

Garuojančių lašelių sudėtinės pernašos nestacionariųjų procesų sąveikos sisteminis įvertinimas

Gintautas Miliauskas,

Kristina Norvaišienė

*Kauno technologijos
universitetas,
Šilumos ir atomo
energetikos katedra,
K. Donelaičio g. 20,
LT-44239 Kaunas
El. paštas: gimil@ktu.lt*

Energetikoje ir pramonėje gana plačiai pritaikomi dujų ir skysčio lašelių dvifaziai srautai. Skysčio išpurškimu besiremiančių terminių technologijų tobulinimui ir dariniam vystymui svarbu pažinti jose vykstančius šilumos ir masės pernašos procesus ir sugebėti juos tinkamai valdyti. Būtina suvokti sudėtinių pernašos procesų intensyvumą lemiančios jų tarpusavio sąveikos, dažniausiai vykstančios nuolat kintančiose kraštinėse sąlygose, esmę.

Sudėtinių pernašos procesų sąveiką išpurkšto skysčio sistemose sąlygoja daugelis veiksnių. Jų įtakai įvertinti reikalingas sisteminis požiūris į sudėtinių procesų visumą ir esminių procesų sąveiką lemiančių veiksnių išryškimas. Tai įmanoma atlikti tik išsamiai pažinus paprasčiausiose kraštinėse sąlygose vykstančių pernašos procesų dėsningumus ir palyginamuoju būdu įvertinus sudėtingesnių vyksmo sąlygų įtaką procesų sąveikai.

Šiame darbe pristatytas lašelių nestacionariųjų pernašos procesų sąveikos intensyvumo įvertinimo palyginamuoju būdu metodas. Vandens lašelių garavimo atveju pateiktas jo praktinio taikymo pavyzdys. Išryškinta vieno iš sudėtingiausio veiksnio – spektrinės spinduliuotės sugėrimo pusskaidriuose lašeliuose – įtaka lašelių šilumokaitai ir terminiai būsenai nestacionariojo garavimo režime.

Raktažodžiai: vandens lašeliai, nestacionarusis garavimas, spektrinis spinduliavimas, pernašos procesų sąveika, sisteminio įvertinimo metodas

ĮVADAS

Šiuo metu pasaulis susiduria su aštriomis aplinkosaugos problemomis [1]. Tai susiję su sparčiai augančia energijos paklausa pasaulyje ir darnaus energetikos vystymo idėja, kuri lėmė spartesnę aplinkosauginės politikos orientavimą į aplinkos taršos profilaktiką [2–5]. Teršalų išmetimai iš energetikos ir pramonės objektų yra antroje vietoje po transporto, o pagal šiluminį gamtos teršimą – netgi pirmauja. Todėl labai svarbu energetikoje ir pramonėje tobulinti ir vystyti kuo mažesnę neigiamą poveikį aplinkai darančias termines technologijas, kuriose gali būti plačiai panaudojami dujų ir išpurkšto skysčio lašelių dvifaziai srautai. Greta skystojo

kuro deginimo disperguotame pavidale gana plačiai terminėse technologijose pritaikomas vandens išpurškimas [6–11]: aukštos temperatūros dujų srauto terminiai būsenai reguliuoti ir gaisro frontui slopinti, dūmuose sukauptai fazinių virsmų šilumai utilizuoti ir juos išvalyti, paviršius apsaugančioms dvifazio srauto priedangoms sudaryti, orui ataušinti tarp turbokompresoriaus pakopų ir t. t. Optimalus vandens išpurškimas į išmetamus dūmus įgalina ne tik tobulinti labai brangias spalvotų metalų rekuperaciniais ekonomiažeriais besiremiančias ir šiuo metu pasaulyje plačiausiai taikomas fazinių virsmų šilumos utilizavimo iš išmetamų dūmų technologijas, bet ir sudaro prielaidas pigių kontaktinio tipo ekonomiažerių pritaikymui [12].

Skysčio išpurškimo besiremiančios technologijos yra savitos, tačiau šilumos ir masės pernašos procesų modeliavimo aspektu jas jungia skysčio lašelio grandis. Lašelių šilumos ir masės mainų tyrimas mokslinėje literatūroje žinomas kaip „lašo“ uždavinys. Jo sprendinys yra svarbus tobulinant skysčio išpurškimo technologijas ir bendru atveju apima „lašo išorinio“ bei „lašo vidinio“ uždavinių sprendinius: pirmasis duoda atsakymą apie šilumokaitos ir masės pernašą tarp lašelio ir jo apsuptyties, o antrasis nusako šių procesų intensyvumą lašelyje. Pagal tyrėjų santykį su minėtais „lašo“ uždaviniais pasauliniuose „lašo“ tyrimuose, kurių pradžia siekia 1877 m., kuomet J. C. Maxwell nustatė, kad garuojančių lašelių temperatūra sumažėja [13], sąlyginai galima išskirti pradinį, pereinamąjį ir dabartinį etapus. Pradiniame etape „lašo vidinis“ uždavinys buvo ignoruojamas visą dėmesį sutelkiant į žemos temperatūros apsuptyje vykstantį lašelio stacionariųjį garavimą. Šie „lašo“ tyrimai apžvelgti [14] darbe. Juose išryškėjo Stefano hidrodinaminio srauto įtakos lašelio garavimui ir šilumokaitai įvertinimo problema, kuri vėliau sėkmingai išspręsta, pasitelkus D. Spoldingo šilumos pernašos parametą [15–17]. Pereinamoju etapu gilintasi į sudėtingesnėse sąlygose garuojančių lašelių nestacionariusius pernašos procesus, neišvengiamai pareikalavusius didesnio dėmesio ir „lašo vidiniam“ uždaviniui. Pereinamojo etapo „lašo“ tyrimų, kurie nesusieti su spinduliavimo įvertinimo problematika, pasiekimai pakankamai išsamiai atspindėti [18]. Apskritai vykdyti labai platūs ir įvairiapusiški šio etapo „lašo“ tyrimai. Išryškėjo poreikis susieti spręsti „išorinį“ ir „vidinį“ „lašo“ uždavinius. Tai iššaukė sudėtinių pernašos procesų tarpusavio sąveikos įvertinimo poreikį, kas ir tapo vienu esminiu „lašo“ uždavinio šiuolaikinio etapo indikatoriumi. Šiuolaikiniams „lašo“ tyrimams kelią atveriantys modeliai ir jų sprendimo metodai gana išsamiai aptarti [19]. Plačiai „lašo“ tyrimuose taikomų teorinių modelių kontrolei labai svarbūs yra skysčių lašelių šilumos ir masės mainų eksperimentinių tyrimų rezultatai. Gana plačiai pradiniame etape vykdyti lašelių garavimo žemos temperatūros apsuptyje eksperimentiniai tyrimai tapo retesni sudėtingesnėmis šilumokaitos sąlygomis. Šiuo aspektu išskirtiniais galima laikyti vandens lašelių garavimo aukštos temperatūros ore eksperimentinius tyrimus [20], kai oras yra pašilęs iki jį gaubiančios spinduliuojančios sienelės temperatūros. Ant kapiliaro pakabinto lašelio garavimo greitis prilygintas specialia kapiliarine sistema į garuojantį lašelį tiekiamo vandens, kurio temperatūra atitiko pusiausvirai garuojančio lašelio temperatūrą, srautui, užtikrinančiam iki penkiasdešimt kartų padidintos šviesos šaltinio apšviesto lašelio projekcijos ekrane pastovumą. Šių eksperimentų apibendrintų rezultatų išsami grafinė analizė pateikta [21]. Įvairių autorių skirtingos temperatūros ore pusiausvirai garuojančių vandens lašelių temperatūros matavimai artimose šildymui laidumu sąlygose grafiškai apibendrinti [22].

Pernašos procesų sąveika pasireiškia tuo, jog kartu vykstančių procesų intensyvumas skiriasi nuo atsietai vykstančių procesų intensyvumo, nors abejais atvejais kraštinės sąlygos ir būtų identiškos. Lašelio gyvavimo cikle, kurį apibrėžia laikas nuo lašelio atsiradimo iki jo išnykimo, sąlygos pernašos procesų sąveikai kinta. Tai lemia daugelis lašelio terminės būsenos kitimą ir fazinius virsmus lemiančių veiksnių. Nestacionariųjų pernašos procesų sąveikos įvertinimą labai apsunkina spinduliuotės selektyvumas bei lašelį supančio Knudseno sluoksnio poveikis. Spinduliavimo selektyvumas iššaukia poreikį atsižvelgti į pusskaidrių skysčių optinių spektrinių charakteristikų savitumus [23, 24], lemiančius spektrinės spinduliuotės sugėrimą lašelyje ir optinius reiškinius jo paviršiuje. Pernašos procesai Knudseno sluoksnyje iššaukia lašelio paviršiuje išsiskiriančio garo slėgio ir jo temperatūros šuolius, lemiančius skysčio garo parametrų Knudseno sluoksnio riboje nukrypimą nuo lašelio paviršiaus temperatūrą turinčio sočiojo garo parametrų. Šių veiksnių įtaka priklauso nuo lašelių dispersiškumo: Knudseno sluoksnio poveikis ryškesnis smulkiesiems mikrono eilės lašeliams [25, 26], o spektrinės spinduliuotės sugėrimo efektai ryškesni stambesniuose pusskaidriuose lašeliuose jiems garuojant aukštesnės temperatūros spinduliuojančioje apsuptyje [6, 27–32]. Spektrinės spinduliuotės srautas pusskaidriame lašelyje tradiciškai aprašomas elektromagnetinės bangos ir geometrinės optikos teorijomis paremtais modeliais. Abiejų teorijų spinduliuotės modeliai turi savų minusų ir privalumų [6]: elektromagnetinės bangos teorija neleidžia atsižvelgti į spektrinius šviesos efektus kontakto tarp fazių paviršiuje, o geometrijos optikos teorija negalioja smulkiems lašeliams, kurių skersmuo yra šviesos bangos ilgio eilės; elektromagnetinės bangos teorija įgalina sąlyginai paprastai nustatyti tūrinį spinduliuotės srauto sugėrimą lašelyje, o geometrinės optikos teorijos pagrindu sudaryti modeliai įgalina įvertinti lokalinį spinduliuotės srauto tankį lašelyje. Pastarasis reikalingas nestacionariajam temperatūros laukui lašelyje apskaičiuoti ir spinduliavimo poveikiui jo lokaliniam gradientui lašelyje įvertinti.

Dažnai „lašo“ tyrimuose taikomų lašelio „sferiškumo“ ir šilumokaitos jame „simetriškumo“ prielaidų atveju garuojančio lašelio temperatūros laukus nusakomas universalios lašelio $\eta = r / R(\tau) \equiv 0-1$ koordinatės ir laiko $T(\eta, \tau)$ funkcija. Pastarosios determinavimas yra raktas sudėtinių pernašos procesų sąveikai įvertinti. Galima numatyti, jog bendruoju „lašo“ uždavinio formulavimo atveju nestacionariojo temperatūros lauko lašelyje $T(\eta, \tau)$ funkciją analitiškai gauti neįmanoma dėl termohidrodinaminių procesų judančiame fluide nevienareikšmiško aprašymo. Tuomet vienintelė išeitis – pernašos procesus aprašančių fundamentinių lygčių tiesioginis skaitinis sprendimas. Šiuolaikinis skaičiavimo technikos lygis tam sudaro palankias sąlygas, tačiau iteracinių skaitinio sprendimo schemų konvergavimo

kontrolės problema išlieka aktualia procesų nestacionarumo ir spinduliuotės selektyvumo įvertinimo aspektais. Yra pagrįsta skysčio mechaninio stabilumo prielaida be slydimo dujų srauto nešamuose vandens [33] ir grynujų angliavandenilių [34] neizoterמיškuose lašeliuose terminėse technologijose sutinkamam išpurškiamo skysčio dispersiškumui. Tuomet sudėtinį šilumos plitimą pusskaidriuose lašeliuose galima aprašyti pagal šilumos laidumo ir spinduliavimo matematinis modelius. Jie sprendžiami pritaikius kombinuoto analitinio ir skaitinio sprendimo metodus [35, 36]: pirminė sudėtinę šilumos pernašą lašelyje aprašanti diferencialinių ir integralinių lygčių sistema analitiškai pertvarkoma į integralinių ir algebrinių lygčių sistemą, kuri sprendžiama skaitiniais metodais patikimai kontroliuojant sudarytų schemų konvergavimą. Skaitinio sprendimo schemas ašimi tampa garuojančio ir šylančio lašelio paviršiaus temperatūros $T_R(\tau) \equiv T(\eta = 1, \tau)$ laiko funkcijos iteracinis determinavimas. Ši funkcija privalo tenkinti prie lašelio pritekančių ir nuo jo nutekantį energijos srautų atitikimo sąlygą:

$$\bar{q}_\Sigma^+(\tau) + \bar{q}_\Sigma^-(\tau) + \bar{q}_f^+(\tau) \equiv 0. \quad (1)$$

(1) išraiška yra formali energijos balanso lašelio paviršiuje sąlyga, užrašyta pernašos procesų kvazistacionarumo prielaidos rėmuose ir jungianti „lašo“ „vidinio ir išorinio“ uždavinių sprendinius. Svarbu suvokti, jog (1) išraiškoje energijos srautų aprašymas yra tiesiogiai susijęs su lašelio paviršiaus momentine T_R temperatūra ir nestacionariojo temperatūros lauko lašelyje gradientu: $gradT(r=R, \tau) \equiv \partial T(r, \tau) / \partial r |_{r=R}$. Pastarajam nustatyti pritaikoma nestacionarųjį temperatūros lauką lašelyje šilumai plintant laidumu ir spinduliavimu aprašanti integralinio tipo lygtis [35]:

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

Šaltinio f_n funkcija (2) išraiškoje atsižvelgiama į šylančio lašelio paviršiaus temperatūros kitimo tempą ir spinduliuotės srauto sugėrimą pusskaidriame skystyje, o šio funkcijos konkreiti išraiška priklauso nuo „lašo“ uždavinio kraštinių sąlygų formulavimo [33, 35, 37].

