

# Išpurkšto vandens gyvavimo ciklas ir lašelių nestacionariojo garavimo sausame ore universalios trukmės diagrama

**Gintautas Miliauskas,**

**Kristina Norvaišienė**

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

Išpurkšto vandens gyvavimo ciklas apibrėžtas laikotarpiu tarp lašelių susidarymo ir jų išnykimo laiko momentų. Pagal lašelių paviršiuje vykstančius fazinius virsmus jų gyvavimo cikle išskirti kondensacinis, nestacionariojo ir pusiausviro garavimo režimai. Kiekviename ciklo režime yra būdinga lašelių šilumos ir masės mainų procesų sąveika ir galima savita šilumokaitos lašeliuose ir jų paviršiuje vykstančių fazinių virsmų procesų energinė interpretacija. Šiais aspektais labai ryški lašelių apsupties energinio poveikio įtaka, lemiamą lašelių šildymo proceso ypatumų. Todėl lašelių gyvavimo ciklo trukmę lemia išpurškiamo vandens ir apsupties parametrai bei šilumokaitos tarp skystosios ir dujinės fazių savitumai. Paprasčiausiu šilumokaitos atveju, kai apsuptis šilumą lašeliams tiekia laidumu, Furje kriterijaus mastelyje galimas išpurkšto vandens gyvavimo ciklas, nepriklausantis nuo lašelių dispersiškumo. Fazinių virsmų režimų kaitos momentus jame apibrėžia būdingi Furje kriterijai. Pastarieji priklauso nuo išpurškiamo vandens temperatūros ir lašelių apsupties parametru. Būdingiems Furje kriterijams apibrėžti atlikti laidumu šildomų vandens lašelių garavimo proceso išsamūs skaitiniai tyrimai. Pagal jų rezultatus lengvai identifikuojami kondensacinio režimo ir lašelių gyvavimo trukmės apibrėžiantys Furje kriterijai: kondensacinio režimo pabaigą nurodo lašelio paviršiaus pašilimas iki rasos taško temperatūros, o lašelio gyvavimo ciklą užbaigia kondensuotos fazės išgaravimo momentas. Lašelių pusiausviro garavimo režime visa apsupties teikiama šiluma garina vandenį. Šio režimo pradžia apibrėžta atlikus garuojančių lašelių terminės ir energinės būsenos kompleksinę analizę. Pagal jos rezultatus sudaryta vandens lašelių nestacionariojo garavimo sausame ore universalios trukmės diagrama.

**Raktažodžiai:** vandens lašeliai, gyvavimo ciklas, nestacionarusis garavimas, sausas oras, universali diagrama

## ĮVADAS

Išpurkšto skysčio sistemose šilumos ir masės pernaša yra efektyvi. Tai lemia išvystytas kontakto tarp skystos ir dujų fazių paviršius bei spartūs šilumokaitos ir fazinių virsmų procesai. Šilumos ir masės mainams ryški sudėtinių pernašos procesų sąveikos įtaka, pasireiškianti Stefano hidrodinaminio srauto, Knudseno sluoksnio, selektyvaus

spinduliavimo, lašelių slydimo dujų sraute ir kitų veiksmų poveikiu. Dėl sudėtinių pernašos procesų tarpusavio sąveikos jų intensyvumas gali skirtis nuo atsietai vykstančių procesų intensyvumo, nors pradinės šilumos ir masės mainų sąlygos yra identiškios. Lašelių ir dujų dvifaziuose srautuose šilumokaitos kraštinės sąlygos kinta. Tai lemia lašelio terminės būsenos kitimo spartą ir fazinių virsmų intensyvumą apibrėžiantys parametrai. Svarbūs parametrai yra

skysčio išskaidymo  $R_{0, n=1+\infty}$  dispersiškumas, jo pradinė  $T_{l,0}$  temperatūra, dujų srauto  $T_{d,0}$  temperatūra bei skysčio garo  $\bar{p}_0 \equiv p_{g,0} / p$  pradinė koncentracija dujų mišinyje. Išpurkšto skysčio lašelių ir jų apsupties temperatūrų skirtumas sudaro prielaidas vykti šilumokaitai tarp fazių. Skysčio garas dujose sudaro prielaidas vykti kondensaciniam fazinių virsmų režimui šaltesniame už rasos taško temperatūrą lašelių paviršiuje. Skysčio lašelių dispersiškumas lemia kontakto tarp fazių paviršiaus plotą, lašelių  $R_{0, n=1+\infty}$  dispersiškumą – skysčio dispergavimo procesas. Todėl lašelių sudarymo sąlygos iš esmės lemia šilumos ir masės pernašos procesų modeliavimo metodus. Juos parenkant tenka atsižvelgti ir į išpurškiamą skystį. Pastarąjį patogiau apibrėžti pagal dujų ir įpurškiamo skysčio debitų  $\bar{g}_0 \equiv G_{l,0} / G_{d,0}$  santykį.

Išpurškiant skystį  $\bar{g}_0 > 0$  sąlygomis susidaro lašelių ansambliai, kurių savitumus lemia lašelių dispersiškumas. Kai generuojami artimo stambumo lašeliai, turimas paprasčiausias „monodispersinių lašelių“ ansamblis. Išpurkšto skysčio terminė būseną ir faziniai virsmai aprašomi „vienišo lašelio“ modeliu, tačiau būtina jį papildyti „dujų srauto“ modeliu. Tiriamąjį atvejį tenka apibrėžti dvifazio srauto pradiniais  $T_{l,0}, R_{0, n=1} \equiv R_0, T_{d,0}, \bar{p}_0$  parametrais ir numatyti išpurškiamo skysčio kiekiu  $\bar{g}(\tau \equiv 0) = \bar{g}_0$ . Dvifazio srauto būseną aprašoma tarpusavyje susijusiomis skysčio ir dujų parametru  $P_l(\tau)$  bei  $P_d(\tau)$  funkcijomis. Joms ryški  $R_0$  ir  $\bar{g}_0$  parametrais nulemtos lašelių  $N_{R_0}$  koncentracijos įtaka. „Monodispersinio“ lašelių ansamblio gyvavimo  $\tau_f$  trukmė skiriasi nuo analogiškoms sąlygoms garuojančio „vienišo lašelio“ atvejo. Tai lemia išgaruojančio skysčio poveikis dujų srauto būsenai.

Kai  $\bar{g}_0 > 0$  ir generuojami skirtingo stambumo lašeliai, susidaro „polidispersinių lašelių“ ansamblis. Tiriamasis atvejis apibrėžiamas dvifazio srauto pradiniais  $T_{l,0}, T_{d,0}$  ir  $\bar{p}_0$  parametrais, taip pat tenka numatyti skirtingo  $R_{0,n}$  dispersiškumo lašelių baigtinių  $n_R$  grupių skaičių bei apibrėžti kiekvienai grupei tenkantį išpurškiamo skysčio kiekį. Apibrėžiant dvifazio srauto būseną determinuojančias parametrų  $P_l(\tau)$  bei  $P_d(\tau)$  funkcijas, „vienišo lašelio“ modelis pritaikomas kiekvienai  $R_{0,n}$  dispersiškumo grupei ir atsižvelgiama į lašelių koncentraciją grupėje. Kiekvienos  $R_{0,n}$  dispersiškumo grupės lašelių gyvavimo  $\tau_{f,n}$  trukmė yra individuali. Nuosekliai išgaruojant mažesnio dispersiškumo lašelių grupėms, pasiekiamas „monodispersinių lašelių“ ansamblio atvejis, kuriam atstovauja vėliausiai išgaruojanti stambiausiųjų lašelių grupė. Ji ir apibrėžia išpurkšto skysčio gyvavimo trukmę. Išpurkšto skysčio paskutinės grupės lašelių baigiamojoje garavimo stadijoje dujų būsenos kitimas slopsta, todėl nuosekliai artėjama prie „vienišo lašelio“ atvejo. Taigi, „vienišo lašelio“ atvejis yra atspirties taškas išpurkšto skysčio šilumos ir masės mainų tyrimuose [1]. „Vienišo lašelio“ atveju teigiama, jog  $\bar{g}_0 \cong 0$  ir lašelių yra mažai, todėl skystosios fazės šilumokaita ir faziniai virsmai nešančiosios dujinės fazės būsenos nepakeičia. Išpurkš-

to skysčio terminė būseną ir faziniai virsmai apibrėžiami lašelio šilumos ir masės mainų parametrų  $P_f(\tau)$  funkcijomis numatant lašelio terminius, energinius, dinامينius ir fazinių virsmų parametrus atitinkamai  $P_T(\tau), P_q(\tau), P_F(\tau), P_f(\tau)$ . Šias funkcijas determinuoti galima tik esant apibrėžtiems išpurškiamo skysčio  $T_{l,0}$  ir  $R_{0, n=1} \equiv R_0$  bei dujų  $T_d$  ir  $\bar{p} \equiv p_{g,\infty} / p$  parametrams. Skirtingo dispersiškumo lašeliams pernašos parametrų  $P_f(\tau)$  funkcijas veikia lašelių šilumokaitos sąlygos. Todėl  $P_f(\tau)$  funkcijoms lašelių gyvavimo  $0 \div \tau_f$  cikle apibrėžti būtini įvairiapusiški išpurkšto skysčio šilumokaitos tyrimai ir sisteminis jų rezultatų palyginamasis įvertinimas. Pastarajam svarbus Furje kriterijumi išreikšto laiko mastelio vaidmuo [2]. Pereinant nuo realaus laiko į Furje kriterijaus mastelį svarbu atsižvelgti į išpurkšto skysčio lašelių paviršiuje vykstančių fazinių virsmų savitumus, kurie apibrėžia kondensacinį, nestacionariojo garavimo ir pusiausviros garavimo režimus.

Šiame darbe pagal „vienišo lašelio“ modelį [2] plačiau šilumos ir masės mainų kraštinių sąlygų diapazone skaitiškai sumodeliuota ore išpurkšto vandens lašelių šilumokaita ir masės mainai. Pagal laidumu šildomų lašelių terminių ir energinių parametrų kompleksinį įvertinimą siekiama Furje kriterijumi apibrėžti išpurkšto vandens nestacionariojo garavimo režimo universalią trukmę.

