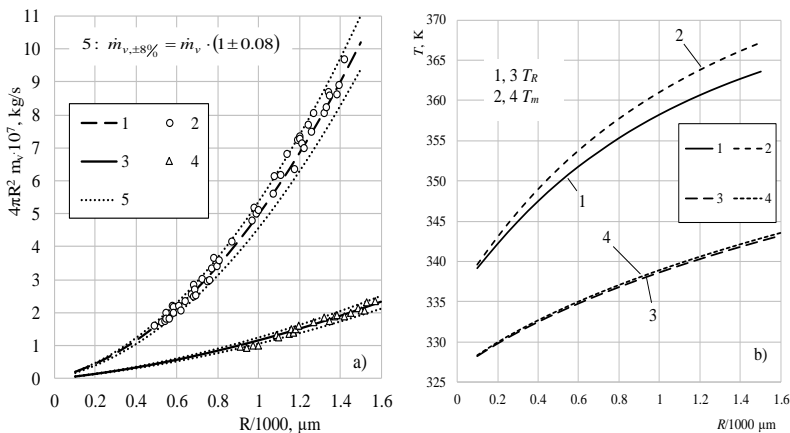
10 pav. Greičiausio nusileidimo metodu vykdomų iteracinių $it \equiv 1 \div IT$ ciklų T_R temperatūrai apibrėžti pavyzdžiai (a) ir apskaičiuotųjų šilumos q_i srautų balanso lašelio paviršiuje sąlygos (31) užtikrinimo kontrolė (b). $T_g = 1133K$; $\bar{p}_V = 0,2$; $w_g = 15 \text{ m/s}$; $T_{l,0} = 306K$; $R_0 = 0,0005m$; $w_{l,0} = 65m/s$; τ, S : (1) 0,00075, (2) 0,00394, (3) 0,0343; Balti taškai $P \equiv |T_{R,it} - T_{R,IT}| + 0,001, K$; juodi taškai $P \equiv \delta_{it}, \%$



11 pav. Spoldingo šilumos pernašos parametras pereinamųjų fazinių virsmų režime ir pusiausviros garavimo pradinėje stadijoje "c" šilumokaitos atveju: (1–3) M.C. Yuen ir L.W. Chen eksperimento taškai [33]; (4–9) skaičiavimo rezultatai; T_g, K : (1, 6) 373, (2, 7) 473, (3, 8, 9) 673; $\bar{p}_{V,\infty}$: (4) 0, (5) 0.1; Re_0 : (6–8) 0, (9) 50; $R_0 = 100$

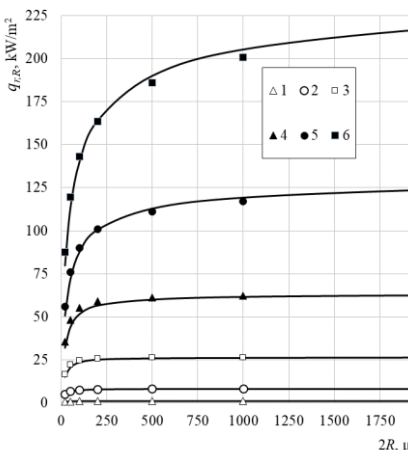
Lašelio vidinės šilumokaitos savitumai apibrėžia Spoldingo šilumos parametro $B_T(Fo)$ funkcijos dėsninumus (11 pav.). Visame pereinamųjų fazinių virsmų režime lašelio temperatūros lauko gradientas "c" šilumokaitos atveju yra

teigiamas, todėl (30) išraiška aprašomas B_T parametras už (23) išraiška aprašomą $B_{T, "c"}$ parametru yra mažesnis: $B_T(Fo < Fo_{nf}) < B_{T, "c"}$. Kondensaciniame režime $q_{c, "c"}^- / q_{c, "c"}^+ > 1$, nes vidine konvekcija į lašelį nuvedama ir kondensacijos procese išsiskyrusi šiluma, todėl apskaičiuotasis B_T parametras yra neigiamas (11 pav.), o jo funkcija išraiškoje apibrėžia konvekcinio šildymo sustiprėjimą veikiant garo kondensacijai. Pereinamajame garavimo režime $q_{c, "c"}^- / q_{c, "c"}^+ < 1$, todėl apskaičiuotasis B_T parametras yra teigiamas ir įvertina, kad lašelį šildanti išorinės konvekcijos šilumos dalis vandens garinimo procese nedalyvauja. Spoldingo šilumos pernašos parametro $B_T(Fo)$ funkcijos pereinamųjų fazinių virsmų režime priklauso nuo dujų drėgnumo ir temperatūros bei lašelių šilumokaitą apibrėžiančių faktorių. Skirtingos dujų temperatūros sraute apskaičiuotųjų $B_T(Fo)$ grafikų $B_T(\overline{Fo}=1) \equiv B_{T, "c"}$ taškai lašelių "c" šilumokaitos atveju pakankamai gerai koreliuoja su darbo [33] eksperimentinių tyrimų rezultatais (11 pav.).



12 pav. Lašelio stambumo ir dujų temperatūros įtaka garo srautui a) ir lašelio terminai būsenai b) pusiausvirai garuojančiam lašeliui sudėtinio šildymo atveju. T_g , K (1, 2) 1133, (3, 4) 678; $\overline{p}_v \approx 0$; $w_g = 0,01$ m/s; $w_l = 0$ m/s; linijos – modeliavimo rezultatai; taškai – eksperimento [34] rezultatai

Skysčio dispergavimo technologijoms svarbi charakteristika – garo srautas. Jis apskaičiuotas skirtingo skersmens pusiausvirai garuojančių vandens lašelių 678 K ir 1133 K temperatūros ore sudėtinio šildymo atveju ir palygintas su darbo [34] eksperimento rezultatais (12 pav. a). Norint skaitiškai atkartoti darbe išlaikytas lašelių sudėtinio šildymo kraštines sąlygas, buvo pritaikytas pastovaus tūrio lašelio šilumokaitos modelis, kai jį 0,01 m/s greičiu apteka oro srautas, užtikrinantis $R(\tau) = R_0$ ir $Re(\tau) = Re_0$ sąlygas. Taip pat numatytas oro temperatūrą turinčio spinduliuotės šaltinio egzistavimas. Tuomet pereinamojo garavimo režime lašelis pašyla iki pusiausvirą garavimą užtikrinančios apskaičiuotosios terminės būsenos (8 pav., b), kuriai esant garo srautą apibrėžianti paviršiaus temperatūra pusiausviro garavimo režime išlieka pastovi. Analogiškai grafikai buvo sudaryti $2R$ skersmens lašeliams, kai $R \equiv 100 \div 1600 \mu m$ kai $\Delta R = 50 \mu m$. Pagal šiuos grafikus apibrėžtas nuo pusiausvirai garuojančio $2R$ skersmens lašelio sklindantis garo $\dot{m}_{v,e}$ srautas 1133 K ir 678 K temperatūros atvejais. Po to sudaryti konvekcija ir spinduliuavimu šildomų lašelių paviršiuje garo srautą apibrėžiančių funkcijų $\dot{m}_{v,e}(R)$ grafikai (12 pav.; 1 ir 3 kreivės). Apskaičiuotųjų garo srautų $\dot{m}_{v,e}(R)$ grafikai $\pm 8\%$ pasikliautinumu apibrėžia visus darbo [34] eksperimentinių tyrimų rezultatus atitinkamos oro temperatūros (12 pav.), eksperimentatorių teigimu, jie yra apibrėžti su $\pm 5\%$ paklaida.