Išsamesnius energijos srautų balansą nusakančios (1) išraiškos konkretizavimo niuansus dar aptarsime. Šio darbo tikslas yra apibendrinti (1–2) sistemos pagrindu atliktus „lašo“ uždavinio skaitinius tyrimus, atskleisti lašelių pernašos procesų sąveikos įvertinimo palyginamuoju būdu esmę bei vandens lašelių garavimo atveju įvertinti spektrinės spinduliuotės srauto sugėrimo įtaką lašelių terminiai būsenai nestacionariojo garavimo režime.

GARUOJANČIŲ LAŠELIŲ PERNAŠOS PROCESŲ SĄVEIKOS TYRIMO METODAS IR REZULTATAI

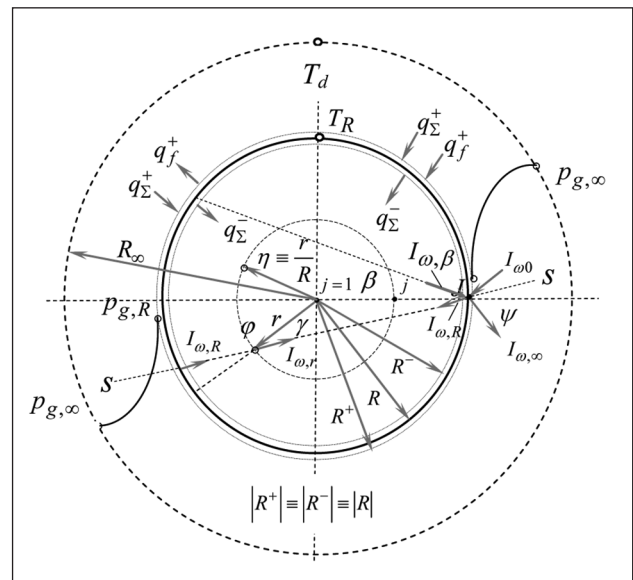
Išpurkšto skysčio technologinio pritaikymo įvairovė lemia platų lašelių šilumos ir masės mainų vyksmo sąlygų spektrą bei skirtingą ir savitą sudėtinės pernašos procesų sąveikos lygmenį. Todėl lašelių šilumos ir masės pernašos procesų sąveikos kompleksinis įvertinimas yra labai sudėtingas ir darbai imlus uždavinys, reikalaujantis nuoseklaus bei sisteminio požiūrio. Praktinio realizavimo aspektu patrauklu lašelių pernašos procesų sąveiką įvertinti palyginamuoju būdu, kuomet nuosekliai einama nuo paprasčiausių link sudėtingesnių kraštinių šilumos ir masės mainų vyksmo sąlygų. Toliau apžvelgsime tokio sąveikos įvertinimo pagrindinius aspektus.

Problemos formulavimas ir tyrimo prielaidos

Skysčio išpurškimo terminių technologijų efektyvumą lemia lašelių šilumos ir masės mainų procesų intensyvumas. Sudėtinės šilumokaitos atveju atskiro lašelio paviršiuje vykstančių fazinių virsmų greitį lemia suminių šilumos srautų paviršiaus išorinėje ir vidinėje pusėse skirtumas (1 pav.):

$$g_g(\tau) = 4\pi R^2(\tau) \frac{q_\Sigma^+(\tau) - q_\Sigma^-(\tau)}{L(\tau)} \equiv 4\pi R^2(\tau) \cdot m_g^+(\tau). \quad (3)$$

Sudėtinės šilumokaitos atveju apsuptis lašeliui šilumą teikia spinduliavimu ir konvekcija, todėl suminių šilumos srautą lašelio paviršiaus išorinėje pusėje sudaro radiacinis ir konvekcinis sandai: $q_\Sigma^+ = q_r^+ + q_c^+$. Suminis šilumos srautas lašelio paviršiaus vidinėje pusėje $q_\Sigma^- = q_r^- + q_c^-$ nusakoma skysčio lašelyje šildymo intensyvumą. Šio srauto prigimtis priklauso nuo fazinių virsmų lašelio paviršiuje



1 pav. Lašelio šilumokaitos ir fazinių virsmų schema

režimo: kondensaciniame fazinių virsmų režime skystį šildo apsupties suteikta šiluma ir besikondensuojančio garo išskirta fazinių virsmų šiluma: $q_{\Sigma, f = kon}^- = q_{\Sigma}^+ + q_{f = kon}^+ \equiv q_{\Sigma}^+ + m_{g, kon}^+ \cdot L$; nestacionariojo garavimo režime dalis apsupties suteiktos šilumos garina skystį, todėl: $q_{\Sigma}^- = q_{\Sigma}^+ - q_{f = gar}^+ \equiv q_{\Sigma}^+ - m_{g, gar}^+ \cdot L$; pusiausviro garavimo režime skystį garina visa apsupties lašeliui suteikta šiluma ir yra dar galimas auštančio lašelio mažėjančios entalpijos dalies dalyvavimas garavimo procese, tai ir atspindi suminis $q_{\Sigma, e}^- = q_{f = gar, e}^+ - q_{\Sigma}^- \equiv (1/3)\partial(\rho_m c_{p, m} T_m R)/\partial\tau$ šilumos srautas. Dažniausia auštančio lašelio entalpijos indėlis pusiausviro garavimo energiniame balanse yra nedidelis: $q_{\Sigma, e}^- \cong 0$.

Taigi, glaudus ryšys tarp šilumokaitos procesų lašelyje ir jo apsuptyje bei fazinių virsmų procesų yra akivaizdus. Jis pagrindžia „lašo“ „vidinio“ ir „išorinio“ uždavinių kompleksinės analizės būtinumą ir sudėtinės pernašos procesų tarpusavio sąveikos įvertinimo poreikį. Pastarajam realizuoti energijos srautų balanso lašelio paviršiuje formaliai (1) išraiškai būtina suteikti skaitinei analizei tinkamą formą, kurios konkrečią išraišką lemia tyrimui keliamas tikslas ir daromos prielaidos: orientuojamasi į įprastinėms terminėms technologijoms aktualų vidutinių ir stambesniųjų lašelių nestacionariojo garavimo režimą numatant 10 μm skersmens sferinių lašelių apatinio dispersiškumo ribą; Knudseno sluoksnio įtaka paneigiama; išpurškiamo vandens temperatūra žemesnė už lašelių pusiausviro garavimo temperatūrą: $T_0 / T_{R, e} < 1$; sauso oro terminė būsena ribojama 1 600 K temperatūra; oro srautas lašelius neša be slydimo ir šilumą oras jiems teikia laidumu: $q_c^+ \equiv q_k^+$; neizotermiškuose lašeliuose veikiančios jėgos yra nepakankamos savaiminei skysčio cirkuliacijai sukelti: $q_c^- \equiv q_k^-$; sudėtinio šildymo atveju egzistuoja oro temperatūrą turintis absoliučiai juodas spektrinės spinduliuotės šaltinis; vandens spektrinių šviesos sugėrimo baigtinio dydžio koeficientų pagrindu teigiama, jog lašelio paviršius spektrinės spinduliuotės nesugeria: $q_r^- \equiv q_r^+$; lašelio šilimas ir faziniai virsmai apsupties parametrus įtakos neturi.

„Lašo“ matematinis modelis, jo analitinis ir skaitinis sprendimas

Aptartos prielaidos įgalina (1) formalią energijos srautų lašelio paviršiuje balanso lygtį transformuoti taip:

$$\begin{aligned} & q_k^+(\tau) + q_k^-(\tau) + q_r^+(\tau) - q_r^-(\tau) - q_f^+(\tau) = \\ & = \lambda_{gd} \frac{T_d - T_R(\tau)}{R(\tau)} \cdot \ln \frac{1 + B_T(\tau)}{B_T(\tau)} - \lambda_l(\tau) \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=R} - \\ & - m_g^+(\tau) \cdot L(\tau) \equiv 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Šioje išraiškoje fazinių virsmų šilumos srautas nustatomas atsižvelgus į garuojančio lašelio paviršiuje išsiskiriančio garo srauto tankį, pastarąjį aprašius pagal Stefano hidrodinaminio srauto poveikį fazinių virsmų intensyvumui įvertinantį analitinį modelį [38, 39]:

$$\begin{aligned} q_f^+(\tau) \equiv L \cdot m_g^+ = L \cdot \frac{D_{gd} \cdot \mu_g}{T_R \cdot R_\mu \cdot R} \left[p_{g, R} - p_{g, \infty} + \right. \\ \left. + \frac{\mu_g}{\mu_d} \left(p \cdot \ln \frac{p - p_{g, \infty}}{p - p_{g, R}} - p_{g, R} + p_{g, \infty} \right) \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Įvertinant laidumu lašelio apsupties teikiamos šilumos srautą garo ir dujų mišinio savybės parenkamos pagal „1/3“ taisyklės [17] temperatūrą: $T \equiv T_R + (T_d - T_R) / 3$. Į garuojančio lašelio konvekcinį šildymą slopinantį Stefano hidrodinaminio srauto poveikį atsižvelgiama pagal Spoldingo šilumos pernašos B_T parametro logaritmine funkcija paremtą klasikinį modelį [18]. Spoldingo šilumos pernašos parametras yra glaudžiai susijęs su šilumos pernašos procesų lašelyje sąveika [33], veikiama nestacionariojo temperatūros lauko gradiento kitimą lašelio šilimo ir garavimo metu:

$$B_T = \frac{c_{p, gd} (T_d - T_R)}{L} \left(1 - \lambda_l \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} / q_k^+ \right). \quad (6)$$

Šilumos laidumo srauto tankis lašelyje nustatomas pagal klasikinį Furje šilumos laidumo dėsnį. Iš pirmo žvilgsnio kiek neįprastai atrodo tai, jog šylančio ir garuojančio lašelio paviršiaus temperatūros kitimą lemiančioje (4) išraiškoje nesimato tiesioginės spinduliuotės įtakos. Nesugeriant pusskaidriam skysčiui paviršiumi spinduliuotę lašeliui teikiamas spinduliuotės srautas tiesioginės įtakos jo paviršiaus temperatūrai ir neturi. Tačiau lašelyje sklindantis spinduliuotės srautas yra svarbus šilumos plitimo procesų sąveikoje ir yra esminis veiksnys nestacionariojo temperatūros lauko transformacijoms įvykti, kurios nestacionariojo garavimo režime gali iššaukti net lašelio temperatūros lauko gradiento vektoriaus krypties pasikeitimą [35, 40].

Taigi, pernašos procesų sąveikos sąlygomis, nestacionariojo temperatūros lauko gradiento įtaka yra labai ryški. Formuluoiant fundamentinį sudėtinio šilumos plitimo pusskaidriame lašelyje uždavinį, jo nestacionariųjų temperatūros lauką sąveikaujant šilumos laidumo ir spinduliuotės procesams aprašo netiesinė integrodiferencialinė lygčių sistema:

$$\frac{\partial(\rho_l c_{p, l} T)}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 \left[\lambda_l \frac{\partial T}{\partial r} - q_r(r, \tau) \right] \right\}, \quad (7)$$

$$q_r = 2\pi \int_0^\pi \int_0^\pi I_{\omega} \sin \varphi \cos \varphi d\varphi d\omega, \quad \frac{dI_{\omega}}{ds} = \chi_{\omega} (n_{\omega}^2 I_{\omega 0} - I_{\omega}),$$

$$I_{\omega 0} = \frac{2c_0^2 \omega^3 h}{\exp(c_0 \omega h / k_0 T) - 1}, \quad (8)$$

$$ds = \pm \frac{r}{(r^2 - R^2 \sin^2 \beta)^{1/2}} dr; \quad \chi_{\omega} = 4\pi \kappa_{\omega} \omega; \quad n_{\omega} = n_{\omega} - i\kappa_{\omega}.$$

Ženklas „-“ ds (8) išraiškoje galioja, kai $0 \leq s < R \cos \beta$ (1 pav.).

