

Grynojo skysčio lašelių fazinių virsmų režimų universalusis ciklas

1. Ciklo sudarymo metodas ir pernašos procesų skaitinio modeliavimo metodika

Gintautas Miliauskas

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

Straipsnyje apžvelgti grynojo skysčio lašelių šilumos ir masės mainų modeliavimo kombinuotu analitiniu-skaitiniu metodu pasiekimai. Patvirtintas laidumu šildomų lašelių terminės būsenos ir fazinių virsmų parametrų kitimo Furje kriterijumi išreikštu masteliu universalumas išpurkšto skysčio lašelių atžvilgiu. Iškelta lašelių fazinių virsmų režimų universalaus ciklo idėja. Pateiktas šio ciklo sudarymo metodas ir aptarta lašelio pernašos procesų jame skaitinio modeliavimo metodika. Laidumu šildomų vandens lašelių fazinių virsmų kondensacinio režimo bei nestacionariųjų fazinių virsmų ir pusiausviro garavimo režimų nuoseklaus modeliavimo pavyzdžiais pagrįstas universalaus ciklo gyvybingumas.

Raktažodžiai: grynojo skysčio lašeliai, šilumos ir masės mainai, Furje laiko mastelis, fazinių virsmų universalusis ciklas, skaitinis modeliavimas

ĮVADAS

Daugelyje terminių technologijų energetikoje ir pramonėje taikomas skysčio išpurškimo procesas. Jis svarbus tuo, jog skystį suskaidžius į smulkius lašelius, labai padidėja kontaktas tarp

skystosios ir dujinės fazių. Tai sudaro prielaidas skysčio išpurškimo grindžiamų technologijų efektyvumui. Šilumokaitos ir masės mainų tarp skystosios ir dujinės fazių intensyvumo apibrėžimas yra tiesiogiai susijęs su atskiro lašelio terminės būsenos kitimo ir jo paviršiuje vykstančių

fazinių virsmų procesų ištyrimu. Tai klasikinis, jau daugiau nei šimtmetį tyrėjus dominantis „lašo“ uždavinys [1], kurio pažangiausi šiuolaikiniai sprendimo metodai išsamiai aptarti [2] darbe. Su lašelių šilumos ir masės mainais susijusių problemų sudėtingumas ir nemažėjantis praktinis poreikis kuo giliau jas pažinti terminijų technologijų tobulinimo aspektu, skatina tyrėjų didėjančią susidomėjimą išpurškto skysčio šilumos ir masės mainų problematika: į užklausą „skysčio lašelių garavimas“ duomenų bazė [3] pateikia per 34 tūkst. pripažintų ISI lygio mokslinių šaltinių. Iš jų 2010 m. „lašo“ tyrimams priskirti 1 705 moksliniai straipsniai, 2011 m. – 2069, 2012 m. – 2 214, 2013 m. – 2 715, o 2014 m. į šią duomenų bazę jau įtraukta beveik 2 tūkst. mokslinių straipsnių. Tiek daug dėmesio skiriama „lašo“ uždaviniui spręsti, kadangi šilumos ir masės mainų tyrimai aktualūs branduolinei ir šilumos energetikai bei termoinžinerijai chemijos, biotechnologijos, medicinos ir kitose srityse [4–17]. Individuali publikacijų „lašo“ tematika analizė praktiškai neįmanoma, todėl dažniausiai vykdomos sisteminės bendrojo pobūdžio apžvalgos arba išskirtos siauros problematikos gilesnės individualios analizės. „Lašo“ tyrimuose galima pastebėti mokslininkų išskirtinį dėmesį atskiriems skysčiams. Šiuo aspektu išsiskiria vanduo [4–10] ir kt. bei skystasis kuras [11–15] ir kt. Teorinių ir eksperimentinių „lašo“ tyrimų plėtrai plačių galimybių atveria aukštas šiuolaikinės matavimo ir skaičiavimo technikos lygis, tačiau norimą rezultatą dažniausiai leidžia pasiekti šių tyrimų sintezė. Teoriniai tyrimai dažnai grindžiami pernašos procesus aprašančių fundamentinių lygčių skaitine analize, o skaitinio sprendimo schemų patikimumui pagrįsti reikalinga kontrolė, grindžiama modeliavimo rezultatų palyginimu su eksperimentinių tyrimų rezultatais.

Pernašos procesų dėsningumai tyrėjus domina visame lašelių gyvavimo cikle, kurį apibrėžia skysčio išpurškimo į dujas ir kondensuotos fazės jose išnykimo momentai atitinkamai $\tau \equiv \tau_0 = 0$ ir $\tau \equiv \tau_f$. Pagal skysčio lašelio paviršiuje vykstančių fazinių virsmų savitumus, atskiro lašelio gyvavimo $0 - \tau_f$ cikle išskirtini kondensacinis, nestacionariojo ir pusiausviro garavimo režimai:

$$0 - \tau_f \rightarrow 0 - \tau_{ko} - \tau_{nf} - \tau_f \quad (1)$$

Pusiausviro garavimo $\tau_{eg} = \tau_f - \tau_{nf}$ režimu (1) cikle suvokiamas skysčio paviršinio garavimo procesas, kuriame dalyvauja visa lašelio apsupties jam teikiama šiluminė energija. Apibrėžiant fazinių virsmų režimus (1) cikle, ypač svarbi yra lašelio paviršiaus temperatūros $T_R(\tau)$ funkcija. Kad vyktų kondensacinis fazinių virsmų režimas, būtina $T_R(\tau = 0) < T_{rt}$ sąlyga. Šios trukmės režimu $\tau \equiv 0 - \tau_{ko}$ lašelio paviršius pašyla nuo išpurškiamo skysčio T_0 temperatūros ir rasos taško T_n temperatūros. Todėl $T_R(\tau \equiv \tau_{ko}) = T_{rt}$ sąlyga leidžia vienareikšmiškai apibrėžti kondensacinio fazinių virsmų režimo τ_{ko} trukmę. Kondensaciniame režime skystis lašelyje šildomas labai intensyviai. Lašeliui šilumokaita suteikiamą šiluminę energiją atspindi suminio šilumos srauto q_{Σ}^+ tankis lašelio paviršiaus išorinėje pusėje, o kondensacijos procese išsiskiriančią fazinių virsmų šilumą atspindi garo srauto m_g^+ tankio ir fazinių virsmų L šilumos sandauga $m_g^+ L \equiv q_f^+$. Todėl kondensaciniame fazinių virsmų režime skystį lašelyje šildo $q_h = q_{\Sigma}^+ + q_{f=ko}^+$ šilumos srautas. Pasibaigus kondensaciniam fazinių virsmų režimui, prasideda nestacionariojo garavimo fazinių virsmų režimas. Per jo trukmę $\tau \equiv \tau_{ko} - \tau_{eg}$ lašelio paviršius pašyla nuo rasos taško temperatūros iki pusiausviro garavimo sąlygas užtikrinančios $T_{R,eg}$ temperatūros. Šylančio lašelio paviršiaus T_R temperatūra asimptotiškai artėja prie $T_{R,eg}$ temperatūros. Todėl vienareikšmiškai apibrėžti pašilimo iki $T_{R,eg}$ temperatūros trukmę $\tau_{ng} = \tau_{nf} \div \tau_{ko}$ yra keblu. Kadangi per trukmę τ_{ng} skysčio lašelio šildymo intensyvumas nuosekliai mažėja iki nulio, tai nestacionariųjų fazinių virsmų režimo $0 - \tau_{nf}$ trukmę inžineriniam vertinimui galima apibrėžti pagal $q_h(\tau \rightarrow \tau_{nf}) \rightarrow 0$ sąlygą. Lašelio pusiausviro garavimo režimo pradžios sąlygą tenkinanti T_{eg} temperatūra yra apibrėžiama lašelį supančio dujų mišinio temperatūra, garo tūriniu dalimi jame bei lašelio ir apsupties šilumokaitos ypatumais [18].

Tyrėjų požiūri į $T_R(\tau)$ funkciją atspindi „lašo“ tyrimuose taikomi metodai. Juose labai svarbus tyrėjo santykis su „lašo“ uždavinio „vidinio“ ir „išorinio“ uždavinių sandais. „Išorinio“ uždavinio sprendiniais apibrėžiamas lašelio šildymo intensyvumas ir garo srauto tankis lašelio paviršiuje. Todėl „išorinis“ uždavinys tradiciškai laikomas pagrindiniu. Grubiuose „lašo išorinio“ uždavinio modeliuose, pritaikomuose tik lašelio pusiausviram garavimo režimui modeliuoti, „vidinis“ už-

davinys ignoruojamas ir lašelio paviršiaus temperatūros funkcija apibrėžiama laisvai parinkta $T_R(\tau) \equiv T_R$ temperatūra. Pastaroji parenkama tarp rasos taško ir soties būsenos sąlygų temperatūrų: $T_{rt} < T_R < T_{sol}$. Kondensaciniame ir nestacionariojo garavimo režimuose $T_R(\tau)$ funkcijos ignoruoti negalima. Ją apibrėžti įmanoma pagal prie lašelio paviršiaus pritekančius (tiek iš skysčio, tiek ir iš lašelio apsupties) ir nuo jo nutėkančius (tiek į skystį lašelyje, tiek ir į jo apsuptį) šiluminės energijos srautus. Sferinės formos lašelio simetriško šildymo atveju šis atitikimas pagal pernašos procesų kvazistacionarumo prielaidas pateikiamas formalia išraiška:

$$\begin{aligned} \bar{q}_\Sigma^+(\tau) + \bar{q}_\Sigma^-(\tau) + \bar{q}_f^+(\tau) &\equiv 0 \rightarrow \frac{Nu_f}{2R} (T_d - T_R) + \\ + (q_r^+ - q_r^-) + k_c^- \lambda_l \left. \frac{\partial T_r}{\partial r} \right|_{r=R} + m_g^+ L &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Apskritai(2) išraiška yra transcendentinė lygtis, kurią konkretizuojant reikia išspręsti keletą problemų: pirmoji yra susijusi su lašelio konvekcinio šildymo intensyvumą apibrėžiančio Nusselto kriterijaus Nu_f aprašymu lašelio paviršiuje vykstančių fazinių virsmų sąlygomis; antroji yra susijusi su spektrinės spinduliuotės sugėrimo pusskaidriame skystyje ir optinių efektų lašelio paviršiuje įvertinimu apskaičiuojant spinduliuotės suminį srautą q_r ; trečioji atsiranda dėl poreikio apskaičiuoti nestacionariojo temperatūros lauko lašelyje gradientą $grad T_{r-R}$ sudėtinės šilumokaitos procesų lašelyje sąveikos sąlygomis; ketvirtoji kyla dėl Stefano hidrodinaminio srauto įtakos garo srauto tankiui lašelio paviršiuje įvertinimo poreikio.

Garuojančio lašelio konvekcinio šildymo intensyvumo apskaičiavimo uždavinys sėkmingai išsprendžiamas pagal Spoldingo šilumos pernašos B_T parametro [19] funkcijų matematinį aparatą [11] ir kt. Spinduliuotės srautui pusskaidrio skysčio lašelyje apskaičiuoti pritaikomos elektromagnetinės bangos ir geometrinės optikos teorijos, pagal kurias q_r modeliai aprašyti [6–10, 16, 20–23] ir kt. darbuose. Šių modelių privalumai ir apribojimai išsamiai aptarti [9] darbe. Garo srauto m_g^+ tankis lašelio paviršiuje tradiciškai apskaičiuojamas panašumo teorijos metodais, Stefano hidrodinaminio srauto poveikį įvertinant Spoldingo masės pernašos B_M parametro [19] funkcijomis [11, 24] ir kt. Patogu m_g^+ aprašyti analitine

išraiška [25]. Taigi, kebliausia apibrėžti nestacionariojo temperatūros lauko gradientą sudėtinės šilumokaitos pusskaidriame lašelyje atveju. Bendriausiu konvekcinės ir radiacinės „ $c + r$ “ šilumokaitos lašelyje atveju apibrėžti nestacionariojo temperatūros lauko gradientą tiesiogiai sprendžiant fundamentinių lygčių sistemą yra labai keblu, nes iškyla skaitinių schemų stabilumo problema. Konvekcinio šilumos pernešimo lašelyje intensyvumui įvertinti išplėtotą efektyviojo šilumos laidumo teorija [11]. Tuomet šilumos laidžio koeficientas Furje šilumos laidumo dėsnyje pakeičiamas efektyviuoju šilumos laidžio $\lambda_{ef} \equiv \lambda \cdot k_{ef}^-$ koeficientu ir šilumos plitimo suintensyvėjimą dėl skysčio cirkuliacijos įvertinamas Peklė kriterijaus skysčiui empirine $k_{ef}^- = f(Pe_l)$ funkcija. Sudėtiniam šilumos plitimui lašelyje spinduliuotės ir laidumu „ $k + r$ “ apibrėžti išplėtotas kombinuotas analitinis-skaitinis metodas [13, 14, 21, 26], kuriame „ $k + r$ “ šilumokaitą aprašanti diferencialinių ir integralinių fundamentinių lygčių sistema pirmiausia analitiškai pertvarkoma į integralių ir algebrinių lygčių sistemą. Pastaroji sistema išsprendžiama skaitiniais metodais. Šiuo atveju lengva sukontroliuoti skaitinių schemų konvergavimą. „ $k + r$ “ šilumokaitos modelį galima pritaikyti ir „ $c + r$ “ šilumokaitos atveju. Tuomet nestacionariojo temperatūros lauko lašelyje gradientas apibrėžimas pagal „ $k + r$ “ modelį ir kartu naudojamas efektyviojo šilumos laidumo lašelyje matematinis aparatas [11].