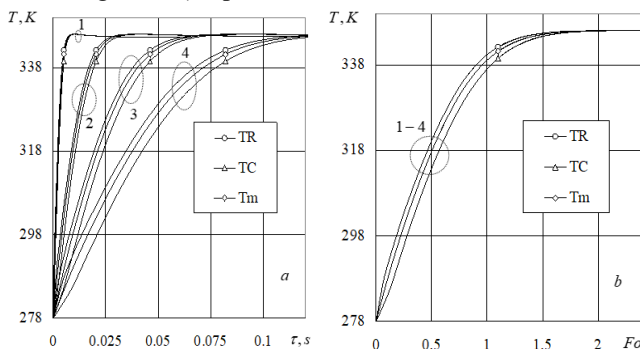
13 pav. Pusiau skaidriame vandens lašelyje sugeriamas spinduliuotės srautas. $T_l = 373 K$; (a): T_{sr}, K : (1) 450, (2) 650, (3) 850, (4) 1050, (5) 1250, (6) 1450; $R \cdot 10^6, m$: (1) 20, (2) 50, (3) 100, (4) 200, (5) 500, (6) 1000, (7) 2000 (8) 3000; linijos – skaitinis tyrimas; taškai – Harpole skaitinio modeliavimo apibendrinti rezultatai [27]

Darbo metu buvo atliktas pusskaidrio vandens lašelio sugeriamo spinduliuotės srauto palyginimas su autoriaus Harpole pateiktais apibendrintais skaitinio srauto

modeliavimo rezultatais [27]. Apskaičiuotasis 373 K temperatūros vandens lašelyje sugeriamas spinduliuotės srautas priklauso nuo lašelio skersmens ir spinduliuotės šaltinio temperatūros ir gerai koreliuoja su darbe [27] pateiktais tyrimų rezultatais (13 pav.).

3.3. Lašelio temperatūros režimo analizė

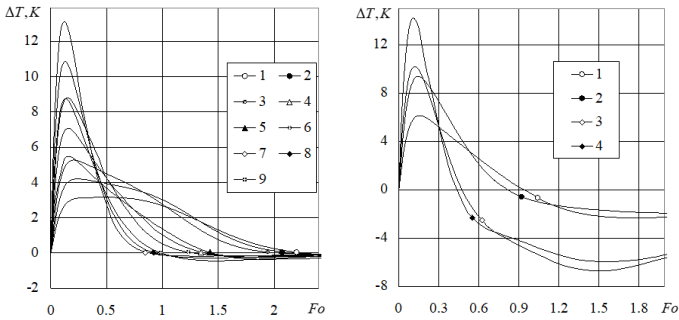
Lašelio terminiai parametrai yra susiję su temperatūros susiskirstymo lašelyje kitimą aprašančia nestacionariojo temperatūros lauko $T(r, \tau)$ funkcija. Pagal šią funkciją apibrėžiamos lašelio šilumokaitai ir faziniams virsmams labai svarbios lašelio paviršiaus temperatūros $T_R(\tau) \equiv T(r = R, \tau)$ ir centro $T_C(\tau) \equiv T(r = 0, \tau)$ temperatūrų funkcijos. Pagal (18) išraišką apibrėžiama lašelio masės vidutinės temperatūros $T_m(\tau)$ funkcija. Realiame laike šias temperatūras aprašančių funkcijų grafikai yra jautrūs lašelių dispersiškumui (14 pav., a). Šių temperatūrų funkcijas Furje kriterijaus laiko mastelyje galima atspindėti vienu grafiku (14 pav., b).



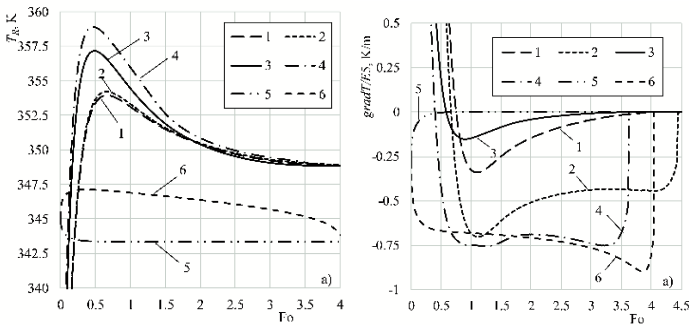
14 pav. Lašelio terminių parametų $T_R(\tau)$, $T_C(\tau)$, ir $T_m(\tau)$, funkcijų grafikai realaus laiko (a) ir Furje kriterijaus laiko (b) masteliuose. Lašelio pradinis skersmuo $2R_0 \cdot 10^6$, m: (1) 50, (2) 100, (3) 150, (4) 200; $Re_0 = 15$

Pusiausvirai garuodamas lašelis aušta dėl slydimo greičio mažėjimo ir nuosekliai artėja prie "k" šilumokaitos atveju izotermiškos būsenos, kurią apibrėžia $T_{e, "k"}$, antrasis neizotermiškumas pusiausviro garavimo metu nuosekliai silpnėdamas išnyksta (15 pav., a). Sudėtinio šildymo atveju lašelio terminės būsenas kitimas pasikeičia iš esmės, tai aiškiai iliustruoja neizotermiškumo lašelyje dinamika (15 pav., b). Esminiai lašelio terminės būsenos pokyčiai sudėtinės "c+r" šilumokaitos atveju yra susisiję su neigiamo

gradiento temperatūros lauko lašelyje susiformavimu dar nepasibaigus pereinamajam garavimo režimui.



15 pav. a) dujų drėgnumo ir temperatūros įtaka slystančio lašelio neizotermiškumui $\Delta T = T_R - T_C$ pereinamųjų fazinių virsmų režime "c" šilumokaitos atveju. $Re_0 = 50$; T_g, K (1–3) 533, (4–6) 833, (7–9) 1133; $\bar{p}_{g,\infty}$: (1, 4, 7) 0, (2, 5, 8) 0,15, (3, 6, 9) 0,3; b) dujų drėgnumo ir temperatūros įtaka slystančio lašelio neizotermiškumui $\Delta T = T_R - T_C$ pereinamųjų fazinių virsmų režime "c+r" šilumokaitos atveju. $Re_0 = 50$; T_g, K (1, 2) 833, (3, 4) 1133; $\bar{p}_{g,\infty}$: (1, 3) 0, (2, 4) 0,3



16 pav. Vandens lašelių dispersiškumo ir šildymo proceso įtaka jų paviršiaus temperatūros (a) ir temperatūros lauko gradiento lašeliuose dinamikai. $R_0 \times 10^6, m$: (1, 2) 50, (3, 4) 100, (5, 6) 1500; \bar{T}_{sr} : (1, 3, 5) 0, (2, 4, 6) 1; Re_0 : (1, 2) 49,4, (3, 4) 246,98, (5, 6) 0; $T_{l,0}, K$: (1–4) 306, (5, 6) 358; $w_{l,0}, m/s$: (1–4) 65, (5, 6) 0; $w_g, m/s$: (1–4) 15, (5, 6) 0; $T_g = 1133 K$; \bar{p}_v : (1–6) 0,2, (7, 8) 0; a_0 / R_0^2 : (1, 2) 53,572, (3, 4) 2.14288, (5, 6) 0,059524

Pradinėje kondensacinio režimo stadijoje temperatūrų skirtumas $\Delta T_{R,C}$ lašelyje auga ir pasiekia pirmąjį piką, nepriklausomai nuo lašelio šildymo

atveju. Tuomet $\Delta T_{R,C}$ šylančiuose lašeliuose modeliuotu atveju gali išaugti daugiau nei 12 K (15 pav.). Po to neizotermiškumas lašeliuose sparčiai mažėja. Pusiausvirai garuojančių vandens lašelių $\Delta T_{R,C}$ yra praktiškai nereikšmingas konvekcinio šildymo atveju. Dėl spinduliavimo poveikio garuojančiuose ir šylančiuose lašeliuose susiformuoja ryškesnis antrasis neizotermiškumo pikas. Antrasis neizotermiškumo pikas yra silpnesnis už pirmąjį, tačiau gali siekti iki 7 K (15 pav., b).