(7, 8) lygčių sistemos analitinis sprendinys neįmanomas, o jos tiesioginio skaitinio sprendimo schemos yra komplikotos. Taikomas aptartas kombinuotas analitinio ir skaitinio sprendimo metodas. Numatant iteracinės skaitinio sprendimo schemos neišvengiamumą vienareikšmiškumo sąlygos formuluojamos dar nežinomų lašelio matmens ir jo paviršiaus temperatūros laiko funkcijų bei spektrinės spinduliuotės intensyvumo lašelio vidiniame paviršiuje atžvilgiu:

$$\begin{aligned} T(r, \tau) &= T_0 \text{ ir } R(\tau) = R_0, \text{ kai } \tau = 0; \\ T(r \equiv R, \tau) &\equiv T_R(\tau) \text{ ir } R(\tau) = f_R(\tau), \text{ kai } \tau > 0; \\ I_{\omega}(r \equiv R, \tau) &= I_{\omega,R}(\tau). \end{aligned} \quad (9)$$

Energijos (7) ir spinduliuotės srauto (8) lygtys sprendžiamos atskirai: pertvarkant (7, 9) sistemą spinduliuotės srautą lašelyje aprašanti $q_r(r, \tau)$ funkcija laikoma žinoma, o pertvarkant (8, 9) sistemą žinoma laikoma nestacionariojo temperatūros lauko $T(r, \tau)$ funkcija. Pagalbinė $f_r(r, \tau) = r \cdot [T(r, \tau) - T_R(\tau)]$ funkcija pagal [41] metodiką įgalina (7, 9) sistemą pakeisti (2) išraiška aprašoma begaline integralinių lygčių eilute [37]. Šylančio lašelio fizikinių savybių pokytį ir jo paviršiaus temperatūros kitimo spartą bei lokalinio spinduliuotės srauto sugėrimo ypatumus lašelyje įvertinančiai f_n funkcijai galima suteikti pavidalą:

$$\begin{aligned} f_n &= (-1)^n \frac{R}{n\pi} \frac{dT_R}{d\tau} + \frac{1}{R} \int_0^R \frac{r}{\rho_l c_{p,l}} \sin \frac{n\pi r}{R} \left[\frac{2}{r} q_r + \right. \\ &+ \left. \frac{\partial q_r}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial r} \frac{\partial \lambda_l}{\partial r} - c_{p,l} T \frac{\partial \rho_l}{\partial \tau} - \rho_l T \frac{\partial c_{p,l}}{\partial \tau} \right] dr. \end{aligned} \quad (10)$$

(10) išraiška aprašoma $f_n(r, \tau)$ funkcija energijos srautų lašelio paviršiuje balanso (4) lygties skaitinio sprendimo iteraciniame cikle yra vienareikšmiškai apibrėžiama pagal ankstesnėje iteracijoje nustatytą nestacionarųjį temperatūros lauką lašelyje. Tuomet nestacionariojo temperatūros lauko gradientas eilinėje iteracijoje vienareikšmiškai aprašomas išraiška:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = \frac{2\pi}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} -1^n n \int_0^{\tau} f_n \exp \left[-a \left(\frac{n\pi}{R} \right)^2 (\tau - \tau_*) \right] d\tau_*. \quad (11)$$

Kai temperatūros lauko pusskaidriame sferiniame tūryje $T(r)$ funkcija apibrėžta ir yra žinomas spektrinio šviesos spindulio $I_{\omega,R}$ intensyvumas lašelio paviršiuje, (8, 9) sistema pakeičiama integraline spinduliuotės lokalinio srauto lygtimi [42]:

$$\begin{aligned} q_r(r) &= 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \gamma \sin \gamma \left(I_{\omega,R} \exp(-\theta_{r \sin \gamma}^R - \theta_{r \sin \gamma}^r) + \int_{r \sin \gamma}^r n_{\omega}^2 I_{\omega,0} \exp(-\theta_r^r) d\theta_r^r \right. \\ &- \left. I_{\omega,R} \exp(-\theta_r^R) - \int_{r \sin \gamma}^R n_{\omega}^2 I_{\omega,0} \exp(-\theta_r^r) d\theta_r^r \right) d\gamma d\omega. \\ &+ \int_{r \sin \gamma}^R n_{\omega}^2 I_{\omega,0} \exp(-\theta_{r \sin \gamma}^r - \theta_{r \sin \gamma}^r) d\theta_r^r \end{aligned} \quad (12)$$

Šviesos spindulio sklaidimo kryptį ir kontrolinį pjūvį lašelyje apibrėžiančius kampus (1 pav.) sieja ryšys: $r \sin \gamma = R \sin \beta$; $\gamma = \pi - \varphi$. Nuo lašelio paviršiaus sklindančio šviesos spindulio $I_{\omega,R}$ intensyvumą lemia į lašelį patekusio išorinio spinduliuotės šaltinio dedamoji, sustiprinta vidiniu lašelio paviršiumi atspindėta šviesos bangos energija [35]:

$$I_{\omega,R} = \frac{(1 - r_{\omega,\beta}) n_{\omega}^2 I_{\omega,0}(T_g) + r_{\omega,\beta} \int_{R \sin \gamma}^R n_{\omega}^2 I_{\omega,0}(r)}{1 - r_{\omega,\beta} \exp(-2\theta_{R \sin \gamma}^R)} \quad (13)$$

(12, 13) išraiškose optinio storio $\theta_{r_1}^2$ simboliais atspindėti lašelio radialinės r koordinatės integralai, kurių indeksai rodo integralų rėžius: $\theta_{r_1}^2 \equiv \int_{r_1}^{r_2} \chi_{\omega} dr_* \sqrt{1 - (r/r_*)^2 \sin^2 \gamma}$ [43].

(2–6, 10–13) lygčių sistemos skaitinio sprendimo schema sudaryta pagal [35] darbe išvystytą metodiką: lašelio bematė η koordinatė suskaidoma į $J - 1$ dalį, o laisvai parinktas laiko $0 - \tau$ intervalas suskaidomas į $I - 1$ dalį:

$$\sum_{i=1}^{I-1} \Delta \tau_i = \sum_{i=1}^{I-1} (\tau_{i+1} - \tau_i) \equiv \tau, \quad \sum_{j=1}^{J-1} \Delta \eta_j = \sum_{j=1}^{J-1} (\eta_{j+1} - \eta_j) \equiv 1. \quad (14)$$

Lašelio paviršiaus momentinė $T_{R,i}$ temperatūra įvertinama iteracijomis greičiausio nusileidimo metodu $T_{R,i,it}$ minimizuojant (4) sąlygą: $T_{R,i} \equiv T_{R,i,it}$ iteracijoje, kurioje užtikrinamas mažesnis nei 0,01 % energijos srautų disbalansas lašelio paviršiuje. Skaitinėse schemose temperatūros $T_{i,j,it}$ laukui ir jo gradientui $grad T_{i,j,it}$ lašelyje nustatyti sudarytos (2) ir (11) išraiškose įvertinus 101 narį begalinėje sumoje ir fizikines savybes (F_s) išskirtuose koordinatinių intervaluose, apibrėžus kaip $\bar{F}_{s,j,i} \equiv (F_{s,j,i+1} + F_{s,j,i}) / 2$ ir $\bar{F}_{s,i,j} \equiv (F_{s,i+1,j} + F_{s,i,j}) / 2$, bei atlikus integralų šiose išraiškose galimus analitinius pertvarkymus. Skaitinė schema spinduliuotės lokaliam spinduliuotės $q_{\tau,i,j,it}$ srautui lašelyje apskaičiuoti remiasi $T_{i,j,it-1}$ rezultatais ir yra sudaryta išskirtuose lašelio koordinatės $\Delta \eta_j$ intervaluose, apibrėžus absoliučiai juodo kūno spinduliuotės intensyvumą ($\bar{I}_{\omega,0,i,j} = (I_{\omega,0,i,j} + I_{\omega,0,i,j+1}) / 2$ bei optines spektrines savybes ($\bar{\chi}_{\omega,i,j} = \chi_{\omega,i,j+1} = \chi_{\omega,i,j}$) / 2, $\bar{n}_{\omega,i,j} = (n_{\omega,i,j+1} + n_{\omega,i,j}) / 2$). Tai įgalina analitiškai pertvarkyti optinių storių integralus į skaitinei schemei patogią formą, pvz.:

$$\begin{aligned} \theta_{r \sin \gamma}^r &\equiv \theta_{r \sin \gamma}^{r_0} + \theta_{r_0}^r = \bar{\chi}_j \sqrt{r_{j_0}^2 + r^2 \sin^2 \gamma} + \\ &+ \sum_{jj=1}^{j-1} \bar{\chi}_{jj} \left(\sqrt{r_{jj+1}^2 + r^2 \sin^2 \gamma} - \sqrt{r_{jj}^2 + r^2 \sin^2 \gamma} \right); \end{aligned} \quad (15)$$

čia: $r_{j_0-1} < r \sin \gamma \leq r_{j_0}$ ir $j_0 \geq 2$. Šviesos atspindžio lašelio paviršiuje spektriniais $r_{\omega,\beta}$ koeficientai įvertinti pagal [44] rekomendacijas atsižvelgiant į lygiagrečiai ir statmenai polarizuotos šviesos spindulio sandus. Įvertinta Briusterio $\beta_{\omega} \equiv \arcsin(1/n_{\omega})$ kampo įtaka: $r_{\omega,\beta} = 1$, kai $\beta > \beta_{\omega}$.

Skaitinių schemų stabilumui užtikrinti $T_{R,ij}$ įvertinimo iteraciniame cikle lašelio skersmuo nekito: $2R_{iit} \equiv 2R_{i-1}$, o ciklui pasibaigus, buvo patikslinamas atsižvelgus į lašelio paviršinio garavimo greitį ir šylančio skysčio plėtimąsi:

$$\begin{aligned} \frac{4}{3} \pi \frac{\partial [\rho_l(\tau) R^3(\tau)]}{\partial \tau} &= -g_g(\tau), \rightarrow \\ \rightarrow \frac{\partial [\rho_l(\tau) R^3(\tau)]}{\partial \tau} &= -3R^2(\tau) m_g^+(\tau) \rightarrow R_f. \end{aligned} \quad (16)$$

Skaitinis eksperimentas baigiamas pasiekus numatytąjį lašelio šildymo τ laiką arba garavimo procese lašeliui sumažėjus iki 10 mikronų skersmens.

Atraminis šilumokaitos atvejis pernašos procesų sąveikos palyginamajam įvertinimui

Juo laikomas „lašo“ „ k “ šilumokaitos modelis, atspindintis lašelio garavimą ir šilumokaitą šildymo laidumu. „ k “ modelis sėkmingai realizuojamas pagal pateiktą „lašo“ sudėtinės šilumokaitos laidumu ir spinduliavimu uždavinio „ $k + r$ “ modelį tarus, jog $q_{r,ij,ii} \equiv 0$. „ k “ modelio šilumokaitos atvejo tinkamumas ir patrauklumas sudėtingesnėse sąlygose vykstančių šilumos ir masės pernašos procesų sąveikos įvertinimo metodikoje išryškėja, kai lašelio gyvavimo realus ciklas pervedamas į Furje kriterijumi išreikštą universalus laiko mastelį. Furje kriterijus ir šilumokaitos laikas siejami išpurškiamo skysčio pradinės būsenos sąlygose $Fo = (a_0/R_0^2) \cdot \tau$:

$$0 - \tau_{kon} - \tau_{fn} - \tau_f \rightarrow 0 - Fo_{ko} - Fo_{fn} - Fo_f. \quad (17)$$

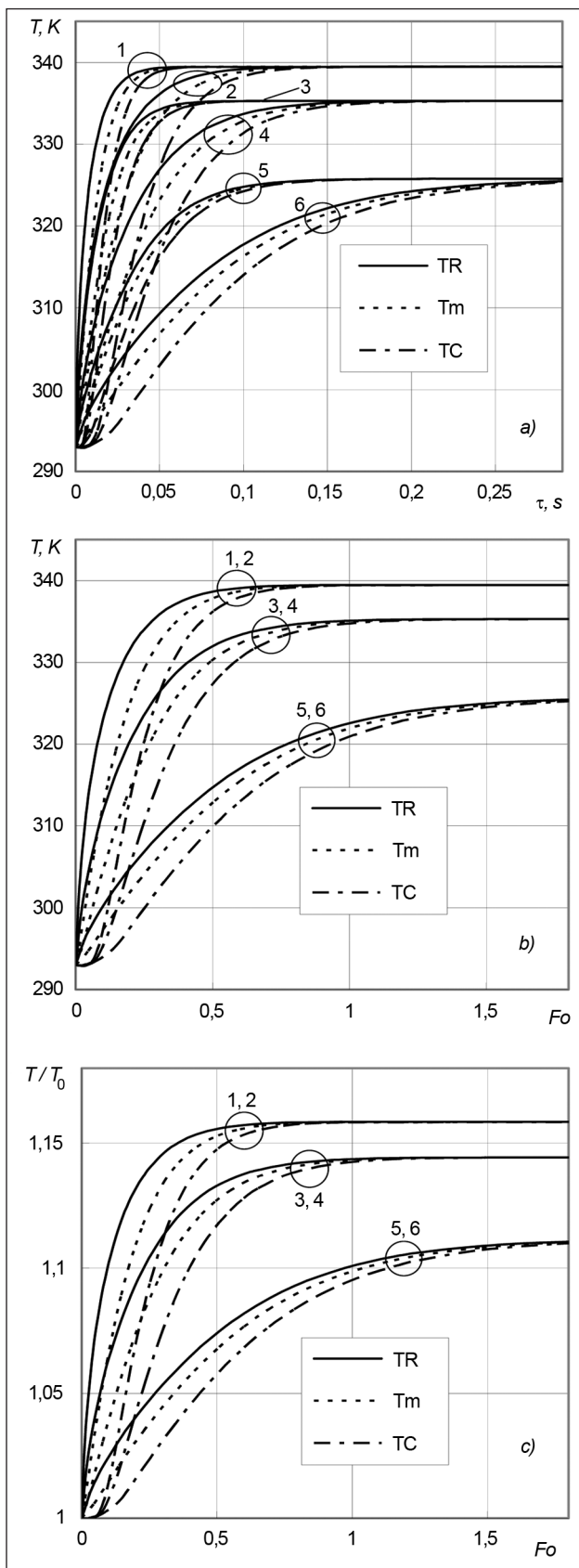
Esminis pernašos procesų pateikimo Furje masteliu privalumas, kad laidumu šildomų lašelių fazinių virsmų būdingų režimų trukmės – kondensacinio $Fo_{kon, „k“}$ nestacionariojo garavimo $Fo_{gar, „k“} = Fo_{fn, „k“} - Fo_{kon, „k“}$ nestacionariųjų fazinių virsmų $Fo_{fn, „k“} = Fo_{gar, „k“} + Fo_{kon, „k“}$ pusiausviro garavimo $Fo_{gar, „k“} = Fo_{f, „k“} - Fo_{fn, „k“}$ ir fazinių virsmų $Fo_{f, „k“} = Fo_{kon, „k“} + Fo_{gar, „k“} + Fo_{gar, „k“} -$ nepriklauso nuo skysčio išpurškimo dispersiškumo ir yra vienodos visiems laidumu šildomiems to paties skysčio lašeliams sauso oro temperatūra apibrėžtu atveju [35, 40].