Vandens ir kuro lašelių garavimo tyrimais pagrįstas glaudus lašelio šilumokaitos ir jo fazinių virsmų ryšys. Sudėtinių pernašos procesų tarpusavio sąveikos įvertinimo aspektu vertėtų (1) lašelio gyvavimo ciklą pateikti Furje kriterijumi išreikštu laiko masteliu:

$$0 - \tau_f \rightarrow 0 \div Fo_f \equiv 0 - Fo_{ko} - Fo_{nf} - Fo_f \quad (3)$$

Tik klasikinė Furje kriterijaus $Fo = (a/R^2) \cdot \tau$ forma $0 - \tau_f$ ciklui transformuoti netinka, nes lašeliui šylant ir jo paviršiuje vykstant faziniams virsmams, kistų ir realaus laiko bei Furje mastelių sąsajų a/R^2 parametras. Todėl pritaikomas modifikuotos formos Furje kriterijus $Fo \equiv (a_0 / R_0^2) \cdot \tau$. Jame a_0/R_0^2 parametras suformuojamas pagal pradinę lašelio būseną, todėl vykstant faziniams virsmams nepakinta. (3) tipo cikle išryškėja laidumu šildomų lašelių „ k “ šilumokaitos šilumos ir

masės parametrų kitimo savitumai [27]. Jie sudaro prielaidas sudėtinių pernašos procesų tarpusavio sąveikos intensyvumą įvertinti palyginamuoju būdu [28]. Dujų temperatūra T_d ir skysčio garose tūrine $\bar{p}_g \equiv p_{g,\infty} / p$ dalimi apibrėžtai lašelių apsupties būsenai, stambesniems už keletą mikrometrų lašeliams (3) ciklas „k“ šilumokaitos atveju yra neįprastai išpurškiamo skysčio lašelių dispersiškumui. Atskirų fazinių virsmų režimo trukmė (3) cikle, kaip ir (1), yra nevienoda. Todėl tiek (1), tiek ir (3) cikle skaitinio tyrimo metu keblu sudėtinius pernašos procesus modeliuoti taip, kad išlaikytume vienodo lygmens požiūrį į jų sąveikos svarbą atskiruose fazinių virsmų režimuose.

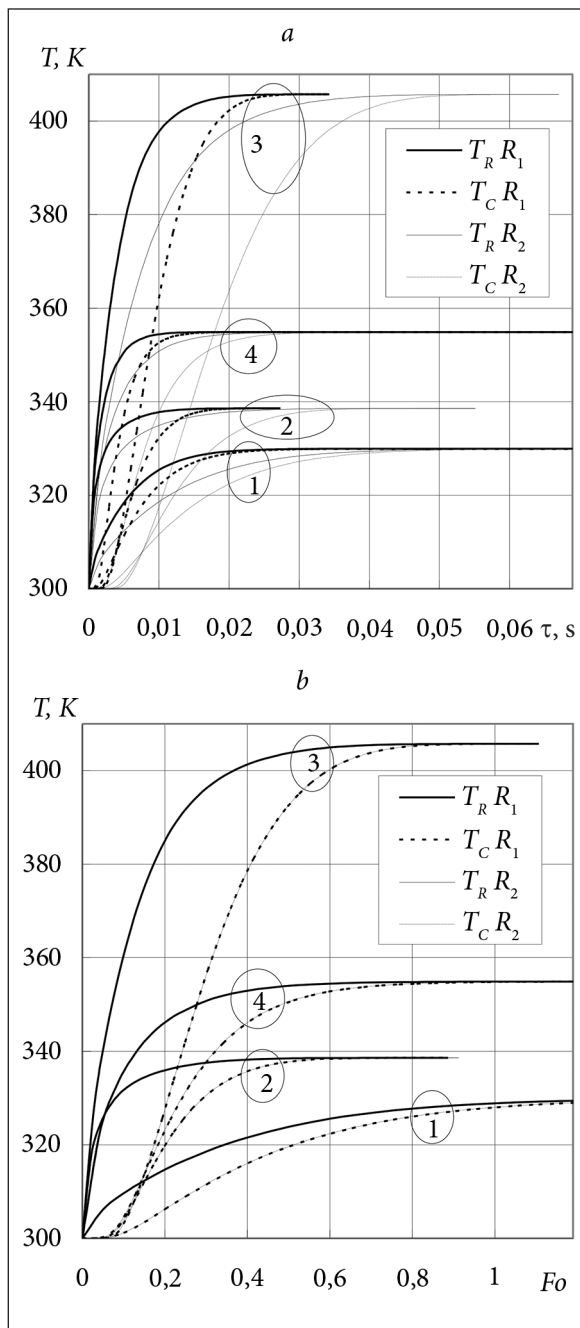
Šiame darbe plėtojama universalios trukmės fazinių virsmų režimų ciklo idėja bei pernašos procesų atskiruose jo fazinių virsmų režimuose savarankiško skaitinio modeliavimo metodika. Jos gyvybingumas grindžiamas vandens lašelių fazinių virsmų režimų (kondensacinio, nestacionariojo ir pusiausviro garavimo) modeliavimo pavyzdžiais.

LAŠELIO UNIVERSALIAUS FAZINIŲ VIRSMŲ REŽIMŲ CIKLO METODOLOGIJA

Šiame darbe apsiribota vandens ir grynujų angliavandenilių lašeliais, kadangi (1) gyvavimo ciklą daugiakomponenčio skysčio lašelių atveju gali iškreipti su kietėjančio apvalko formavimosi procesu lašelio paviršiuje susiję reiškiniai. Lašelių gyvavimo (1) ciklas visiškai atspindi vandens lašelių galimų fazinių virsmų režimų nuoseklią kaitą tuo atveju, kai išpurškiamo vandens šiluminė būseną tenkina kondensaciniam fazinių virsmų režimui vykti būtina sąlyga: $\bar{T}_0 \equiv T_0 / T_{rt} < 1$. Išpurškus aukštesnės už rasos taško temperatūros vandenį ($\bar{T}_0 > 1$), lašeliai iš karto pradeda garuoti. Tai būdinga ir kuro lašeliams, kadangi nuo jų sklindantis garas sudega ir lašelių apsuptyje skystojo kuro garo dažniausiai nebūna. Garavimo režimą galima apibrėžti $\bar{T}_{eg} \equiv T_0 / T_{eg}$ parametru [29]. Kai $\bar{T}_{eg} < 1$, skystis laikomas „šaltu“. Jo lašeliai nestacionariojo garavimo režime pašyla iki pusiausviro garavimo T_{eg} temperatūros. „Karšto“ skysčio ($T_{eg} > 1$) lašeliai pusiausvirai garuoti pradeda iš karto. Lašelių temperatūra yra aukštesnė už pusiausviram garavimui vykti pakankamą T_{eg} temperatūrą, todėl jie, garuodami iki T_{eg} temperatūros, sparčiai ataušta. „Karšto“ skysčio lašelių

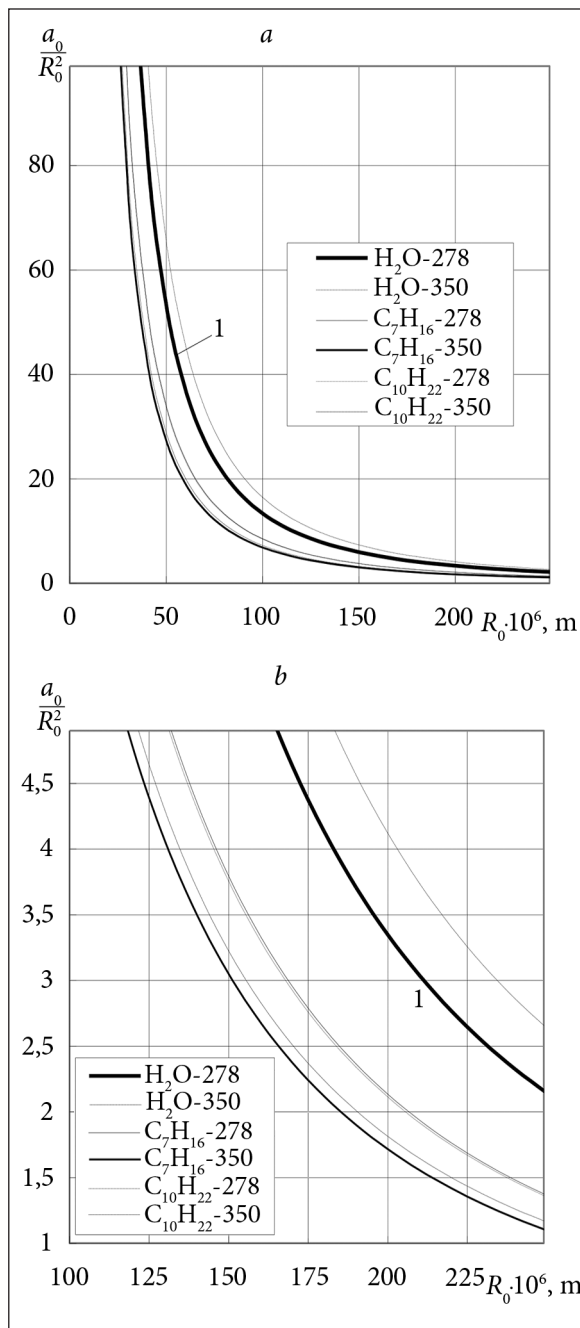
garavimo pradiniam etape fazinių virsmų energinėje pusiausvyroje reikšminga auštančio lašelio entalpijos įtaka.

Siekdami aiškiau suvokti grynojo skysčio lašelių universalios gyvavimo ciklo idėją, prisiminkime lašelių gyvavimo realaus laiko (1) ciklo pervedimo į Furje laiko mastelį privalumus „k“ šilumokaitos atveju. Taip pat apibrėžkime (3) ciklo praktinę naudą sudėtingesnių už „k“ šilumokaitą šildymo atvejų įtaką lašelio pernašos procesams įvertinti. Kartu aptarkime ir išliekančius trūkumus. Tuo tikslu, pagal [21] darbe pateiktą „lašo“ uždavinio analitinio-skaitinio tyrimo metodiką „k“ šilumokaitos atveju, sumodeliuotas 100 ir 140 mikrometrų skersmens 300 K temperatūros vandens (H_2O) bei grynujų angliavandenilių n-heptano (C_7H_{16}) bei n-dekano ($C_{10}H_{22}$) lašelių garavimas 800 K temperatūros 0,1 MPa slėgio sausame ore. Kondensaciniam fazinių virsmų režimui (1) cikle išreikšti papildomai sumodeliuoti vandens lašelių faziniai virsmai drėgname ore, kai vandens garo tūrinė dalis $\bar{p}_{H_2O,\infty} = 0,4$, o kitos aptartos kraštinės sąlygos galioja. Taikomos skaitinio modeliavimo metodikos patikimumas pagrįstas ankstesniuose darbuose [7, 18, 21, 26]. „Lašo“ uždavinio iteracinio sprendimo skaitinės schemas savitumus išsamiai aptarsime vėliau. Skaitinio modeliavimo rezultatai (1 pav.) rodo ryškią skysčio prigimties įtaką lašelių šiluminės būsenos kitimui nestacionariųjų fazinių virsmų režime. Jame „k“ šilumokaitos sąlygomis skirtingo skysčio lašeliai pašyla iki savitos pusiausviro garavimo sąlygas užtikrinančios $T_{e,k}$ temperatūros: 329,9 K; 338,6 K ir 405,7 K atitinkamai vandens, n-heptano ir n-dekano išpurškimo į sausą orą atveju. Vandens lašelių pusiausviro garavimo temperatūra drėgname ore išauga iki 354,9 K. Be to, netgi to paties skysčio skirtingo dispersiškumo lašelių terminė būseną realaus laiko $0 - \tau_{f,k}$ gyvavimo (1) ciklo nestacionariųjų fazinių virsmų režime kinta savitai nuo pradinės T_0 temperatūros iki pusiausviro garavimo $T_{eg,k}$ temperatūros. Verta pabrėžti, jog „k“ šilumokaitos atveju lašelių šiluminė būseną pusiausviro garavimo režime nepakinta: $T_C(\tau > \tau_{eg}) = T_R(\tau > \tau_{eg}) \equiv T_{eg,k}$. Šias įžvalgas pagrindžia lašelių paviršiaus bei centro temperatūrų $T_R(\tau)$ ir $T_C(\tau)$ dinamika (1 pav. a). Svarbu, jog Furje kriterijumi išreikštame lašelių gyvavimo $0 - Fo_{f,k}$ (3) tipo cikle ir nestacionariųjų fazinių virsmų režime skirtingo dispersiškumo