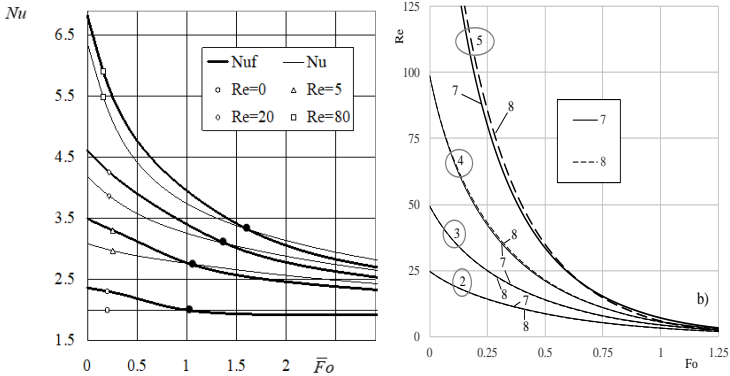
16 pav. atspindėtas vandens lašelių terminės būsenos kitimas vykstant skirtingam lašelių šildymo procesui. Pradinėje fazinių virsmų stadijoje šalto 306 K temperatūros vandens lašeliai šyla (16 pav.; 1–4 ir 6 kreivės), o šilto 358 K temperatūros vandens lašeliai aušta (16 pav.; 5 kreivė). Lašelių terminės būsenos kitimo savitumai aiškiai atsispindi temperatūros gradiento lašeliuose dinamikoje (16 pav., b). Sudėtinio šildymo atveju temperatūros lauko lašelyje gradientas, pereinamųjų fazinių virsmų režime pereinamas nulinę vertę, pakeičia savo vektoriaus kryptį ir pasiekia maksimalią vertę (16 pav., b; 2, 4 ir 6 kreivės). O konvekcinio šildymo atveju temperatūros lauko lašelyje gradientas pereinamųjų fazinių režime nuosekliai pasiekia nulinę vertę ir vektoriaus kryptį pakeičia tik lašeliui pradėjus pusiausviro garavimo režime aušti (16 pav., b; 1, 3 kreivės). Šildomo laidumu lašelio temperatūros lauko gradientas pradinėje pusiausviro garavimo stadijoje nuosekliai priartėja prie nulio, ir vėliau jo nulinė vertė išlieka (16 pav., b; 5 kreivė), todėl 358 K temperatūros lašelis ataušta iki apskaičiuotosios 336,17 K temperatūros, ir toliau jo terminė būsena nepakinta (16 pav.; 5 kreivė).

Vienodo pradinio slydimo lašeliams galioja "k" šilumokaitos atvejui gerai žinomas lašelių pernašos parametrų bemačių $\bar{P}(Fo)$ funkcijų grafikų universalumas lašelių dispersiškumo atžvilgiu išpurškiamo vandens temperatūra T_0 , dūmų temperatūra T_g bei drėgnumu $\bar{p}_{g,\infty}$ apibrėžtu atveju. Todėl vandens lašelių fazinių virsmų ciklą Furje laiko mastelyje, parinktame pradinių parametrų Re_0 , T_0 , T_g ir $\bar{p}_{g,\infty}$ atvejui, galima apibrėžti pagal laisvai parinkto dispersiškumo lašelio šilumos ir masės mainų modeliavimo rezultatus. Tai sudaro prielaidą optimizuoti „lašo“ tyrimo skaitinį eksperimentą, kas labai svarbu optimaliam vandens išpurškimui plačiame kraštinių šilumokaitos sąlygų diapazone apibrėžti.

3.4. Lašo šilumos srautų analizė

Lašelių energinės būsenos kitimui svarbus faktorius yra lašelių slydimo oro sraute dinamika. Lašelio slydimas oro sraute veikiant pasipriešinimo

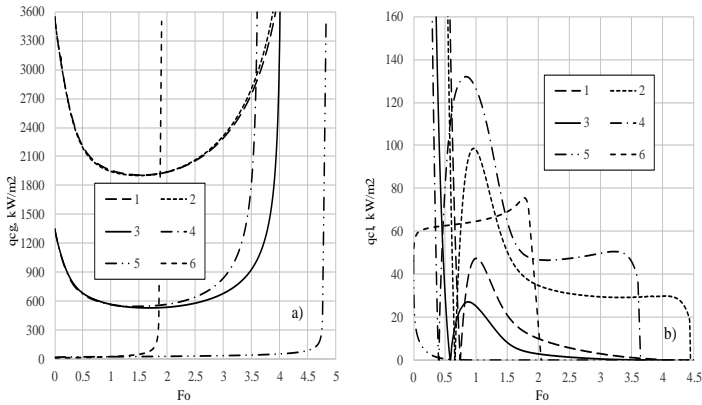
jėgoms slopsta (17 pav., b). Sparčiausiai lašelio greitis kinta kondensaciniame fazinių virsmų režime, o garavimo režime lašelio slydimas tampa nereikšmingas. Todėl lašelio energinės būsenos analizėje pagrindinis dėmesys skirtas kondensaciniam ir pereinamojo garavimo režimams.



17. pav. a) Lašelio slydimo dujų sraute įtaka konvekcinio šildymo intensyvumui. $T_0 = 278\text{K}$, $T_g = 500\text{K}$, $2R_0 = 150 \cdot 10^{-6}\text{ m}$, $\bar{p}_{v,\infty} = 0,3$, Re_0 : (1) 0, (2) 5, (3) 20, (4) 80, $w_g \equiv 10\text{ m/s}$; b) Reinoldso kriterijaus kitimas (b) \bar{T}_{sr} : (7) 0, (8) 1; $R \cdot 10^6$, m: (1) 10, (2) 25, (3) 50, (4) 100, (5) 250, (6) 500; $q_{r,R}$, kW/m^2 : (1) 39,77, (2) 53,78, (3) 63,64, (4) 71,31, (5) 77,93, (6) 81,19; $T_{l,0}$, K: (a) 306, (b) 358; $w_{l,0} = 65\text{ m/s}$; $T_g = 1133\text{ K}$; $w_g = 15\text{ m/s}$; $\bar{p}_v = 0,2$

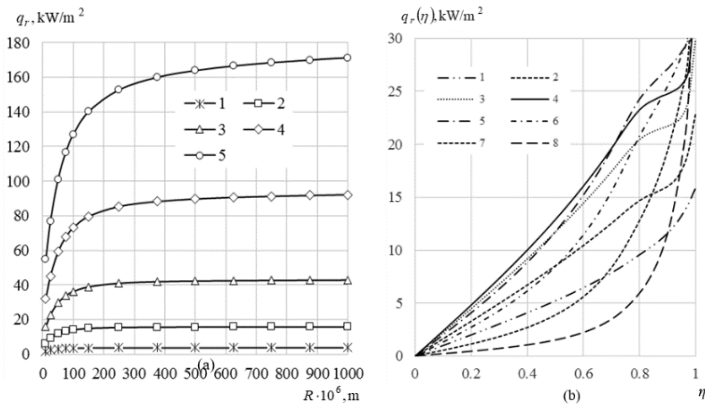
Konvekcinio šildymo atveju lašelio šildymo intensyvumas kondensaciniame fazinių virsmų režime viršija analogišką kietos dalelės šildymo atvejį, kai jo paviršiuje faziniai virsmai nevyksta. Pereinamojo garavimo režime lašelio šildymo intensyvumas yra silpnesnis nei kietos dalelės, o režimų kaitos momentu (juodi taškai 17 pav., a) jį atitinka.