Išpurkšto skysčio lašelių šilumokaitą ir masės mainus nusakančius parametrus pažymėkime bendru „ P “ simboliu. Galima numatyti tris pagrindines jų grupes: terminius „ P_T “, energinius „ P_q “ ir fazinių virsmų „ P_f “ parametrus. Terminiais „ P_T “ parametrais nusakomas lašelio terminės būsenos kitimas fazinių virsmų procese. Jie yra susiję su lašelio nestacionariuoju temperatūros $T(\eta, Fo)$ lauku. Labai svarbios yra trys būdingos šio lauko temperatūros: lašelio paviršiaus $T_R(Fo) \equiv T(\eta = 1, Fo)$, lašelio centro $T_C(Fo) \equiv T(\eta = 0, Fo)$ ir jo masės vidutinė $T_m(Fo) \equiv \int_0^1 T(\eta, Fo) \cdot \rho_l(\eta, Fo) d\eta / \int_0^1 \rho_l(\eta, Fo) d\eta$. Lašelio paviršiaus T_R^0 temperatūra yra kombinuoto analitinio ir skaitinio „lašo“ uždavinio sprendimo ašis. Ji yra nulemta

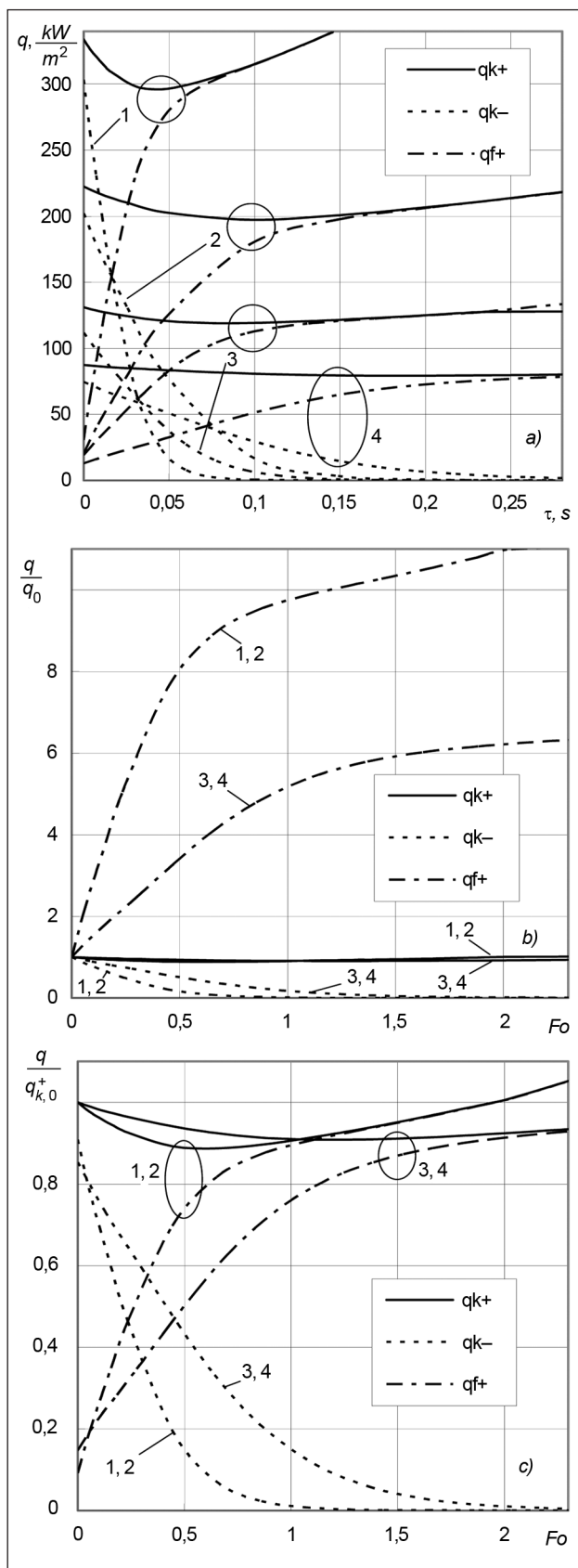
lašelio paviršiuje sąveikaujančiais energijos srautais ir lemia fazinių virsmų režimą: kol ji žemesnė už rasos taško temperatūrą, lašelio paviršiuje kondensuojasi skysčio garas; nestacionariojo garavimo režime ji išauga iki pusiausvirą garavimą užtikrinančios temperatūros, o šios temperatūros dinamiką pusiausviro garavimo režime lemia lašelio šildymo būdas [40]. Lašelio centro temperatūra svarbi neizotermiškumui $\Delta T_1 \equiv |T_R - T_C|$ lašelyje apibrėžti, o neizotermiško lašelio terminę būseną galima įvertinti tik pagal jo masės vidutinę temperatūrą. Laidumu šildomi lašeliai pusiausviro garavimo sąlygas pasiekia vienodai pašilę iki temperatūros, kuri pagal priimtas prielaidas yra sauso oro temperatūros funkcija: $T_{m, „k“, e} = T_{C, „k“, e} = T_{R, „k“, e} \equiv T_{l, „k“, e}(T_d)$ (2 pav.). Oro temperatūra apibrėžtu atveju yra patvirtintas nestacionariojo lauko $T_{„k“}(\eta, Fo)$ funkcijos identiškas laidumu šildomiems skirtingo stambumo lašeliams [45]. Tai lemia, jog realaus laiko mastelyje skirtingo stambumo lašeliams buvę savitos $T_{R, „k“}(\tau)$, $T_{C, „k“}(\tau)$, $T_{m, „k“}(\tau)$ funkcijos (2 pav. a). Furje mastelyje $T_{R, „k“}(Fo)$, $T_{C, „k“}(Fo)$ ir $T_{m, „k“}(Fo)$ funkcijos kiekvienai oro temperatūrai atspindimos trijų kreivių apibrėžtu būdingu grafiku (2 pav. b). Šį grafiką galima pateikti išpurškiamo skysčio temperatūros atžvilgiu normuotų $\bar{P}_{T, „k“}(Fo) \equiv P_{T, „k“}(Fo) / T_{l0}$ funkcijų grafiku (2 pav. c).

Išpurkšto skysčio lašelių šilumokaitos ir fazinių virsmų procesų sąveikos gilesniam priežastiniam ryšiui atskleisti svarbus energinių „ P_q “ parametru pažinimas. Tarp jų esminiais laikytini suminiai q_{Σ}^- , q_{Σ}^+ šilumos srautai lašelyje ir jo apsuptyje, jų q_k^- , q_r^- , q_k^+ , q_r^+ sandai bei fazinių virsmų šilumos q_f^+ srautas. Laidumu šildomiems lašeliams: $q_r \equiv 0$, $q_{\Sigma}^- \equiv q_{k, „k“}^-$ ir $q_{\Sigma}^+ \equiv q_{k, „k“}^+$. Šilumos srautų $q_{k, „k“}^+(\tau)$, $q_{k, „k“}^-(\tau)$ ir $q_{f, „k“}^+(\tau)$ grafikai skirtingo dispersiškumo lašeliams yra saviti (3 pav. a). Skirtingai nuo terminių parametru $P_{T, „k“}(Fo)$ funkcijų grafiku ir energinių parametru $P_{q, „k“}(Fo)$ funkcijų grafikai priklauso nuo lašelių dispersiškumo. Tačiau egzistuoja normuotų energinių parametru $\bar{P}_{q, „k“}(Fo)$ funkcijoms būdingi grafikai (3 pav. b, c). Jie svarbūs pernašos procesų sąveikos įtakos energiniams parametrus palyginamajame vertinime. Normuojančiu vardikliu gali būti energijos srautų pradinės vertės, užtikrinančios $\bar{P}_{q, „k“}(Fo) \equiv P_{q, „k“}(Fo) / P_{q, „k“, 0}$ funkcijų būdingo grafiko kreivių vieningą pradžios tašką $\bar{P}_{q, „k“}(Fo \equiv 0) = 1$ (3 pav. b). Normuojančiu vardikliu patogiau naudoti išorinio šilumos laidumo srauto pradinę $q_{k, „k“, 0}^+$ tankį. Šio normuojančio vardiklio pagrindu sudarytų $\bar{P}_{q, „k“}(Fo) \equiv P_{q, „k“}(Fo) / q_{k, „k“, 0}^+$ funkcijų grafikuose akivaizdžiai atsispindi atskirų energijos srautų indėlio garuojančio lašelio energiniame balanse dinamika (3 pav. c). Energinių parametru $\bar{P}_{q, „k“}(Fo)$ atitinkamų funkcijų skirtingo dispersiškumo lašeliams vienodumas ir sudaro prielaidas jų nestacionariojo temperatūros lauko $T_{„k“}(\eta, Fo)$ funkcijos minėtam tapatumui.

Esmniais fazinių virsmų „ P_f “ parametrais laikytini skysčio garo srautas ir jo tankis bei jų dinamikos nulemtas lašelio matmens kitimas. Garo srauto $m(\tau)$ funkcijos paži-

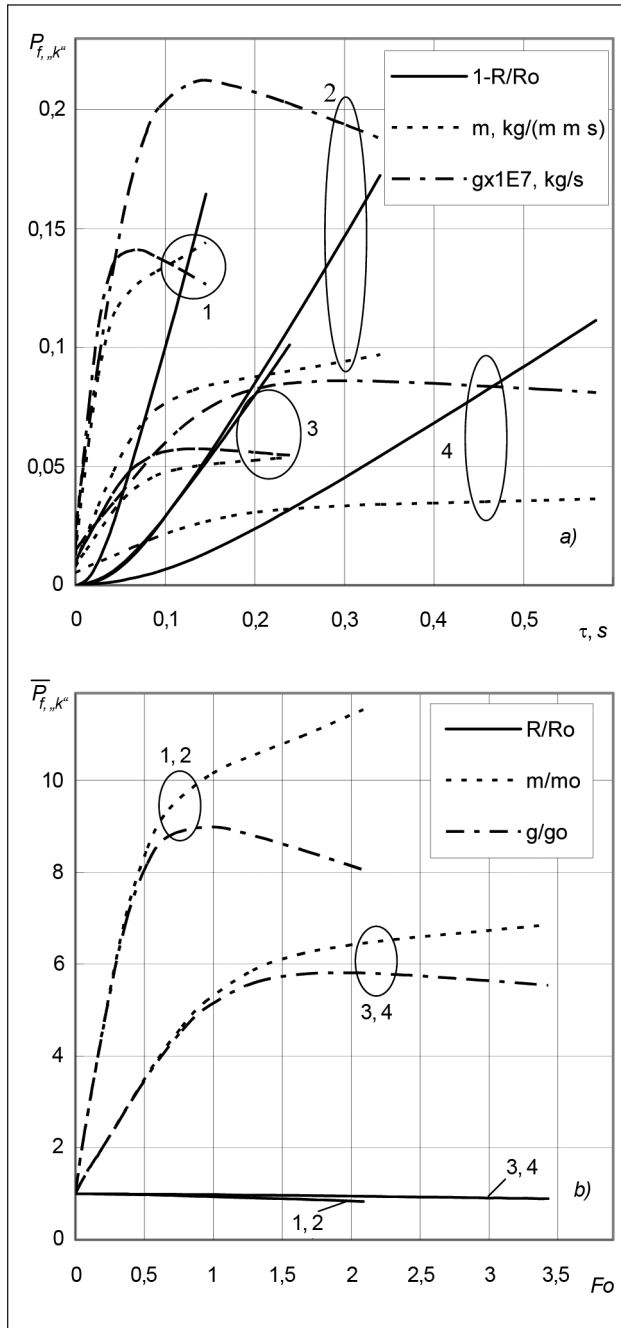


2 pav. Skirtingos temperatūros ore laidumu šildomų vandens lašelių terminė būsena nestacionariojo garavimo režime: (a) realaus laiko mastelis; (b, c) Furje kriterijumi išreikštas laiko mastelis. T_{gr} , K: (1, 2) 1 473, (3, 4) 1 073, (5, 6) 673; $R_0 \cdot 10^6$, m: (1, 3, 5) 100, (2, 4, 6) 150; $T_0 = 293$ K



3 pav. Šilumos srautai laidumu šildomų vandens lašelių paviršiuje nestacionariojo garavimo režime: (a) realaus laiko mastelis; (b, c) Furje kriterijumi išreikštas laiko mastelis. $R_0 \cdot 10^6$, m: (1, 3) 100, (2, 4) 150; T_{gr} , K: (1, 2) 673, (3, 4) 1 073; $T_0 = 293$ K

nimas ir tinkamas valdymas įgalina reguliuoti daugelio terminių technologijų efektyvumui svarbią garo srauto g (τ) funkciją, lemiančią skysčio lašelių gyvavimo ciklą apibrėžiančią $R(\tau)$ funkciją. Pastaroji turi aiškų grįžtamąjį poveikį išpurkšto skysčio lašelių terminiams ir energiniams parametrams. Laidumu šildomų lašelių $\bar{P}_{q,k^c}(Fo)$ ir $P_{T,k^c}(Fo)$ parametrų funkcijų dėsningumai sudaro prielaidas egzistuoti ir fazinių virsmų parametrų $\bar{P}_{f,k^c}(Fo)$ funkcijų būdingiems kitimo grafikams (4 pav.).



4 pav. Laidumu šildomų vandens lašelių fazinių virsmų parametrai nestacionariojo garavimo režime: (a) realaus laiko mastelis; (b) Furje kriterijumi išreikštas laiko mastelis. $R_0 \cdot 10^6$; m: (1, 3) 100, (2, 4) 150; T_d, K : (1, 2) 673, (3, 4) 1 073; $T_0 = 293 K$

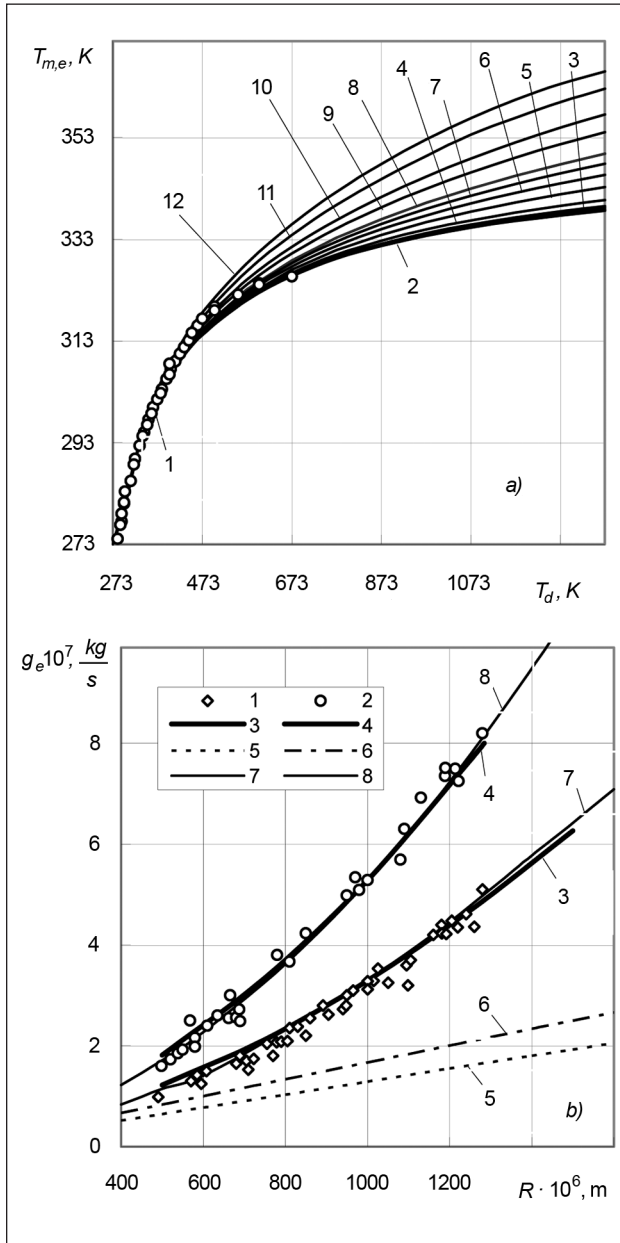
$\bar{P}_{q,k^c}(Fo)$ funkcijoms sudaryti ir jų kitimą aprašančioms kreivėms gauti pakanka sumodeliuoti laisvai pasirinkto laidumu šildomo lašelio šilumokaitą ir fazinius virsmus konkrečiu sauso oro temperatūra apibrėžtu atveju.

„Hipotetinio“ lašelio „k“ šilumokaitos atvejis

„Hipotetiniu“ lašeliu suvokiamas vandens savybes turintis lašelis, kurio paviršiuje egzistuoja menamas masės šaltinis, garavimo procese paviršiuje tolygiai išskiriantis, o kondensacijos procese sugeriantis faziniuose virsmuose dalyvaujantį vandens srautą. „Hipotetinio“ lašelio modelis įgalina skaitiškai atkurti [20] darbe vykdytų vandens lašelių pusiausviro garavimo eksperimentų kraštines sąlygas ir gautus pusiausviro garavimo greičio ir temperatūros modeliavimo rezultatus palyginti su [16, 22] darbuose pateiktais eksperimentinių tyrimų rezultatų grafikais (5 pav.) [46]. Eksperimentų šilumokaitos atvejis pakartojamas pagal apertą (1–16) „lašo“ modelį. Tam lašelio garavimo dinamiką aprašanti (16) lygtis pakeičiama lašelio tūrio pastovumą užtikrinančia $dR/d\tau \equiv 0$ sąlyga. Kadangi laidumu šildomų lašelių pusiausviro garavimo terminė būseną nepriklauso nuo vandens išpurškimo dispersiškumo, apskaičiuotoji „hipotetinio“ lašelio pusiausviro garavimo temperatūra atspindi ir realaus kintančio skersmens lašelio pusiausviro garavimo terminę būseną.

Atliktas platus „hipotetinio“ lašelio šilumos ir masės mainų skaitinis tyrimas „k“ ir „k+r“ šilumokaitos atvejais. Patvirtintas geras sumodeliuotos pusiausvirai garuojančių vandens lašelių terminės būsenos atitikimas „k“ atvejo eksperimentams (5 pav. a) bei apskaičiuotojo lašelių pusiausviro garavimo greičio suderinamumas su „k+r“ atvejo eksperimentu plačiame kraštinių sąlygų diapazone (5 pav. b). Tuo patvirtintas „lašo“ uždavinio tyrimo metodikos patikimumas ir sudarytos prielaidos sudėtinės pernašos procesų sąveikos procesų sisteminio vertinimo metodikai nestacionariojo garavimo režime išvystyti.

„Hipotetinio“ lašelio gyvavimo cikle aiškiai išskiriamas nestacionariojo garavimo režimas, kadangi šilumokaitą ir masės mainus nusakančių parametrų $P(Fo)$ funkcijos nestacionariojo garavimo režimo eigoje nusistovi ir pusiausvirame režime nekinta: $P_{q,k^c}(Fo \rightarrow Fo_e) \rightarrow P_{q,k^c,e}(Fo \geq Fo_e) \equiv const$. Todėl „hipotetinio“ lašelio „k“ šilumokaitos sąlygomis visais sauso oro T_d temperatūra nusakytais atvejais, žinomais galima laikyti ne tik pradinis P_0 parametrus, bet ir pusiausviro garavimo sąlygų $P_{q,k^c,e}$ pernašos parametrus. Nestacionariojo garavimo režimo metu įvyksta $P_0 \rightarrow P_{q,k^c,e}$ transformacija. Galima numatyti nestacionariojo garavimo režimo universalią 0–1 trukmę Furje kriterijų $\bar{Fo} \equiv Fo / Fo_{q,k^c,e}$ santykiu išreikštame laiko mastelyje. Gilesnė „k“ atvejo modeliavimo rezultatų analizė parodė, jog P_{q,k^c} pernašos parametrai pateikti specialioje $\bar{P}_{q,k^c,n}(\bar{Fo})$ funkcijos formoje nestacionariojo garavimo režime taip pat pakinta 0–1 universaliame intervale. Pagrįsta, jog $\bar{P}_{q,k^c,n}(\bar{Fo})$ funkcijai sudaryti anksčiau



5 pav. „Hipotetinio“ lašelio nustatytų pusiausviro garavimo terminių (a) ir fazinių virsmų (b) parametų palyginimas su eksperimentinių tyrimų rezultatais. a) (1,2) $T_{m,e} \equiv T_{m,e,k}$ (3–12) $T_{m,e} \equiv T_{m,e,k+r}$; (1) eksperimentinių tyrimų rezultatai [16, 22], (2–12) „hipotetinio“ lašelio skaitinio tyrimo rezultatai; $R \cdot 10^6$, m: (3) 25, (4) 50, (5) 100, (6) 150, (7) 200, (8) 250, (9) 375, (10) 500, (11) 750, (12) 1 000. b) (1–4, 7, 8) $g_e \equiv g_{e,k+r}$ (5, 6) $g_e \equiv g_{e,k}$; (1, 2) eksperimentinių tyrimų rezultatai [20, 21]; (3, 4) skaitinio tyrimo [6] rezultatai; (5–8) „hipotetinio“ lašelio skaitinio tyrimo rezultatai. T_d , K: (1, 3, 5, 7) 981, (2, 4, 6, 8) 1 133

aptartas pernašos parametų $P_{„k“}(Fo)$ funkcijas reikia normuoti atitinkamo parametro pradinės ir pusiausviro garavimo sąlygų vertės atžvilgiu ir jas pateikti \bar{Fo} masteliu:

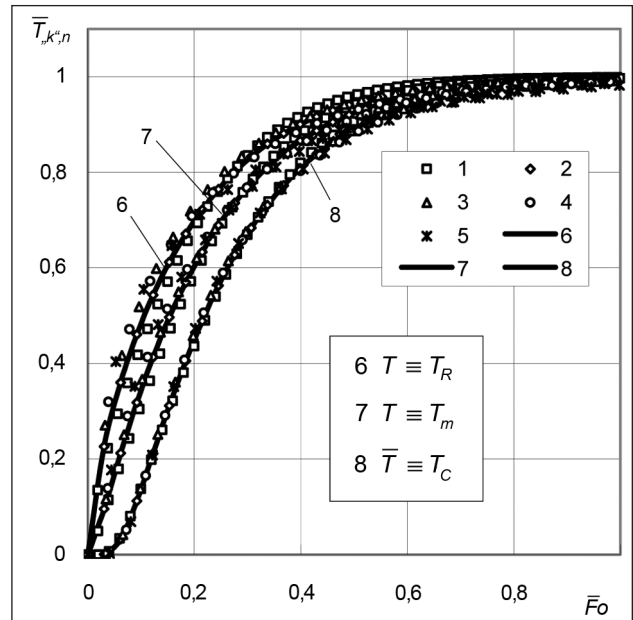
$$\bar{P}_{„k“}(Fo) \equiv \frac{P_{„k“}(Fo) - P_{„k“,0}}{P_{„k“,e} - P_{„k“,0}} = \frac{\bar{P}_{„k“}(Fo) - 1}{\bar{P}_{„k“,e} - 1} \quad (18)$$

„Hipotetinio“ lašelio „k“ šilumokaitos skaitinio eksperimento išsami rezultatų grafinė analizė parodė, jog visais modeliuotais kraštinių sąlygų atvejais lašelių terminės būsenos kitimą nestacionariojo garavimo režime atspindi [46] darbe pateiktas pagal (18) formos išraišką sudarytų $\bar{T}_{R„k“,n}(Fo)$, $\bar{T}_{m„k“,n}(Fo)$ bei $\bar{T}_{C„k“,n}(Fo)$ funkcijų grafikas (6 pav.). Todėl temperatūrų kitimo kreives šiame grafike galima pavadinti laidumu šildomo „hipotetinio“ lašelio terminės būsenos kitimą apibrėžiančiosiomis paviršiaus, centro ir masės vidutinės temperatūros kitimo būdingosiomis kreivėmis.

(18) išraiška atspindėti terminės būsenos normavimo principai „k“ šilumokaitos atveju taikyti ir kintamo skersmens lašelių terminiai būsenai apibrėžti: [40] darbe grafiškai apibendrintas vandens lašelių paviršiaus temperatūros kitimas, o [45] darbe vandens ir angliavandenilių lašelių masės vidutinės temperatūros dinamika nestacionariojo garavimo režime aprašyta empirine formule. Tačiau (18) išraiškos pritaikymas kintamo skersmens lašelio terminiai būsenai aprašyti nestacionariojo garavimo režime „k“ šilumokaitos atveju turi tam tikrų savitumų.

Baziniai grafikai sudėtinės pernašos nestacionariųjų procesų sąveikai įvertinti

Lašelių dispersiškumas intensyviai veikia jų šilumokaitos ir fazinių virsmų spartą. Todėl iteraciniame $T_{R,i,it}$ nustatymo ciklo laiko $\Delta\tau_i = \tau_{i+1} - \tau_i$ žingsnyje daroma lašelio skersmens pastovumo $2R(\tau_i - \tau_{i+1}) \equiv 2R_i$ prielaida iššaukia energinių $P_{q,i}$ parametų įvertinimo papildomus neapibrėžtumus. Todėl kintamo skersmens lašelių atitinkamo pernašos parametro

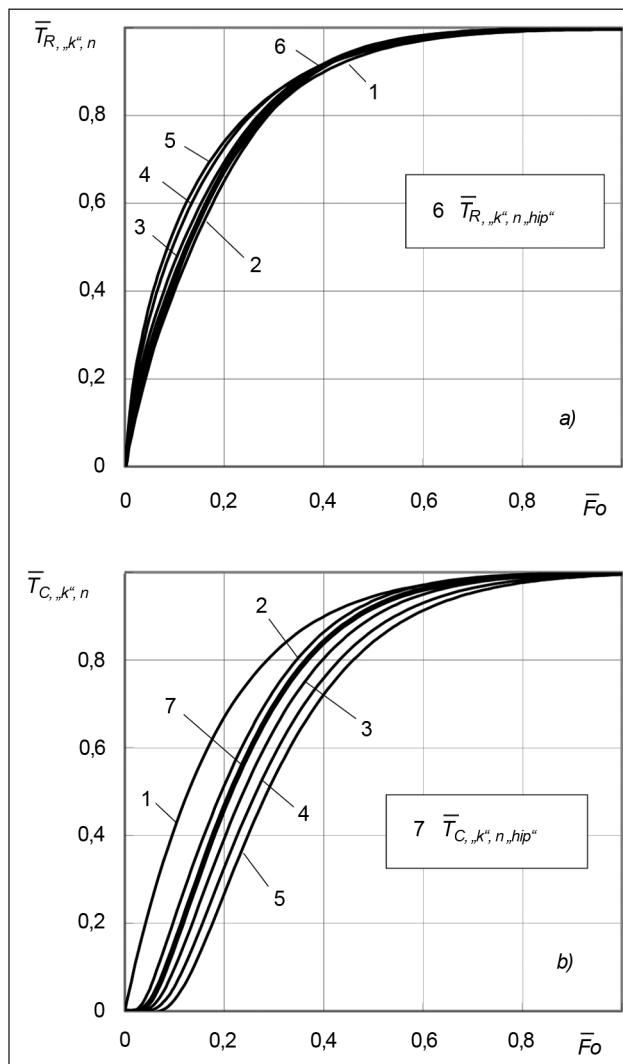


6 pav. „Hipotetinio“ lašelio terminės būsenos kitimą „k“ šilumokaitos atveju apibrėžiančios lašelio paviršiaus, centro ir jo masės vidutinės temperatūros būdingosios kreivės. T_0 , K: (1–3) 873, (4) 673, (5) 1 273