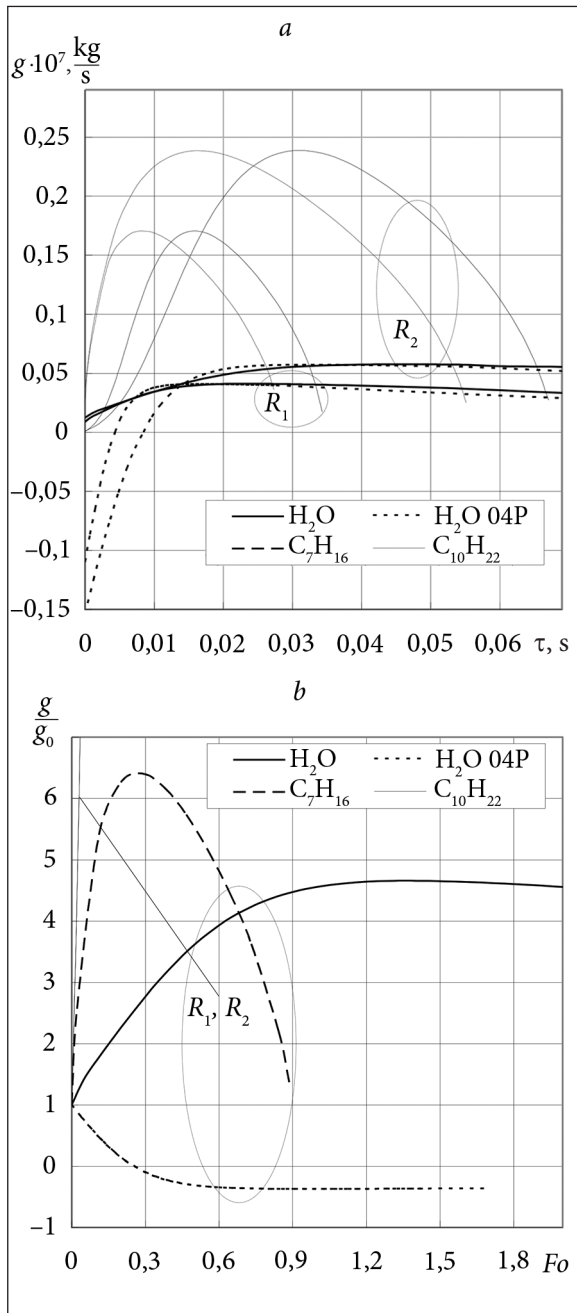
1 pav. Skysčio medžiagos įtaka lašelio paviršiaus ir centro temperatūrų kitimą aprašančioms $T_R(\tau)$ ir $T_C(\tau)$ (a) bei $T_R(Fo)$ ir $T_C(Fo)$ (b) funkcijoms „ k “ šilumokaitos atveju. Skystis: (1, 4) vanduo, (2) n-heptanas, (3) n-dekanas; $T_d = 800$ K; $T_0 = 300$ K; $\bar{p}_{g,\infty}$: (1–3) 0, (4) 0,4; $R_1 \equiv R_0 = 50 \cdot 10^{-6}$ m; $R_2 \equiv R_0 = 70 \cdot 10^{-6}$ m; $TR \equiv T_R$; $TC \equiv T_C$

to paties skysčio lašelių šiluminės būsenos kitimas yra identiškas (1 pav. b). $T_{R,k}(Fo)$ ir $T_{C,k}(Fo)$ funkcijų universalumą atitinkamo skysčio skirtingo dispersiškumo lašelių šiluminei būsenai aprašyti „ k “ šilumokaitos atveju (1 pav. b) užtikrina realaus laiko ir Furje kriterijaus mas-



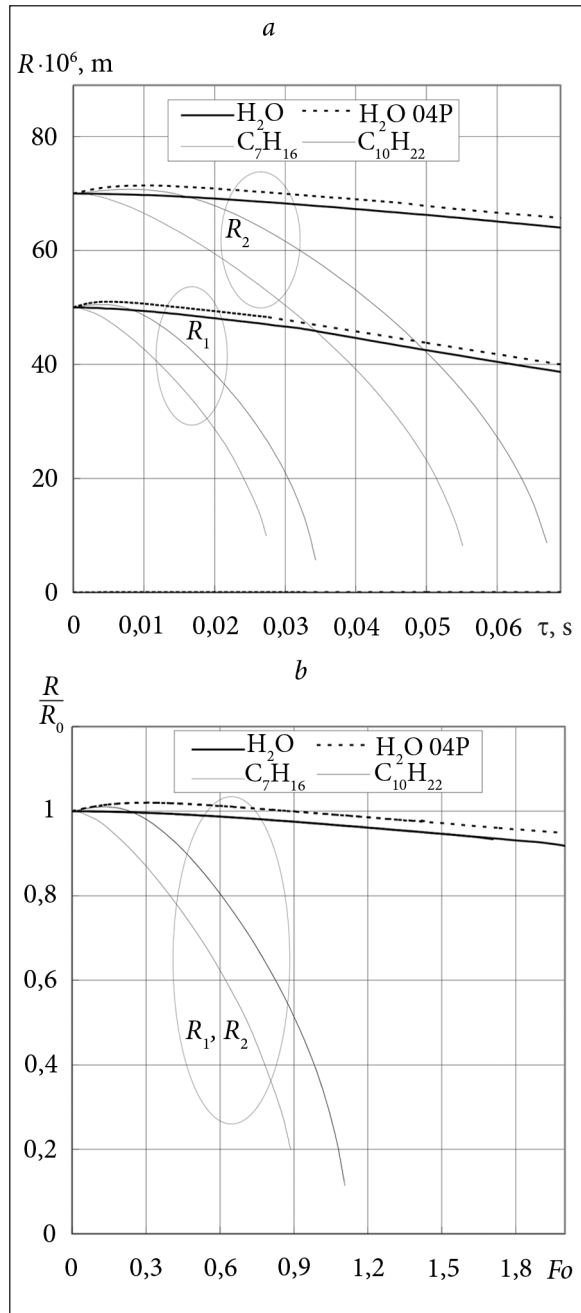
2 pav. Furje kriterijaus ir realaus laiko ryšio parametras nuo lašelių spindulio, skysčio medžiagos ir temperatūros: $H_2O-278 \equiv 278$ K temperatūros vanduo; $H_2O-350 \equiv 350$ K temperatūros vanduo; $C_7H_{16}-278 \equiv 278$ K temperatūros n-heptanas; $C_7H_{16}-350 \equiv 350$ K temperatūros n-heptanas; $C_{10}H_{22}-278 \equiv 278$ K temperatūros n-dekanas; $C_{10}H_{22}-350 \equiv 350$ K temperatūros n-dekanas; (1) a_0/R_0^2 parametro funkcija etaloniniu skysčiu laikant 278 K temperatūros vandenį

telių ryšio a_0/R_0^2 parametro priklausomumas nuo skysčio prigimties ir lašelių pradinio dispersiškumo (2 pav.).



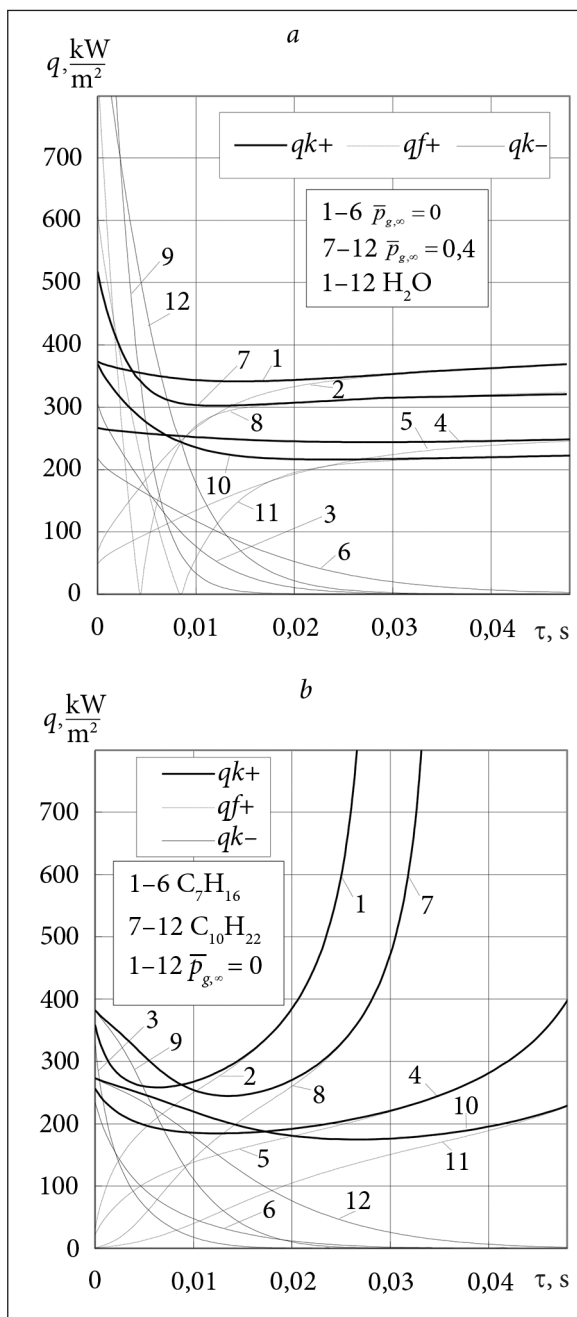
3 pav. Skysčio medžiagos ir lašelių spindulio įtaka garo srauto dinamikai realiu laiku (a) ir pagal Furje kriterijaus mastelį (b) „k“ šilumokaitos atveju. $T_d = 800 \text{ K}$; $T_0 = 300 \text{ K}$; $R_1 \equiv R_0 = 50 \cdot 10^{-6} \text{ m}$; $R_2 \equiv R_0 = 70 \cdot 10^{-6} \text{ m}$; $g_0 \cdot 10^7, \text{ kg/s}$: ($\text{H}_2\text{O } R_1$) 0,00882, ($\text{H}_2\text{O } R_2$) 0,01235, ($\text{C}_7\text{H}_{16} R_1$) 0,0266, ($\text{C}_7\text{H}_{16} R_2$) 0,0372, ($\text{C}_{10}\text{H}_{22} R_1$) 0,000773, ($\text{C}_{10}\text{H}_{22} R_2$) 0,00108, ($\text{H}_2\text{O 04P } R_1$) -0,11, ($\text{H}_2\text{O 04P } R_2$) -0,154; $\text{H}_2\text{O 04P} \equiv$ drėgname $\bar{p}_{g,\infty} = 0,4$ ore R_1 arba R_2 spindulio vandens lašelis

Plėtojant sisteminių požiūrį „lašo“ tyrimuose, lašelio šilumos ir masės mainų parametrus P pagal jų fizikinę prigimtį vertėtų sugrupuoti į



4 pav. Skysčio medžiagos ir lašelių spindulio įtaka lašelių garavimo dinamikai realiu laiku (a) ir pagal Furje kriterijaus mastelį (b) „k“ šilumokaitos atveju. $T_d = 800 \text{ K}$; $T_0 = 300 \text{ K}$; $R_1 \equiv R_0 = 50 \cdot 10^{-6} \text{ m}$; $R_2 \equiv R_0 = 70 \cdot 10^{-6} \text{ m}$

terminių P_T (susiję su lašelio nestacionariuoju temperatūros $T(r, \tau)$ lauku), energinių P_q (susiję su šilumos srautais lašelyje ir jo apsuptyje), dinaminų P_F (susiję su lašelio judėjimu ir jį veikiančiomis jėgomis) bei fazinių virsmų P_f (susiję su lašelio faziniais virsmais bei jo spindulio kitimu) parametrų grupes [29]. Terminų parametrų iš-



5 pav. Skysčio medžiagos ir lašelių spindulio įtaka energinių parametru dinamikai vandens (a) ir angliavandenilių (b) lašelių paviršiuje „ k'' “ šilumokaitos atveju. $T_d = 800 \text{ K}$; $T_0 = 300 \text{ K}$; (1–3, 7–9) $R_0 = 50 \cdot 10^{-6} \text{ m}$; (4–6, 10–12) $R_0 = 70 \cdot 10^{-6} \text{ m}$; $qk+ \equiv q_k^+$; $qf+ \equiv q_f^+$; $qk- \equiv q_k^-$

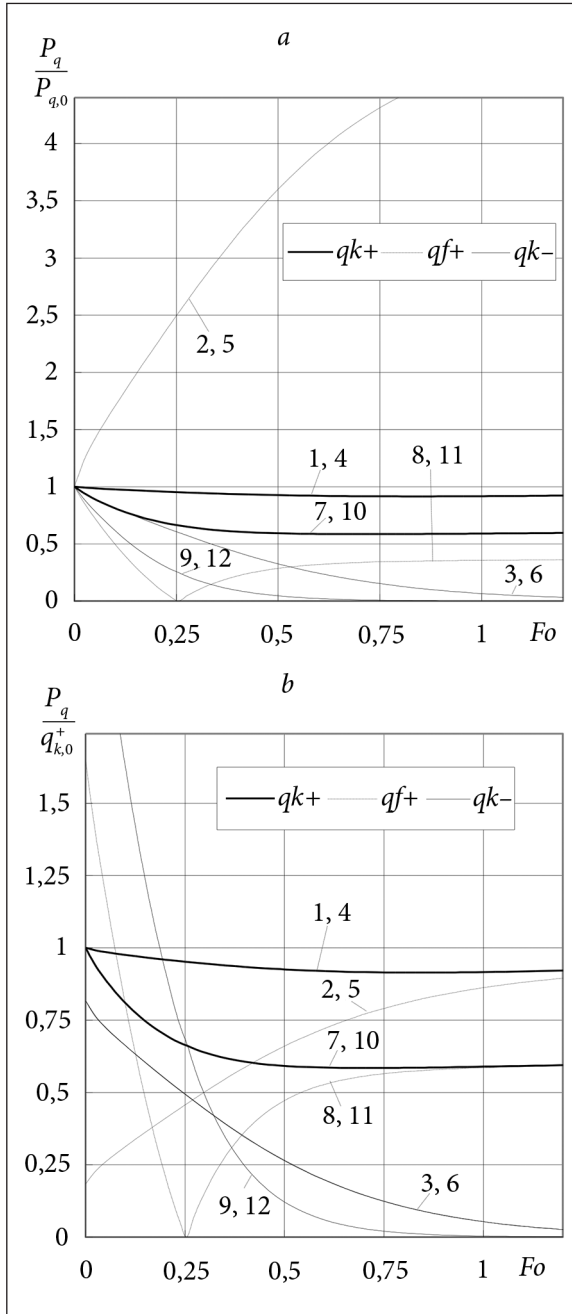
skirtinumą apibrėžia konkretaus skysčio lašelių dispersiškumui nejautrios dimensinės formos $P_{T,k''}(Fo)$ funkcijos. Jas apibrėžia išpurškiamo skysčio temperatūra, lašelių apsupties temperatūra ir garo tūrinė dalis. Kitiems lašelio pernašos parametrams nuo skysčio išpurškimo dispersiš-

kumo nepriklausančias matuojamosios formos $P_{T,k''}(Fo)$ funkcijas sudaryti nepavyksta. Tačiau visiems lašelio pernašos parametrams galima sudaryti bematės $\bar{P}_{T,k''}(Fo) \equiv P_{T,k''}(Fo) / P_0$ formos funkcijas, kurios atitinkamų parametru kitimą pagal Furje mastelį skirtingo dispersiškumo lašeliams aprašo tapačiai (3–5 pav.). Lašelių fazinių virsmų spartą apibrėžia garo srautas. Jis akivaizdžiai priklauso nuo skysčio medžiagos bei lašelių spindulio, ir jo kitimo pobūdį lemia fazinių virsmų režimas (3 pav. a). Kondensaciniame fazinių virsmų režime lašelio paviršiuje besikondensuojančio garo srautas sąlyginai laikomas neigiamu (3 pav.). Jis kartu su šylančio skysčio plėtimosi procesu sudaro prielaidas lašeliui augti (4 pav.). Lašelio paviršiuje besikondensuojančio garo srautas sparčiai mažėja nuo $g_0 \equiv g_{k,0}$ vertės, kol tampa nuliniu perėjimo į nestacionariojo garavimo režimą momentu. Kai kondensaciniam režimui sąlygų nėra, tuomet pradinį garo $g_0 \equiv g_{ng,0}$ srautą apibrėžia pradinės sąlygos (3 pav. a).