Vienodo skersmens lašeliams teikiamos konvekcinės šilumos srauto $q_{c,g,c}$ ir $q_{c,g,cr}$ tankiai pereinamajame fazinių virsmų režime yra artimi, o pusiausviro garavimo baigiamojoje stadijoje sudėtinio šildymo atveju $q_{c,g,cr}$ pradeda augti sparčiau (18 pav., a) dėl spartesnio intensyviau garuojančių lašelių mažėjimo (18 pav., a).



18 pav. Lašeliams teikiamos konvekinės šilumos srauto tankio (a) ir konvekinės šilumos srauto lašeliuose tankio (b) dinamika. $R_0 \times 10^6$, m: (1, 2) 50, (3, 4) 100, (5, 6) 1500; \bar{T}_{sr} : (1, 3, 5) 0, (2, 4, 6) 1; Re_0 : (1, 2) 49.4, (3, 4) 246.98, (5, 6) 0; $T_{l,0}$, K: (1–4) 306, (5, 6) 358; $w_{l,0}$, m/s: (1–4) 65, (5, 6) 0; w_d , m/s: (1–4) 15, (5, 6) 0; $T_d = 1133$ K; \bar{p}_g : (1–6) 0,2, (7, 8) 0; a_0 / R_0^2 : (1, 2) 53,572, (3, 4) 2,14288, (5, 6) 0,059524

Pusskaidriame vandens lašelyje sugeriamas spinduliuotės srautas priklauso ne tik nuo spinduliuavimo šaltinio temperatūros, bet ir nuo lašelio dydžio (19 pav.). Lašelio stambumas apibrėžia spinduliuotės sugėrimo procesą. Stambesnių lašelių paviršiniuose sluoksniuose sugėrimas yra intensyvus ir gana staigiai silpnėjantis (19 pav.; 6–8 kreivės). Vidutiniuose lašeliuose didesnę įtaką įgauna šviesos atspindžio vidiniame lašelio paviršiuje reiškiniai, todėl spinduliuotės sugėrimas šiuo atveju yra labai netolygus (19 pav.; 2–5 kreivės). Smulkiuose lašeliuose spinduliuotės sugėrimas vėl yra tolygesnis (19 pav.; 1 kreivė), tačiau spinduliuotės srautas centriniuose lašelio sluoksniuose, palyginti su stambiais lašeliais, santykinai stipresnis. Taigi sudėtinio šildymo atveju skirtingo stambumo lašelių fazinių virsmų ciklą tenka modeliuoti individualiai.



19 pav. Pusiau skaidriame vandens lašelyje sugeriamas spinduliuotės srautas (a) ir jo susiskirstymas lašelio vidiniuose sluoksniuose (b). $T_l = 350 \text{ K}$; (a): T_{sr}, K : (1) 573, (2) 773, (3) 973, (4) 1173, (5) 1373; (b): $R \cdot 10^6, \text{m}$: (1) 10, (2) 25, (3) 50, (4) 75, (5) 150, (6) 250, (7) 500 (8) 1000; $T_{sr} = 973 \text{ K}$

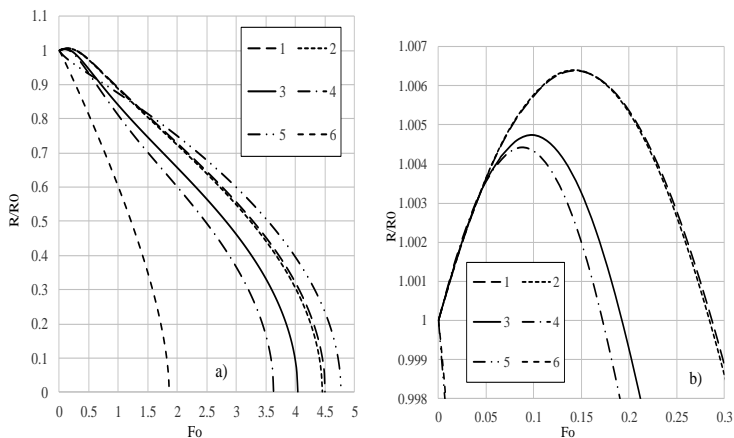
Didėjant dujų temperatūrai, spinduliuotės indėlis lašelio šildymo procese stiprėja, todėl slystančių lašelių kondensacinio režimo trukmės pailgėjimo efektas susilpnėja. Aukštos temperatūros dujų atveju spinduliuavimo ir lašelio slydimo faktorių įtaka fazinių virsmų greičiui yra maždaug vienoda. Todėl kondensacinio režimo trukmė drėgnuose aukštos temperatūros dujose slystančių vandens lašelių paviršiuje ne tik neišauga, bet gali ir sutrumpėti.

3.5. Lašo fazinių virsmų analizė

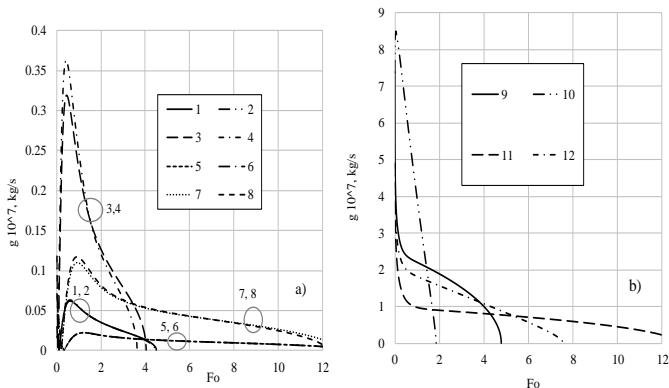
Šalto 306 K temperatūros vandens lašeliai pereinamųjų fazinių virsmų režimo drėgno oro sraute pradinėje stadijoje auga plečiantis šylančiam vandeniui ir jų paviršiuje kondensuojantis vandens garui (20 pav., b; 1–4 kreivės). Pereinamojo garavimo pradžioje vandens plėtimosi efektas dar persveria pradėjusio garuoti lašelio mažėjimo efektą. Šių efektų susilyginimo momentu lašelio matmuo yra didžiausias. Aukštos temperatūros sausame ore lašeliai pradeda mažėti iš karto (20 pav.; 5, 6 kreivės).

Pradinį garo srautą apibrėžia išpurškiamo vandens temperatūra, lašelių dispersiškumas ir oro drėgnumas. Šilto vandens lašeliai pusiausvirai garuoja iš karto, ir jiems galioja sąlyga $g_e \equiv g_0$ (21 pav., b). Pusiausviro garavimo pradinėje stadijoje garo srauto augimą skatina auštančių lašelių entalpijos dalyvavimas vandens garinimo procese, tačiau kartu slopina lašelių slydimo

mažėjimo apibrėžtas konvekcinio šildymo intensyvumo silpnėjimas. Be to, garo srauto tankio augimą tiesiogiai skatina garuojančio lašelio paviršiaus ploto mažėjimas. Dėl šių faktorių sąveikos garo srauto tankio kitimo grafikuose susiformuoja ekstremumo taškai, o garo srauto spartų išaugimą baigiamojoje lašelių garavimo stadijoje apibrėžia jų paviršiaus ploto mažėjimo faktorius įsivyravimas.