## IŠPURKŠTO VANDENS LAŠELIŲ GYVAVIMO CIKLAS

Sudėtinių pernašos procesų intensyvumui svarbus fazinių virsmų nulemtas lašelių matmens kitimas. Jį galima apibrėžti atitinkamai lašelio skersmens, paviršiaus ploto ar tūrio  $R(\tau), R^2(\tau)$  ir  $R^3(\tau)$  funkcijomis. Šios funkcijos apibrėžia išpurkšto skysčio lašelių egzistavimo  $\tau \equiv \tau \div \tau_2$  laiką. Pradžią fiksuoja skysčio išpurškimo momentas ( $\tau \equiv \tau_1 = 0$ ), o pabaigą – lašelio išgaravimo momentas ( $\tau \equiv \tau_2 = \tau_f$ ). Todėl  $0 \div \tau_f$  laikotarpis formaliai apibrėžia lašelio gyvavimo ciklą, tačiau jame vykstančių pernašos procesų neatspindi. Norint suteikti lašelio gyvavimo ciklui konkretų turinį, būtina lašelio šilumos ir masės mainų parametrų  $P_f(\tau)$  kompleksinė analizė, išryškinanti lašelio terminių  $P_{l,T}(\tau \equiv 0 \div \tau_f)$ , energinių  $P_{l,q}(\tau \equiv 0 \div \tau_f)$ , dinaminė  $P_{l,F}(\tau \equiv 0 \div \tau_f)$  bei fazinių virsmų  $P_{l,f}(\tau \equiv 0 \div \tau_f)$  parametrų kitimo dėsningumus lašelio gyvavimo cikle.

Lašelio šilumos ir masės mainų terminiai  $P_T(\tau)$  parametrai yra susiję su lašelio nestacionariojo temperatūros lauko  $T(r, \tau)$  funkcija, kiekvienu laiko momentu lašelio gyvavimo  $0 \div \tau_f$  cikle apibrėžiančia temperatūros pasiskirstymą lašelyje. Lašelio matmuo, veikiamas paviršiuje vykstančių fazinių virsmų ir šylančio skysčio plėtimosi, kinta, todėl lašelio radialinės koordinatės kitimo intervalas yra kintantis:  $r \equiv 0 \div R(\tau)$ . Dėl to kylantiems nepatogumams  $P_T(\tau)$  analizėje išvengti, įvedama bematė lašelio radialinė  $\eta = r / R(\tau)$ , užtikrinanti pastovų bematį lašelio matmenį  $\eta \equiv 0 \div 1$  visame lašelio gyvavimo  $0 \div \tau_f$  cikle. Pagal

nestacionariojo temperatūros lauko  $T(\eta, \tau)$  funkciją apibrėžiamos lašelio šilumos ir masės pernašos procesų intensyvumui svarbios lašelio paviršiaus, centro ir jo masės vidutinės temperatūros:  $T_R(\tau) \equiv T(\eta = 1, \tau)$ ,  $T_C(\tau) \equiv T(\eta = 0, \tau)$  ir  $T_m(\tau) \equiv \int_0^1 \eta^3 \rho(\eta, \tau) T(\eta, \tau) d\eta / \int_0^1 \eta^3 \rho(\eta, \tau) d\eta$ . Mažesnės už rasos taško temperatūrą šylančio lašelio paviršiaus temperatūros  $T_R(\tau) < T_{rt} \equiv T_{sot}(p_{g,\infty})$  atveju stebimas kondensacinis fazinių virsmų režimas. Lašelio paviršiaus ir centro temperatūrų  $|T_R(\tau) - T_C(\tau)| \equiv \Delta T_l$  skirtumas apibrėžia lašelio neizotermiškumą. Tai svarbu skysčio mechaniniam stabilumui šylančiame ir garuojančiame lašelyje įvertinti. Neizotermiško lašelio terminę būseną apibrėžti galima tik pagal jo masės vidutinę temperatūrą.

Lašelio šilumos ir masės mainų energiniais  $P_q(\tau)$  parametrais yra nusakomi šilumos srautai lašelyje ir jo apsuptyje. Juos aprašyti patogų sąlyginai numaćius lašelio paviršiaus vidinę ir išorinę puses, kurias apibrėžia atitinkamai  $R^-$  ir  $R^+$ , kai  $|R^-| \equiv |R^+| \equiv R$ . Sudėtinės šilumokaitos atveju apsupties energinio poveikio intensyvumą apibrėžia suminis šilumos srautas lašelio paviršiaus išorinėje pusėje. Jį lemia konvekcinių ir radiacinių šilumos srautų sandai:  $q_{\Sigma}^+(\tau) \equiv q_c^+(\tau) + q_r^+(\tau)$ . Skysčio lašelyje šildymo intensyvumą apibrėžia suminis šilumos srautas lašelio paviršiaus vidinėje pusėje:  $q_{\Sigma}^-(\tau) \equiv q_c^-(\tau) + q_r^-(\tau)$ . Šių šilumos srautų skirtumas nusako fazinių virsmų lašelio paviršiuje šilumos srautą:  $q_f^+(\tau) \equiv q_{\Sigma}^+(\tau) - q_{\Sigma}^-(\tau)$ . Gilesnė fazinių virsmų energinė interpretacija pateikta [2].

Lašelio šilumos ir masės mainų dinaminiai  $P_F(\tau)$  parametrai yra susiję su lašelyje ir jo apsuptyje veikiančiomis jėgomis, jų poveikiu lašelio judėjimui dujų sraute bei skysčio mechaniniam stabilumui lašelyje. Svarbi yra lašelio judėjimo ir dujų srauto greičių skirtumu  $\Delta w_R(\tau) \equiv |w_R(\tau) - w_d(\tau)|$  išreikšto lašelio slydimo dujose greičio įtaka pernašos procesų sąveikai. Šis dinaminis parametras apibrėžia slystančio lašelio paviršiuje kylančias trinties jėgas ir tiesiogiai veikia  $q_c^+(\tau)$  energinį parametą. Trinties jėgos slystančio lašelio paviršiuje iššaukia skysčio tekėjimą, kurio metu besiformuojantys sūkuriai gali persiduoti į vidinius lašelio sluoksnius ir sukelti priverstinę skysčio cirkuliaciją lašelyje. Šilumos plitimo lašelyje „laidumo“ modelio taikymo sąlyga yra  $Pe_l < 5$ , kitaip šilumos plitimui lašelyje aprašyti būtina taikyti „efektyvaus šilumos laidumo“ modelį [3]. Skysčio mechaninį stabilumą neslystančiame lašelyje gali pažeisti dėl lašelio neizotermiškumo kylančios Archimedo jėgos. Kol  $Ra_l < Ra_{l,kr}$ , tol jos yra nepakankamos savaiminiam skysčio judesiui lašelyje sukelti [4]. Mažesnio nei milimetras skersmens vandens lašeliams ši sąlyga tenkinama [5].

Svarbūs lašelio fazinių virsmų parametrai yra skysčio garo srautas lašelio paviršiuje ir jo tankis:  $G_g^+(\tau) = 4\pi R^2(\tau) \cdot m_g^+(\tau)$ . Garo difuzinį srautą iššaukia skysčio garo skirtumas prie lašelio ir toli nuo jo. Stefano hidrodinaminio srauto dėka papildomai kyla konvekcinė garo pernaša. Stefano hidrodinaminis srauto poveikis lašelio ši-

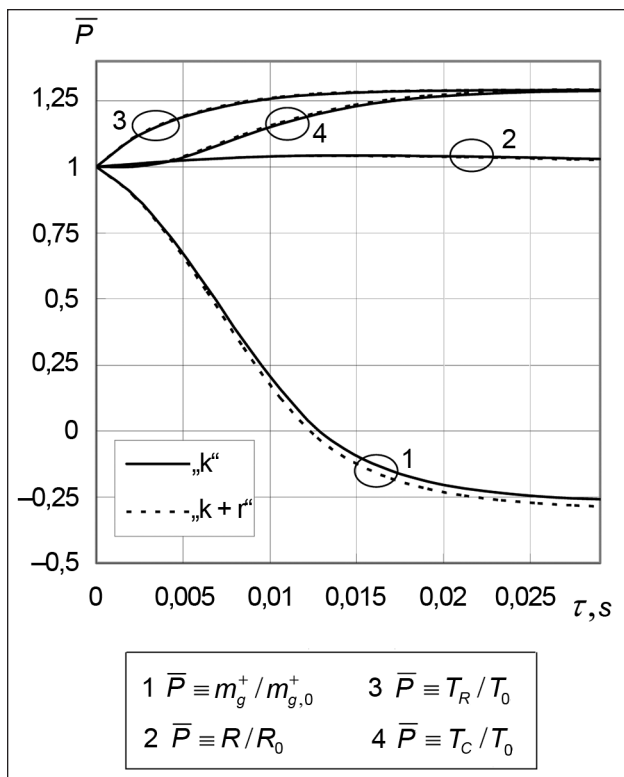
lumokaitai ir faziniams virsmams yra daugialypis: jis spartina skysčio garo nuvedimą nuo lašelio, lašelio konvekcinių šildymą slopina ir daro įtaką hidrodinaminiam režimui lašelyje, veikdamas garavimo procese trinties jėgų lašelio paviršiuje kitimą [3, 6]. Stefano hidrodinaminio srauto įtaka lašelio pernašos procesams tradiciškai įvertinama empirinėmis išraiškomis, kuriose pritaikomos Spoldingo šilumos  $B_T$  ir masės  $B_M$  parametų funkcijos:  $P_l(\tau) \equiv P_{l,f=0}(\tau) \cdot f_B(\tau)$ . Jose  $P_{l,f=0}$  atspindi atitinkamą lašelio šilumos ir masės mainų parametą, apskaičiuotą neatsižvelgus į Stefano hidrodinaminio srauto poveikį. Konvekcinio šildymo intensyvumui, garavimo spartai, trinties bei visiško pasipriešinimo koeficientams Stefano hidrodinaminio srauto poveikis pasireiškia tiesiogiai ir įvertinamas empirinėmis išraiškomis atitinkamai  $Nu \equiv Nu_{f=0} \cdot f_{B_T}$ ,  $G_g \equiv 2\pi R \rho_{gd} D_{gd} Sh \cdot f_{B_M}$ ,  $C_F \equiv C_{F,f=0} \cdot f_{B_M}$ ,  $C_D \equiv C_{D,f=0} \cdot f_{B_M}$ . Kai pernašos proceso parametrai Stefano hidrodinaminis srauto poveikis yra netiesioginis, t. y. pasireiškia per daromą įtaką kitiems parametrams, kurie savo ruožtu veikia minėtą parametą, tuomet parametrai aprašyme  $f_B(\tau) \equiv 1$ .