Neatsižvelgiant į pradinį fazinių virsmų režimą, g_0 srauto atžvilgiu normuotos $\bar{g} \equiv g/g_0$ funkcijos yra nejautrios lašelių spinduliui, jeigu jos pateiktos Furje kriterijaus masteliu (3 pav. b). Aišku, jog $\bar{g}(Fo)$ funkcijų universalumas užtikrina ir lašelių spindulio $\bar{R}(Fo) \equiv R(Fo) / R_0$ kitimą aprašančių funkcijų universalumą skysčio medžiaga ir dujų parametrais apibrėžtu vienareikšmiškumo sąlygų atveju.

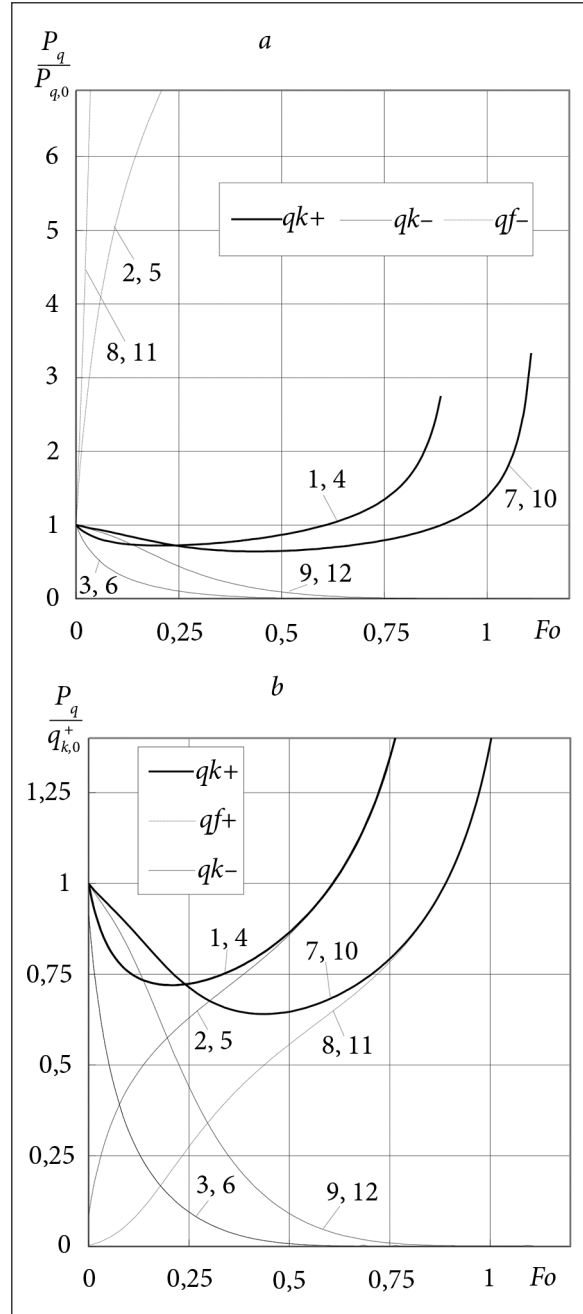
Šilumos srautai lašelio paviršiuje ir jų $P_q(\tau)$ funkcijos itin priklauso nuo skysčio medžiagos ir lašelių spindulio (5 pav.). Ypač savita yra fazinių virsmų energinį lygį išreiškianti $P_q \equiv q_f^+(\tau)$ funkcija kondensaciniame fazinių virsmų režime (5 pav. a). Tačiau pagal Furje mastelį normuotoje $\bar{P} \equiv P/P_{norm}$ formoje pateiktos energinių parametru $\bar{P}_{T,k''}(Fo)$ funkcijos lašelių spinduliui yra nejautrios tiek tradicinio normuojančio parametro $P_{norm} \equiv P_0$ (6 pav.), tiek ir šilumos srautų įvertinimui akivaizdesnės jo modifikuotos $P_{norm} \equiv q_{k,0}^+$ formos atveju (7 pav.).

Anksčiau pateiktas „lašo“ „ k'' “ šilumokaitos atvejo modeliavimo rezultatų analizės pavyzdys patvirtina (3) tipo cikle lašelių spindulio atžvilgiu pasireiškiantį $\bar{P}_{T,k''}(Fo)$ funkcijų universalumą. Pastarasis ir atveria kelią sudėtingesnių šilumokaitos „ $k+r$ “, „ $k+c$ “ ir „ $c+r$ “ atvejų įtaką lašelio pernašos procesams įvertinti palyginamuoju metodu. Patogu tai, kad palyginamajam vertinimui



6 pav. Oro drėgnumo įtaka $\bar{P} \equiv P/P_0$ formoje (a) ir $\bar{P} \equiv P/q_{k,0}^+$ formoje (b) pateiktoms vandens lašelių energinių parametų $\bar{P}_{„k“}(Fo)$ funkcijoms. Vienareikšmiškumo sąlygos atitinka 5 pav. a

reikalingas etalonines $\bar{P}_{„k“}(Fo)$ funkcijas galima apibrėžti pagal laisvai parinkto dispersiškumo lašelio „k“ šilumokaitos modeliavimo rezultatus; nepatogu, kad palyginamąjį pernašos procesų sąveikos įvertinimą (3) tipo cikluose šiek tiek komplikuoja lig šiol „lašo“ tyrimuose taikytas (1) ir (3) ciklų susiejimas tiriamojo skysčio išpurškimo sąlygomis apibrėžtu a_0/R_0^2 parametru.



7 pav. Skysčio medžiagos įtaka $\bar{P} \equiv P/P_0$ formoje (a) ir $\bar{P} \equiv P/q_{k,0}^+$ formoje (b) pateiktoms angliavandenilių lašelių energinių parametų $\bar{P}_{„k“}(Fo)$ funkcijoms. Vienareikšmiškumo sąlygos atitinka 5 pav. b

Kadangi skirtingais kraštinių sąlygų atvejais a_0/R_0^2 parametras gali kisti, todėl pagal (3) tipo cikluose stebimus fazinių virsmų režimų pokyčius apibrėžti realius režimų trukmės pokyčius gana keblu. Tam būtina lygiagreti (1) ir (3) tipo ciklų analizė. Galima lašelių šilumokaitos ir masės mainų procesus apibrėžiančių vienareikšmiškumo sąlygų įvairovė bei platus išpurškiamų skys-

čių medžiagų pasirinkimas sukelia daug nepatogumų pernašos procesų sąveikos palyginamojo įvertinimo praktikoje.

Galima išvelgti, jog a_0/R_0^2 parametro neapibrėžtume pradinį sąlygų atžvilgiu neigiamą aspektą turi tik a_0 sando priklausomumas nuo išpurškiamo skysčio medžiagos ir temperatūros. Patogus nuo išpurškiamo skysčio medžiagos ir temperatūros nepriklausantis fazinių virsmų trukmės mastelis. Tačiau jame privaloma išsaugoti pernašos parametru $\bar{P}_{„k“}(Fo)$ funkcijų aptartus savitumus „k“ šilumokaitos atveju. Furje kriterijui ir realaus laiko ryšio daugikliui unifikuoti būtinas susitarimas dėl etaloninio skysčio ir jo temperatūros. Pernašos procesų sąveikos sisteminio įvertinimo palyginamuoju būdu metodikos pagrindai pirmą kartą nuosekliai pateikti [28, 30] darbuose. Juose pagrįsti nestacionariojo garavimo universalios 0–1 trukmės režimo privalumai ir 278 K temperatūros vandens lašeliams pateikta $Fo_{ng,k}(T_d)$ funkcija, užtikrinanti universalus ciklo $\bar{Fo} \equiv Fo/Fo_{ng,k}$ mastelio suformavimą [30]. Todėl unifikuotą a_0/R_0^2 daugiklį siūloma suformuoti pagal 278 K temperatūros vandens lašelius. Tuomet 278 K temperatūros vanduo gauna etaloninio skysčio statusą, o tradicinis Furje Fo kriterijaus mastelis gali būti pakeičiamas etaloninio Furje Fo^{et} kriterijaus masteliu:

$$Fo = (a_0/R_0^2) \cdot \tau \rightarrow Fo^{et} = (a_{et}/R_0^2) \cdot \tau \text{ ir} \quad (4)$$

$$0 - Fo_f \rightarrow 0 - Fo_f^{et} \equiv 0 - Fo_{ko}^{et} - Fo_{nf}^{et} - Fo_f^{et}$$

Abu Furje masteliai yra vienareikšmiškai susiejami išraiška:

$$Fo^{et} = \frac{a_{et}}{a_0} Fo, \quad (5)$$

kurioje $a_{et} \equiv a_{H_2O}(T_0 = 278K)$.

Realų fazinių virsmų τ laiką bei etaloninį Furje Fo^{et} kriterijų siejantis a_{et}/R_0^2 daugiklis yra tik lašelių pradinio spindulio $a_{et}/R_0^2 \equiv f(R_0)$ funkcija, kurią 2 pav. parodo 1 kreivė. Todėl (4) tipo ciklų palyginimu jau galima tiesiogiai įvertinti skirtingų kraštinių sąlygų įtaką atitinkamų fazinių virsmų režimų trukmei, o lašelių pernašos procesų palyginamojoje analizėje atraminėmis tampa etaloninio Furje kriterijaus $Fo_{„k“}^{et}$ vertės. Jas galima apibrėžti pagal jau žinomas $Fo_{„k“}$ vertes, pastarąsias pagal (5) išraišką perskaičiavus į Fo^{et}

mastelį. Platesnės $Fo_{„k“}^{et}$ kriterijus apibrėžiančios diagramos sudarytų prielaidas lašelių šilumos ir masės mainų sąlygų poveikio sudėtinių pernašos procesų sąveikos intensyvumui įvertinti pagal $\bar{P}_{„k“}(Fo^{et})$, $\bar{P}_{„k+r“}(Fo^{et})$, $\bar{P}_{„k+c“}(Fo^{et})$ bei $\bar{P}_{„c+r“}(Fo^{et})$ funkcijų kitimo (4) tipo cikluose ypatumus. Tačiau apibrėžtų $Fo_{„k“}$ kriterijų pasirinkimas kol kas yra siauras. Todėl $Fo_{„k“}^{et}$ apibrėžiančių diagramų sudarymas yra svarbus uždavinys „lašo“ ateities tyrimuose tiek skysčių medžiagos, tiek ir lašelių šilumokaitos vienareikšmiškumo sąlygų aspektais.

Tarus, jog fazinių virsmų režimų trukmę „k“ šilumokaitos atveju nusakantys $Fo_{„k“}^{et}$ kriterijai yra apibrėžti, galima plėtoti lašelių universalus gyvavimo ciklo idėją, numatant skirtingų režimų universalios trukmės galimybę. Tam atspirties tašku gali būti „k“ šilumokaitos atveju suformuoto universalios vienetinės trukmės 0–1 fazinių virsmų režimo koncepcija. Pagal ją (4) tipo lašelių gyvavimo ciklo atitinkamo būtų universalusis ciklas:

$$0 - Fo_{ko,k}^{et} - Fo_{nf,k}^{et} - Fo_{f,k}^{et} \rightarrow \quad (6)$$

$$\rightarrow \bar{Fo}^{et} \equiv 0-1-2-3.$$

(6) tipo cikle: 0–1 būtų universalios vienetinės bematės trukmės kondensacinis fazinių virsmų režimas; 1–2 būtų universalios vienetinės bematės trukmės nestacionariojo garavimo fazinių virsmų režimas; 2–3 būtų universalios vienetinės bematės trukmės pusiausviro garavimo fazinių virsmų režimas, o 0–2 atspindėtų nestacionariųjų fazinių virsmų universalų režimą. (6) cikle kiekvienam fazinių virsmų režimui reikia savito laiko mastelio, kuris gali būti apibrėžtas kaip $\bar{Fo}_i^{et} \equiv Fo^{et}/Fo_i^{et}$, kur $i \equiv 1, 2$ ir 3 nusako atitinkamai pirmąjį ($f \equiv ko$), antrąjį ($f \equiv ng$) ir trečiąjį ($f \equiv eg$) fazinių virsmų režimus. Laiko mastelį formuojantis $Fo_{i,k}^{et}$ parametras priklausys nuo fazinių virsmų režimo: kondensaciniame $f_v \equiv „ko“$ 0–1 režime:

$$\bar{Fo}^{et} \equiv Fo^{et}/Fo_{ko,k}^{et}; \quad (7)$$

nestacionariojo garavimo $f_v \equiv „ng“$ 1–2 režime:

$$\bar{Fo}^{et} \equiv 1 + (Fo^{et} - Fo_{ko,k}^{et}) / (Fo_{nf,k}^{et} - Fo_{ko,k}^{et}); \quad (8)$$

pusiausviro garavimo $f_v \equiv „eg“$ 2–3 režime:

$$\bar{Fo}^{et} \equiv 2 + (Fo^{et} - Fo_{nf,k}^{et}) / (Fo_{f,k}^{et} - Fo_{nf,k}^{et}). \quad (9)$$

Normuojančio etaloninio Furje kriterijaus vertes atskiriems fazinių virsmų režimams tam tikromis vandens lašelių fazinių virsmų vyksmo sąlygomis galima apibrėžti pagal [7, 18, 30, 31] ir kt. rezultatus.