20 pav. Lašelių santykinio R/R_0 skersmens dinamika fazinių virsmų cikle (a) ir pereinamųjų fazinių virsmų metu (b). R_{max}/R_0 : (1) 1,00636, (2) 1,00641, (3) 1,00474, (4) 1,00443, (5, 6) 1; $R_0 \times 10^6$, m: (1, 2) 50, (3, 4) 100, (5, 6) 1500; \bar{T}_{sr} : (1, 3, 5) 0, (2, 4, 6) 1; Re_0 : (1, 2) 49,4, (3, 4) 246,98, (5, 6) 0; $T_{l,0}$, K: (1–4) 306, (5, 6) 358; $w_{l,0}$, m/s: (1–4) 65, (5, 6) 0; w_d , m/s: (1–4) 15, (5, 6) 0; $T_g = 1133K$; \bar{p}_v : (1–6) 0,2, (7, 8) 0; a_0/R_0^2 : (1, 2) 53,572, (3, 4) 2,14288, (5, 6) 0,059524



21 pav. Garo srauto smulkių ir vidutinio stambumo (a) bei stambiųjų (b) lašelių paviršiuje priklausomybė nuo šildymo proceso: (1, 3, 5, 7) konvekcinis šildymas, (2, 4, 6, 8) sudėtinis šildymas konvekcija ir spinduliavimu, (9, 11) šildymas laidumu, (10, 12) sudėtinis šildymas laidumu ir spinduliavimu; $g_0 \times 10^7, kg/s$: (1, 2) 0,0294, (3, 4) 0,1178, (5, 6) 0,0177, (7, 8) 0,0708, (9, 10) 7,388, (11, 12) 4,896; $R_0 \times 10^6, m$: (1, 2, 5, 6) 25, (3, 4, 7, 8) 100; (9, 10) 1500, (11, 12) 1600; T_d, K : (1–4, 9, 10) 1133, (5–8, 11, 12) 678; $T_{l,0}, K$: (1–8) 306, (9–12) 358; \bar{p}_g : (1–8) 0,2, (9–12) 0; $w_{l,0}, m/s$: (1–8) 65, (9–12) 0; $w_d, m/s$: (1–8) 15, (9–12) 0

4. IŠVADOS

Mokslinės literatūros analizės pagrindu pateikus vandens lašelių šilumos ir masės mainų procesų fizikinę interpretaciją, tarpusavyje suderinus lašelio geometrinę, terminę ir energinę interpretacijų dedamąsias, lašelių energinės būsenos kitimo fazinių virsmų cikle analizės pagrindu išplėtus Stefano hidrodinaminio srauto įtakos įvertinimo Spoldingo pernašos parametru panašumo teoriją lašelių pereinamiesiems režimams, patikslinus „lašo“ matematinį modelį bei išvysčius jo skaitinio sprendimo algoritmą, pagrindus optimalų įvertintinių narių skaičių nestacionariojo temperatūros lauko gradientą lašelyje aprašančioje integralinių lygčių begalinėje eilutėje, apibrėžus optimalų skaitinės schemas tinklę radialinei bei laiko koordinatėms sugraduoti, numačius iteracinių ciklų kontrolę ir pagrindus skaitinio tyrimo rezultatų patikimumą bei atlikus lašelių šilimo ir fazinių virsmų drėgname ore išsamų skaitinį tyrimą, jo rezultatus galima apibendrinti išvadomis:

1. Lašelio energinės būsenos kitimo pereinamuosiuose režimuose pagrindu bei fazinių virsmų ir konvekcinio šildymo srautų santykiu išreikštos pataisos įvedimas Stefano hidrodinaminio srauto įtaką įvertinančio

Spoldingo parametro klasikinėje išraiškoje užtikrina universalų visiems lašelių fazinių virsmų ciklo režimams „lašo“ matematinį modelį ir leidžia sudaryti nuoseklus ir vientisus sprendimo algoritmus.

2. Nestacionariojo temperatūros lauko gradientą lašelyje aprašančioje integralinių lygčių begalinėje eilutėje būtina įvertinti ne mažiau kaip 101 narį, lašelio radialinės koordinatės tinklelyje optimalu išskirti 41 pjūvį, o laiko tinklelį optimalu formuoti pirmajam pereinamųjų fazinių virsmų režimui, numatant jame 21 kontrolinį laiką Furje kriterijaus laiko skalėje.
3. Drėgno oro sraute išpurkšto vandens lašelių fazinius virsmus ir šilimą apibrėžia oro drėgnumo ir temperatūros, vandens temperatūros ir lašelių dispersiškumo bei šilumokaitos specifikos faktoriai. Oro parametrai daro įtaką lašelių pusiausviro garavimo režimui. Žemiausia $T_{e,"k"}$ būtų idealizuotai lašelį šildant laidumu. Lašelių slydimas oro sraute ir sugertas spinduliuotės srautas pusiausviro garavimo temperatūrą paaukština: $T_{e,"c+r"} > T_{e,"c"} > T_{e,"k"}$. Vandens parametrai apibrėžia pereinamuosius fazinių virsmų procesus, o lašelių pusiausviram garavimui yra nereikšmingi. Lašelių šilumokaitos įtaką apibrėžia jų slydimas ore ir spektrinis spinduliuotės sugėrimas.
4. Stambių vandens lašelių garavimo 1133 K ir 678 K temperatūros aplinkoje modeliavimo rezultatai pusiausviro garavimo g_e greičio priklausomybėje nuo jų dispersiškumo, palyginti su kitų autorių eksperimentinių tyrimų rezultatais, kurių pasikliautinumas yra apibrėžtas $\pm 5\%$. Apskaičiuotojo garavimo greitis sudėtinio šildymo spinduliuoimu ir silpnos konvekcijos atveju, kai $Re < 0,3$, apibrėžia eksperimentinio tyrimo rezultatus $\pm 8\%$ patikimumu. Santykinai neaukštoje 678 K temperatūros aplinkoje dėl spinduliuoimo poveikio lašelių garavimo sparta išaugo iki dviejų kartų. Aukštoje 1133 K temperatūros spinduliuojančioje aplinkoje stambių vandens lašelių pusiausviro garavimas spartesnis keliolika kartų.
5. Lašelio šilumokaitą apibrėžia jo šilimo procesas **pereinamųjų** fazinių virsmų režime:
 - Kondensacinį fazinių virsmų režimą apibrėžia lašelio paviršiaus pašilimas iki rasos taško temperatūros T_{dp} , todėl centriniuose sluoksniuose sugerama spinduliuotė kondensacinio fazinių virsmų režimų trukmei nėra svarbi. Konvekcinio šildymo atveju oro sraute slystančiame lašelyje intensyviai cirkuliuoja vanduo, šiluma efektyviai nuvedama į lašelį, lašelio paviršiaus šilimas kondensaciniame režime sulėtėja, dėl to susidaro sąlygos kondensacinio režimo trukmei išaugti.