Taigi, skysčio lašelio šilumos ir masės pernašos procesai ir juos nusakantys parametrai yra labai glaudžiai tarpusavyje susiję tiesioginės ir užslėptos tarpusavio sąveikos ryšiais. Todėl galimi skirtingi požiūriai į lašelio gyvavimo ciklą, kuriuos lems vieno ar kito veiksnio išryškėjimo siekis. Be to, yra labai svarbūs ciklo vientisumo, galimų skirtingų režimų jame nuoseklus kitimo, aiškaus suvokimo ir interpretavimo bei korektiško matematinio aprašymo veiksniai. Visa tai tenkina lašelio gyvavimo ciklo skaidymas pagal jo paviršiuje vykstančius fazinius virsmus. Tuomet išskiriami skysčio garo kondensacijos ir skysčio garavimo režimai, pastarajame dar numatomas nestacionariojo ir pusiausviro garavimo periodai:

$$\tau_f \equiv \tau_{f=ko} + \tau_{f=gar} = \tau_{f=ko} + \tau_{f=gar,nes} + \tau_{f=gar,e} \rightarrow 0 \div \tau_{ko} \div \tau_{f,nes} \div \tau_f \quad (1)$$

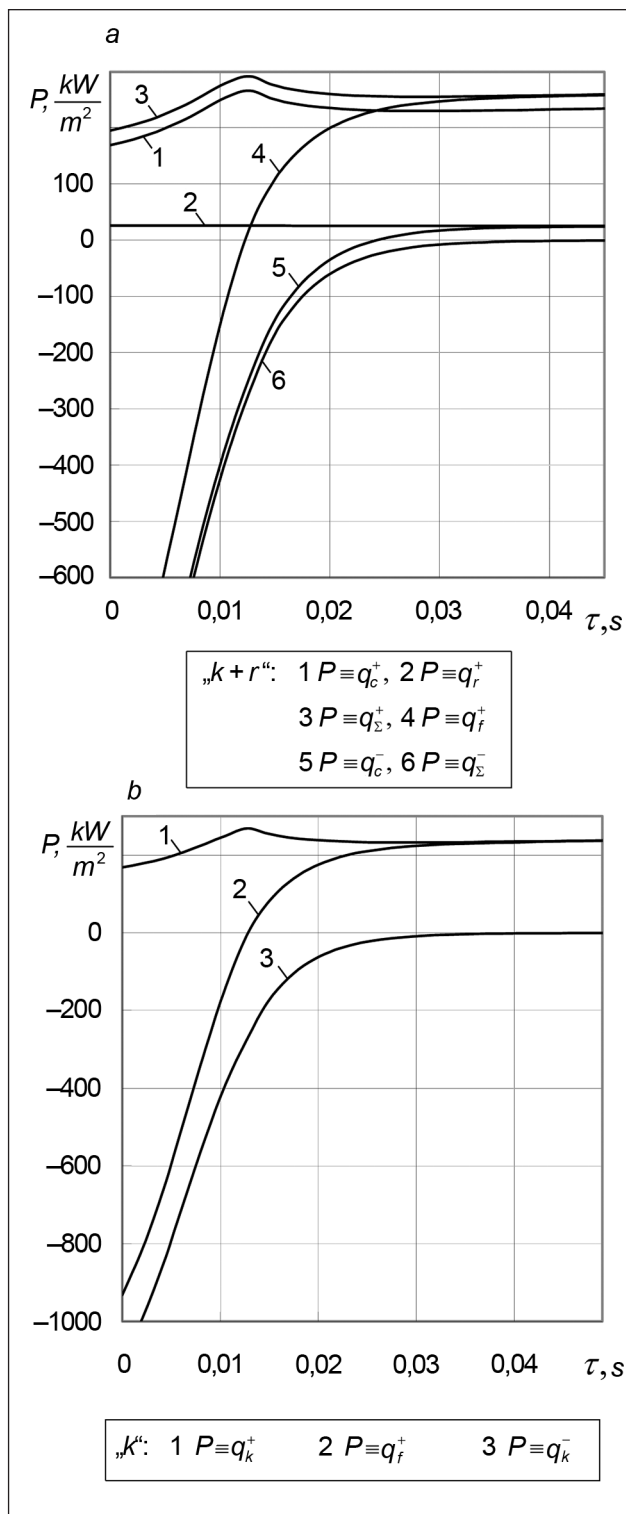
Kondensacinio režimo trukmę atspindi  $\tau_{f=ko} = \tau_{ko}$  laikas. Nestacionariojo garavimo periodo trukmę nusako nestacionariųjų fazinių virsmų trukmės, atitinkančios pusiausviro garavimo nusistovėjimo laiką, ir kondensacinio režimo trukmės skirtumas:  $\tau_{f=gar,nes} = \tau_{f,nes} - \tau_{ko}$ . Pusiausviro garavimo periodo trukmę apibrėžia lašelio fazinių virsmų trukmės, atitinkančios lašelio gyvavimo laiką, ir nestacionariųjų fazinių virsmų trukmės skirtumas:  $\tau_{f=gar,e} = \tau_f - \tau_{f,nes} \equiv \tau_f - \tau_{ko} - \tau_{gar,nes}$ . Svarbiausias vaidmuo pateiktoje lašelio gyvavimo ciklo interpretacijoje tenka skysčio garo srauto lašelio paviršiuje tankiui. Jį galima aprašyti analitiškai:

$$m_g^+ = \frac{D_{gd} \cdot \mu_g}{T_R \cdot R_{\mu} \cdot R} \left[ p_{g,R} - p_{g,\infty} + \mu_g \left( p \cdot \ln \frac{p - p_{g,\infty}}{p - p_{g,R}} - p_{g,R} + p_{g,\infty} \right) \right] \quad (2)$$



1 pav. Lašelio terminių ir fazinių virsmų parametų kitimas nestacionariųjų fazinių virsmų režime.  $T_0 = 278$  K;  $R_0 = 75 \cdot 10^{-6}$  m;  $T_d = 873$  K;  $\bar{p} = 0,5$ ;  $T_{e,k} \equiv 359,04$  K;  $m_{g,0}^+ = -0,345$  kg/(m<sup>2</sup>s)

(2) išraiška sudaryta įvertinus difuzinę ir konvekcinę skysčio garo pernašas lašelio apsuptyje [7, 8]. Kondensacinio fazinių virsmų režimo metu drėgnos dujinės apsuptyies lašeliui tiekiamo vandens garo srautą sąlyginai laikant neigiamu, o garavimo režime nuo lašelio sklindantį garo srautą – teigiamu, (2) išraiška nuosekliai aprašo garo srauto kitimą lašelio gyvavimo (1) cikle. Garo srauto tankio nulinė vertė aiškiai apibrėžia fazinių virsmų režimo lašelio paviršiuje kaitos iš garo kondensacinio režimo į skysčio nestacionariojo garavimo režimą momentą. Tuomet lašelio paviršiaus temperatūra atitinka rasos taško temperatūrą:  $T_R$  ( $\tau \equiv \tau_{ko}$ )  $\equiv T_{rt} = T_{sot}(\bar{p}_{g,so})$ . Kadangi  $m_g^+$  ( $\tau \equiv \tau_{ko}$ ) = 0 (1 pav.), todėl ir  $q_f^+$  ( $\tau \equiv \tau_{ko}$ ) = 0 (2 pav.). Šiuo momentu vandens lašelyje šildymo intensyvumas atitiks apsuptyies šiluminio poveikio intensyvumą  $q_l \equiv q_{\Sigma}^-$  ( $\tau \equiv \tau_{ko}$ )  $\equiv q_{\Sigma}^+$  ( $\tau \equiv \tau_{ko}$ ) sudėtinio šildymo atveju (2 pav. a), o nespinduliuojančios apsuptyies atveju:  $q_l \equiv q_c^-$  ( $\tau \equiv \tau_{ko}$ )  $\equiv q_c^+$  ( $\tau \equiv \tau_{ko}$ ) (2 pav. b). Sudarant 2 pav. grafikus kondensacijos šilumos ir į lašelį sklindančios šilumos srautai laikyti neigiamais ir teigta, jog neslystančiam lašeliui  $q_c^+ \equiv q_k^+$ . Nestacionariojo garavimo periodu lašeliui apsuptyies teikiama šiluma vandenį lašelyje šildo ir kartu garina nuo jo paviršiaus, o pusiausviro garavimo periodu – tik garina. Todėl nestacionariojo garavimo periode fazinių virsmų šilumos srautas nuosekliai auga, o šio periodo pabaigoje prilygsta lašelio apsuptyies šiluminio poveikio intensyvumui ir  $q_{gar,e}^+ \equiv q_{\Sigma}^-$  ( $\tau \equiv \tau_e$ ) ir  $q_{\Sigma}^-$  ( $\tau \equiv \tau_e$ ) = 0. Nespinduliuojančios



2 pav. Lašelio energinių parametų dinamika nestacionariųjų fazinių virsmų režime.  $T_0 = 278$  K;  $R_0 = 75 \cdot 10^{-6}$  m;  $\bar{p} = 0$ ;  $T_d = 873$  K

apsuptyies atveju: ir  $q_{gar,e}^+ \equiv q_c^+$  ( $\tau \equiv \tau_e$ ) ir  $q_c^-$  ( $\tau \equiv \tau_e$ ) = 0. Nestacionariojo garavimo periode lašelis pašyla iki pusiausviro garavimo  $T_e$  temperatūros (1 pav.). Ši temperatūra priklauso nuo lašelio apsuptyies temperatūros bei drėgnumo. Svarbu, jog  $T_e$  temperatūrą keičia lašelio šildymo būdas [9]. Apsuptyies laidumu šildomų lašelių pusiausviro garavimo tempera-

tūra žemiausia  $T_{R,e,n,k} \equiv f_{n,k}(T_d, \bar{p}_{g,\infty})$ . Be to, ši temperatūra pusiausviro garavimo periode nepakinta:  $T_{e,n,k}(\tau \geq \tau_e) \equiv T_{R,e,n,k}$ . Kai vandens lašeliai šyla ir garuoja sausame ore, tuomet laidumu šildomų lašelių pusiausviro garavimo temperatūra yra tik oro temperatūros  $T_{R,e,n,k} \equiv f_{n,k}(T_d)$  funkcija. Sudėtinio šildymo atveju lašeliai pašyla iki aukštesnės temperatūros. Pusskaidriame skystyje veikiant sugeriamo spinduliuotės srautui lašelyje susiformuoja neigiamo gradiento temperatūros laukas. Pusiausviro garavimo režime jo gradientas užtikrina sugerto spinduliuotės srauto dalyvavimą skysčio garinimo procese:  $q_c^- \equiv (\tau \geq \tau_e) \equiv q_r(\tau)$ , todėl  $q_c^-(\tau \geq \tau_e) \equiv 0$  (2 pav. a), jeigu paneigsime galimą auštančio lašelio entalpijos dedamąją jame [2].