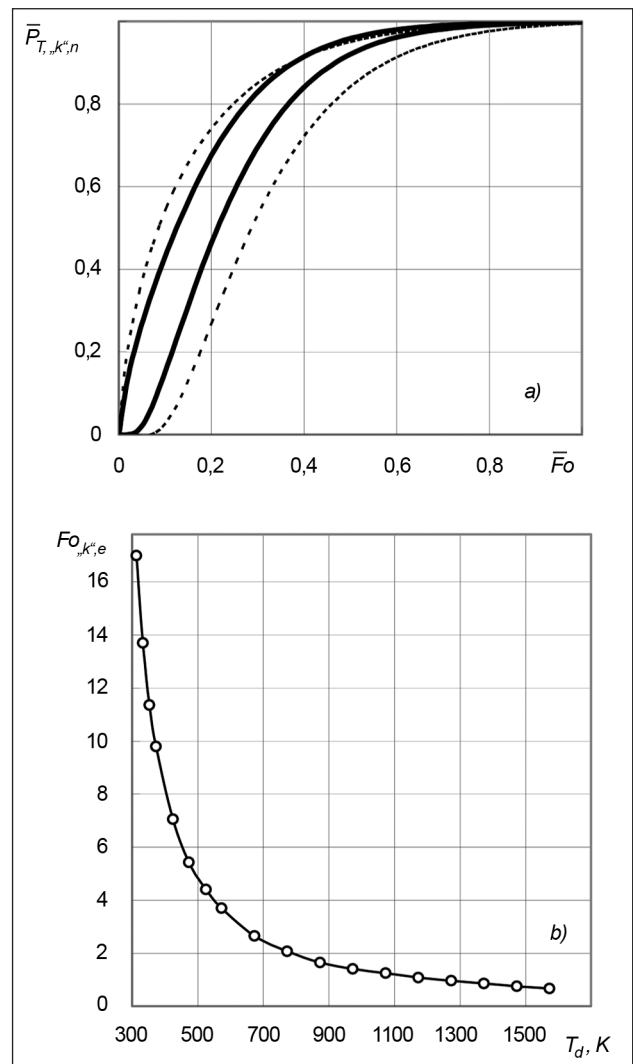
$\bar{P}_{„k“,n}(\bar{Fo})$ funkcijos grafiką sudaro jau ne viena būdingoji kreivė, o tam tikrą dispersiškumo įtaką atspindinti kreičių šeima. Pastaroji atskiriems pernašos parametrams savitai apgaubia „hipotetinio“ lašelio atitinkamo parametro kitimo būdingąją kreivę. Šio darbo apimtis neleidžia pateikti vykdytus $\bar{P}_{„k“,n}(\bar{Fo})$ funkcijų grafikų išsamaus tyrimo rezultatus. Tačiau būtina pabrėžti, jog buvo išryškintos ribinės kreivės atskiro parametro $\bar{P}_{„k“,n}(\bar{Fo})$ funkcijos grafiko kreičių šeimoje. Ribinės kreivės svarbios sudėtinų pernašos procesų sąveikos įvertinimo prasme, kadangi apjungtos su „hipotetinio“ lašelio parametro kitimo būdingąja kreive sudaro bazinį grafiką sudėtingesnio už šildymą laidumu šilumokaitos atvejo įtakos atitinkamam pernašos parametrai įvertinti. Kreivių šeimai $\bar{P}_{„k“,n}(\bar{Fo})$ funkcijos grafike akivaizdi išpurškiamo vandens temperatūros įtaka, lemianti nestacionariojo garavimo režimo universalią $Fo_{„k“,e}(T_d)$ trukmę. Ap-

tartame oro temperatūros kitimo intervale $T_0 \cong 278$ K atveju $\bar{T}_{R,„k“,n}(\bar{Fo})$ ir $\bar{T}_{C,„k“,n}(\bar{Fo})$ grafikų kreičių šeimos pateiktos (7 pav.). Lašelio paviršiaus temperatūros (7 pav. a) ir centro temperatūros (7 pav. b) kitimo ribinės kreivės atrinktos į laidumu šildomo lašelio terminės būsenos kitimo $\bar{P}_{T,„k“,n}(\bar{Fo})$ bazinį grafiką (8 pav. a). Šis grafikas tenkina nestacionariųjų temperatūros lauką laidumu šildomame lašelyje aprašančią $\bar{T}_{T,„k“,n}(\bar{Fo})$ funkciją, todėl tinka ir lašelio masės vidutinės temperatūros $\bar{T}_{m,„k“,n}(\bar{Fo})$ funkcijai. Reikia pažymėti, jog šis grafikas sudarytas pagal išpurškiamo $T_0 \cong 278$ K temperatūros vandeniui galiojančią $Fo_{„k“,e}(T_d)$ funkciją (8 pav. b). Todėl išlieka poreikis atlikti platesnį išpurškiamo vandens temperatūros įtakos baziniam $\bar{P}_{T,„k“,n}(\bar{Fo})$ grafikui įvertinimą.

Analogiški baziniai grafikai sudaryti ir kitiems laidumu šildomų lašelių šilumokaitos ir fazinių virsmų parametrams. Juos sudarant teigta, jog nestacionariojo



7 pav. Sausame ore išpurkšto $T_0 \cong 278$ K temperatūros vandens lašelių terminė būseną nestacionariojo garavimo režime apibrėžiančių $\bar{T}_{R,„k“,n}(\bar{Fo})$ ir $\bar{T}_{C,„k“,n}(\bar{Fo})$ funkcijų grafikų kreičių šeimos „k“ šilumokaitos atveju. T_d , K: (1) 313, (2) 673, (3) 1 073, (4) 1 273, (5) 1 573



8 pav. Sausame ore išpurkšto vandens laidumu šildomų lašelio terminės būsenos kitimo $\bar{P}_{T,„k“,n}(\bar{Fo})$ bazinis grafikas (a) ir 278 K pradinės temperatūros vandens lašelių nestacionariojo garavimo režimo trukmės universali $Fo_{„k“,e}(T_d)$ funkcija (b)

garavimo pabaigą atspindi laiko momentas, po kurio lašelio masės vidutinė temperatūra pusiausviro garavimo režime pakinta ne daugiau kaip dešimtąja laipsnio dalimi: $|T_m(\tau \equiv \tau_e) - T_m(\tau > \tau_e)| \leq 0,1 \text{ K}$.

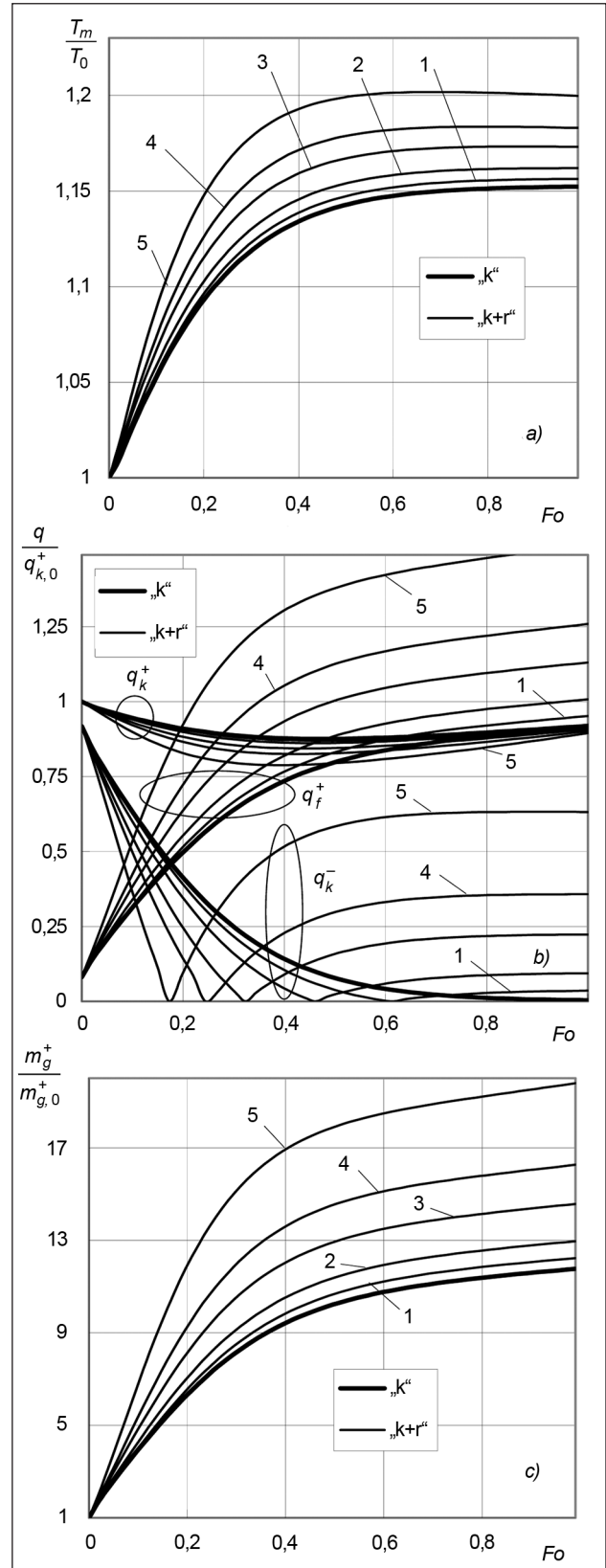
Nestacionariųjų procesų sąveikos įvertinimas „ $k+r$ “ šilumokaitos atveju

Sudėtingesnės, pvz., „ $k+r$ “ šilumokaitos atveju išpurkšto skysčio lašelių šilumos ir masės mainų parametrus apibendrins $P_{„k+r“}(Fo)$ funkcijos. Kadangi vandens lašeliuose spinduliuotės srauto sugėrimo procesas labai priklauso nuo jų dispersiškumo [6, 37–32], $P_{„k+r“}(Fo)$ funkcijas tenka apibrėžti sauso oro temperatūra ir lašelio pradiniu skersmeniu. Todėl $P_{„k+r“,R_0}(Fo)$ funkcijos grafike atspindi tam tikro lašelių dispersiškumo nulemtą kreivių šeimą. Pastaroji išlieka ir normuotos parametru formos $\bar{P}_{„k+r“,R_0}(Fo) \equiv P_{„k+r“,R_0}(Fo) / P_{„k+r“,R_0,0}$ funkcijų grafikuose. Galima pastebėti, jog „ k “ ir „ $k+r$ “ šilumokaitos vyksmo identiškomis pradinėmis sąlygomis normuojantys parametrai bus tapatūs: $P_{„k+r“,R_0,0} \equiv P_{„k“,R_0,0}$. Todėl $\bar{P}_{„k+r“,R_0}(Fo)$ ir $\bar{P}_{„k“}(Fo)$ sutapdintuose grafikuose „ $k+r$ “ šilumokaitos atvejo kreivių šeimos atsilankimas nuo „ k “ atvejo parametro kitimo kreivės parodys sudėtinės pernašos procesų sąveikos įtaką skirtingo dispersiškumo lašelių atitinkamiems parametrams (9 pav.).

Toks sudėtinės pernašos procesų įvertinimo būdas yra akivaizdus ir gana paprastas. Tačiau atspindi konkretų oro temperatūra apibrėžtą atvejį ir sąveikos intensyvumui plačiame kraštinių sąlygų diapazone įvertinti reikalauja labai plataus skaitinio eksperimento, yra imlus darbu. Geras prielaidas sudėtinių pernašos procesų sąveikos sisteminiam įvertinimui palyginamuoju metodu sudaro aptarti baziniai „ k “ šilumokaitos atvejo parametru grafikai. Tam juos reikia sutapatinti su numatytam dvifazio srauto parametru („ SP “) sudarytais sudėtinės šilumokaitos („ SA “) atvejo atitinkamų $\bar{P}_{„SA“,n,SP}(Fo)$ funkcijų grafikais. Šioms $\bar{P}_{„SA“,n,SP}(Fo)$ funkcijoms sudaryti pritaikoma (18) išraiška modifikuota numatytam „ SA “ šilumokaitos atveju:

$$\bar{P}_{„SA“,n,SP}(Fo) \equiv \frac{\bar{P}_{„SA“,n,SP}(Fo) - 1}{\bar{P}_{„k“,e} - 1}. \quad (19)$$

(19) ir (18) išraiškose Furje kriterijus normuojamas vienodai: $\bar{Fo} \equiv Fo / Fo_{„k“,e}$. Tuomet „ k “ šilumokaitos atvejo „ SP “ parametro baziniai grafikai, papildyti $\bar{P}_{„SA“,n,SP}(Fo)$ funkcijos grafiko kreivių šeima, įgalina pateikti sudėtinės šilumokaitos „ SA “ atvejo įtakos lašelių šilumokaitai ir faziniams virsmams įvertinimą: didesnis kreivių atsilankimas nuo bazinio grafiko rodyt augantį sudėtinės šilumokaitos „ SA “ atvejį apibrėžiančiojo parametro vaidmenį sudėtinės pernašos procesų sąveikoje, o kreivių priartėjimas prie bazinio grafiko leis apibrėžti šio parametro vaidmens sąveikoje galimo paneigimo ribas. Aiškūs pagrindiniai „ SA “ \equiv „ $k+c$ “; „ SA “ \equiv „ $k+r$ “ ir „ SA “ \equiv „ $k+c+r$ “ sudėtinės šilumokaitos atvejai. Jiems visiems yra svarbūs „ SP “ $\equiv T_p$, „ SP “ $\equiv R_0$,

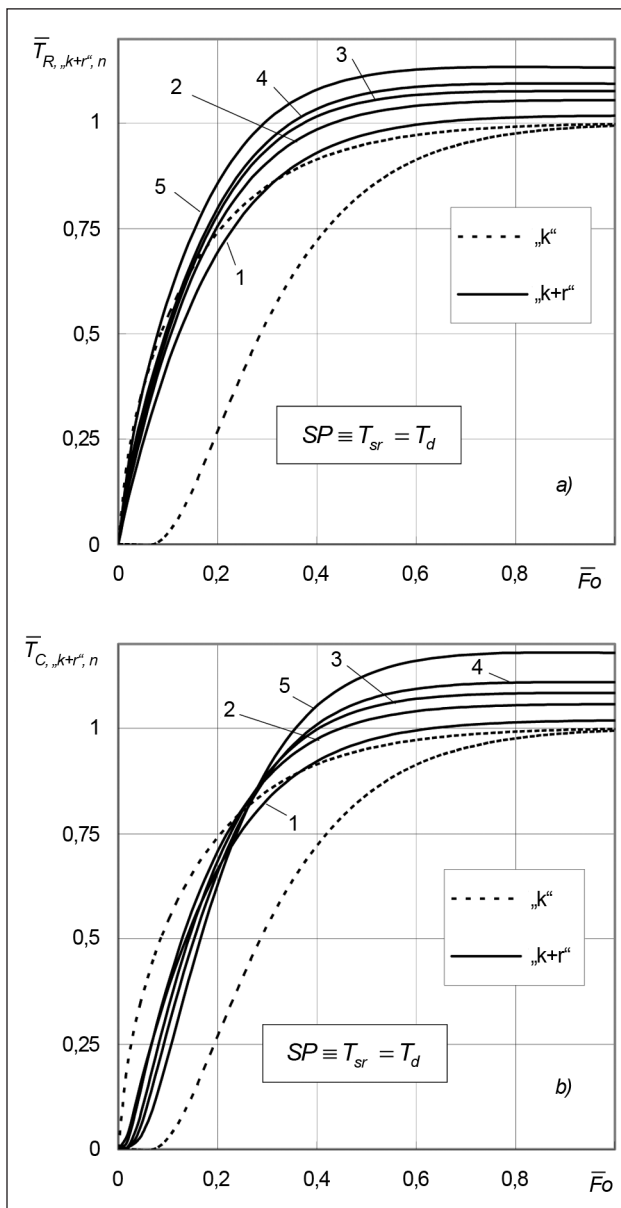


9 pav. Vandens išpurškimo dispersiškumo įtaka lašelių šilumokaitos ir masės mainų terminiams (a), energiniams (b) ir fazinių virsmų (c) parametrams. $R_0 \cdot 10^6$, m: (1) 25, (2) 50; (3) 100, (4) 150, (5) 250; $q_{k,0}^+$, kW/m²: (1) 1 644.4, (2) 913; (3) 456.5, (4) 304.3, (5) 182.6; $m_{g,0}^+$, kg/(m²s): (1) 0.0606, (2) 0.0303; (3) 0.0151, (4) 0.0101, (5) 0.0061; $T_d = 1 273 \text{ K}$; $T_0 = 293 \text{ K}$

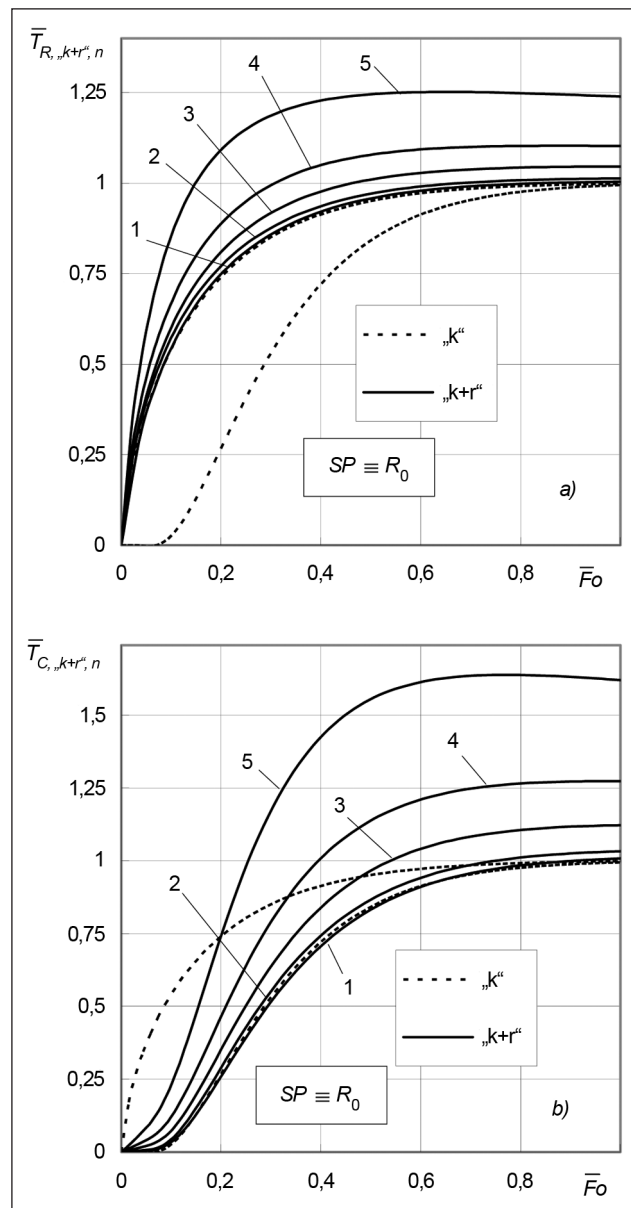
„ $SP^c \equiv T_0$ “ dvifazio srauto parametrai. Konvekcinio šildymo intensyvumui nusakyti „+c“ šilumokaitos atvejais žinotina lašelio slydimo greičio nešančiajame sraute $\Delta w(\tau) \equiv |w_d - w|$ dinamika, kuriai apibrėžti svarbus lašelio slydimo pradinio greičio „ $SP^c \equiv \Delta w_0$ “ parametras. Sudėtinės „ $k+r^c$ “ šilumokaitos atvejais svarbus spinduliavimo šaltinio temperatūros „ $SP^c \equiv T_{sr}$ “ parametras.

Šiame darbe analizuotai „ $k+r^c$ “ šilumokaitai įvertinta pernašos procesų sąveikos įtaka lašelių terminiams parametrams nestacionariojo garavimo režime spinduliuojančios apsupties $SP_{„k+r^c, Td”} \equiv T_{sr} = T_d$ atvejo temperatūros bei vandens išpurškimo dispersiškumo $SP_{„k+r^c, R”} \equiv R_0$ aspektais. Numatyti minėtų parametru $SP_{„k+r^c, Td”} \equiv 300-1\ 500$, K ir

$SP_{„k+r^c, R”} \equiv 5 \cdot 10^{-6}-250 \cdot 10^{-6}$, m kitimo intervalai. Juose galimos įvairios $SP_{„k+r^c, Td”}$ ir $SP_{„k+r^c, R”}$ parametru kombinacijos. Svarbu išryškinti tokias kombinacijas, kuriose apibrėžtai tam tikrai vieno parametro vertei sudėtinės pernašos procesų sąveiką galima būtų paneigti, nepriklausomai nuo kito parametro vertės. Spinduliavimo įtaka terminiams vandens lašelio parametrams yra nedidelė, kai jie garuoja žemesnės už 100 °C temperatūros ore (10 pav.), arba jų skersmuo yra dešimties mikronų eilės (11 pav.). Šiuos svarbius atvejus galima atspindėti spinduliavimo šaltinio normuota $SP_{„k+r^c, T”} \equiv \bar{T}_{sr} = T_d / 350 \leq 1$ temperatūra ir normuotu lašelio pradiniu spinduliu $SP_{„k+r^c, R”} \equiv \bar{R}_0 = R_0 / 10^{-5} \leq 1$. Kai $\bar{T}_{sr} > 1$ ir $\bar{R}_0 > 1$, tuomet reikalingas spinduliavimo vaidmens



10 pav. Spinduliavimo poveikio lašelių terminiai būsenai nestacionariojo garavimo režime įvertinimas šaltinio temperatūros aspektu: $T_{sr} \equiv T_d$, K: (1) 353, (2) 425; (3) 573, (4) 673, (5) 873; T_0 , K: (1) 283, (2–5) 293; $R_0 = 250 \cdot 10^{-6}$ m



11 pav. Spinduliavimo poveikio lašelių terminiai būsenai nestacionariojo garavimo režime įvertinimas lašelių dispersiškumo aspektu: $R_0 \cdot 10^6$, m: (1) 10, (2) 20; (3) 50, (4) 100, (5) 250; $T_0 \equiv 293$ K; $T_d = 1\ 473$ K

sudėtinių pernašos procesų sąveikoje įvertinimas kiekvienai \bar{T}_{sr} ar \bar{R}_0 kombinacijai. Pagal jo rezultatus galima sudaryti $\bar{R}_{0,sn}(\bar{T}_{sr})$ funkciją, nusakančią apatinę lašelių dispersiškumo ribą, iki kurios spinduliavimo vaidmenį pernašos procesų sąveikoje galima paneigti. Pagal pateiktą vertinimą turime: $\bar{R}_{0,sn}(\bar{T}_{sr} \rightarrow 4.5) \rightarrow 1$ ir $\bar{R}_{0,sn}(\bar{T}_{sr} \rightarrow 1) \rightarrow \infty$. Tarpinėms $\bar{R}_{0,sn}(\bar{T}_{sr})$ funkcijos vertėms nustatyti reikalinga išsamesnė grafinė analizė, kurią neleidžia pateikti šio straipsnio apimtis.

IŠVADOS

1. Furje kriterijumi išreikštame laiko mastelyje išpurkšto vandens gyvavimo ciklas yra universalus visiems laidumu šildomiems lašeliams sauso oro temperatūra apibrėžtu atveju. Jį sudaryti pakanka sumodeliuoti laisvai parinkto lašelio šilumokaitę ir fazinius virsmus. Šiame cikle terminės lašelio būsenos kitimą nusakančių atitinkamų terminių $P_{T, \kappa}(Fo)$ funkcijų grafikai visiems lašeliams yra tapatūs, o energiniams ir faziniams virsmų parametrų tai galioja jų normuotame $\bar{P}_{q, \kappa}(Fo) \equiv P_{q, \kappa}(Fo)/P_{q, 0}$ ir pavidale.

2. Sudėtinio šildymo laidumu ir spinduliavimo atveju $\bar{P}_{T, \kappa+r}(Fo)$ grafikai priklauso nuo lašelių dispersiškumo. Sauso oro temperatūra apibrėžtu atveju sudaryti ir sutaptinti $P_{\kappa}(Fo)$ ir $\bar{P}_{\kappa+r}(Fo)$ funkcijų grafikai atspindi sudėtinių pernašos procesų sąveikos poveikį atitinkamų parametru dinamikai.

3. Sisteminių sudėtinės pernašos procesų sąveikos įvertinimą įgalina atlikti Furje kriterijų $\bar{Fo} \equiv Fo/Fo_{\kappa, e}$ santykiu išreikštoje nestacionariojo garavimo režimo universalios 0–1 trukmės normuotoje formoje pateikti $P_{\kappa}(Fo)$ ir atitinkamo $P_{\kappa+r}(Fo)$ parametro funkcijų grafikai, kai šios funkcijos yra sunormuojamos pradinės parametro $P_{\kappa, 0} \equiv P_{\kappa}(Fo \equiv 0)$ ir pusiausviros garavimo sąlygų parametro $P_{\kappa, e} \equiv P_{\kappa}(Fo \equiv 1)$ verčių atžvilgiu.

Žymėjimai

a – temperatūros laidumo koeficientas m^2/s ;
 B_T – Spoldingo šilumos pernešimo parametras;
 c_p – savitoji šiluma $J/(K \text{ kg})$;
 c_0 – šviesos greitis m/s ;
 D – difuzijos koeficientas m^2/s ;
 Fo – Furje kriterijus;
 g – srautas kg/s ;
 h – Planko konstanta J s;
 I_ω – spektrinis spinduliuotės intensyvumas $W/(m \text{ ster})$;
 $I_{\omega 0}$ – absoliučiai juodo kūno spektrinis spinduliuotės intensyvumas $W/(m \text{ ster})$;
 k – Bolcmano konstanta J/K ;
 L – garavimo šiluma J/kg ;
 m – garo srauto tankis $kg/(m^2 \text{ s})$;
 n – nario indeksas begalinėje sumoje;

n_ω – spektrinis lūžio rodiklis;
 $n_{\omega \kappa}$ – kompleksinis spektrinis lūžio rodiklis;
 p – slėgis Pa;
 q – šilumos srauto tankis W/m^2 ;
 R – lašelio spindulys m ;
 R_μ – dujų pastovioji $J/(kmol \text{ K})$;
 r – radialinė koordinatė m ;
 $r_{\omega, \beta}$ – spektrinis kampas β sklindančio šviesos spindulio atspindžio lašelio paviršiuje koeficientas;
 T – temperatūra K;
 s – laisvai parinkta kryptis m ;
 $\beta, \gamma, \varphi, \psi$ – spinduliavimo šilumokaitai sferoje būdingi kampai (1 pav.) rad;
 β_ω – Briusterio kampas rad;
 $\eta = r/R$ – bematė radialinė koordinatė;
 κ_ω – spektrinis sugėrimo rodiklis;
 λ – šilumos laidžio koeficientas $W/(K \text{ m})$;
 μ – molekulinė masė $kg/kmol$;
 ρ – tankis kg/m^3 ;
 τ – laikas s;
 τ_{fn} – nestacionariųjų fazinių virsmų režimo trukmė s;
 $\tau_{gar, n}$ – nestacionariojo garavimo režimo trukmė s;
 χ – sugėrimo koeficientas m^{-1} ;
 ω – banginis skaičius m^{-1} .

Indeksai apačioje:

c – konvekcija;
 C – lašelio centras;
 d – dujos;
 e – pusiausviros garavimas;
 f – faziniai virsmai;
 fn – nestacionarūs faziniai virsmai;
 g – garas;
 gar – garavimas;
 gd – garo ir dujų mišinys;
 i – laiko indeksas skaitinėje schemeje;
 it – iteracijos indeksas skaitinėje schemeje;
 j – radialinės koordinatės indeksas skaitinėje schemeje;
 I – kontrolinio laiko indeksas skaitinėje schemeje;
 J – lašelio paviršiaus radialinės koordinatės indeksas skaitinėje schemeje;
 k – laidumas;
 kon – kondensacija;
 l – skystis;
 m – masės vidutinis;
 R – lašelio paviršius;
 r – spinduliavimas;
 sr – spinduliavimo šaltinis;
 ω – spektrinis;
 Σ – suminis;
 0 – pradinė būsena;
 ∞ – toli nuo lašelio;
 $*$ – kintamasis.

Indeksai viršuje:

+ – išorinė lašelio paviršiaus pusė;

– – vidinė lašelio paviršiaus pusė.

Santrumpos

„hip“ – hipotetinis;

„k“ – šildymas laidumu;

„k+c“ – šildymas konvekcija;

„k+c+r“ – šildymas konvekcija ir spinduliavimu;

„k+r“ – šildymas laidumu ir spinduliavimu;

P – lašelio šilumos ir masės mainų parametras;

 \bar{P} – pradinės lašelio būsenos parametro atžvilgiu normuotas parametras; \bar{P}_n – pradinės ir pusiausviro garavimo lašelio būsenos parametru atžvilgiu normuotas parametras; P_f – lašelio fazinių virsmų parametras; P_T – lašelio terminės būsenos parametras; P_q – lašelio energinės būsenos parametras;

„SA“ – bendras šilumokaitos atvejo pavadinimas;

„SP“ – dvifazio srauto parametras.

Gauta 2012 12 27

Priimta 2013 02 15

Literatūra

1. *An Energy Policy for Europe: Commission Steps up to the Energy Challenges of the 21st Century*. MEMO/07/7. Brussels, 2007.
2. *Energetikos ir aplinkos apsaugos darba*. <http://www.mokslasirtechnika.lt/mokslo-naujienos/energetikos-ir-aplinkos-apsaugos-darna.html>
3. Baublys J., Miškinis V., Morkvėnas A. Lietuvos energetikos darba su gamta. *Energetika*. 2011. Nr. 57. P. 85–94.
4. *Communication from the Commission to the Council and the European Parliament: Thematic Strategy on Air Pollution*. COM (2005) 446. Brussels.
5. Skjærseth J. B., Wettstad J. Making the EU Emissions Trading System: The European Commission as an entrepreneurial epistemic leader. *Global Environmental Change*. 2010. Vol. 20. P. 314–321.
6. Tseng C. C., Viskanta R. Enhancement of water droplet evaporation by radiation absorption. *Fire Safety Journal*. 2006. Vol. 41. P. 236–247.
7. Van der Burgt M. J. Tophat: a smart way to get over 60% efficiency in simple cycle. *Modern Power Systems*. August 2004. P. 19–25.
8. Buinevičius K., Puida E. Reduction of NOx concentrations in boiler flue gas by injecting selective reagents. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. 2005. Vol. 13. P. 91–96.
9. Yu H. Z. Froude-modeling-based general scaling relationships for fire suppression by water sprays. *Fire Safety Journal*. 2012. Vol. 47. P. 1–5.
10. Chang J. C., Lin C. M., Huang S. L. Experimental study on the extinction of liquid pool fire by water droplet streams and sprays. *Fire Safety Journal*. 2007. Vol. 42. P. 295–309.
11. Che D., Da Y., Zhuang Z. Heat and mass transfer characteristics of simulated high moisture flue gases. *Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005. Vol. 41. P. 250–256.
12. Miliauskas G., Šinkūnas S., Miliauskas G. Evaporation and condensing augmentation of water droplets in flue gas. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010. Vol. 53. P. 1220–1230.
13. Maxwell J. C. *Collected Scientific Papers*. Cambridge: University Press, 1890. P. 55.
14. Fuchs N. A. *Evaporation and Droplet Growth in Gaseous Media*. London: Pergamon Press, 1959.
15. Spalding D. B. *Convective Mass Transfer*. London: Edward Arnold Publishers Ltd., 1963.
16. Renksizbulut M., Nafziger R., Li X. A mass transfer correlation for droplet evaporation in high-temperature flows. *Chemical Engineering Science*. 1991. Vol. 46. P. 2351–2358.
17. Abramzon B., Sirignano W. A. Droplet vaporization model for spray combustion calculations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1989. Vol. 32. P. 1605–1618.
18. Sirignano W. A. *Dynamics and Transport Processes of Sprays*. Cambridge University Press, 1999.
19. Sazhin S. S. Advanced models of fuel droplet heating and evaporation. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2006. Vol. 32. P. 162–214.
20. Ivanov V. M., Smirnova E. V. Evaporation of liquid droplet in high temperature. *W. IGI*. 1960. Vol. 19. P. 19.
21. Shcukin E. P., Krasovitov V. G., Jalamov J. I. Evaporation and condensative growth of large and moderately large droplets in gaseous media at any temperature differences. *VINITI 3706-B091*. 1991. P. 1–158.
22. Apashev M. D., Malov R. V. Evaporation of various liquid single droplets, as flow passes around the droplets at small Reynolds numbers. 1960. *Izv. AN SSSR Energetika i Avtomatika*. Vol. 2. P. 185–191.
23. Hale G. M., Query M. R. Optical constants of water in the 200-nm to 200- μ m wavelength region. *Applied Optics*. 1973. Vol. 12. P. 555–562.
24. Tuntomo A., Tien C. L. Optical constant of liquid hydrocarbon fuels. *Combustion Science and Technology*. 1992. Vol. 84. P. 133–140.
25. Elperin T., Krasovitov B. Radiation, thermal diffusion and kinetic effects in evaporation and combustion of large and moderate size fuel droplets. *International*

- Journal of Heat and Mass Transfer*. 1995. Vol. 38. P. 409–418.
26. Miliauskas G., Garmus V. The peculiarities of hot liquid droplets heating and evaporation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009. Vol. 52. P. 3726–3737.
 27. Harpole G. M. Radiative absorption by evaporating droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1980. Vol. 22. P. 17–26.
 28. Miliauskas G., Tamonis M., Svenčianas P. Radiation and combined heat transfer in spherical volume of selectively-radiating and absorbing medium 1. Determination of radiation heat flow. *LTSR MA darbai B*. 1983. Vol. 139. P. 53–61.
 29. Tuntomo A., Tien C. L., Park S. H. Internal distribution of radiant absorption in a spherical particle. *Journal of Heat Transfer*. 1991. Vol. 113. P. 407–412.
 30. Lage P. L. C., Rangel R. H. Single droplet vaporization including thermal radiation absorption. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 1993. Vol. 7. P. 502–509.
 31. Liu L. H., Tan H. P., Tong T. W. Internal distribution of radiation absorption in a semitransparent spherical particle. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2002. Vol. 72. P. 747–756.
 32. Dombrovskii L. A. Absorption of thermal radiation in large semi-transparent particles at arbitrary illumination of the polydisperse system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2004. Vol. 47. P. 5511–5522.
 33. Miliauskas G. Interaction of the transfer processes in semitransparent liquid droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2003. Vol. 46. P. 4119–4138.
 34. Miliauskas G., Talubinskas J., Adomavicius A., Puida E. The thermal state and hydrodynamics of evaporating hydrocarbon droplets. 1. A possibility of natural circulation of the liquid in the droplet. *Mechanika*. 2012. Vol. 18. No. 2. P. 170–176.
 35. Miliauskas G. Regularities of unsteady radiative-conductive heat transfer in evaporating semitransparent liquid droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2001. Vol. 44. P. 785–798.
 36. Sazhin S. Modeling of heating, evaporation and ignition of fuel droplets: combined analytical, asymptotic and numerical analysis. *Journal of Physics: Conference Series*. 2005. Vol. 22. P. 174–193.
 37. Miliauskas G., Sinkunas S. Influence of droplets heating manner to the sprayed liquid thermal state. *CHT'08: Proceedings of the International Symposium of the Advances in Computational Heat Transfer, Morocco, 2008*. P. 1–17.
 38. Kuzikovskij A. V. Dynamic of spherical particle in powerful optical field. *Izvestiya VUZ. Fizika*. 1970. No. 5. P. 89–94.
 39. Shorin S. N. *Teploperedacha*. Moskva: Vishaja Shkola, 1964.
 40. Miliauskas G., Sabanas V. Interaction of transfer processes during unsteady evaporation of water droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2006. Vol. 49. P. 785–798.
 41. Miliauskas G. Nestacionarieji šilumos ir masės mainai spinduliuojančiuose dispersiniuose srautuose. 2. Sudėtinis energijos pernešimas pusskaidrėse dalelytėse. *Energetika*. 1997. Nr. 2. P. 16–23.
 42. Miliauskas G., Tamonis M., Svenčianas P. Radiation and combined heat transfer in spherical volume of selectively-radiating and absorbing medium 1. Determination of radiation heat flow. *LTSR MA darbai B*. 1983. Vol. 139. P. 53–61.
 43. Tamonis M. *Radiation and Combined Heat Transfer in Channels*. Berlin: Springer-Verlag, 1987.
 44. Siegel R., Howell J. R. *Thermal Radiation Heat Transfer*. New York: Taylor & Francis, 2002.
 45. Miliauskas G., Sabanas V., Bankauskas R., Miliauskas G., Sankauskaite V. The peculiarities of sprayed liquid's thermal state change, as droplets are heated by conduction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008. Vol. 51. P. 4145–4160.
 46. Miliauskas G., Šinkūnas S., Norvaišienė K. Influence of thermal radiation to the interaction of heat and mass transfer processes under evaporation of water droplets. *ICCHMT'2011: 7th International Conference on Computational Heat and Mass Transfer, Istanbul, Turkey, 2011*. P. 1–8.

Gintautas Miliauskas, Kristina Norvaišienė

A SYSTEMATIC EVALUATION OF THE UNSTEADY TRANSFER PROCESS INTERACTION IN EVAPORATING DROPLETS

Summary

Liquid and gas two-phase flows are widely applied in energy and industrial sectors. Improvement and sustainable development of the thermal technologies, based on liquid evaporation, require a thorough cognition and ability to control heat and mass transfer processes, occurring in the thermal technologies. For that it is necessary to understand thoroughly the essence of the interaction of transfer processes, which mostly often occurs in changing boundary conditions and which decides the intensity of the transfer processes.

The interaction of transfer processes in sprayed water systems is influenced by many factors. To evaluate them, a systematic approach to the whole of combined transfer processes and revealing of the main factors that decide transfer processes are necessary. Thorough cognition of the regularities of the transfer processes that occur in the simplest boundary conditions and consequent evaluation of the

influence of more complicated boundary conditions using comparative methods can solve the above mentioned problems.

This paper presents the method, which evaluates the intensity of unsteady transfer process interaction in a comparative way. An example of its practical application in the case of water droplet evaporation is given. The influence of one of the most complicated factors – absorption of spectral radiation in semitransparent droplets – on the thermal state and heat transfer of droplets during unsteady evaporation mode is highlighted.

Key words: water droplets, unsteady evaporation, spectral radiation, interaction of transfer processes, the method of systematic evaluation

Гинтаутас Миляускас, Кристина Норвайшене

СИСТЕМАТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ СЛОЖНОГО ТЕПЛО И МАССА ПЕРЕНОСА ИСПАРЯЮЩИХСЯ КАПЕЛЬ

Резюме

В энергетике и промышленности широко применяются двухфазные газо-капельные потоки. Для совершенствования и устойчивого развития на распиле жидкости базирующихся термических технологий важно познать суть в их происходящих процессов тепло и масса переноса и уметь ими управлять. Для этого необходимо глубоко понять суть взаимодействия процессов сложного переноса, которое происходит, как правило, в быстро изменяющихся граничных условиях и обуславливает интенсивность процессов переноса.

Взаимодействие процессов сложного переноса в системах распыленной жидкости обуславливает множество факторов. Для оценки их влияния необходим систематический подход при выявлении основных факторов. С этой целью нужно глубоко познать закономерности процессов переноса, которые происходят в простейших граничных условиях, а потом сравнительным методом можно оценить влияние более сложных граничных условий на интенсивность взаимодействия процессов сложного переноса.

В этой работе представлен метод сравнительной оценки взаимодействия процессов нестационарного переноса. Представлен пример применения этого метода в случае испарения капель воды. Выявлено влияние одного из самых сложных факторов, фактора спектрального поглощения теплового излучения в полупрозрачных каплях, на теплообмен и термическое состояние капель в режиме нестационарного испарения.

Ключевые слова: капли воды, нестационарное испарение, спектральное излучение, взаимодействия процессов переноса, метод систематической оценки