- Konvekcinio šildymo atveju lašelis šyla esant teigiamo gradiento temperatūros laukui, ir, artėjant pusiausviram garavimui, neizotermiškumas lašelyje nuosekliai išnyksta.
 - Vykstant sudėtiniam šildymui, dėl spinduliuotės poveikio po tam tikro laiko lašelyje susiformuoja neigiamo gradiento temperatūros laukas. Šis laiko momentas pereinamąjį garavimo režimą suskaido į du periodus. Tik antrajame periode susidaro prielaidos sugertai spinduliuotės šilumai ištekėti vidine konvekcija į lašelio paviršių ir dalyvauti vandens garinimo procese.
 - Veikiant trinties jėgoms lašelio slydimas sparčiai slopsta, todėl konvekcinis šildymas pereinamojo garavimo metu smarkiai mažėja. O spinduliuotės sugėrimui reikšmingas lašelio stambumas, todėl spinduliuotės srautas lašelyje smarkiai pradeda silpnėti tik baigiamąjoje pusiausviro garavimo stadijoje.
6. Drėgnų dujų sraute įpurkšto vandens lašelių terminę būseną ir pereinamuosius fazinius virsmus apibrėžia rasos taško ir pusiausviro garavimo temperatūrų santykiu su išpurškiamo vandens temperatūra išreikšti $\bar{T}_{dp} = T_{dp}/T_{l,0}$ ir $\bar{T}_e = T_e/T_{l,0}$ parametrai. Kondensaciniam režimui vykti vandenį būtina išpurkšti galiojant $\bar{T}_{dp} > 1$ sąlygai, pereinamo garavimo režime lašelis pašils iki T_e temperatūros, kai $\bar{T}_e > 1$, ir iki T_e temperatūros atauš, kai $\bar{T}_e < 1$.

LITERATŪRA

1. Fuchs, N. A. (1959). Evaporation and droplet growth in gaseous media. London: Pergamon Press.
2. Sirignano, W. A. (1983). Fuel droplet vaporization and spray combustion theory. *Prog Energy Combust Sci*; 9, 291–322.
3. Sazhin, S. S. (2014). Droplets and Sprays, Springer, Heidelberg.
4. Abdel-Salam, A. H., Simms, J.C. (2016). State-of-the-art in liquid desiccant air conditioning equipment and systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1152-1183.
5. Tseng, C. C., Viskanta, R. (2006). Enhancement of water droplet evaporation by radiation absorption, *Fire Safety Journal*. 41, 236-247.
6. Breitenbach, J., Rosiman, V. I., Tropea, C. (2017). Heat transfer in the film boiling regime: Single drop impact and spray cooling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 110, 34-42.
7. Tarkalson, D. D., King, B. A., Bjorneberg, D. L. (2018). Yield production functions of irrigated sugarbeet in an arid climate, *Agricultural Water Management*, 200, 1-9.

8. Polizos, G., Jang, G.G., Smith, D.B., List, F.A., Lassiter, M. G., Park, J., Datskos, P.G. (2018). Transparent superhydrophobic surfaces using a spray coating process, *Solar energy Materials and Solar Cells*, 176, 405-410.
9. Shapira, B., Cohen, I., Penki, R. T., Avraham, E., Aurbach, D. (2018) Energy extraction and water treatment in one system: The idea of using desalination battery in a cooling tower, *Journal of Power Sources*, 378, 146-152.
10. Zhang, X., Wu, X., Min, J., Liu, X. (2017). Modelling of sessile water droplet shape evolution during freezing with consideration of supercooling effect, *Applied Thermal Engineering*, 125, 644-651.
11. Voytkov, I., Volkov, R., Strizhak, P. (2017). Reducing the flue gases temperature by individual droplets, aerosol, and large water batches, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 88, 301-316.
12. Kim, H. K., Ko, H. J., Kim, K., Perez-Blanco, H. (2012). Analysis of water droplet evaporation in a gas turbine inlet fogging process, *Applied Thermal Engineering*, 33, 62-69.
13. Paepe, W., Carrero, M., Bram, S., Contino, F., Parente, A. (2017). Waste heat recovery optimization in micro gas turbine applications using advanced humidified gas turbine cycle concepts, *Applied Energy*, 207, 218-229.
14. Mingrui, W., Nguyen, T. S., Turkson, R. F., Jinping, L., Guanlun, G. (2017). Water injection for higher engine performance and lower emissions, *Journal of Energy Institute*, 90, 285-299.
15. Buchlin, J. (2017). Mitigation of industrial hazards by water spray curtains, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 50, 91-100.
16. Spalding, D. B. (1963). Convective mass transfer; an introduction. London: Edward Arnold.
17. Faeth, G.M. (1983). Evaporation and combustion of sprays. *Prog Energy Combust Sci*, 9. 1–76.
18. Yuen, M.C., Chen, L.W. (1978). Heat-transfer measurements of evaporating liquid droplets, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 21, 537–542 .
19. Kuzikovskij, A. B. (1970). Dynamic of spherical particle in powerful optical field. *Izvestiya VUZ*. 5, 89–94.
20. Brewster, M. Q. (2015). Regularities of unsteady radiative-conductive heat transfer in evaporating semi-transparent liquid droplets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 785–798.
21. Dombrovsky, L. A , Sazhin, S. S , Sazhina, E. M. , Feng, G. , Heikal, M. R. , Bardsley, M. E. A. (2001). Heating and evaporation of semi-transparent diesel fuel droplets in the presence of thermal radiation, *Fuel*, 80, 1535–1544.
22. Miliauskas, G. (2014). Regularities of unsteady radiative-conductive heat transfer in evaporating semitransparent liquid droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 785–798.
23. Abramzon, B., Sirignano, W. A. (1989). Droplet vaporization model for spray combustion calculations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 32, 1605–1618.

24. Miliauskas, G. (2003). Interaction of the transfer processes in semitransparent liquid droplets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, 4119-4138.
25. Renksizbulut, M., Busmann, M., Li, X. (1992). A Droplet Vaporization for Spray Calculations, *Particle & Particle Systems Characterization*, 9, 59-65.
26. Renksizbulut, M., Yuen, M. C. (1983). Numerical study of droplet evaporation in a high-temperature stream. *J. Heat Transfer*, 105, 389-397.
27. Harpole, G.M. (1980). Radiative absorption by evaporating droplets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 22, 17-26.
28. Brenn, G. (2011). Droplet Collision. In ASHGRIZ, N.Sud. *Handbook of Atomization and Sprays*. Boston, MA: Springer US.
29. Miliauskas, G., Sabanas, V. (2006). Interaction of transfer processes during unsteady evaporation of water droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 1790-1803.
30. Miliauskas, G. (2014). Grynojo skysčio lašelių fazinių virsmų režimų universalusis ciklas I. Ciklo sudarymo metodas ir pernašos procesų skaitinio modeliavimo metodika, *Energetika*, 60, 77-95.
31. Miliauskas, G., Sabanas, V., Bankauskas, R., Miliauskas, G., Sankauskaitė, V. (2008). The peculiarities of sprayed liquid's thermal state change, as droplets are heated by conduction, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 4145-4160.
32. Hale, G.M., Query, M.R. (1973). Optical constants of water in the 200-nm to 200- μ m wavelength region, *Applied Optics*, 12, 555-562.
33. Yuen, M.C., Chen, L.W. (1978). Heat-transfer measurements of evaporating droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 21, 537-542.
34. Ivanov, V.M., Smirnova, E.V. (1962). Experimental research of liquid droplets evaporation velocity in non-moving high temperature environment. *Tr. IGI*, 19, 46-58.

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

Straipsniai „Thomsons Reuters“ duomenų bazėje „Web of Science Core Collection“ referuojamuose leidiniuose

1. MILIAUSKAS, G., MAZIUKIENĖ, M.; RAMANAUSKAS, V. Peculiarities of the transit phase transformation regime for water droplets that are slipping in humid gas. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, Volume 102, Pages 302-314, ISSN 0017-9310.