Pusiausviro garavimo periodo pradžią lašelio gyvavimo  $0 \div \tau_f$  cikle apibrėžti keblu, ypač lašelių dispersiškumo aspektu. Terminių ir energinių lašelio šilumos ir masės mainų parametrų kompleksinę analizę reikia atlikti plačiame kraštinių sąlygų diapazone. Lašelių gyvavimo ciklą patogiu pateikti Furje kriterijumi išreikštame laike  $0 \div Fo_f$  masteliu [2, 5, 9–12]. Lašelių šildymo laidumu „k“ šilumokaitos atveju Furje laiko masteliu pateiktas lašelių gyvavimo ciklas:

$$\begin{aligned} 0 \div Fo_{f,n,k} &\equiv Fo_{f=ko,n,k} + Fo_{f=gar,n,k} \equiv \\ &\equiv Fo_{f=ko,n,k} + Fo_{f=gar,nes,n,k} + Fo_{f=g,e,n,k} \equiv \\ &\equiv 0 \div Fo_{ko,n,k} \div Fo_{e,n,k} \div Fo_{f,n,k}; \end{aligned} \quad (3)$$

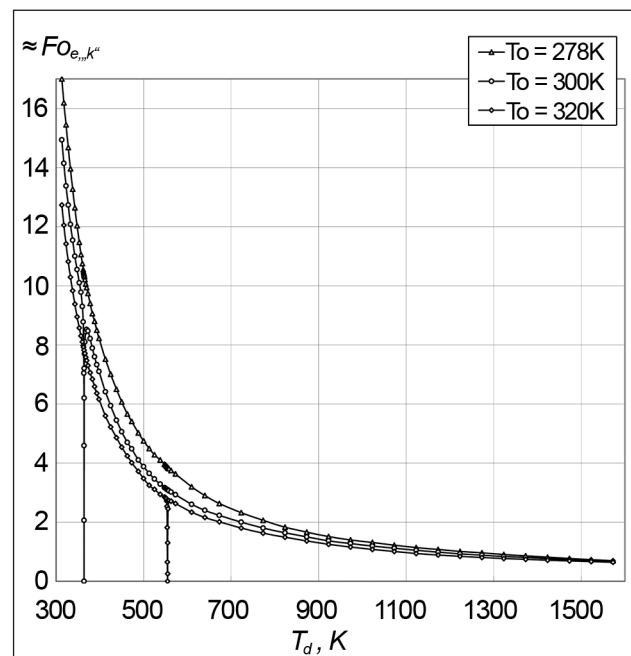
išpurškiamo vandens temperatūra ir dujų parametrais apibrėžtu atveju yra universalus visam lašelių dispersiškumo spektrui [11], kuriam Knudseno sluoksnio įtaką lašelių šilumokaitai ir faziniams virsmams galima paneigti [13]. Sudėtinių pernašos procesų sąveiką patogiu įvertinti palyginamuoju metodu, kai atitinkamai normuoti lašelio šilumos ir masės mainų parametrai pateikiami universalioje  $\bar{Fo} = Fo / Fo_{b,n,k} \equiv 0 \div 1$  trukmėje [2]. Būdingas  $Fo_{b,n,k}$  kriterijus parenkamas pagal tiriamąjį fazinių virsmų režimą. Svarbu disponuoti  $Fo_{b,n,k}$  kriterijų vertėmis. Išpurškiamo vandens temperatūros bei oro drėgnumo ir temperatūros įtaka kondensacinio fazinių virsmų režimo universaliai trukmei apibendrinta  $Fo_{ko,n,k}(T_0, T_d, \bar{p}_{g,\infty})$  diagrama [12]. Nestacionariojo garavimo bei viso fazinių virsmų ciklo universalios trukmės yra tirtos epizodiškai. Nestacionariojo garavimo universalios trukmės  $Fo_{f,n,k}(T_0, T_d, \bar{p}_{g,\infty})$  diagrama vandens lašelių „k“ šilumokaitai nesudaryta. Tai apsunkina sudėtinių pernašos procesų sąveikos įvertinimo palyginamojo metodo [2] inžinerinį taikymą.

### SAUSAME ORE VANDENS LAŠELIŲ NESTACIONARIOJO GARAVIMO PERIODO UNIVERSALIOS TRUKMĖS DIAGRAMA

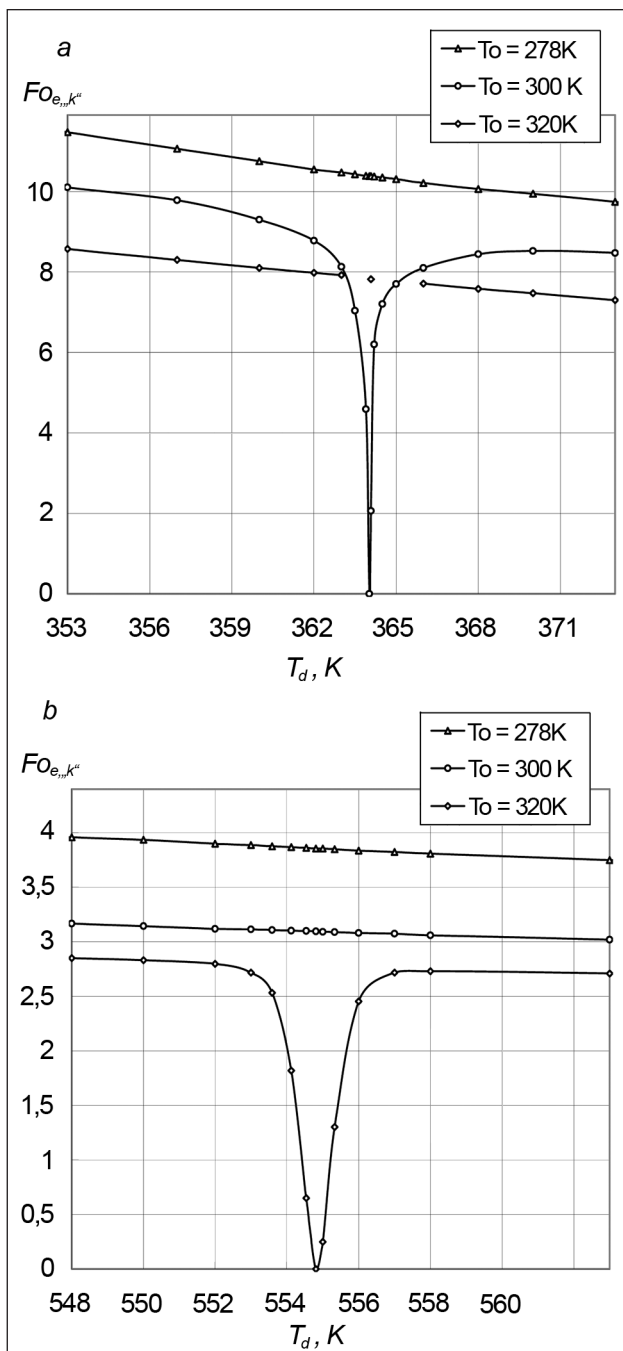
Sausam orui  $\bar{p}_{g,\infty} \equiv 0$  ir  $Fo_{ko} \equiv 0$ , nepriklausomai nuo vandens lašelio šilumokaitos atvejo. Tuomet turime  $0 \div Fo_e \div Fo_f$  lašelio gyvavimo ciklą. Nestacionariojo garavimo

periodo trukmei svarbi išpurškiamo vandens terminė būseną. Ji apibrėžiama išpurškiamo vandens temperatūros santykiu su pusiausviro garuojančio lašelio temperatūra:  $\bar{T}_{o,e} \equiv T_0 / T_e$ . Kai  $\bar{T}_{o,e} < 1$ , išpurškiamas vanduo vadinamas „šaltu“; kai  $\bar{T}_{o,e} > 1$ , išpurškiamas vanduo vadinamas „karštu“ [13]. Abiem atvejais lašelių fazinių virsmų cikle yra nestacionariojo garavimo periodas. Jame lašelio terminė būseną priklauso nuo išpurškiamo vandens temperatūros: „šalto“ vandens lašeliai iki pusiausviro garavimo temperatūros pašyla, o „karšto“ vandens atveju – ataušta. Į šiuos išpurškto vandens lašelių terminės būsenos kitimo savytumus  $Fo_{e,n,k}(T_0, T_d)$  diagramoje būtina atsižvelgti, kadangi  $Fo_{e,n,k}(T_0 \rightarrow T_{e,n,k}) \rightarrow 0$ . Sauso oro temperatūros kitimo intervalas apibrėžiamas minimalia ir maksimalia sauso oro temperatūromis. Šiame darbe parinktas  $T_d \equiv T_{d,\min} \div T_{d,\max} \equiv 300 \div 1600$  K sauso oro temperatūros galimo kitimo intervalas. [2] darbe pateiktų išpurškto vandens šilumokaitos ir masės mainų modelyje daromų prielaidų atveju:  $T_{e,n,k}(T_d \equiv T_{d,\min}) \equiv T_{e,n,k,\min} = 281,35$  K ir  $T_{e,n,k}(T_d \equiv T_{d,\max}) \equiv T_{e,n,k,\max} = 340,32$  K. Todėl pasirinktame sauso oro temperatūrų intervale „šalto“ vandens sąlygas visuomet tenkins  $T_0 < T_{e,n,k,\min}$  atvejis, o „karšto“ –  $T_0 > T_{e,n,k,\max}$  atvejis. Tuomet  $Fo_{e,n,k}(T_d, T_0)$  funkcijos grafiką sudarys nuosekliai kintančios kreivės. Tarpinių vandens temperatūrų  $T_{e,n,k,\min} < T_0 < T_{e,n,k,\max}$  atvejais  $Fo_{e,n,k}(T_d, T_0)$  funkcijos grafike kiekviena  $Fo_{e,n,k,T_0}(T_d)$  kreivė bus ekstremali (3 pav.) su individualiu  $Fo_{e,n,k,T_0} \equiv T_{e,n,k}(T_d) \equiv 0$  minimo tašku (4 pav.), priklausančiu nuo išpurškiamo vandens temperatūros (4 pav. a) ir (4 pav. b).

$Fo_{e,n,k}(T_d, T_0)$  diagramai sudaryti parinktame sauso oro temperatūros kitimo  $T_{d,\min} \div T_{d,\max}$  intervale numatytos

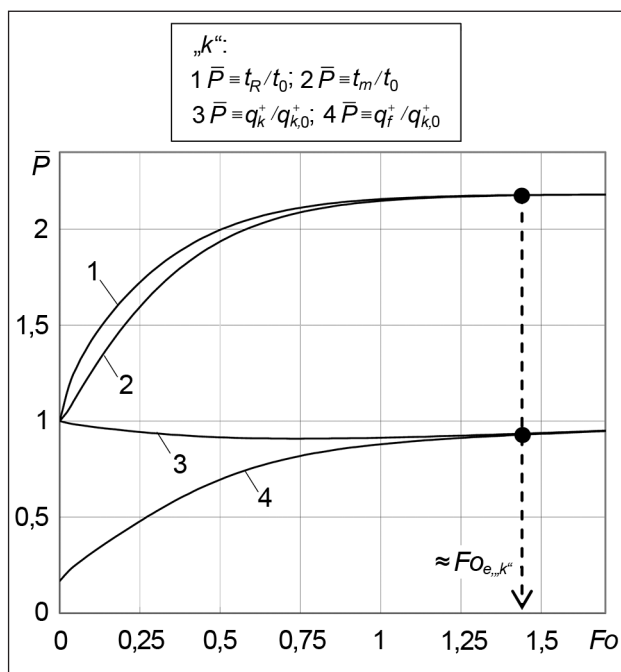


3 pav. Vandens lašelių nestacionariojo garavimo sausame ore periodo universalios trukmės diagrama



4 pav. Vandens lašelių nestacionariojo garavimo sausame ore periodo universalios trukmės ypatumai „šalto“ ir „karšto“ vandens atvejų sandūroje, kai  $T_0 = 300$  K (a) ir  $T_0 = 320$  K (b)

tarpinės  $T_{d,\min} \leq T_d \leq T_{d,\max}$  temperatūros.  $Fo_{e,k}$  vertei kiekvienai pasirinktai  $T_d$  ir  $T_0$  temperatūrų kombinacijai apibrėžti sumodeliuotas laisvai parinkto dispersiškumo lašelio „k“ šilumokaitos atvejo nestacionarusis garavimo periodas. Skaitiniam eksperimentui pasirinktas  $2R_0 \equiv 2 \cdot 10^{-4}$  m skersmens vandens lašelis. Kiekvienu  $T_d$  ir  $T_0$  atveju parinktas individualus Furje kriterijumi išreikšto laiko kitimo žingsnis  $\Delta Fo$ , užtikrinantis artimą 81-am tarpinių  $Fo_i$  pjūvių nestacionariojo garavimo  $0 \div Fo_{e,k}$  periode. Skaitinio eksperimento metu nestacionariojo garavimo periodo pa-



5 pav. Vandens lašelių nestacionariojo garavimo  $\approx Fo_{e,k}$  trukmės grafinė interpretacija.  $T_0 = 300$  K;  $T_d = 873$  K;  $\bar{p} \equiv 0$ ;  $T_{e,k} \equiv 331,64$  K;  $q_{k,0}^+ = 222,42$  kW/m<sup>2</sup>

baigos indikatoriumi buvo 0,01 K nesiekiantis lašelio masės vidutinės temperatūros pokytis paskutiniuose penkiuose universalios laiko kitimo žingsniuose:  $\Delta T_m \equiv |T_{m,i=81} - T_{m,i=77}| \leq 0,01$  K. Orientacinė nestacionariojo garavimo režimo  $\approx Fo_{e,k}$  trukmė parinkta pagal lašelio terminių  $\bar{T}_R(Fo)$  bei  $\bar{T}_m(Fo)$  ir energinių  $\bar{q}_k^+(Fo)$  bei  $\bar{q}_k^-(Fo)$  parametrų funkcijų grafikus (5 pav.), sudarytus  $T_d$  ir  $T_0$  temperatūromis apibrėžtais atvejais, kai atitinkamai  $T_0 = 278$  K,  $T_0 = 300$  K ir  $T_0 = 320$  K. Pagal parinktus  $\approx Fo_{e,k}$  sudaryta atitinkamos  $T_0$  temperatūros išpurkšto vandens lašelių nestacionariojo garavimo periodo  $300 < T_d \leq 1600$  K temperatūros sausame ore universalios trukmės diagrama (3 pav.). Kadangi nestacionariojo garavimo periodo pabaigoje lašelių garavimo sąlygos yra artimos pusiausviros garavimo sąlygoms, todėl ši diagrama įgalina lašelių gyvavimo sausame ore  $0 \div Fo_{f,k}$  ciklą traktuoti kaip  $0 \div \approx Fo_{e,k} \div Fo_{f,k}$  ciklą, ir sudaro prielaidas vienareikšmiškai apibrėžti nestacionariojo garavimo periodą inžineriniais išpurkšto vandens garavimo sausame ore skaičiavimais.

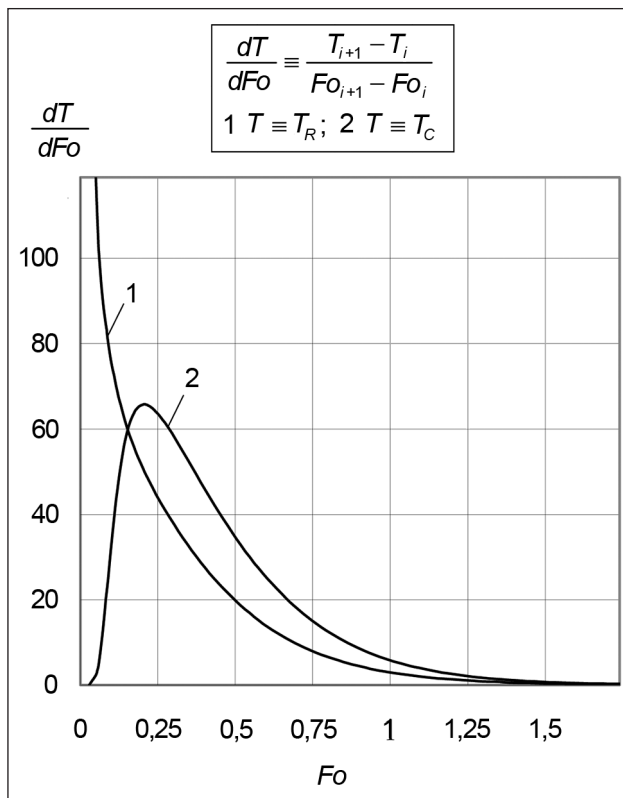
Sausame  $300 < T_d \leq 1600$  temperatūros ore „šalto“ vandens lašelių  $Fo_{e,k}(T_d)$  grafikui nestacionariojo garavimo periodo universalios trukmės diagramoje (3 pav.) atstovauja 1 kreivė, atspindinti nuoseklų  $Fo_{e,k}(T_d)$  kitimą  $T_0 = 278$  K vandens išpurškimo atveju. Išpurškiant tarpinės  $T_{e,k,\min} < T_0 < T_{e,k,\max}$  temperatūros vandenį, kaip jau minėta,  $Fo_{e,k}(T_d)$  funkcijų grafikus kreivės yra ekstremalios su ryškiai išreikštu minimumo tašku (4 pav.).  $Fo_{e,k}(T_{e,k,\min} < T_0 < T_{e,k,\max}, T_d)$  grafikuose apibrėžtai išpurškiamo vandens  $T_0$  temperatūrai  $Fo_{e,k} = 0$  taškas atitinka sauso oro temperatūrą, kuriai  $T_{e,k}(T_d) \equiv T_0$ . Skaitiniu eksperimentu

nustatyta:  $T_{e,n,k} \equiv 320$  K, kai  $T_{d1} = 364,02$  K, ir  $T_{e,n,k} \equiv 320$  K, kai  $T_{d2} = 554,81$  K. Todėl  $T_0 \equiv 300$  K temperatūros vandens lašeliai žemesnės už  $T_{d1}$  temperatūrą ore garuos pagal „karšto“ vandens atvejį, o aukštesnės už  $T_{d1}$  temperatūrą – „šalto“ vandens atvejį, todėl  $Fo_{e,n,k}(T_0 \equiv 320 \text{ K}, T_d \rightarrow T_{d2}) \rightarrow 0$  (4 pav. a).  $T_0 \equiv 320$  K pradinės temperatūros lašeliams „šalto“ ir „karšto“ vandens atvejų skiriamoji riba atitiks  $T_{d,2}$  oro temperatūrą, todėl  $Fo_{e,n,k}(T_0 \equiv 320 \text{ K}, T_d \rightarrow T_{d2}) \rightarrow 0$  (4 pav. a).