Grynujų skysčių lašelių „k“ šilumokaitos atveju gyvavimo etaloniniame (6) tipo cikle kiekvieno fazinių virsmų režimo trukmė yra vienietinė. Tai sudaro prielaidas kiekvieno fazinių virsmų režimo lygiaverčiam traktavimui skaitinio modeliavimo aspektu, „lašo“ matematinio modelio sprendimo algoritmą realizuojant pagal vieningu principu sudaromą skaitinio sprendimo schemą.

LAŠELIO UNIVERSALIAUS FAZINIŲ VIRSMŲ CIKLO SKAITINIO MODELIAVIMO METODIKA IR REZULTATAI

Vienietinės trukmės režimai (6) cikle yra tik „k“ šilumokaitos atveju. Sudėtingesnės šilumokaitos tarp lašelių ir jų apsupties atvejais nukrypimai nuo vienietinės trukmės režimų leis įvertinti kraštinių sąlygų įtaką pernašos procesų sąveikoje. Lašelio „k“ šilumokaitos atvejį galima sumodeliuoti pagal sudėtinės šilumokaitos šiluminės energijos srautų lašelio paviršiuje pusiausvyros (2) sąlygą, iškeliant papildomus $q_r \equiv 0$ ir $Nu \equiv 2$ reikalavimus. Numatant \overline{Fo}^{et} mastelio perspektyvą sudėtinių pernašos procesų palyginamojoje analizėje, vertėtų „lašo“ uždavinio subtilybes paaiškinti sudėtinės šilumokaitos atveju. Sudėtinio šilumos plitimo spinduliavimu ir laidumu izotermiškos pradinės šiluminės būsenos sferinės formos lašelyje analitinis modelis ir jo skaitinio sprendimo iteracinė schema išplėtoti [21] darbe. Prielaidas tam sudarė vietinį spinduliuotės srautą pusskaidrėje sferoje aprašanti integrali lygtis [32], vienareikšmiškai aprašanti $q_r(r)$ funkciją spektrinės spinduliuotės intensyvumo sferos paviršiuje $I_{\omega,R}$ ir temperatūros lauku $T(r)$ joje apibrėžtu atveju. [21] darbe išplėtotas (2) išraiškos skaitinio sprendimo iteracinis algoritmas lašelio paviršiaus temperatūros $T_R(\tau)$ funkcijai apibrėžti grindžiamas nestacionariojo temperatūros $T(r, \tau)$ lauko lašelyje integralaus tipo analitiniu sprendiniu „k + r“ šilumokaitos lašelyje atveju. „Lašo“ uždaviniui apibrėžti būtinos vienareikšmiškumo sąlygos formuluojamos $T_R(\tau)$ funkcijos atžvilgiu:

$$\begin{aligned} T_r(\tau=0) &\equiv T_R(\tau=0), R(\tau=0) \equiv R_0, R(\tau) \equiv R_\tau, \\ T_{r=R}(\tau) &\equiv T_R(\tau), I_{\omega,r=R}(\tau) \equiv \\ &\equiv I_{\omega,R}(\tau), \left[\partial T_r(\tau) / \partial r \right]_{r=0} \equiv 0. \end{aligned} \quad (10)$$

„Lašo“ uždavinio vienareikšmiškumo (10) sąlygomis pradinių sąlygų apibrėžiamas lašelio $2R_0$ skersmuo ir pradinės temperatūros pastovumas jo tūryje: $T(r, \tau \equiv 0) = T_{R,0}$. Nestacionariojo temperatūros lauko lašelyje gradientas aprašomas integralių lygčių begaline eilute [21]:

$$\begin{aligned} grad T_{r=R}(\tau) &= \frac{2\pi}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n n \int_0^\tau (-1)^n \frac{R}{n\pi} \frac{dT_R}{dt} + \\ &+ \frac{1}{R\rho c_p} \int_0^R \left(\sin \frac{n\pi r}{R} - \frac{n\pi r}{R} \cos \frac{n\pi r}{R} \right) q_r dr \times \\ &\times \exp \left[-a \left(\frac{n\pi}{R} \right)^2 (\tau - \tau_i) \right] d\tau_i, \end{aligned} \quad (11)$$

atsižvelgiant į šylančio lašelio paviršiaus temperatūros kitimo tempą ir spinduliuotės srauto sugėrimą pusskaidriame skystyje. (11) išraiškos savitumai apibrėžia (2) išraiškos iteracinio skaitinio sprendimo algoritmo sudarymo metodiką: lašelio gyvavimo $0 - \tau_f$ cikle būtina išskirti (spėti) modeliuojamą laiko $0 - \tau$ intervalą ir jame numatyti baigtinį I skaičių tarpinių τ_i laiko momentų, užtikrinant $\sum_{i=1}^{I-1} (\tau_{i+1} - \tau_i) \equiv \tau$ sąlygą; begalinėje integralių lygčių eilutėje reikia pasirinkti baigtinį N narių skaičių; momentinį lašelio $R(\tau)$ matmenį τ_i laiko momentais reikia padalyti į baigtinį $J-1$ skaičių $\Delta\tau_j$ intervalą; ω_1 ir ω_2 banginiais skaičiais reikia apibrėžti šiluminei spinduliuotei vertingą spinduliavimo spektro $\omega_1 - \omega_2$ intervalą ir jame numatyti baigtinį M skaičių tarpinių ω_m banginių skaičių, užtikrinant $\sum_{m=1}^{M-1} (\omega_{m+1} - \omega_m) \equiv \omega_2 - \omega_1$ sąlygą; į spektrinius optinius efektus lašelio paviršiuje atsižvelgianti bei spektrinės spinduliuotės sugėrimą pusskaidriame skystyje įvertinanti integralaus spinduliuotės $q_{r,j}$ srauto lašelio apskaičiavimo metodika privalo būti išplėtotą (Spinduliavimo spektre integravimą pagal šviesos bangos l_b ilgį efektyvu pakeisti integravimu pagal banginį $\omega \equiv 1/l_b$ skaičių. Tai leidžia spinduliuotės srauto skaičiavimo schemeje tinklę sutankinti trumpųjų bangų srityje [32], kuriose spektrinis spinduliavimo intensyvumas didžiausias ir smarkiai kinta optinės savybės [33, 34].); parinkta leistina šilumos srautų lašelio paviršiu-

je nepusiausvira $[1 - (q_{\Sigma, it}^- + q_{f, it}^+) / q_{\Sigma, it}^+] \cdot 100\% < \delta_{leist}$ reikia apibrėžti iteracinio *it* ciklo, skirto lašelio paviršiaus $T_{R, i}$ temperatūrai kiekvienu τ_i momentu parinkti, ciklo pabaigos sąlygą (keliant reikalavimą $\delta_{leist} < 0,05\%$, reikia atsižvelgti į šimosios laipsnio dalies eilės lašelio paviršiaus temperatūros pokyčius [35]); $\tau_{i>1}$ laiko momentams reikia numatyti lašelio R_i matmens patikslinimo būdą. Tokio algoritmo praktinio realizavimo skaitinė schema yra imli mašininio laiko sąnaudoms, kurios auga su kiekvienu laiko žingsneliu vis naujai apibrėžiant laiko integralą (11) išraiškoje. Nemažos įtakos „lašo“ uždavinio mašininio laiko apskaičiavimui turi lašelio spindulio ir laiko koordinatų kitimo žingsneliai skaitinėje schemoje. Minimalų laiko žingsnelį riboja pernašos procesų relaksacijos laikas, o maksimalus laiko žingsnelis turėtų užtikrinti pageidautiną lašelio masės vidutinį pašilimą iki 1K, siekiant išlaikyti aukštą lašelio šiluminių parametrų apskaičiavimo patikimumą [35]. Turima „lašo“ uždavinio sprendimo kombinuotu analitiniu ir skaitiniu metodu patirtis [7, 18, 21, 26–32] ir kt. jau leidžia (2) išraiškos skaitinio sprendimo schemai parinkti optimalių parametrų I_{op} , J_{op} , N_{op} , M_{op} variantą bei pagrįsti ribiniais $\omega_1 = 10^4 \text{ m}^{-1}$ ir $\omega_2 = 125 \cdot 10^4 \text{ m}^{-1}$ banginiais skaičiais apibrėžiamą spinduliuotės spektro svarbų intervalą. Skaitinės schemos stabilumui užtikrinti iteraciniame *it* cikle lašelio spindulio rekomenduojama nekeisti ($R_{i, it} \equiv R_{i-1}$). $\Delta R_i \equiv R_i - R_{i-1}$ pokytis kiekviename laiko $\Delta \tau_{i>1} \equiv \tau_i - \tau_{i-1}$ žingsnelyje apibrėžiamas pasibaigus iteraciniam ciklui. Ši aptarta iteracinė schema užtikrina aukštą „lašo“ uždavinio skaitinio sprendimo patikimumą, tačiau, kaip minėta, ji yra gaiši mašininio skaičiavimo laikui.

Skysčio išpurškimo momentu susiformuojančių lašelių temperatūra prilyginama į purkštuvą tiekiamo skysčio temperatūrai. Kai spinduliuotės intensyvumas $I_{\omega} \equiv 0$, „lašo“ uždavinio viena-reikšmiškumo (10) sąlygos visiškai tinka (6) ciklo pirmajam fazinių virsmų režimui modeliuoti „k“ šilumokaitos atveju. Pirmasis 0–1 fazinių virsmų režimas bus kondensacinis režimas, kai $T_0 / T_{rt} < 1$. Jeigu $T_0 / T_{rt} > 1$, lašelių gyvavimo cikle kondensacinio fazinių virsmų režimo nebus. Tuomet pirmuoju fazinių virsmų režimu (6) cikle bus 1–2 nestacionariojo garavimo režimas. Pirmajam fazinių virsmų režimui modeliuoti (1) ciklo atveju

tinka (2, 10, 11) „lašo“ modelis, papildytas lašelio masės kitimą aprašančia diferencialine lygtimi:

$$\frac{1}{3} \frac{\partial [\rho(\tau) R^3(\tau)]}{\partial \tau} = -R^2(\tau) m_g^+(\tau). \quad (12)$$

(12) išraiškoje lašelio paviršiuje besikondensuojančio garo srauto m_g^+ tankį numatant neigiamu, jį patogiu aprašyti pagal analitinį modelį [36]. Kai $Fo_{\text{„k“}}^{et}$ yra apibrėžti, (2, 10–12) sistema aprašomas „lašo“ uždavinys dėka bematės formos kintamųjų

$$\bar{T}_{\eta}(Fo) \equiv \frac{T_{\eta}(Fo)}{T_{R, 0}}, \eta \equiv \frac{r}{R(Fo)}, \quad (13)$$

$$Fo \equiv \frac{a_0 \tau}{R_0^2(Fo)}, \bar{q}_r(Fo) = \frac{R_0 q_r(Fo)}{T_{R, 0} \lambda_0},$$

kartu su (5) transformacija, lengvai pertvarkomas į (6) ciklą tenkinantį „lašo“ matematinę bematę modelį. Iteracinė skaitinė schema pirmajam (6) ciklo fazinių virsmų režimui sudaroma numačius sveiką I skaičių Fo^{et} verčių universalioje vienetinėje režimo trukmėje:

$$Fo_i^{et} = \frac{i-1}{I-1}, \text{ kai } \sum_{i=2}^I (Fo_i^{et} - Fo_{i-1}^{et}) \equiv 1. \quad (14)$$

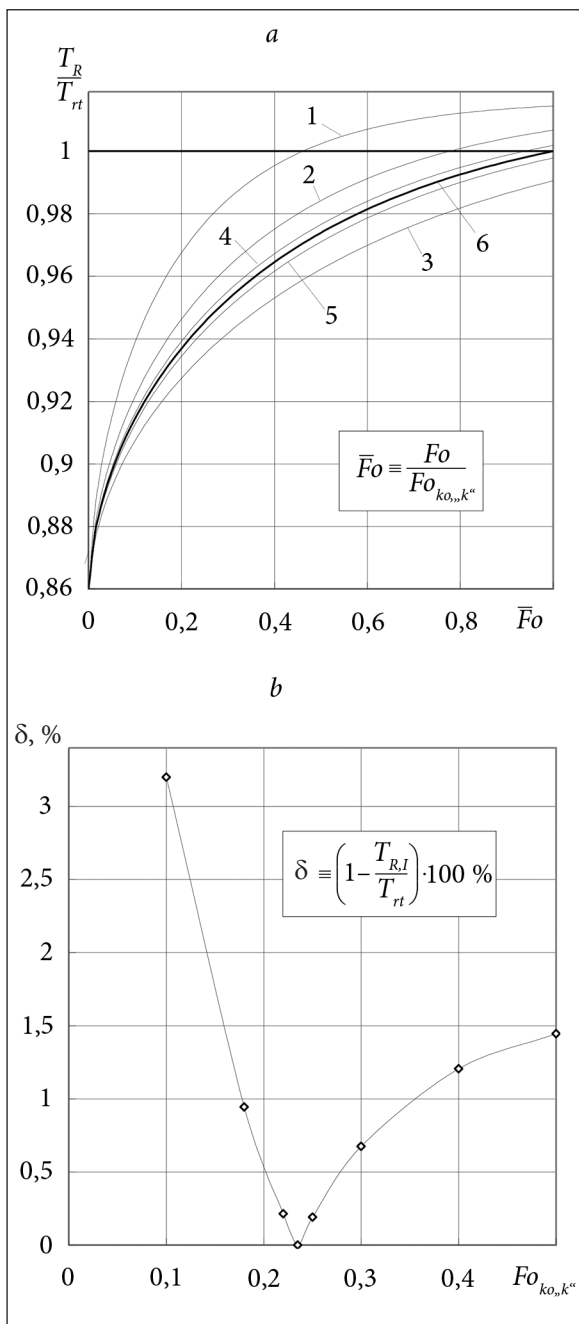
Lašelio bematėje 0–1 η koordinatėje numatomas sveikas J skaičius tarpinių verčių:

$$\eta_j = \frac{j-1}{J-1}, \text{ kai } \sum_{j=2}^J (\eta_j - \eta_{j-1}) \equiv 1. \quad (15)$$

Norint tiksliau skaičiuoti pernašos procesus paviršiniuose lašelio sluoksniuose galimas ir netolygus žingsnis pagal lašelio bematę koordinatę (smulkėjantis koordinatei η artėjant prie vienetinės vertės), kur sukaupta pagrindinė lašelio masė.

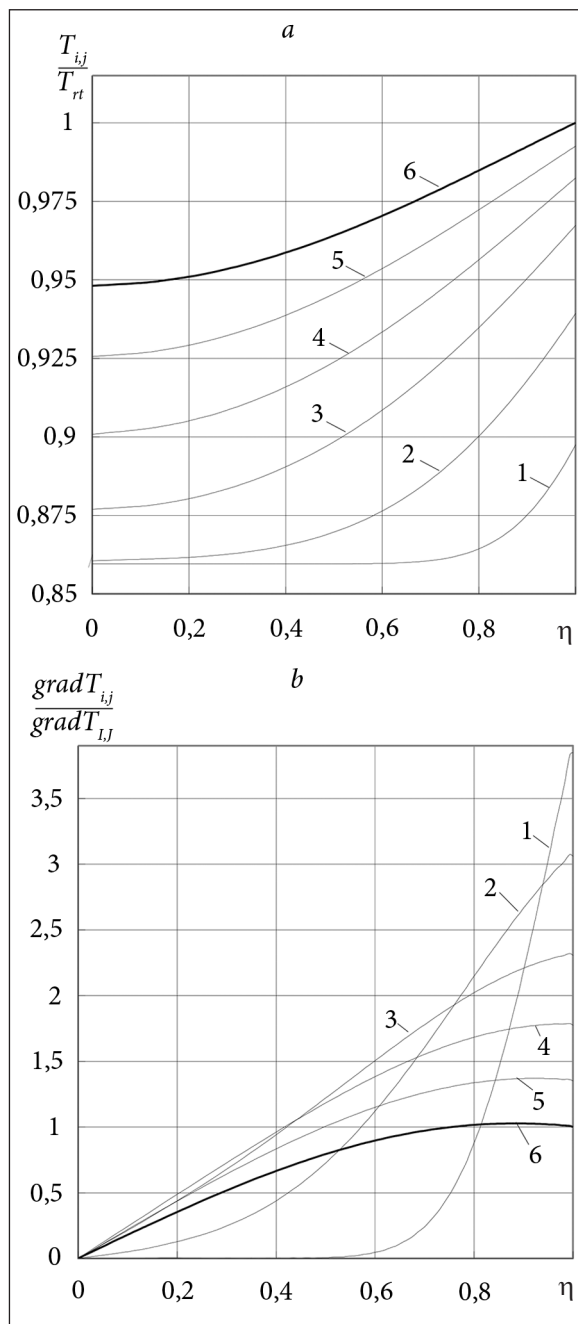
Universalūs laiko (14) ir lašelio matmens (15) masteliai leidžia apibrėžti Fo_i ir τ_i bei $r_{i, j}$ parametrus, o (13) išraiškos leidžia apibrėžti pageidaujamas lašelio šilumos ir masės mainų P_i parametrus matmeninėje jų formoje.

Pirmasis (6) ciklo kondensacinis fazinių virsmų režimas sumodeliuotas 300 K temperatūros išpurškiamo vandens $2R_0 = 140 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ skersmens lašeliui, kai jį supa 800 K temperatūros 0,1 MPa slėgio ir $p_{g, \infty} / P \equiv 0,4$ drėgnumo ($T_{rt} = 349,036 \text{ K}$) oras. „k“ šilumokaitos atvejis realizuotos aptartomis $Nu \equiv 2$ ir $q_r \equiv 0$ sąlygomis, papildoma $k_{ef} \equiv 1$ prielaida eliminavus skysčio cirkuliacijos lašelyje galimumą. Skaitinės schemos



8 pav. Lašelio paviršiaus temperatūros dinamikos kondensaciniame režime (a) ir apskaičiuotosios $T_{R,I}$ temperatūros atitikimo rasos taško T_{rt} temperatūrai (b) priklausomumas nuo spėjamo Fo_{ko,k^*}^{et} kriterijaus vertės: (1) 0,5, (2) 0,3, (3) 0,18, (4) 0,25, (5) 0,22, (6) 0,2141; $T_d = 800 \text{ K}$; $\bar{p}_{g,\infty} = 0,4$; $T_0 = 300 \text{ K}$; $R_0 = 70 \cdot 10^{-6} \text{ m}$

tinkelis suformuotas $I = 81$, $J = 91$ ir $N = 71$ parametrų, iteracinio ciklo pabaigą apibrėžus $\delta_{leist} \leq 0,01 \%$ sąlyga. Modeliuojamu atveju $T_0 / T_{rt} = 0,85951 < 1$, todėl vandens lašelių gyvavimo (6) ciklą sudarys trys fazinių virsmų režimai. Iš pradžių modeliuojamas 0–1 kon-

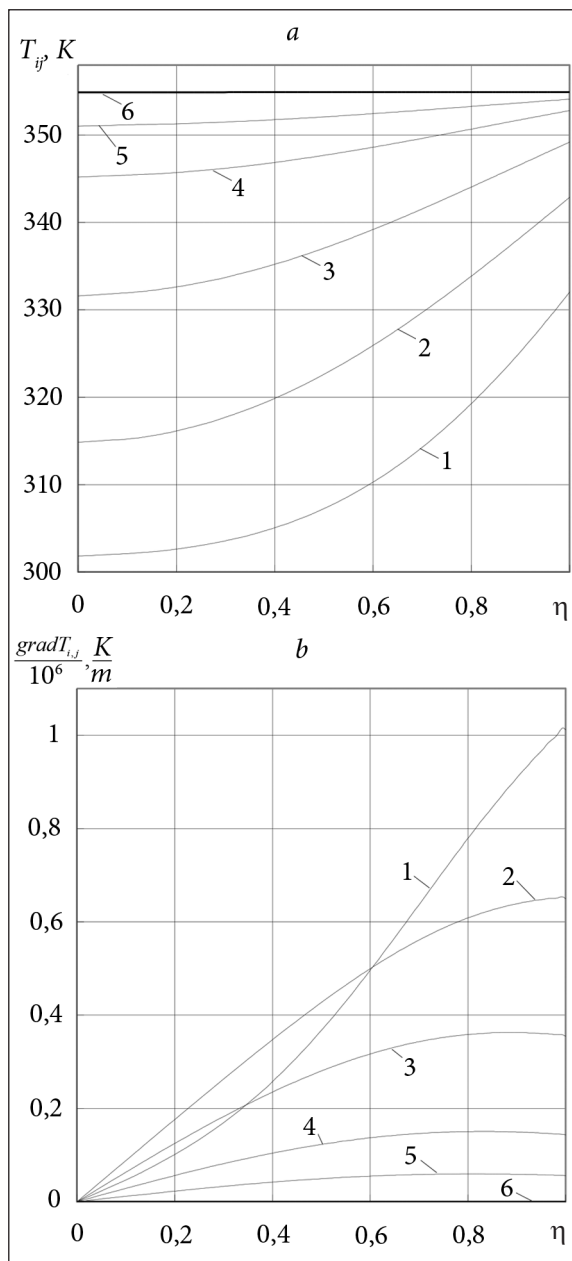


9 pav. Lašelio nestacionarusis temperatūros laukas (a) ir jo vietinis gradientas (b) kondensaciniame fazinių virsmų 0–1 režime. Fo^{et} : (1) 0,0107, (2) 0,0455, (3) 0,091, (4) 0,1472, (5) 0,1713, (6) 0,2141; $T_d = 800 \text{ K}$; $\bar{p}_{g,\infty} = 0,4$; $T_0 = 300 \text{ K}$; $R_0 = 70 \cdot 10^{-6} \text{ m}$; $T_{R,I} = 349,033 \text{ K}$; $T_{C,I} = 330,91 \text{ K}$; $gradT_{I,J} = 365300,7 \text{ K/m}$; $R_l = 71,264 \cdot 10^{-6} \text{ m}$

densacinis fazinių virsmų režimas. Jam apibrėžiamos pradinės $T_r(\tau = 0) \equiv T_R(\tau = 0) = 300 \text{ K}$ ir $R(\tau = 0) \equiv R_0 = 70 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ sąlygos. (6) ciklo 0÷1 kondensacinio režimo $\bar{Fo}^{et} = Fo^{et}/Fo_{ko,k^*}^{et}$ mastelį apsprendžiančio Fo_{ko,k^*}^{et} vertę pirmajam priartėjimui tenka spėti: $Fo_{ko,k^*}^{et} \equiv Fo_{ko,k^*}^{et,parinkta}$

(apytikriai ją galima parinkti pagal [7] darbe pateiktas diagramas). Pagal (14) ir (15) išraiškas apibrėžiamas skaitinės schemas tinklelis ir pradėdamas skaitinis eksperimentas lašelio pernašos $\bar{P}_{0 \rightarrow 1, i}^{k^{**}} \rightarrow P_{0 \rightarrow Fo_{ko, i}^{k^{**}}}^{k^{**}} \rightarrow P_{0 \rightarrow Fo_{ko, i}^{k^{**}}}^{k^{**}} \rightarrow P_{0 \rightarrow \tau_{ko, i}^{k^{**}}}^{k^{**}}$ parametrus apskaičiuoti. Pagal modeliavimo rezultatus patikslinama $Fo^{et, apsk}_{ko, k^{**}} \equiv Fo^{et, apsk}_{ko, k^{**}}$. Tam pakanka išanalizuoti lašelio šiluminius $P_{T, i}$ parametrus pagal apskaičiuotosios lašelio paviršiaus momentinės $T_{R, i}$ temperatūros atitikimą rasos taško T_{rt} temperatūrai: $Fo^{et, apsk}_{ko, k^{**}} \cong Fo_i (|T_{R, i} - T_{rt}| \equiv \min)$. Patikslintąją kondensacinio režimo $Fo^{et, apsk}_{ko, k^{**}}$ trukmę priskyrus parinktajai, skaitinis eksperimentas kartojamas, kol pasiekiamas apskaičiuotosios lašelio paviršiaus $T_{R, I}$ temperatūros leistinas nukrypimas nuo rasos taško temperatūros. Modeliuotu atveju pasiektas $T_{R, I} \equiv 349,033$ rezultatas, kai $Fo^{et}_{ko, k^{**}} = 0,2141$, atitinka $Fo_{ko, k^{**}} = 0,2351$ vertę (8 pav. a). Tuomet $\tau_{ko, k^{**}} = 0,00783$ s ir kondensaciniame režime lašelio skersmuo išauga iki $2R_{ko}$ ($\tau \equiv \tau_{ko}$) $\equiv 142,528 \cdot 10^{-6}$ m, o lašelio centriniai sluoksniai pašyla iki $T_{c, I} \equiv 330,91$ K temperatūros. Lašelio šiluminės būsenos kitimą kondensaciniame fazinių virsmų režime atspindi T_{ij} temperatūrų dinamika (9 pav. a). Lašelio neizotermiškumą šio režimo pabaigoje apibūdina apskaičiuotasis $T_{r, ko}$ ($\tau \equiv \tau_{ko}$) temperatūros laukas (9 pav. a 6 kreivė). Šilumos plitimo laidumo intensyvumo kitimą lašelyje apibūdina temperatūros lauko gradientas $gradT_{ij}$ jame (9 pav. b). Temperatūros lauko gradientą kondensacinio fazinių virsmų režimo pabaigoje apibrėžia 9 pav. b 6 kreivė: $gradT_{r=R}$ ($\tau \equiv \tau_{ko}$) = 365300,7 K/m ir $gradT_{r=0}$ ($\tau \equiv \tau_{ko}$) = 0. Apskaičiuotosios lašelio paviršiaus $T_{R, I}$ temperatūros atitikimas rasos taško T_{rt} temperatūrai (9 pav. a) patvirtina kondensacinio režimo modeliavimo patikimumą.

Pagal kondensacinio režimo modeliavimo rezultatus galima apibrėžti pradines sąlygas nestacionariojo garavimo 1–2 režimui modeliuoti: $T_{r, ng}(\tau = 0) \equiv T_{r, ko}(\tau \equiv \tau_{ko})$; $gradT_{r, ng}(\tau = 0) \equiv gradT_{r, ko}(\tau \equiv \tau_{ko})$ ir $R_{0, ng} \equiv R_{ko}(\tau \equiv \tau_{ko})$. Tačiau tęsti skaitinį eksperimentą pagal pateiktą „lašo“ uždavinio izotermiškos pradinės būsenos lašelio modelį negalima, nes neizotermiškos pradinės būsenos atveju būtina (2) išraiškos korekcija. Ją galima įvykdyti pagal [26] darbe pateiktą matematinį modelį. Tačiau atskleisti neizotermiškos pradinės būsenos lašelio šilumos ir masės mainų

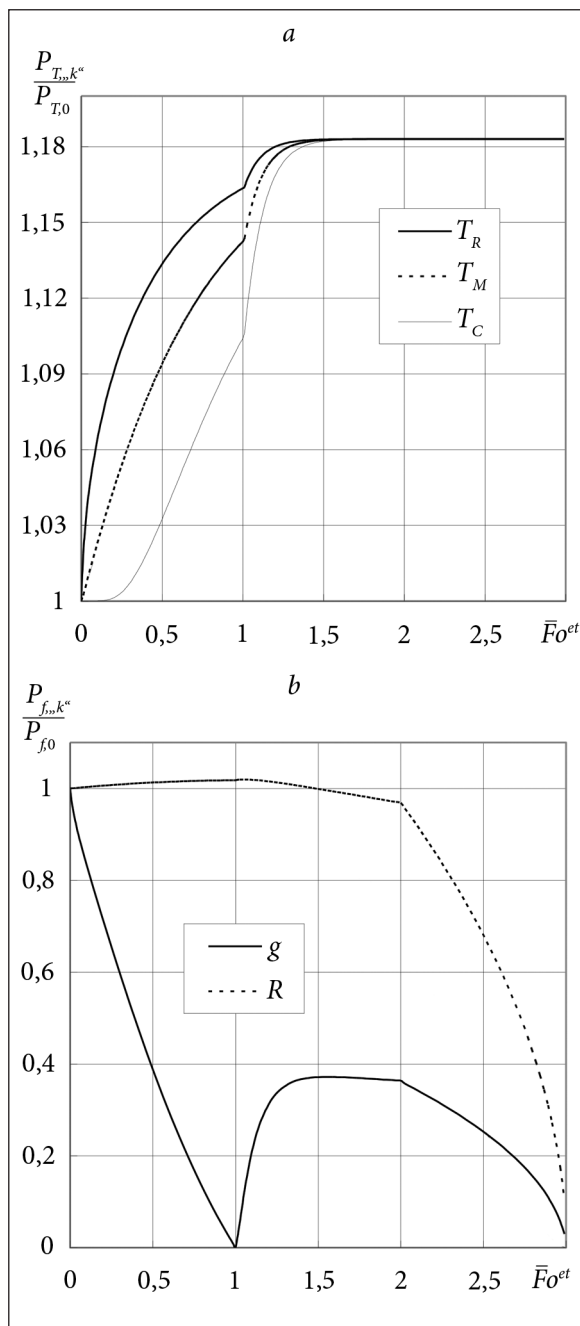


10 pav. Lašelio nestacionarusis temperatūros laukas (a) ir jo vietinis gradientas (b) nestacionariųjų fazinių virsmų 0–2 režime. Fo^{et} : (1) 0,07, (2) 0,14, (3) 0,2275, (4) 0,35, (5) 0,4725, (6) 1,4; $T_d = 800$ K; $\bar{p}_{g, \infty} = 0,4$; $T_0 = 300$ K; $R_0 = 70 \cdot 10^{-6}$ m; $T_{R, I} = 354,893$ K; $R_I = 67,81 \cdot 10^{-6}$ m

modeliavimo specifika neleidžia šio straipsnio apimtis. Tad skaitinis eksperimentas tęsiamas pagal pateiktą izotermiško lašelio modelį. Tam nestacionariųjų fazinių virsmų 0–2 režimas traktuojamas kaip universalios vienetinės trukmės režimas, jungiantis kondensacinį ir nestacionariojo garavimo režimus: $Fo^{et}_{nf, k^{**}} \equiv Fo^{et}_{ko, k^{**}} + Fo^{et}_{ng, k^{**}}$. Tuomet nestacionariųjų fazinių virsmų režimui tinka

$\bar{Fo}^{et}_{f_v=k_0}$ masteliui pritaikytas skaitinio tyrimo žingsnis, tačiau perėjimui į \bar{Fo}^{et} mastelį reikalinga \bar{Fo}^{et}_{nf,k^c} kriterijaus vertė yra dar nežinoma. Be to, 0–2 režimas turi su nestacionariųjų fazinių virsmų pabaigos nevienareikšmišku apibrėžimu susijusią specifiką, kadangi lašelio paviršiaus temperatūra prie pusiausviro garavimo sąlygas užtikrinančios lašelio temperatūros artėja asimptotiškai. Šią problemą galima spręsti iš inžinerinių arba griežtų mokslinių pozicijų. Abu būdai išsamiai aptarti [30] darbe. Daugelyje šiluminių technologijų yra labai svarbus skystosios fazės dispersiniame pavidale gyvavimo τ_f laikas. Todėl perėjimo iš nestacionariojo į pusiausvirą garavimą laiko $\tau_{eg} \equiv \tau_{nf} + \tau_{ng}$ momentą be didesnės įtakos τ_f laikui galima apibrėžti apytiksliai. Tuomet galima parinkti leistiną neatitikimą tarp apskaičiuotosios $T_{L,l}$ temperatūros ir kraštinėmis sąlygomis apibrėžiamos pusiausviro garavimo sąlygas užtikrinančios $T_{R,eg}$ temperatūros: $T_{R,eg} - T_{L,l} < \Delta T_{leist}$. Modeliuotu atveju priimta $\Delta T_{leist,k^c} < 0,01$ K sąlyga. Apytiksliai $Fo^{et,parinkta}_{nf,k^c} \approx 1,4$ vertė parinkta pagal [30] darbo rezultatus. Tuomet apskaičiuota, jog nestacionariųjų fazinių virsmų 0–2 režimo metu lašelis pašyla iki 354,893 K temperatūros (10 pav. a). Nestacionariųjų fazinių virsmų režimo pabaigoje lašelio terminė būsena artima izoterminei. Tą liudija šio režimo metu iki nulinės vertės sumažėjantis nestacionariojo temperatūros lauko lašelyje gradientas (10 pav. b). Lašelio skersmuo 0–2 nestacionariųjų fazinių virsmų pradžioje, veikiamas kondensacinio režimo, išauga (kondensacinio režimo modeliavimu apibrėžtas $2R_{k_0} \equiv 142,528 \cdot 10^{-6}$ m lašelio skersmuo), o nestacionariojo garavimo metu sumažėja iki $2R_l \equiv 135,62 \cdot 10^{-6}$ m skersmens. Papildomu skaitiniu eksperimentu apskaičiuota parinktus lašelių apsuptyes parametrus atitinkanti lašelių pusiausviro garavimo $T_{eg,k^c} = 354,9$ K temperatūra „ k^c “ šilumokaitos atveju. Todėl $T_{R,eg} - T_{L,l} \equiv 354,9 - 354,893 < \Delta T_{leist}$ atveju priimta $Fo^{et}_{nf,k^c} = 1,4$ vertė. Tuomet $Fo_{nf,k^c} = 1,5371$ ir $\tau_{nf,k^c} = 0,0512$ s. Apibrėžiama nestacionariojo garavimo režimo trukmė: $Fo^{et}_{ng,k^c} \equiv Fo^{et}_{nf,k^c} - Fo^{et}_{ko,k^c} = 0,1859$. Tuomet $Fo_{ng,k^c} = 1,302$ ir $\tau_{ng,k^c} = 0,04339$ s.

Kadangi nestacionariųjų fazinių virsmų 0–2 režimo pabaigoje lašelis „ k^c “ šilumokaitos atveju yra vėl izotermiškas, todėl tinka pusiausviro garavimo 2–3 režimui aptartas „lašo“ modelis. Pagal 0–2 režimo modeliavimo rezultatus for-



11 pav. Lašelio šiluminių (a) ir fazinių virsmų (b) parametų kitimas universaliame egzistavimo cikle. $T_d = 800$ K; $\bar{p}_{g,\infty} = 0,4$; $T_0 = 300$ K; $R_0 = 70 \cdot 10^{-6}$ m

muluojamos pradinės sąlygos 2–3 režimui modeliuoti: $T_{r,eg}(\tau = 0) \equiv T_{r,nf}(\tau = \tau_{nf}) = 354,893$ K; $grad. T_{r,eg}(\tau = 0) = 0$ K/m ir $R_{0,eg} \equiv R_{nf}(\tau = \tau_{nf}) = 67,81 \cdot 10^{-6}$ m. Pusiausviro garavimo režime taip pat tinka $\bar{Fo}^{et}_{f_v=k_0}$ masteliui pritaikytas skaitinio tyrimo žingsnis. Nors Fo^{et}_{eg,k_0} kriterijaus vertė yra nežinoma, tačiau prielaidas jai apibrėžti sudaro lašelio išgaravimo sąlyga: $R(\tau \rightarrow \tau_{eg}) \rightarrow 0$. Todėl

Lentelė. „k“ šilumokaitos atveju drėgname ($\bar{p} = 0,4$) 800K temperatūros ore šylančio 300 K pradinės temperatūros $2R_0 = 140 \cdot 10^{-6}$ m skersmens vandens lašelio fazinių virsmų modeliavimo (6) cikle rezultatų išplėtimas didesniam lašelių spindulio intervalui. $T_{R_0}(\tau_{R_0}) = 349,033$; $T_{C_{k0}}(\tau_{C_{k0}}) = 331,242$ K; $T_{m_{k0}}(\tau_{m_{k0}}) = 342,688$ K; $T_{R_0}(\tau_{R_0}) = T_{C_{k0}}(\tau_{C_{k0}}) = T_{m_{k0}}(\tau_{m_{k0}}) = T_{R_0}(\tau_{R_0}) = T_{C_{k0}}(\tau_{C_{k0}}) = T_{m_{k0}}(\tau_{m_{k0}}) = 0$; $q_g(\tau_{R_0}) \equiv q_k(\tau_{R_0})$; $q_k(\tau_{R_0}) \equiv 0$

$R_0 \cdot 10^6$ m	$g_0 \cdot 10^7$ kg/s	$q_{k,0}^+$ kW/m ²	$q_{f,0}^+$ kW/m ²	$a_{et} R_0^2$ s ⁻¹	τ_{k0} s	$R_{k0} \cdot 10^6$ m	$q_{k,0}^+$ kW/m ²	$g_{R_0} \cdot 10^7$ kg/s	$R_{R_0} \cdot 10^6$ m	$q_{k,0}^+$ kW/m ²	τ_{R_0} s	τ_{R_0} S	τ_{R_0} S	τ_{R_0} S	τ_{R_0} S	τ_{R_0} S
5	0,011	5174	8536,6	5357,2	4E-05	5,0903	3427,8	0,004	4,844	3127,2	0,00022	0,00026	0,00189	0,00215		
10	0,022	2587	4268,3	1339,3	0,00016	10,1806	1713,9	0,008	9,687	1563,6	0,00088	0,00105	0,00754	0,00859		
20	0,044	1293,5	2134,2	334,825	0,00064	20,3612	856,95	0,016	19,374	781,8	0,00354	0,00418	0,03017	0,03435		
30	0,066	862,3	1422,8	148,811	0,00144	30,5418	571,3	0,024	29,061	521,2	0,00797	0,00941	0,06787	0,07728		
40	0,088	646,8	1067,1	83,706	0,00256	40,7224	428,48	0,032	38,748	390,9	0,01417	0,01673	0,12066	0,13739		
50	0,11	517,06	853,66	53,572	0,004	50,903	342,55	0,04	48,435	312,51	0,02214	0,02613	0,18853	0,21467		
60	0,132	431,17	711,38	37,2028	0,00575	61,084	285,65	0,048	58,122	260,6	0,03188	0,03763	0,27148	0,3091		
70	0,154	369,58	609,76	27,3327	0,00783	71,264	244,85	0,056	67,809	223,37	0,04339	0,05122	0,36952	0,42074		
80	0,176	329,38	533,54	20,927	0,01023	81,445	218,21	0,064	77,496	199,077	0,05667	0,0669	0,48264	0,54954		
90	0,1981	287,45	474,26	16,535	0,01295	91,625	190,43	0,072	87,183	173,734	0,0717	0,08467	0,61084	0,69551		
100	0,22	258,7	426,83	13,393	0,01599	101,806	171,39	0,08	96,87	156,36	0,08855	0,04532	0,75413	0,85866		
125	0,275	206,98	341,46	8,5715	0,02498	127,258	137,126	0,1	121,09	125,1	0,13836	0,16333	1,1783	1,34166		
150	0,33	172,47	284,55	5,9524	0,03597	152,709	114,261	0,12	145,31	104,24	0,19923	0,2352	1,6968	1,93198		
175	0,385	147,83	243,9	4,3732	0,04896	178,161	97,937	0,14	169,52	89,348	0,27117	0,32013	2,3095	2,62964		
200	0,44	129,35	213,42	3,3482	0,06395	203,612	85,696	0,16	193,74	78,18	0,35418	0,41813	3,0165	3,43463		
250	0,55	103,48	170,73	2,1429	0,09991	254,515	68,556	0,2	242,18	62,544	0,55341	0,65333	4,7133	5,36661		
300	0,66	86,23	142,28	1,4881	0,14387	305,418	57,13	0,24	290,61	52,12	0,79692	0,9408	6,7872	7,72798		
350	0,77	73,92	121,95	1,09331	0,19583	356,321	48,969	0,28	339,05	44,674	1,0847	1,2805	9,238	10,5185		
400	0,88	64,68	106,708	0,83706	0,25578	407,224	42,848	0,32	387,48	39,09	1,4167	1,6725	12,066	13,7386		
450	0,99	57,49	94,851	0,66138	0,32372	458,127	38,087	0,36	435,92	34,747	1,79307	2,1168	15,271	17,3879		
500	1,1	51,74	85,366	0,53572	0,39965	509,03	34,278	0,4	484,35	31,272	2,21366	2,6133	18,8531	21,4664		
600	1,32	43,12	71,138	0,37203	0,5755	610,836	28,565	0,48	581,22	26,06	3,18766	3,7632	27,148	30,9117		
700	1,54	36,96	60,976	0,27333	0,7833	712,642	24,485	0,56	678,09	22,337	4,33876	5,1221	36,952	42,0741		
800	1,76	32,34	53,354	0,20927	1,0231	814,448	21,424	0,64	774,96	19,5451	5,667	6,901	48,264	54,954		
900	1,98	28,745	47,426	0,16536	1,2949	916,254	19,044	0,72	871,83	17,373	7,1722	8,46709	61,084	69,5511		
1000	2,2	25,87	42,683	0,13393	1,5986	1018,06	17,139	0,8	968,7	15,636	8,5463	10,453	75,413	85,8658		

$Fo^{et, parinkta}_{eg, k^a}$ vertė spėjama ir po to tikslinama skaitinio tyrimo eigoje pagal $R(\bar{Fo}^{et})$ funkcijos ypatumus. Praktiškai tenkinti $R_l = 0$ reikalavimą gana keblu, todėl šiame skaitiniame eksperimente pasitenkinta prielaida $Fo^{et}_{eg, k^a} \equiv Fo^{parinkta}_{eg, k^a}$, kai $R(\bar{Fo}^{et} \equiv 1) < 0,5 \cdot 10^{-6}$ m. Po daugelio priartėjimų apibrėžta $Fo^{et}_{eg, k^a} \equiv 0,3695$, tuomet $Fo_{eg, k^a} = 12,51$ ir $\tau_{eg, k^a} \equiv 0,3695$ s.

Pagal apibendrintus 0–1, 0–2 ir 2–3 fazinių virsmų režimų savarankiško modeliavimo rezultatus apibrėžiama lašelių gyvavimo trukmė: $Fo^{et}_{f, k^a} \equiv Fo^{et}_{ko, k^a} + Fo^{et}_{ng, k^a} + Fo^{et}_{eg, k^a} = 11,5$, $Fo_{f, k^a} = 14,0471$ ir $\tau_{f, k^a} = 0,4207$ s. Tuomet pagal (7–9) išraiškas jau galima suformuoti (6) ciklą ir sudaryti etalonines $\bar{P}_{k^a}(\bar{Fo}^{et})$ funkcijas įvairių šilumokaitos atvejų modeliavimo rezultatų palyginamajai analizei. Keleto etalonų funkcijų grafinė interpretacija pateikta (11 pav.).

APIBENDRINIMAS

Darbe išplėta „lašo“ uždavinio sprendimo metodika fazinių virsmų universalus (6) tipo ciklo sudarymo metodu. Ji įgalina atlikti ciklo fazinių virsmų režimuose vykstančių grynujų skysčių lašelių pernašos procesų kruopštų skaitinį modeliavimą skirtingais lašelių šilumokaitos atvejais. „k“ šilumokaitos sąlygomis sudaryti lašelio pernašos procesų parametrų kitimo universaliame fazinių virsmų cikle etaloniniai grafikai yra patogūs sudėtingesnių šilumokaitos sąlygų įtakai įvertinti palyginamuoju metodu. Be to, $\bar{P}_{k^a}(\bar{Fo}^{et})$ funkcijos apibrėžia pernašos parametrų santykinių P / P_0 pokyčių dinamiką. Būdinguose (6) ciklo taškuose modeliuotu kraštinių sąlygų atveju:

$$\begin{aligned} T_{R,ko}/T_{R,0} &\equiv T_{r1}/T_{R,0} = 1,1634, T_{C,ko}/T_{R,0} = 1,1041, \\ T_{m,ko}/T_{R,0} &= 1,1423, R_{ko}/R_0 = 1,01806, q^+_{k,ko}/ \\ q^+_{k,0} &\equiv q^+_{k,ko}/q^+_{k,0} = 0,6625, T_{R,ng}/T_0 \equiv T_{C,ng}/T_0 \equiv T_{M,ng}/ \\ T_0 &\equiv T_{eg,k^a}/T_0 = 1,183, g_{ng}/g_0 = 0,3636, R_{ng}/ \\ R_0 &= 0,9687, q^+_{k,ng}/q^+_{k,0} \equiv q^+_{f,ng}/q^+_{k,0} = 0,6044, q^+_{f,ng}/ \\ q^+_{f,0} &= 0,3664. \end{aligned}$$

Pagal apibrėžtus P / P_0 santykinis parametrus galima išplėsti modeliavimo rezultatus pageidaujama lašelių dispersiškumo spektrui (lentelė). Aišku, pradinės $P_0(R_0)$ parametrų vertės jau turi būti apskaičiuotos.

Šio darbo rezultatai sudaro prielaidas įvertinti universaliame fazinių virsmų cikle vandens lašelių konvekcinį bei sudėtinį šilumos mainų poveikį pernašos procesų sąveikai, kai lašeliai šil-

domi $T_d = 800$ K temperatūros drėgname $\bar{p}_g = 0,4$ ore ir dar pageidautina $p \equiv 0,1$ MPa sąlyga. Palyginamosios analizės metodo taikymą išplėstų analogiškai skaitiniai „lašo“ skirtingų šilumokaitos atvejų tyrimai šiluminėms technologijoms aktualiems skysčiams plačiose kraštinių sąlygų ribose. Tam pateiktoje skaitinio tyrimo metodikoje reikia neizotermiškos lašelio pradinės šiluminės būsenos modelio papildymo.

Žymėjimai

- a – temperatūros laidumo koeficientas m^2/s ;
- B_T – šilumos pernešimo Spoldingo parametras;
- B_M – masės pernešimo Spoldingo parametras;
- c_p – savitoji šiluma $J/(K \text{ kg})$;
- \bar{Fo} – Furje kriterijus;
- g – srautas kg/s ;
- I – kontrolinio laiko suskaidymą skaitinėje schemoje apibrėžiantis sveikas skaičius;
- I_ω – spektrinis spinduliuotės intensyvumas $W/(m \text{ ster})$;
- J – lašelio koordinatės suskaidymą skaitinėje schemoje apibrėžiantis sveikas skaičius;
- k – šilumos konvekcijos lašelyje koeficientas;
- l_B – šviesos bangos ilgis m ;
- L – garavimo šiluma J/kg ;
- m – garo srauto tankis $kg/(m^2s)$;
- M – spinduliavimo spektro suskaidymą skaitinėje schemoje apibrėžiantis sveikas skaičius;
- n – nario indeksas begalinėje sumoje;
- N – begalinėje sumos eilutėje įvertinamų narių skaičius;
- Nu – Nuselto kriterijus;
- p – slėgis Pa ;
- P – lašelio šilumos ir masės mainų parametro bendrasis žymėjimas;
- \bar{P} – lašelio šilumos ir masės mainų bemačio parametro bendrasis žymėjimas;
- q – šilumos srauto tankis W/m^2 ;
- r – radialinė koordinatė m ;
- R – lašelio spindulys m ;
- T – temperatūra K ;
- δ – santykinė paklaida %;
- $\eta = r/R$ – bemačė radialinė koordinatė;
- λ – šilumos laidžio koeficientas $W/(K \text{ m})$;
- ρ – tankis kg/m^3 ;
- τ – laikas s ;
- ω – banginis skaičius m^{-1} .

Indeksai apačioje

c – konvekcija;
 C – lašelio centras;
 d – dujos;
 ef – efektyvūs;
 eg – pusiausviras garavimas;
 et – etaloninis;
 f – faziniai virsmai;
 g – garas, garavimas;
 h – šildymas;
 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;
 ko – kondensacija;
 l – leistinas;
 M – masės vidutinis;
 nf – nestacionarieji faziniai virsmai;
 ng – nestacionarusis garavimas;
 $norm$ – normuojantis;
 r – spinduliavimas;
 R – lašelio paviršius;
 τ – momentinis;
 Σ – suminis;
 0 – pradinė būsena;
 ∞ – toli nuo lašelio.

Indeksai viršuje

et – etaloninis;
 $+$ – išorinė lašelio paviršiaus pusė;
 $-$ – vidinė lašelio paviršiaus pusė.

Santrumpos

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

Literatūra

1. Fuchs N. A. *Evaporation and Droplet Growth in Gaseous Media*. London: Pergamon Press, 1959.
2. Sazhin S. S. Advanced models of fuel droplet heating and evaporation. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2006. Vol. 32. P. 162–214.
3. *Liquid Droplet Evaporation*. 2013. <http://www.Sciencedirect.com>
4. Povilaitis M., Urbonavičius E., Rimkevičius S. Branduolinių jėgainių apsauginiai kiaurai ir juose vykstantys procesai. *Energetika*. 2005. Nr. 4. P. 18–27.
5. Babić M., Kljenak I., Mavko B. Simulations of TOSQAN containment spray tests with combined Eulerian CFD and droplet-tracking modelling. *Nuclear Engineering and Design*. 2009. Vol. 239. P. 708–721.
6. Taylan O., Berberoglu H. Thermal radiation transport in a fluidized dry water system. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2013. Vol. 120. P. 104–113.
7. 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.
8. Godoy W. F., Des Jardin P. E. Radiation driven evaporation for polydisperse water sprays. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009. Vol. 52. P. 2893–2901.
9. Tseng C. C., Viskanta R. Enhancement of water droplet evaporation by radiation absorption. *Fire Safety Journal*. 2006. Vol. 41. P. 236–247.
10. Yang W., Parker T., Ladouceur H. D., Kee R. J. The interaction of thermal radiation and water mist in fire suppression. *Fire Safety Journal*. 2004. Vol. 39. P. 41–66.
11. 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.
12. Elperin T., Krasovtsov 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.

Gauta 2014 01 14
 Priimta 2014 05 20

13. 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.
14. Sazhin S. S., Abdelghaffar W. A., Krutitskii P. A., Sazhina E. M., Heikal M. R. New approaches to numerical modelling of droplet transient heating and evaporation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005. Vol. 48. P. 4215–4228.
15. Labeckas G., Slavinskas S. The effect of ethanol, petrol and rapeseed oil blends on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions. *Transport*. 2010. Vol. 25. No. 2. P. 116–128.
16. Dombrovsky L. A. A model for solid bubbles formation in melt–coolant interaction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009. Vol. 52. P. 1085–1093.
17. Zhifu Z., Guoxiang W., Bin C., Liejin G., Yueshe W. Evaluation of evaporation models for single moving droplet with a high evaporation rate. *Powder Technology*. 2013. Vol. 240. P. 95–102.
18. 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.
19. Spalding D. B. *Convective Mass Transfer*. London: Edward Arnold Publishers Ltd., 1963.
20. Dombrovsky 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.
21. 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.
22. Lage P. L. C., Rangel R. H. Single droplet vaporization including thermal radiation absorption. *Journal of Thermo Physics and Heat Transfer*. 1993. Vol. 7. P. 502–509.
23. 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.
24. 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.
25. Kuzikovskij A. V. Dynamic of spherical particle in powerful optical field. *Izvestiya VUZ. Fizika*. 1970. No. 5. P. 89–94.
26. Miliauskas G. Interaction of the transfer processes in semitransparent liquid droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2003. Vol. 46. P. 4119–4138.
27. 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.
28. Miliauskas G., Norvaišienė K. Garuojančių lašelių sudėtinės pernašos nestacionariųjų procesų sąveikos sisteminis įvertinimas. *Energetika*. 2013. T. 59. Nr. 1. P. 26–41.
29. 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.
30. Miliauskas G., Norvaišienė K. Išpurkšto vandens gyvavimo ciklas ir lašelių nestacionariojo garavimo sausame ore universalios trukmės diagrama. *Energetika*. 2013. T. 59. Nr. 2. P. 57–68.
31. Miliauskas G., Norvaišienė K. Miliauskas G. Dūmuose slystančių vandens lašelių faziniai virsmai. *Energetika*. 2010. T. 56. Nr. 2. P. 132–248.
32. 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 Works B*. 1983. Vol. 139. P. 53–61.
33. Hale G. M., Query M. R. Optical constants of water in the 200-nm to 200-mm wavelength region. *Applied Optics*. 1973. Vol. 12. P. 555–562.
34. Tuntomo A., Tien C. L. Optical constant of liquid hydrocarbon fuels. *Combustion Science and Technology*. 1992. Vol. 84. P. 133–140.
35. Miliauskas G. Nestacionariųjų sudėtinių šilumos mainų sferiniame tūryje apskaičiavimo optimizavimas. *Mechanika*. 1997. Nr. 1(8). P. 5–13.

36. Kuzikovskij A. V. Dynamic of spherical particle in powerful optical field. *Izvestiya VUZ. Fizika*. 1970. No. 5. P. 89–94.

Gintautas Miliuskas

UNIVERSAL CYCLE OF THE PHASE TRANSFORMATION REGIMES FOR PURE LIQUID DROPLETS

1. CYCLE FORMATION METHOD AND NUMERICAL MODELING FRAMEWORK FOR DROPLET TRANSFER PROCESSES

Summary

This article reviews achievements of pure liquid droplets in heat and mass transfer modeling using the method of combined analytical and numerical research. The versatility is approved in respect of the sprayed liquid droplets dispersity in a thermal state, heated up by the conduction and phase transitions changing of parameters presented and expressed by the Fourier number. The idea of the universal lifetime cycle of sprayed liquid droplets phase transformation regime was proposed. The article presents the method of this cycle formation and introduces a numerical modeling framework for transfer processes of the droplet. Its vitality is based on modeling examples of consistent water droplets heated up by conductivity in condensing, unsteady and equilibrium evaporation phase transitions regimes.

Key words: pure liquid droplets, heat and mass transfer, Fourier time scale, droplet lifetime cycle, universal duration of phase transformation regime, numerical modeling

Гинтаутас Миляускас

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЦИКЛ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ КАПЕЛЬ ОДНОРОДНОЙ ЖИДКОСТИ

1. МЕТОД СОСТАВЛЕНИЯ ЦИКЛА И МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА КАПЛИ

Резюме

В статье представлен обзор достижений моделирования тепло и массопереноса капель однородной жидкости комбинированным аналитическим и численным методом. Подтверждена универсальность изменения термического состояния и параметров фазовых превращений капель распыленной жидкости в масштабе критерия Фурье при кондуктивном нагреве относительно их дисперсности. Выдвинута идея универсального цикла фазовых превращений капель. Изложен метод составления цикла и подставлена методика численного расчета процессов переноса капли в нем. Примерами постепенного моделирования конденсационного, нестационарного и равновесного испарения режимов фазовых превращений подтверждена ее реальность.

Ключевые слова: капли однородной жидкости, тепло и массоперенос, масштаб критерия Фурье, универсальный цикл фазовых превращений, численное моделирование