2. MILIAUSKAS, G., MAZIUKIENĖ, M., RAMANAUSKAS, V., PUIDA, E. The defining factors of the phase change cycle of water droplets that are

warming in humid gas. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, Volume 113, Pages 683-703, ISSN 0017-9310.

3. MILIAUSKAS, G., MAZIUKIENĖ, M., JOUHARA H., POŠKAS R. Investigation of mass and heat transfer transitional processes of water droplets in wet gas flow in the framework of energy recovery technologies for biofuel combustion and flue gas removal. *Energy*, 2019, Volume 173, Pages 740-754, ISSN 0360-5442

Straipsniai mokslo leidiniuose, registruotuose tarptautinėse mokslinės informacijos duomenų bazėse

1. MILIAUSKAS, G., MAZIUKIENĖ, M., Modeling of heat and mass transfer processes in phase transformation cycle of sprayed water into gas: 1. The calculation peculiarities of droplet phase transformations parameters. *Mechanika*, 2014, Volume 20, Pages 550-558, ISSN 1392-1207.

2. MILIAUSKAS, G., MAZIUKIENĖ, M., Modeling of heat and mass transfer processes in phase transformation cycle of sprayed water into gas: 2. Phase transformation peculiarities of a droplet heated up by convection in humid gas flow. *Mechanika*, 2015, Volume 21(1), Pages 123-128, ISSN 1392-1207.

3. MILIAUSKAS, G., MAZIUKIENĖ, M., RAMANAUSKAS, V. Modeling of heat and mass transfer processes in phase transformation cycle of sprayed water into gas: 3. Energy and thermal states analysis of slipping droplet in a humid air flow. *Mechanika*. 2015, Volume 21(5), Pages 377-383, ISSN 1392-1207.

4. MILIAUSKAS, G., MAZIUKIENĖ, M., BALČIUS, A., GUDZINSKAS, J. Modeling of heat and mass transfer processes in phase transformation cycle of sprayed water into gas: 4. Thermal state analysis of a droplet slipping in humid air flow. *Mechanika*. 2016, Volume 22 (2), Pages 96-104, ISSN 1392-1207.

5. MILIAUSKAS, G., MAZIUKIENĖ, M., PUIDA, E. Modelling of heat mass transfer processes in phase transformation cycle of sprayed water into gas: 5. Numerical modelling optimization of phase transformation cycle for droplets slipping in gas flow. *Mechanika*. 2017, Volume 23(1), Pages 22-30, ISSN 1392-1207.

6.MILIAUSKAS, G., ADOMAVIČIUS, A., MAZIUKIENĖ, M. Modelling of water droplets heat and mass transfer in the course of phase transitions. I: Phase transitions cycle peculiarities and iterative scheme of numerical research control and optimization. *Nonlinear Analysis: Modelling and control*. 2016, Volume 21(1), Pages 135-151, ISSN: 1392-5113.

7.MILIAUSKAS, G., ADOMAVIČIUS, A., MAZIUKIENĖ, M. Modelling of water droplets heat and mass transfer in the course of phase transitions. II: Peculiarities of the droplet radial coordinate and the time grid calibration. *Nonlinear Analysis: Modelling and control*. 2017, Volume 22 (3), Pages 386-403, ISSN 1392-5113.

Pranešimai kituose mokslo leidiniuose, konferencijų medžiagoje

1.MAZIUKIENĖ, M., MILIAUSKAS, G., ADOMAVIČIUS, A. Lašo uždavinio skaitinio eksperimento optimizavimas lašelio terminių parametru aspektu. *Šilumos energetika ir technologijos – 2015: konferencijos pranešimų medžiaga*, 2015 m. sausio 29-30 d., Kauno technologijos universitetas, Kaunas.

2.MAZIUKIENĖ, M., MILIAUSKAS, G. Drėgno oro sraute slystančių vandens lašelių kondensacinio fazinių virsmų režimo savitumai. *Šilumos energetika ir technologijos – 2016: konferencijos pranešimų medžiaga*, 2016 m. sausio 30-31 d., Kauno technologijos universitetas, Kaunas.

3.MILIAUSKAS, G., MAZIUKIENĖ, M., RAMANAUSKAS, V. Regularities of pure liquid droplets phase transformation cycle and its defining factors. *EMN Meeting on Droplets 2016*, May 9-13, 2016, San Sebastian, Spain.

4.MILIAUSKAS, G., MAZIUKIENĖ, M., RAMANAUSKAS, V. Interaction of heat and mass transfer processes of water droplets slipping in humid gas.: 12th *International conference on heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics, HEFAT 2016*, July 11-13, 2016, Malaga, Spain.

5.MAZIUKIENĖ, M., MILIAUSKAS, G. Drėgnuose dūmuose išpurkšto vandens lašelių pereinamuosius fazinių virsmų procesus įtakojantys veiksniai ir slydimo faktoriaus vaidmuo. *Šilumos energetika ir technologijos – 2017:*

konferencijos pranešimų medžiaga, 2017 m. sausio 26 d., Kauno technologijos universitetas. Kaunas.

6.RAMANAUSKAS, V., MAZIUKIENĖ, M., MILIAUSKAS, G. The combined heat and mass transit processes of water droplets in biofuel technologies.: 14-th *International conference of young scientists on energy issues, CYSENI 2017*, May 25-26 d., Lietuvos Energetikos Institutas, Kaunas.

7.MAZIUKIENĖ, M., MILIAUSKAS, G. Skaitinės iteracinės schemos pusskaidrio skysčio lašelių šilumos ir masės mainų parametrams apibrėžti savitumas ir optimalus tinkelio gradavimas. *Šilumos energetika ir technologijos – 2018: konferencijos pranešimų medžiaga*, 2018 m. vasario 1 d., Kauno technologijos universitetas. Kaunas.

8.MAZIUKIENĖ, M., MILIAUSKAS, G. Drėgnose dujose šylančių vandens lašelių šilumos ir masės mainai pereinamųjų fazinių virsmų režime. *20-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija*, 2017 m. kovo 20 d., Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas, Vilnius.

INFORMACIJA APIE AUTORIŲ

Monika Maziukienė (Masaitytė) (gim. 1988 03 16) vidurinį išsilavinimą įgijo Kauno Jono Basanavičiaus vidurinėje mokykloje 2006 m. Fizikos bakalauro laipsnį gavo 2010 m. Vytauto Didžiojo universitete, Gamtos mokslų fakultete. 2014 m. baigė studijas Kauno Technologijos Universitete, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultete, ir gavo energijos inžinerijos magistro laipsnį. 2018 m. baigė jungtines Kauno technologijos universiteto ir Lietuvos energetikos instituto doktorantūros studijas (Technologijų mokslai, energetika ir termoinžinerija (T 006)). Nuo 2011 m. dirba Kauno technologijos universitete, Šilumos ir atomo energetikos katedroje.

SUMMARY

The development of renewable energy technologies is fundamentally important for today's environment. One of them is liquid spraying technology. Most commonly used sprayed liquids are fuel and water. In the 'droplet' problem, the equilibrium evaporation process is widely investigated.