Būtina pabrėžti, jog (3 pav.) diagrama yra kritikuotina moksliniu požiūriu, kadangi ji sudaryta  $\approx Fo_{e,n,k}$  vertes parenkant grafiniu metodu, todėl neturi vieningo konkretaus atraminio taško sisteminėje  $Fo_{e,n,k}$  atrankoje. Gilesnė vandens lašelių nestacionariojo garavimo sausame ore modeliavimo rezultatų analizė leido išvystyti vieningu moksliniu vertinimu pagrįstą  $\approx Fo_{e,n,k}$  atrankos metodą. Juo remiantis  $\approx Fo_{e,n,k}$  vertė patikslinama į  $Fo_{e,n,k}$  pagal vieningą sistemą. Patikslinimo esmė yra susijusi su lašelio terminių parametų  $\bar{P}_{T,n,k}(\bar{Fo})$  funkcijų

$$\bar{P}_{T,n,k}(\bar{Fo}) \equiv \frac{P_{T,n,k}(\bar{Fo}) - P_{T,0}}{P_{T,e,n,k} - P_{T,0}} \quad (4)$$

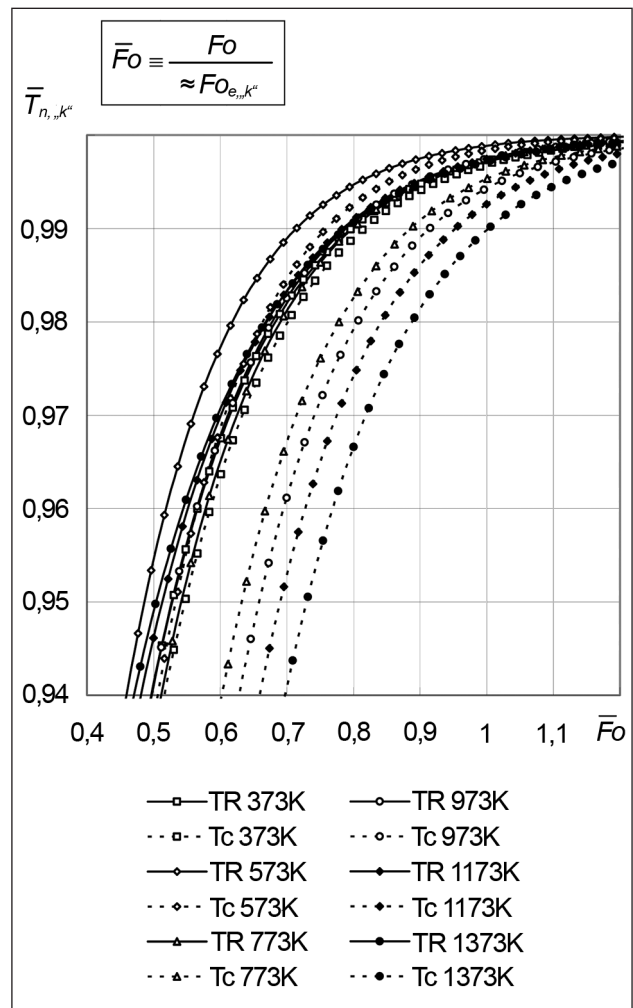
analize. (4) išraiškos forma pateiktos  $\bar{P}_{T,n,k}(\bar{Fo})$  funkcijos užtikrina laidumu šildomo lašelio nestacionariojo temperatūros  $\bar{T}_{n,k}(\eta, \bar{Fo})$  lauko universalų  $0 \div 1$  kitimą Furje kriterijų  $\bar{Fo} \equiv Fo / Fo_{e,n,k}$  santykiu išreikštoje nestacionariojo



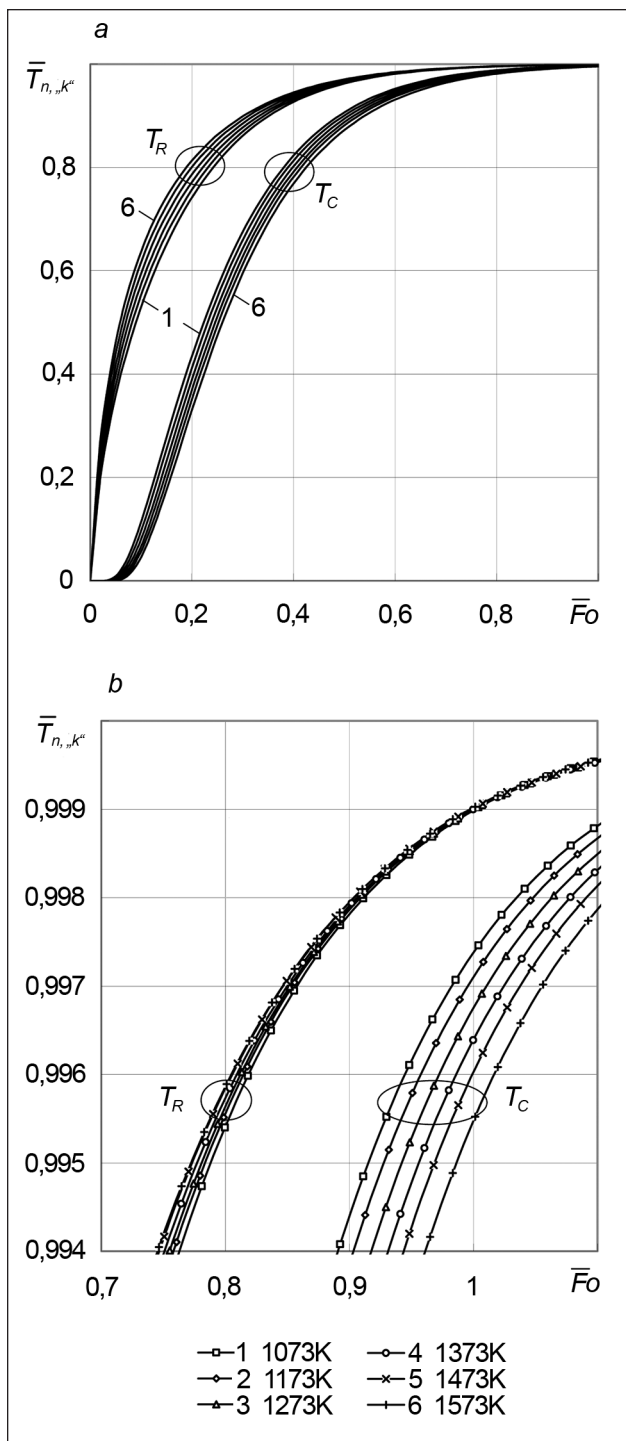
6 pav. „Šalto“ vandens lašelio paviršinių ir centrinių sluoksnių šilimo tempo dinamika nestacionariojo garavimo periode.  $T_0 = 300$  K;  $T_d = 873$  K

garavimo periodo universalioje  $0 \div 1$  trukmėje [2]. Nestacionariojo garavimo režime lašelio atskiri sluoksniai šyla skirtingu greičiu. Labai skiriasi „šalto skysčio“ lašelių paviršinių ir centrinių sluoksnių šilimo tempas (6 pav.). Pradžioje sparčiau šyla „šalto“ lašelio paviršiniai sluoksniai, tačiau jų šilimo tempas nuosekliai slopsta. Centrinųjų sluoksnių šilimo tempas pradinėje nestacionariojo garavimo stadijoje auga, o, pasiekęs piką, ima slopti ir tampa nuliniu pusiausviro garavimo atveju. Skirtingas lašelio paviršinių ir centrinių sluoksnių temperatūros kitimo tempas lemia neizotermiškumo lašelyje dinamiką nestacionariojo garavimo periode. Neizotermiškumo kitimą atspindi lašelio paviršiaus  $\bar{T}_{R,n,k}(\bar{Fo})$  ir centro  $\bar{T}_{C,n,k}(\bar{Fo})$  temperatūrų grafikai.

Atlikta  $T_0 \equiv 300$  K temperatūros vandens lašelių terminės būsenos kitimo nestacionariojo garavimo periode modeliavimo rezultatų analizė parodė, jog visų  $\bar{P}_{T,n,k}(\bar{Fo})$  funkcijų grafikuose kreivių dinamika labai jautri nestacionariojo garavimo periodo trukmę apibrėžiančiam parinktai  $\approx Fo_{e,n,k} \equiv (T_d)$  funkcijai (7 pav.). Atsižvelgus į šylančio

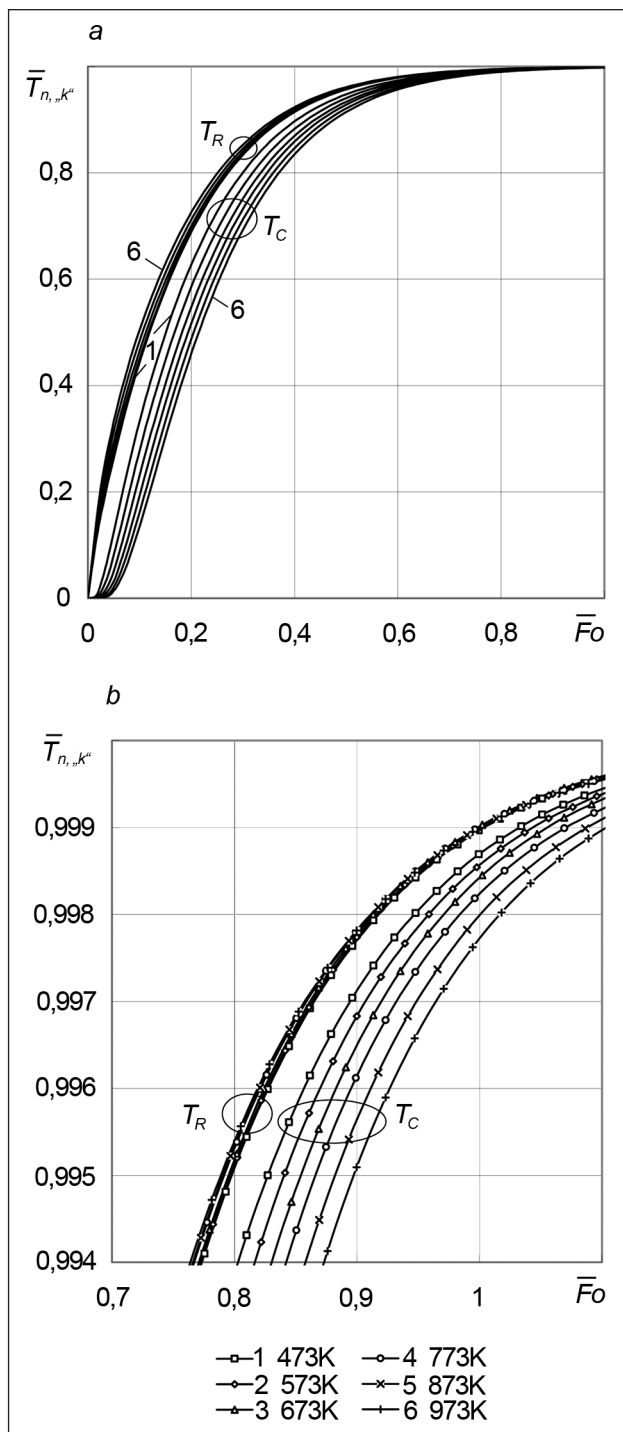


7 pav. Grafiniu metodu parinktos  $\approx Fo_{e,n,k}(T_d)$  funkcijos įtaka terminių parametų  $\bar{P}_{T,n,k}(\bar{Fo})$  grafikams.  $T_d$  K: (1) 373, (2) 573, (3) 773, (4) 973, (5) 1173, (6) 1373



8 pav. Aukštos temperatūros ore šylančių vandens lašelių  $\bar{T}_{R,n,k}(\bar{F}_0)$  ir  $\bar{T}_{C,n,k}(\bar{F}_0)$  patikslinti grafikai.  $T_d$ , K: (1) 1 073, (2) 1 173, (3) 1 273, (4) 1 373, (5) 1 473, (6) 1 573

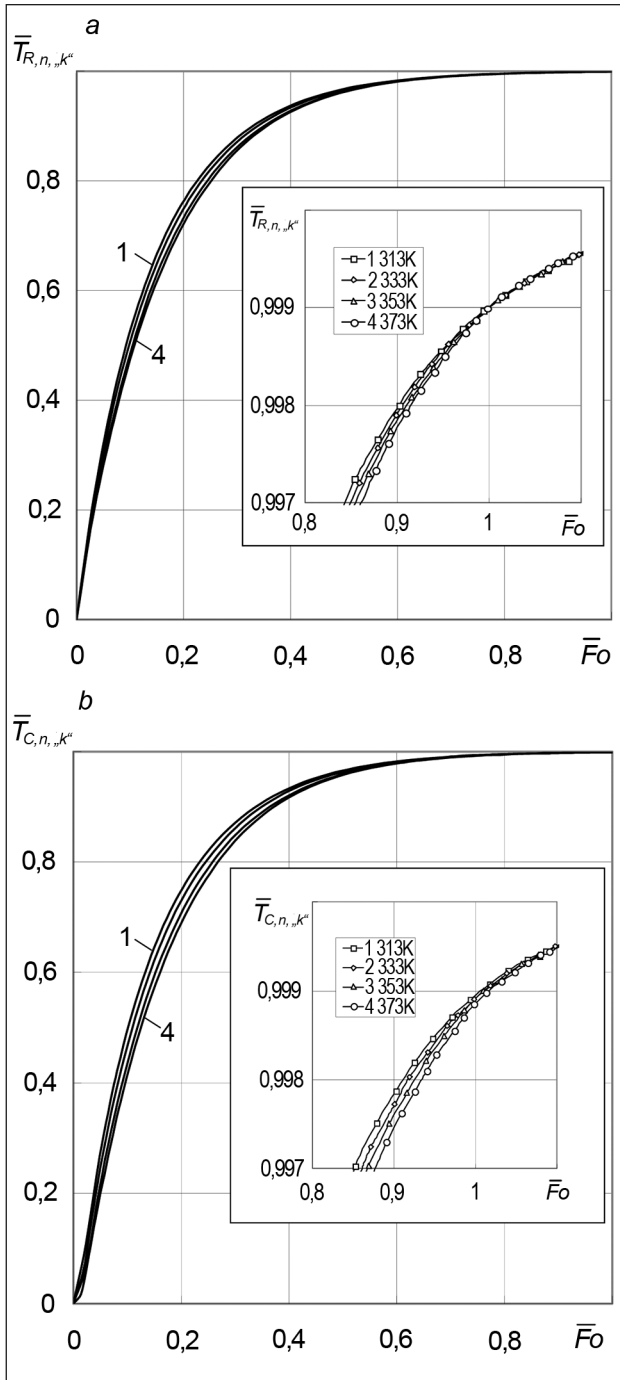
lašelio paviršiaus temperatūros svarbą paviršiuje vykstantiems faziniams virsmams, apsprendžiančiuoju parametru patikslinant  $\approx Fo_{e,n,k}(T_d)$  funkciją numatomas  $\bar{T}_{R,n,k}(\bar{F}_0)$  funkcijos grafikas. Nestacionariojo garavimo periodo universalios trukmės  $Fo_{e,n,k}(T_d)$  funkcija konkrečiai vandens  $T_0$  temperatūrai determinuojama pagal grafiškai atrinktą  $\bar{T}_{R,n,k}(\bar{F}_0, T_d)$  funkciją, kurios grafikui (8–10 pav. a) kelia-



9 pav. Vidutinės temperatūros ore šylančių vandens lašelių  $\bar{T}_{R,n,k}(\bar{F}_0)$  ir  $\bar{T}_{C,n,k}(\bar{F}_0)$  patikslinti grafikai.  $T_d$ , K: (1) 473, (2) 573, (3) 673, (4) 773, (5) 873, (6) 973

mas reikalavimas  $\bar{T}_{R,n,k}(\bar{F}_0 \equiv 1, T_d) \approx 0,999$  (8–10 pav. b). Tuomet kitų terminų parametru  $\bar{P}_{T,n,k}(\bar{F}_0, T_d, T_0)$  funkcijos, išskyrus apsprendžiančiąją  $\bar{T}_{R,n,k}(\bar{F}_0, T_d, T_0)$  funkciją, tampa apsprendžiamosiomis. Daugiausia nuo lašelio paviršiaus  $T_{R,n,k}(\bar{F}_0, T_d, T_0)$  grafiko atsilenkia lašelio centro  $\bar{T}_{C,n,k}(\bar{F}_0, T_d, T_0)$  grafikas, tačiau jis visuomet tenkina  $\bar{T}_{C,n,k}(\bar{F}_0 \equiv 1, T_d) > 0,995$  sąlygą (8–10 pav. b), kai



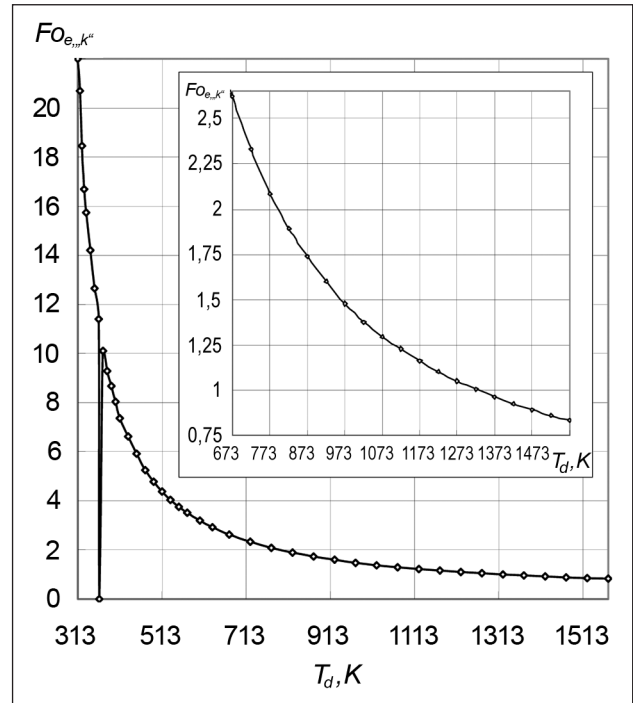


10 pav. Žemos temperatūros ore šylančių vandens lašelių  $\bar{T}_{R,n,k}(\bar{Fo})$  (a) ir  $\bar{T}_{C,n,k}(\bar{Fo})$  (b) patikslinti grafikai.  $T_d, K$ : (1) 313, (2) 333, (3) 353, (4) 373

$\bar{T}_{R,n,k}(\bar{Fo} \equiv 1, T_d) = 0,999$ . Pastarąjį reikalavimą 300 K temperatūros išpurškiamam vandeniui užtikrina 11 pav. pateiktas  $Fo_{e,n,k}(T_d)$  grafikas.

**IŠVADOS**

Kiekvienu vandens ir sauso oro temperatūromis apibrėžtu atveju nestacionariojo garavimo periodo universalią Furje kriterijumi išreikštą  $\approx Fo_{e,n,k}$  trukmę inžineriniame išpurkš-



11 pav.  $\bar{T}_{R,n,k}(\bar{Fo} \equiv 1, T_d) = 0,999$  sąlygą tenkinantis  $Fo_{e,n,k}(T_d, T_0=300K)$  grafikas

to vandens lašelių fazinių virsmų ciklo vertinime galima apibrėžti pagal lašelio terminių ir energinių parametų sutapdintus  $\bar{P}_{T,n,k}(\bar{Fo})$  ir  $\bar{P}_{q,n,k}(\bar{Fo})$  grafikus:  $\approx Fo_{e,n,k} \equiv Fo$ , kai  $T_m(Fo) / T_{e,n,k} \approx 1$  ir  $q_f^+(Fo) / q_k^+(Fo) \approx 1$ .

Grafiniai  $\approx Fo_{e,n,k}$  atrankai pakanka sumodeliuoti laisvai pasirinkto dispersiškumo lašelio šilimą ir garavimą išpurškiamo vandens ir sauso oro temperatūromis apibrėžtais atvejais.

Sausame ore išpurkšto vandens lašelių nestacionariojo garavimo periodo universalios trukmės  $\approx Fo_{e,n,k}(T_d, T_0)$  funkcijos grafiką galima sisteminiu metodu patikslinti pagal lašelio terminiams parametrms taikomą  $\bar{P}_{T,n,k}(\bar{Fo} \equiv 1, T_d) > 0,995$  sąlygą.  $T_0 \equiv 300$  K temperatūros išpurškiamo vandens atveju pagrįsta, jog pastaroji sąlyga tenkinama apsprendžiančiuoju terminiu parametru laikant lašelio paviršiaus temperatūros  $\bar{T}_{R,n,k}(\bar{Fo}, T_d)$  funkciją ir jai taikant  $\bar{T}_{R,n,k}(\bar{Fo} \equiv 1, T_d) = 0,999$  reikalavimą.

Pagal nestacionariojo garavimo periodo universalią trukmę sauso oro srautą galima klasifikuoti į žemos ( $Fo_{e,n,k} > 10$ ), aukštos ( $Fo_{e,n,k} < 2$ ) ir vidutinės  $2 \leq Fo_{e,n,k} \leq 10$  temperatūros atvejus. Žemos temperatūros ore šylančių ir garuojančių vandens lašelių neizotermiškumas nedidelis, vidutinės temperatūros ore gana ryškus, o aukštos temperatūros ore – labai ryškus.

**Žymėjimai**

- a – temperatūros laidumo koeficientas m<sup>2</sup>/s;
- $B_M$  – Spoldingo masės pernešimo parametras;

$B_T$  – Spoldingo šilumos pernešimo parametras;  
 $C_F$  – trinties pasipriešinimo koeficientas;  
 $C_D$  – pilno pasipriešinimo koeficientas;  
 $D$  – difuzijos koeficientas  $m^2/s$ ;  
 $Fo$  – Furje kriterijus,  $\equiv a_{l,0} \tau / R_0^2$ ;  
 $G$  – srautas  $kg/s$ ;  
 $g$  – masės pernašos koeficientas  $m/s$ ;  
 $\bar{g}$  – santykinis srautas;  
 $l$  – būdingas matmuo  $m$ ;  
 $m$  – garo srauto tankis  $kg/(m^2 s)$ ;  
 $N$  – lašelių koncentracija dujose  $m^{-3}$ ;  
 $p$  – slėgis  $Pa$ ;  
 $\bar{p}$  – santykinis slėgis;  
 $Pe_l$  – Peklė kriterijus skysčiui,  $\equiv w_l l / a_p$ ;  
 $q$  – šilumos srauto tankis  $W/m^2$ ;  
 $r$  – radialinė koordinatė  $m$ ;  
 $R$  – lašelio spindulys  $m$ ;  
 $Ra$  – Ralejaus kriterijus,  $\equiv \beta g l^3 \Delta T / (\alpha \nu)$ ;  
 $R_\mu$  – dujų pastovioji  $J/(kmol K)$ ;  
 $t$  – temperatūra  $^\circ C$ ;  
 $T$  – temperatūra  $K$ ;  
 $Sh$  – Šervudo kriterijus,  $\equiv g l / D_{gd}$ ;  
 $\eta$  – bematė radialinė koordinatė,  $\equiv r/R$ ;  
 $\mu$  – molekulinė masė  $kg/kmol$ ;  
 $\nu$  – kinematinės klampos koeficientas  $m^2/s$ ;  
 $\tau$  – laikas  $s$ ;  
 $\tau_e$  – pusiausviro garavimo nusistovėjimo laikas  $s$ ;  
 $\tau_f$  – fazinių virsmų trukmė  $s$ ;  
 $\tau_{ko}$  – kondensacinio fazinių virsmų režimo trukmė  $s$ ;  
 $\tau_{gar}$  – garavimo fazinių virsmų režimo trukmė  $s$ ;  
 $\tau_{gar,e}$  – pusiausviro garavimo trukmė  
 $\tau_{gar,nes}$  – nestacionariojo garavimo trukmė  
 $w$  – greitis  $m/s$ ;  
 $w_l$  – skysčio tekėjimo lašelio paviršiuje maksimalus greitis  $m/s$ .

#### Indeksai apačioje

$c$  – konvekcija;  
 $C$  – lašelio centras;  
 $d$  – dujos;  
 $e$  – pusiausviro garavimas;  
 $f$  – faziniai virsmai;  
 $g$  – garas;  
 $gar$  – garavimas;  
 $gd$  – garo ir dujų mišinys;  
 $k$  – laidumas;  
 $ko$  – kondensacija;  
 $l$  – skystis;  
 $m$  – masės vidutinis;  
 $n$  – lašelio dispersiškumo indeksas;  
 $nes$  – nestacionarus garavimas;  
 $R$  – lašelio paviršius;  
 $r$  – spinduliavimas;

$sot$  – sočioji būsena;  
 $rt$  – rasos taškas;  
 $\Sigma$  – suminis;  
 $0$  – pradinė būsena;  
 $\infty$  – toli nuo lašelio.

#### Indeksai viršuje

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

#### Santrumpos

$„k“$  – šildymas laidumu;  
 $„k+r“$  – šildymas laidumu ir spinduliavimu;  
 $P$  – lašelio šilumos ir masės mainų parametras;  
 $P_d$  – dujų srauto parametras;  
 $P_f$  – lašelio fazinių virsmų parametras;  
 $P_F$  – lašelio dinaminis parametras;  
 $P_T$  – lašelio terminės būsenos parametras;  
 $P_q$  – lašelio energinės būsenos parametras;  
 $\bar{P}$  – pradinės lašelio būsenos parametro atžvilgiu normuotas parametras;  
 $\bar{P}_n$  – pradinės ir pusiausviro garavimo lašelio būsenos parametru atžvilgiu normuotas parametras.

Gauta 2013 02 28

Priimta 2013 04 25

#### Literatūra

- Sazhin S. S. Advanced models of fuel droplet heating and evaporation. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2006. Vol. 32. P. 162–214.
- Miliauskas G., Norvaišienė K. Garuojančių lašelių sudėtinės pernašos nestacionariųjų procesų sąveikos sisteminis įvertinimas. *Energetika*. 2013. T. 59. Nr. 1. P. 26–41.
- 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.
- Gershuni G. Z., Zhukovickiy E. E. *Convective Resistance of Incompressible Liquid*. Moskva: Nauka, 1972.
- Miliauskas G. Interaction of the transfer processes in semitransparent liquid droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2003. Vol. 46. P. 4119–41138.
- Renksizbulut M., Yuen M. C. Numerical study of droplet evaporation in a high temperature stream. *Journal of Heat Transfer*. 1983. Vol. 105. P. 388–394.
- Kuzikovskij A. V. Dynamic of spherical particle in powerful optical field. *Izvestiya VUZ. Fizika*. 1970. No. 5. P. 89–94.
- Shorin S. N. *Teploperedacha*. Moskva: Vishaya Shkola, 1664.

9. 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.
10. 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.
11. 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.
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. 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.

Gintautas Miliauskas, Kristina Norvaišienė

#### THE LIFETIME CYCLE OF SPRAYED WATER AND THE UNIVERSAL DURATION DIAGRAM OF UNSTEADY DROPLET EVAPORATION IN DRY AIR

##### Summary

The lifetime cycle of sprayed water is defined by the period between the time moments of droplet formation and disappearance. The condensing, unsteady and equilibrium evaporation modes were selected according to the phase transformations on droplet surfaces in their life cycle. Each mode of the cycle has its specific interaction of heat and mass transfer processes; distinctive energetic interpretation of phase transformations, occurring in droplets and their surfaces, is possible. The influence of energetic impact of the droplet surroundings is very pronounced in these aspects. This influence is determined by the peculiarities of droplet heating process. Therefore, the parameters of sprayed water and droplets surroundings, as well as the peculiarities of heat transfer between liquid and gas phases decide the duration of the droplet life cycle. In the simplest heat transfer case, as heat from surroundings is being supplied to the droplets by conduction, the lifetime cycle of sprayed water is possible in the Fourier number based scale, independently of the droplet dispersity. The characteristic Fourier criteria reflect the moments, as the modes of phase transformations are changed during the cycle. These criteria depend on the temperature of sprayed water and parameters of droplet surrounding. Comprehensive numerical investigations of the evaporation process of conductively heated

water droplets were performed to define the characteristic Fourier criteria. According to their results, the Fourier criteria, reflecting the condensing mode and droplet lifetime duration, can be easily identified: the end of the condensation mode shows the moment when the droplet surface temperature increases till the dew point. As a droplet warms above the dew point temperature, the water starts to evaporate. And the lifetime cycle of the droplet comes to the end from the moment of condensed phase evaporation. During the equilibrium evaporation mode the whole heat from surroundings evaporates water. The beginning of the equilibrium evaporation mode is defined by performing a complex analysis of the thermal and energetic state of evaporating droplets. According to its results, the universal duration diagram of unsteady evaporation of water droplets in dry air is constructed.

**Key words:** water droplets, life cycle, unsteady evaporation, dry air, universal diagram

Гинтаутас Миляускас, Кристина Норвайшене

#### ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ РАСПЫЛЕННОЙ ВОДЫ И ДИАГРАММА УНИВЕРСАЛЬНОЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РЕЖИМА НЕСТАЦИОНАРНОГО ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ

##### Резюме

Жизненный цикл распыленной воды определен временем существования капель от момента распыла воды до момента их испарения. Исходя из особенностей на поверхности капель происходящих процессов фазового перехода в жизненном цикле капель выделен режим конденсации пара, а также выделены режимы не стационарного и равновесного испарения. В каждом из них происходит характерное взаимодействие процессов сложного тепло и массопереноса и возможна индивидуальная энергетическая интерпретация процессов теплообмена в каплях и на их поверхности происходящих процессов фазового перехода. В этом плане выделяется влияние энергетического воздействия окружения капель, которое обуславливает особенности процесса нагрева капли. Поэтому продолжительность жизненного цикла капель обуславливают параметры распыляемой воды и окружения капель, а также влияние оказывают особенности процессов теплопереноса между жидкой и газовой фазах. В случае простейшего теплопереноса, когда окружение капли нагревает теплопроводностью, в критерием Фурье выраженном масштабе времени возможен не зависящий от дисперсности распыла воды жизненный цикл капель. Моменты изменения режимов фазового перехода в нем указывают характерные Фурье критерии. Они зависят от температуры распыляемой воды и параметров окружения капель.

Для определения характерных Фурье критериев проведено широкое численное исследование процесса испарения капель воды при конвективном нагреве. По его результатам легко определить продолжительность конденсационного режима и продолжительность жизненного цикла капель: на конец конденсационного режима указывает подогрев поверхности капли до температуры росы, а жизненный цикл капли заканчивается в момент ее испарения. В режиме равновесного испарения к капле подводимая теплота используется в процессе испарения. Начало этого режима определено при комплексном анализе термического и энергетического состояния испаряющихся капель. По результатам этого анализа составлена диаграмма универсального времени нестационарного испарения капель воды в сухом воздухе.

**Ключевые слова:** капли воды, жизненный цикл, нестационарное испарение, сухой воздух, универсальная диаграмма