In this dissertation, complex processes of water droplet heat and mass transfer are analyzed. They are combined in a cycle of condensing, transitional evaporation and equilibrium evaporation regimes during the phase change which occurs on a droplet's surface. The dynamics of a heated droplet's surface temperature is directly related to the change in the regimes. Stefan's hydrodynamic flow influence assessment by Spalding transfer parameter for droplet transitional processes is provided. The provided mathematical model and its development, a numerical solution algorithm, do not contradict the presented droplet physical interpretation in the work which includes a droplet's geometrical, thermal and energy state analysis. The definition of the flux dynamics near the droplet's surface is based on a numerical iterative scheme which depends on the balance of the heat fluxes on the droplet's surface. In the iterative scheme, the optimal parameters are outlined. In this scheme, the energy of the phase change and the external heat transfer are combined as well as the internal heat transfer which takes place in droplets. The results of the numerical investigation of the water droplets' phase change were used as the basis while defining the inputs provided by the droplet slipping and the radiation absorbed in the flue gas within the interactions between the processes of complex transitional transfers.

The results of the modeling conducted in this dissertation allow to achieve better understanding of complex transfer process in a consistently changing cycle of droplet phase transformation regimes. They also show the impact of radiation on the droplet's thermal state and on the transitional evaporation regime. Analysis of energy flows also allows to expand the assessment of the Spalding heat transfer parameter regarding the similarity theory for the whole cycle of droplets phase transformations regimes.

The aim of the work – To investigate the transitional processes of heat and phase transformations inside water droplets in humid air flow and to highlight the interaction peculiarities and the defining factors.

Objectives of the thesis

1. On the grounds of scientific literature analysis, to provide a physical interpretation of water droplet heat and mass transfer processes, which could

define the cycle of continuous and uninterrupted droplet phase transformation regimes.

2. To analyze the peculiarities of the droplet energy state in the phase transformations cycle and to justify the Spalding transfer parameter based on the similarity theory, the relevance of the Stefan's hydrodynamic flow influence assessment in the condensation regime while in the 'droplet' mathematical model and its numerical solution algorithm, to define an opportunity of the variation of phase transformation regimes on the droplet surface.
3. To define the optimal number of members in the infinite sum in the line of integral equations which describes the unsteady temperature field gradient and to define the radial and time coordinate scheme grid in the numerical scheme.
4. To provide a mechanism for experiment control in each iterative cycle for the definition of the droplet instantaneous surface temperature and to justify the reliability of the results of numerical investigation.
5. To model droplet warming and phase transformations in humid air in water spraying technologies under common boundary conditions; to investigate the influence of air parameters, droplet dispersity and temperature as well as heat transfer peculiarities on the transitional transfer processes and to highlight the thermal state and phase transformations of water sprayed in humid air flow; to define factors of phase transformations.
6. To summarize the results of numerical research by dimensionless parameters which shall enable the prediction of thermal state and phase transformations as well as phase transformations, which is important for the engineering practice of optimal water spraying.

Scientific novelty of work:

Based on the definition of the droplet energy state, the variation in the phase transformation cycle and the evaluation of Stefan's hydrodynamic flow assessment by the Spalding heat transfer parameter based by similarity theory relevance was specified, extended and applied for transitional transfer processes condensation regime.

On the basis of the complex evaluation of water droplet heat transfer conditions, the possible condensation regime duration growth for more intensively slipping droplets was highlighted.

Conclusions

On the basis of scientific literature analysis when providing physical interpretation of water droplet heat and mass transfer processes, in terms of

matching their geometric, thermal and energy interpretation components, on the basis of energy state variation in phase transformations cycle analysis and extending Stefan's hydrodynamic flow influence assessment by Spalding transfer parameter based by similarity theory basis for droplet transitional processes, while adjusting the mathematical model and developing its numerical solution algorithm, while based on the optimal number of members of asset members in unsteady temperature field gradient describing in integral equation infinite series, after defining the optimal grid of radial and time coordinates in numerical scheme, when foreseeing the iterative cycle control and after basis of numerical research results reliability and after detail numerical research of the droplet warming in phase transformation, its results can be summarized by conclusions:

1. On the basis of the droplet energy state variation in the transitional regime and phase transformations as well as convectional heating fluxes ratio correction introduction for Stefan's hydrodynamic flow influence evaluated with Spalding parameter in classical expression provides universal droplet mathematical model for all droplet phase transformation regimes and enables to create a consistent solution algorithm.
2. For unsteady temperature field gradient description in an infinite integral equations series, it is necessary to evaluate no fewer than 101 members, for the droplet's radial coordinate, it is optimal to examine 41 sections, while for the time grid formation in the initial transitional phase transformation regime, it is optimal to explore 21 control time steps in the Fourier number time scale.
3. The phase transformations and the warming of water droplets sprayed in humid air flow are defined by air humidity and temperature, water temperature and droplet dispersity as well as heat transfer-specific factors. The lowest $T_{e,"k"}$ is detected in the idealized droplet heating case only involving conduction. A droplet slipping in the air flow and absorbed radiation flux raises the equilibrium evaporation temperature $T_{e,"c+r"} > T_{e,"c"} > T_{e,"k"}$. Water parameters define the transitional phase transformation processes, yet they are insignificant for equilibrium evaporation. The influence of droplet heat transfer is defined by their slipping in air and spectral radiation absorption.
4. The calculated vapor flow for large diameter water droplets which evaporate at equilibrium conditions in 678 °K and 1133 °K air temperatures in the complex heating case was compared with the experimental results whose reliability was defined with $\pm 5\%$ error limits. The calculated vapor flow for complex heating by radiation and weak convection, when $Re < 0.3$, defines

the experimental investigation results with $\pm 8\%$ reliability. In a relatively low temperature of 678 °K, the droplet evaporation rate due to the impact of radiation compared with heating only by conduction increases up to two times. In a high 1133 °K radiating temperature environment, the equilibrium evaporation of large droplets is several times faster than that of droplets which are heated only by conduction.

5. The droplet heat transfer case defines the heating process in the transformation regime of the transitional phase:

- The condensation phase transformation regime is defined by droplet surface warming to dew point temperature T_{dp} , therefore, in the central layers, the absorbed radiation is not significant for the duration of the condensation of phase transformation regimes. In the case of convection heating in an air flow slipping droplet water intensively circulates. The heat is effectively led inside droplet. Thus, droplet surface warming in condensation regime slow down, and condensation regime duration increases.
- In the case of convection heating, the droplet warms when unsteady temperature field gradient is positive, and when equilibrium evaporation is approaching, the non-isothermally in the droplet disappears.
- In the case of complex heating, due to the impact of radiation heating, after a certain period of time, a negative temperature field gradient is formed. This time span of the transitional evaporation regime is divided into two periods. Only in the second period, preconditions arise for the absorbed radiation within the droplet to flow outside by internal convection into the droplet's surface layers and to participate in the droplet's evaporation process.
- Due to friction forces, the impact of the droplet's slipping rapidly diminishes, therefore, convective heating in terms of transitional evaporation decreases as well. However, the droplet's diameter is important for the radiation absorption; therefore, the radiation flux inside a droplet decreases only during the initial equilibrium evaporation stage.

6. The thermal state and the transitional phase transformations of water droplets sprayed in humid air flow are defined by the ratio of the dew point temperature or the equilibrium evaporation temperature with the parameters of sprayed water temperature $\bar{T}_{dp} = T_{dp} / T_{1,0}$ and $\bar{T}_e = T_e / T_{1,0}$. For the condensation regime, it is necessary to spray water when conditions $\bar{T}_{dp} > 1$ are valid, for the transitional evaporation regime, the droplet warms to T_e

temperature; meanwhile, when $\bar{T}_e > 1$, the droplet will warm, when $\bar{T}_e < 1$, the droplet will cool down.

UDK 536.24 (043.3)

SL344. 2019-06-17, 3,5 leidyb. apsk. l. Tiražas 50 egz.

Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas