

Spinduliavimo įtaka vandens lašelių energinei būsenai ir garavimui

Gintautas Miliauskas,

Kristina Norvaišienė

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

Sumodeliuotas vandens lašelių garavimas sudėtinio jų šildymo atveju, kai išorinio spinduliavimo šaltinio temperatūra atitinka lašelių apsupties temperatūrą. Tyrimo rezultatai pateikti universalus laiko, išreikšto Furjė kriterijumi, masteliu. Spinduliavimo poveikis lašelių energinei būsenai ir garavimui įvertintas palyginamuoju metodu pagal energijos srautų ir garavimo parametrų kitimą aprašančių kreivių nukrypimą nuo etaloninių. Pastarosiomis laikytos laidumu šildymų lašelių energijos srautų ir garavimo parametrų kitimo kreivės, Furjė kriterijumi išreikštame laike nepriklausančios nuo lašelių dispersiškumo. Išryškintas spinduliavimo poveikis garuojančių lašelių pernašos procesų sąveikoje. Spinduliavimo įtaka ryškesnė stambesniems lašeliams ir stiprėja augant apsupties temperatūrai.

Raktažodžiai: vandens lašelių garavimas, sudėtinis šildymas, pernašos procesų sąveika

ĮVADAS

Išpurkšti skysčiai plačiai pritaikomi terminėse technologijose [1]. Dvifazis vandens lašelių ir dujų srautas yra efektyvi priemonė paviršių apsaugai nuo aukštos temperatūros poveikio, lašelių šilumos ir masės mainų procesų intensyvumas lemia oro kondicionavimo, dujų aušinimo, ugnies fronto slopinimo, tirpalų garinimo, fakelo temperatūros reguliavimo ir kitų termoinžinerijai svarbių procesų efektyvumą. Nors skysčio išpurškimo besiremančios terminės technologijos yra savitos, tačiau šilumos ir masės pernašos procesų jose modeliavimo prasme jas vienijanti grandis yra pusskaidrio skysčio lašeliai. Jų šilumos ir masės mainų tyrimai vadinami bendru „lašo uždavinio“ vardu ir tęsiasi ilgiau nei šimtmetį [2], tačiau ir toliau išlieka aktualūs dėl poreikio tobulinti esamas bei kurti naujas skysčio išpurškimo grindžiamas technologijas. Ankstyvieji „lašo“ tyrimai apžvelgti [2, 3], vėlesnieji aptarti [4]. Išryškinta lašelių šilumos ir masės mainų vyksmo sąlygų įvairovė ir juos sąlygojančių parametrų gausa. Dėl „lašo uždavinio“ įvairiapusio praktinio taikymo prasme ir pernašos procesų vyksmo sąlygų įvairovės bei specifikos yra taikomi skirtingi eksperimentiniai ir teoriniai jo sprendimo metodai, kurie gana išsamiai ir sistemingai išanalizuoti [5]. Pastarųjų metų „lašo“ tyrimuose ryškus siekis kuo išsamiau atsižvelgti į sudėtinės pernašos nestacionariųjų procesų sąveikos,

vykstančios dėl nuo garuojančio lašelio sklindančio Stefano hidrodinaminio srauto ir pusskaidriame skystyje sugeriamo spinduliuotės srauto poveikio, įtaką jų intensyvumui [1, 6, 7]. Atsižvelgti į Stefano hidrodinaminio srauto poveikį lašelio šilumai ir garavimui leidžia [8–10] darbų rekomendacijos, o spektrinės spinduliuotės įtaką energinei lašelių būsenai įvertinti galima pagal [1, 11, 12] „lašo“ modelius. Teorinių tyrimų rezultatų patikimumui svarbi eksperimentinė kontrolė. Lašelių garavimo spinduliuojančioje apsuptyje eksperimentiniai tyrimai yra sudėtingi ir gana reti. Išskirtiniais galima laikyti V. Ivanovo ir E. Smirnovos atliktus vandens lašelių pusiausviro garavimo greičio eksperimentinius matavimus [13], kai lašelį šildo apsupties oras ir pastarąjį gaubianti spinduliuojanti sienelė. Pro sienelėje įrengtus langus sistemos centre ant kapiliarinio vamzdelio galo kabantis lašelis buvo apšviečiamas ir iki 50 kartų padidinta jo projekcija stebima ekrane. Lašelio temperatūra išmatuota pro kapiliarą įvesta termopora. Kapiliarinė sistema į garuojantį lašelį tiekta vanduo, kurio debitas išmatuotas specialiai tam sukonstruotu įrenginiu. Specialiu termostatu tiekiamo vandens temperatūra reguliuota pagal išmatuotą garuojančio lašelio temperatūrą. Oro parametrų pastovumo užtikrinimui ir laisvosios konvekcijos įtakos sumažinimui taikytas lėtas vandens garų išsiurbimas iš garavimo kameros. Keičiant vandens debitą stengtasi kompensuoti išgaruojantį skystį ir išlaikyti numatytą lašelio

stambumą, kol buvo pasiekiamos lašelio pusiausviro garavimo sąlygos. Apie jas spręsta pagal nusistovėjusių garuojančio lašelio temperatūrą ir nekintantį tiekiamo vandens debitą. Pastarasis prilygintas lašelio pusiausviro garavimo greičiui. Ištirtas $0,9\text{--}2,9 \cdot 10^{-3}$ m skersmens stambių vandens lašelių garavimas apsupties temperatūrai kintant nuo 400 iki 800 °C. Eksperimento autorių vertinimu pusiausviro garavimo greičių matavimo rezultatų neapibrėžtis buvo ne didesnė kaip 5 % [13].

Šildymo sąlygų įtaką lašelių terminei būsenai ir faziniams virsmams galima įvertinti palyginamuoju metodu, kai nuosekliai einama link sudėtingesnių kraštinių šilumos ir masės mainų sąlygų. Tam būtinas gerai ištirtas lašelių šilumokaitos atvejis. Juo galima laikyti lašelių šildymą laidumu, kai spinduliavimo bei savaiminės ir priverstinės šilumos konvekcijos įtaka yra paneigiama. Laidumu šildomų vandens lašelių šilimo ir garavimo procesai yra kruopščiai ištirti ir pasižymi daugeliu palyginamajai analizei patogių savybių, kurios išryškėja šilumos ir masės mainų parametrų kitimą aprašančias kreives pateikus Furjė kriterijumi išreikštame laiko mastelyje [14]. Apsupties oro drėgnumu ir temperatūra apibrėžtose sąlygose, laidumu šildomo lašelio terminės būsenos kitimą aprašančios jo paviršiaus ir masės vidutinės temperatūrų kitimo kreivės Furjė kriterijumi pateiktame laike nepriklauso nuo lašelio dispersiškumo ir gali praversti sudėtingesnio šildymo poveikio įvertinimui. Svarbu tai, jog laidumu šildomiems lašeliams būdingos kitimo kreivės egzistuoja ne tik terminės būsenos parametrui, bet ir bematės formos šilumos mainų bei fazinių virsmų parametrui. Jas sudarant reikia tinkamai parinkti normuojančius parametrus [15].

Pritaikius „hipotetinio“ lašelio modelį, kuriame lašeliui šylant ir garuojant jo matmuo nekinta, šiame darbe yra teoriškai atkurtos [13] darbe pateiktų vandens lašelių pusiausviro garavimo eksperimentinio tyrimo sąlygos. Skaitiškai ištirtas vandens lašelių garavimas skirtingais sudėtinio šildymo atvejais. Pateiktas spinduliavimo įtakos vandens lašelių garavimui palyginamasis įvertinimas, modeliavimo rezultatai palyginti su eksperimentinio tyrimo rezultatais.

TYRIMO METODAS

Taikomas [6, 10, 11] darbuose išvystytas kombinuotas analitinio ir skaitinio „lašo“ uždavinio tyrimo metodas, kompleksiskai apjungiantis nestacionariusius sudėtinius šilumos ir masės mainus lašelyje ir jo apsuptyje. Šylančio ir garuojančio pusskaidrio skysčio lašelio paviršiaus temperatūra skaičiuojama pagal iteracinę skaitinę schemą, kuri pritaikyta lašelio paviršiuje sąveikaujančių energijos srautų balansą aprašančiai lygčiai išspręsti. Pastarajai reikia prie lašelio paviršiaus pritekančių ir nutekančių energijos srautų atitikimo ir formaliai ji užrašoma pagal lašelyje ir jo apsuptyje veikiančius suminius šilumos srautus bei fazinių virsmų šilumos srautą:

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

Siekiant konkretizuoti (1) lygtį, reikia atsižvelgti į garuojančio lašelio konvekcinio šildymo intensyvumą, spinduliuotės sugėrimą pusskaidriame skystyje, nestacionariojo temperatūros lauko gradiento ypatumus lašelyje bei lašelio paviršiuje vykstančių fazinių virsmų spartą. Nestacionarius temperatūros laukas spinduliuoimu ir laidumu šildomame lašelyje aprašomas integraline lygtimi

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

čia f_n funkcija atsižvelgiama į spinduliuotės srauto sugėrimo ypatumus lašelyje ir jo paviršiaus temperatūros kitimo spartą [11]. Konvekcines šilumos srautas lašelyje aprašomas pagal modifikuotą Furjė dėsnį

$$q_c^{-}(\tau) = k_{ef}^{-} \cdot \lambda \cdot \left. \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right|_{r=R^{-}}, \quad (3)$$

į skysčio cirkuliacijos galimą įtaką šilumos plitimui lašelyje atsižvelgiant efektyvaus šilumos laidumo parametru [9]. Skysčio lašelyje šildymo intensyvumą atspindi suminis šilumos srautas $q_{\Sigma}^{-} = q_c^{-} + q_r^{-}$. Jo spinduliavimo sandą apskaičiuojant pagal [11] metodiką, atsižvelgiama į pusskaidrio skysčio kompleksinio lūžio rodiklio kitimo spinduliavimo spektre ypatumus, šviesos spindulio lūžio ir atspindžio efektus abiejose lašelio paviršiaus pusėse bei sugėrimą lašelyje. Vandens optinės spektrinės charakteristikos gerai žinomos [16]. Konvekcines šilumos srautas į lašelį apskaičiuojamas pagal modifikuotą Niutono šilumos atidavimo dėsnį

$$q_c^{+}(\tau) = \frac{\lambda_{vg} \cdot Nu}{2R} \cdot [T_g - T_R] \cdot f(B_T). \quad (4)$$

(4) išraiškoje Spoldingo šilumos parametro funkcija atsižvelgiama į Stefano hidrodinaminio srauto poveikį garuojančio lašelio konvekcinio šildymo intensyvumui pagal [10] metodiką. Laidumu šildomam lašeliui $Nu \equiv 2$ ir $q_c^{+} \equiv q_k^{+}$. Lašelio paviršiuje vykstančių fazinių virsmų šilumos srautą lemia garo srautas lašelio paviršiuje ir skysčio prigimtis [17]:

$$q_f^{+}(\tau) = L \cdot m_v^{+} = L \cdot \frac{D_{vg} \cdot \mu_v}{T_R \cdot R_{\mu} \cdot R} \left[p_{v,R} - p_{v,\infty}^{+} + \frac{\mu_v}{\mu_g} \left(p \cdot \ln \frac{p - p_{v,\infty}}{p - p_{v,R}} - p_{v,R} + p_{v,\infty} \right) \right]. \quad (5)$$

Pradinėmis šilumos ir masės mainų sąlygomis numatomas lašelio stambumas ir išpurškiamo skysčio temperatūra. Parinkus spinduliavimo šaltinio ir dujų temperatūras bei numčius skysčio garo tūrinę dalį jose, apibrėžiami lašelio apsupties parametrai. Modeliuojant vienišo lašelio garavimą, apsupties parametrai laikomi nekintančiais. Prie (1)–(5) algebrinių ir integralinių lygčių sistemos prijungiama garuojančio lašelio masės kitimą aprašanti diferencialinė lygtis. „Hipotetiniam“ nekintančio tūrio lašeliui vietoj jos taikoma papildoma sąlyga:

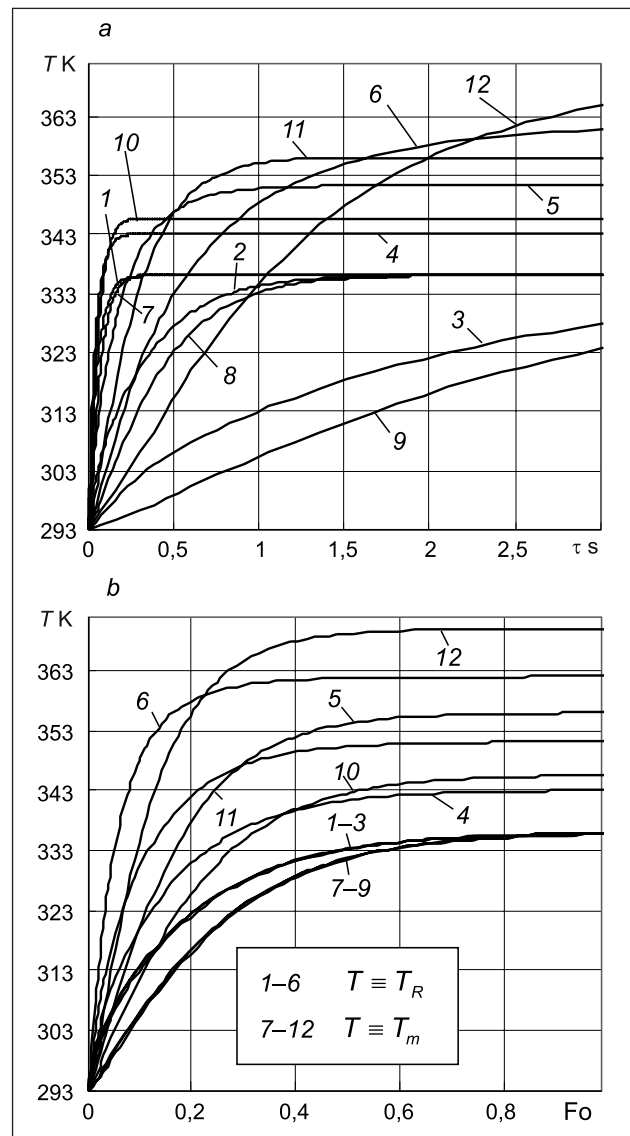
$$\frac{dR(\tau)}{d\tau} = 0. \quad (6)$$

(1)–(6) lygčių sistemos skaitinio sprendimo schema sudaroma numatytoje lašelio šildymo tyrimo kontrolinėje trukmėje parinkus baigtinį skaičių τ_i tarpinių verčių, o bemaž lašelio koordinatę $\eta_j \equiv r_j / R$ padalijus į baigtinį skaičių $\Delta\eta_j \equiv \eta_{j+1} - \eta_j$ intervalų. Daromas $\Delta\tau_i \equiv \tau_{i+1} - \tau_i$ žingsnelis laike. Pirmojoje iteracijoje spinduliavimo srautas lašelyje apskaičiuojamas atsižvelgus į τ_i laiko momentu buvusį temperatūros lauką lašelyje, o vėlesnėse iteracijose atsižvelgiama į ankstesnėje iteracijoje apskaičiuotą temperatūros lauką. Lašelio paviršiaus temperatūra atrenkama greičiausio nusileidimo metodu minimizuojant konkretizuotą (1) funkcionalą, užtikrinant ne didesnę kaip dešimtoji procento prie lašelio paviršiaus pritekančių ir nuo jo nutekančių šilumos srautų neatitikimą. Determinavus lašelio paviršiaus temperatūros $T_R(\tau)$ funkciją, apskaičiuojami ir kiti lašelio šilumos ir masės mainus aprašantys parametrai.

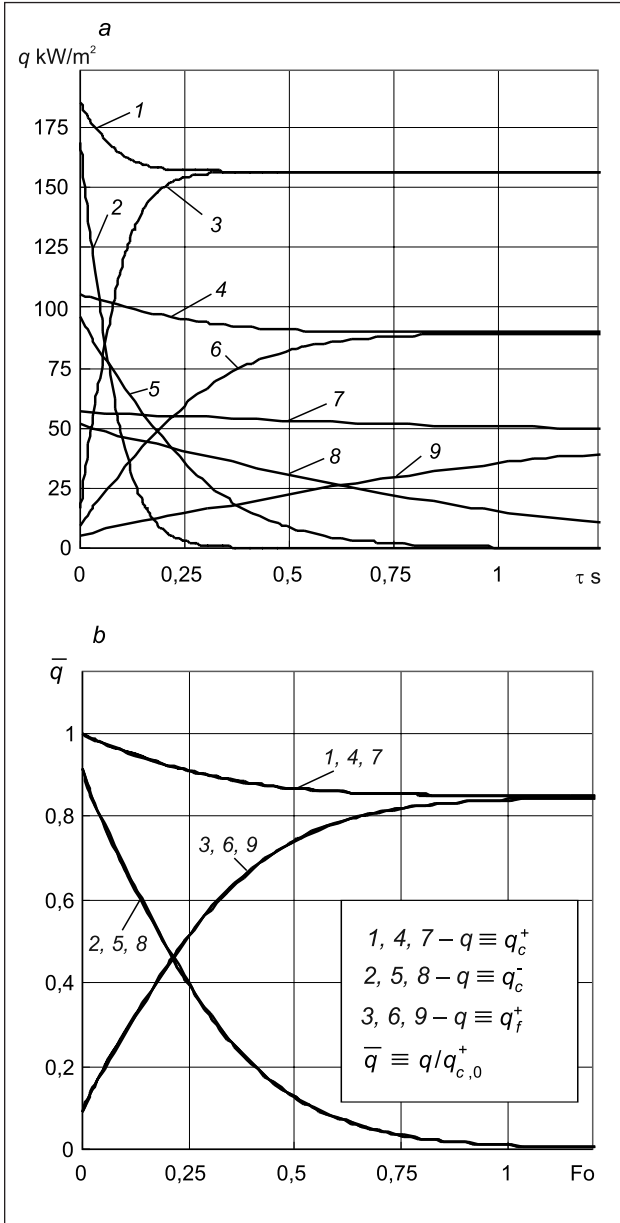
TYRIMO REZULTATAI

Sumodeliuotas laidumu ir spinduliavimu šildomo nejudančio vandens lašelio garavimas T_g temperatūros sausame ore, kai lašelio pradinė T_0 temperatūra yra žemesnė už pusiausviram garavimui būdingą lašelio paviršiaus $T_{R,e}$ temperatūrą, jo paviršiuje veikiančiam hipotetiniam masės šaltiniui užtikrinant (6) sąlygą. Šildymo laidumu atveju numatoma nespinduliuojanti lašelio apsuptis ir paneigiama savaiminės šilumos konvekcija joje. Sudėtinio šildymo atveju spinduliuoja orą gaubianti pilka sienelė, kurios juodumo laipsnis lygus 0,95, o temperatūra atitinka oro temperatūrą: $T_s \equiv T_g$. Spinduliavimo šaltinio įtaka lašelių energinei būsenai ir garavimui įvertinta ištyrus terminės būsenos ir garavimo spartos bei šilumos srautų lašelyje kitimą nestacionariųjų fazinių virsmų režime. Jo metu lašeliai pašyla nuo T_0 temperatūros iki pusiausviram garavimui būdingos T_e temperatūros (1 pav.). Pusiausviru garavimu suvokiamas fazinių virsmų režimas, kai apsupties suteikta šiluma lašelį tik garina. Lašelio terminės būsenos kitimo ypatumus lemia jo šildymo būdas [10], todėl bendruoju atveju pusiausvirai garuojančio lašelio terminę būseną galima apibrėžti tik lašelio masės vidutine temperatūra: $T \equiv T_{m,e}$. Laidumu šildomas lašelis pusiausvirai garuoti gali pasiekęs terminę būseną su nuliniu gradiento temperatūros lauku, užtikrinančią $q_{c,e}^- = 0$ ir $q_{f,e}^+ \equiv q_{k,e}^+$ sąlygas (2 pav.). Laidumu šildomų realaus ir hipotetinio lašelių pusiausviro garavimo terminę būseną galima nusakyti ir lašelio paviršiaus temperatūra $T_{e,k} \equiv T_{m,e,k} \equiv T_{R,e,k}$, kuri pusiausviro garavimo režime išlieka pastovi. Laisvai parinktiems apsupties parametrams laidumu šildomo lašelio paviršiaus ir jo masės vidutinės temperatūros kitimą aprašančias $T_{R,k}(Fo)$ ir $T_{m,k}(Fo)$ kreives (1 pav., b 1–3, 7–9 kreivės) galima laikyti būdingomis, kadangi jos atspindi terminės būsenos kitimą visų tos pačios pradinės temperatūros vandens lašelių, kuriems Knudseno sluoksnio poveikį galima paneigti. Temperatūras jose sunormavus lašelio pradinės ir pusiausviro garavimo temperatūrų atžvilgiu, $\bar{T} \equiv (T - T_0) / (T_e - T_0)$, sudaroma laidumu šildomų lašelių terminės būsenos kitimo universali $\bar{T}(Fo / Fo_{e,k})$ kreivė

[14]. Pastarąją palyginamajame sudėtingesnių už šildymą laidumu sąlygų įtakos lašelių terminėi būsenai įvertinime galima laikyti etalonine. Išpurškiamo skysčio temperatūros, oro temperatūros ir drėgnumu nusakytų apsupties konkrečių parametru atveju spinduliavimo šaltinio įtaką gerai atspindi ir nukrypimas nuo būdingųjų terminės būsenos kitimo kreivių (1 pav., b). Sudėtinio šildymo atveju lašelių terminę būseną labai veikia pusskaidriame skystyje sugertas spinduliuotės srautas. Dėl jo įtakos vykstanti pernašos procesų sąveika sukelia vietines nestacionariojo temperatūros lauko lašelyje deformacijas, lemiančias netgi temperatūros lauko gradiento vektoriaus krypties vandens lašelyje pokytį. Tai sudaro prielaidą skystyje sugertą spinduliuotės srautą perduoti į lašelio paviršių ir įtraukti į skysčio garinimo procesą (3 pav.). Sudėtinio šildymo atveju pusiausviram skysčio garavimo režimui prasidėti būtina sąlyga: $q_{c,e}^- = q_{r,e}$ ir $q_{f,e}^+ = q_{\Sigma,e}^+ \equiv q_{c,e}^+ + q_{c,e}^-$.

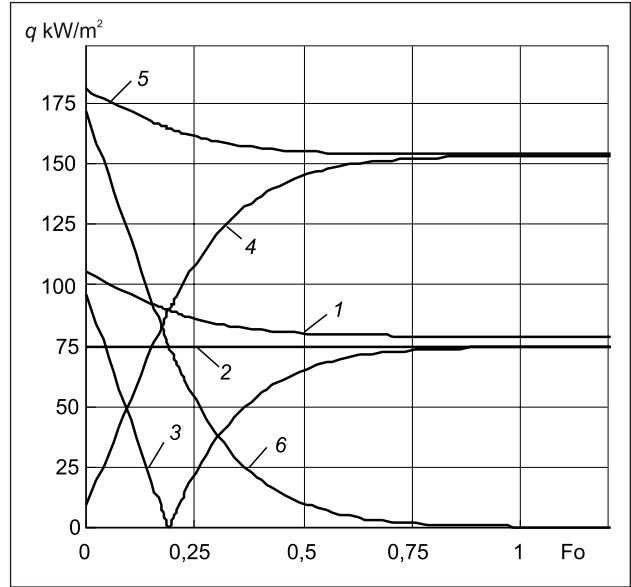


1 pav. Šylančio hipotetinio lašelio temperatūros kitimas nestacionariojo garavimo režime: (1–3, 7–9) šildymas laidumu, (4–6, 10–12) sudėtinis šildymas. $R_0 \cdot 10^6$, m: (1, 4, 7, 10) 200, (2, 5, 8, 11) 500, (3, 6, 9, 12) 1200; $T_g = 1133\text{K}$; $T_0 = 293\text{K}$

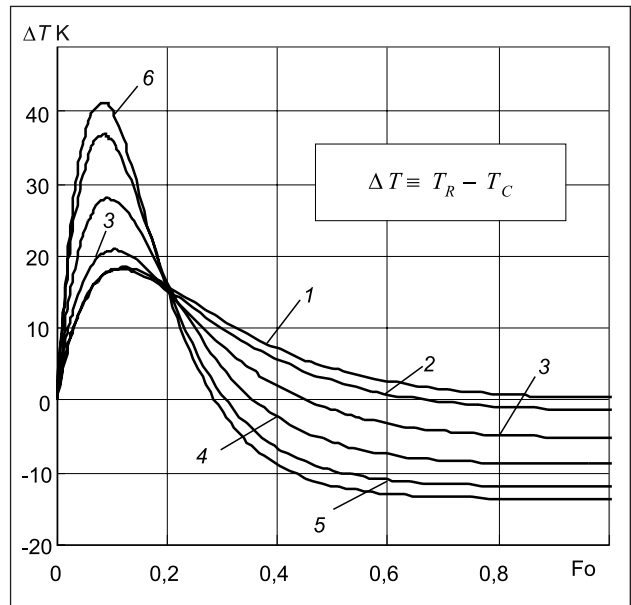


2 pav. Šilumos srautų kitimas nestacionariojo garavimo režime laidumu šildomo hipotetinio lašelio paviršiuje: (a) realiaime laike, (b) Furjė kriterijumi išreikštame laike. $R_0 \cdot 10^6$ (m): 1–3 – 200, 4–6 – 350, 7–9 – 650; $T_g = 1133$ K; $T_0 = 293$ K

Esmines nestacionariojo temperatūros lauko lašelyje transformacijas patvirtina lašelio paviršiaus ir masės vidutinės temperatūros kreivių susikirtimas nestacionariojo garavimo režime (1 pav.). Vėliau stebimas šių kreivių išsiskyrimas rodo sugerto spinduliavimo srauto sukeltą lašelio vidinių sluoksnių aukštesnį pašilimą. Neizotermiškumo kitimą lašelio garavimo metu atspindi lašelio paviršiaus ir centro temperatūrų skirtumas (4 pav.). Pradinėje garavimo stadijoje jo augimą lemia spartus paviršinių lašelių sluoksnių šilimas veikiant išoriniam šilumos konvekcijos srautui. Pastarajam vis labiau įsitraukiant į skysčio garinimą (2, 3 pav.), neizotermiškumas lašelyje pradeda slopti, kol palaipsniui tampa nuliniu (4 pav.). Laidumu šildomiems lašeliams tai rodo



3 pav. Šilumos srautų kitimas nestacionariojo garavimo režime hipotetinio lašelio paviršiuje sudėtinio šildymo atveju. $T_g = 1133$ K; $T_0 = 293$ K; $R_0 = 350 \cdot 10^{-6}$ m. Parametro q prasmė: 1 – q_c^+ , 2 – q_r , 3 – q_c^- , 4 – q_r^+ , 5 – q_{Σ}^+ , 6 – q_c^-



4 pav. Neizotermiškumo kitimas šylančiame hipotetiniame lašelyje jį šildant laidumu (1) ir sudėtinio šildymo atveju (2–8). $R_0 \cdot 10^6$ (m): 2 – 200, 3 – 350, 4 – 650; $T_g = 1133$ K; $T_0 = 293$ K

nestacionariojo garavimo režimo pabaigą, o sudėtinio šildymo atveju – perėjimą į baigiamąją jo stadiją, kurios metu dėl spinduliavimo poveikio pasiekiamas antrasis neizotermiškumo lašelyje pikas. Kadangi spinduliuotės srauto sugėrimas kiekvienam skirtingo stambumo lašeliui yra individualus, todėl neizotermiškumo kitimas sudėtinio šildymo atveju lašeliuose yra irgi savitas. Smulkesniuose lašeliuose jo kitimas artimesnis šildymo laidumu atvejui. Vandens hipotetinio lašelio pusiausviro garavimo režimas gali tęstis be galo

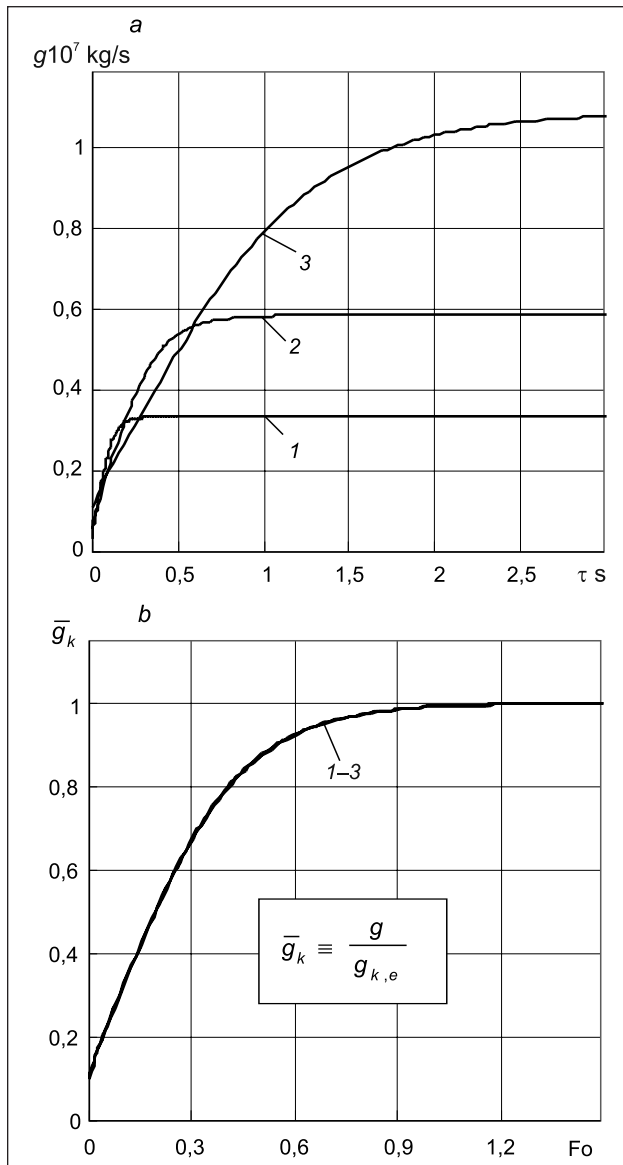
ilgai neizotermiškumui jame nekintant. Pastarojo pokyčius gali sukelti tik apsupties parametų pakitimas. Realaus gi lašelio neizotermiškumas pusiausviro garavimo eigoje slops-ta dėl spinduliuotės srauto sugėrimo mažėjančiame lašelyje silpnėjimo [11].

Laidumu šildomiems skirtingo stambumo lašeliams ste-bimas šilumos srautų dinamikos ekvivalentiškumas Furjė kriterijumi išreikštoje trukmėje (3 pav.) sudaro prielaidas ir kitų šilumos bei masės mainų parametų, tarp jų ir laše-lių garavimo spartos (5 pav.), kitimą aprašančių būdingųjų kreivių egzistavimui. Šios kreivės patogios įvertinti lašelių dispersiškumo įtaką pernašos procesų sąveikoje, kadangi sudėtinio šildymo atveju stebimas šilumos ir masės mainų parametų kitimo nukrypimas nuo būdingųjų kreivių aiškiai parodo pastarojo įtaką jiems išpurškiamo skysčio tempera-

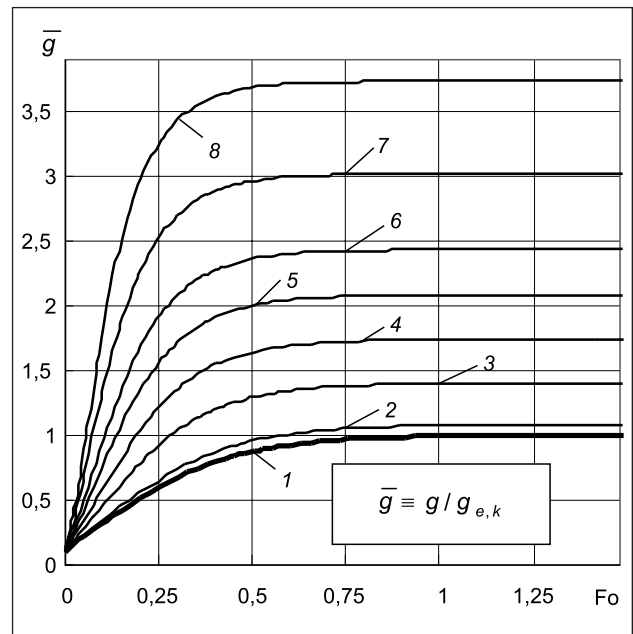
tūra ir lašelių apsupties parametrais apibrėžtu atveju (6 pav.). Nestacionariųjų fazinių virsmų režime sparčiai augęs šylančio hipotetinio lašelio garavimo greitis palaipsniui nusistovi artė-jant prie pusiausviro garavimo. Sudėtinio šildymo atveju pu-siausviro garavimas kur kas spartesnis už laidumu šildomo lašelio garavimą, o jo apskaičiuotasis greitis gerai dera su [13] darbe pateiktais eksperimentinio tyrimo rezultatais (7 pav.).

Lašelio šilumos ir masės mainų parametų kitimo bū-dingųjų kreivių pobūdį labai veikia išpurškiamo skysčio temperatūra ir lašelio apsupties parametrai, o tai rodo fazi-nių virsmų šilumos srauto kitimo būdingųjų kreivių šeimos pavyzdys (8 pav., a). Todėl spinduliavimo įtakos išryškini-mas ir apibendrintas šios įtakos įvertinimas plačiame kraš-tinių sąlygų diapazone yra imlus darbui. Čia plačias pers-pektyvas atveria atskirų parametų kitimo būdingų kreivių šeimos sutraukimas į universaliąsias kreives. Pastarosioms sudaryti būtina numatyti būdingas kreives normuojančius tinkamus parametrus, užtikrinančius tiriamojo parametro kitimą universaliame 0–1 intervale, ir pritaikyti Furjė kri-terijų santykiu išreikštą laiko kitimo universalų 0–1 intervalą. Laidumu šildomų lašelių nestacionariojo fazinių virsmų re-žimo universalų 0–1 trukmę atspindi pusiausviro garavimo pradžia nurodančio Furjė kriterijaus atžvilgiu normuotas $\bar{Fo}_k \equiv Fo / Fo_{e,k}$ laiko parametras, o lašelio šilumos ir masės mainų P parametrai normuojami jų pradinių ir pusiausviro garavimo verčių atžvilgiu:

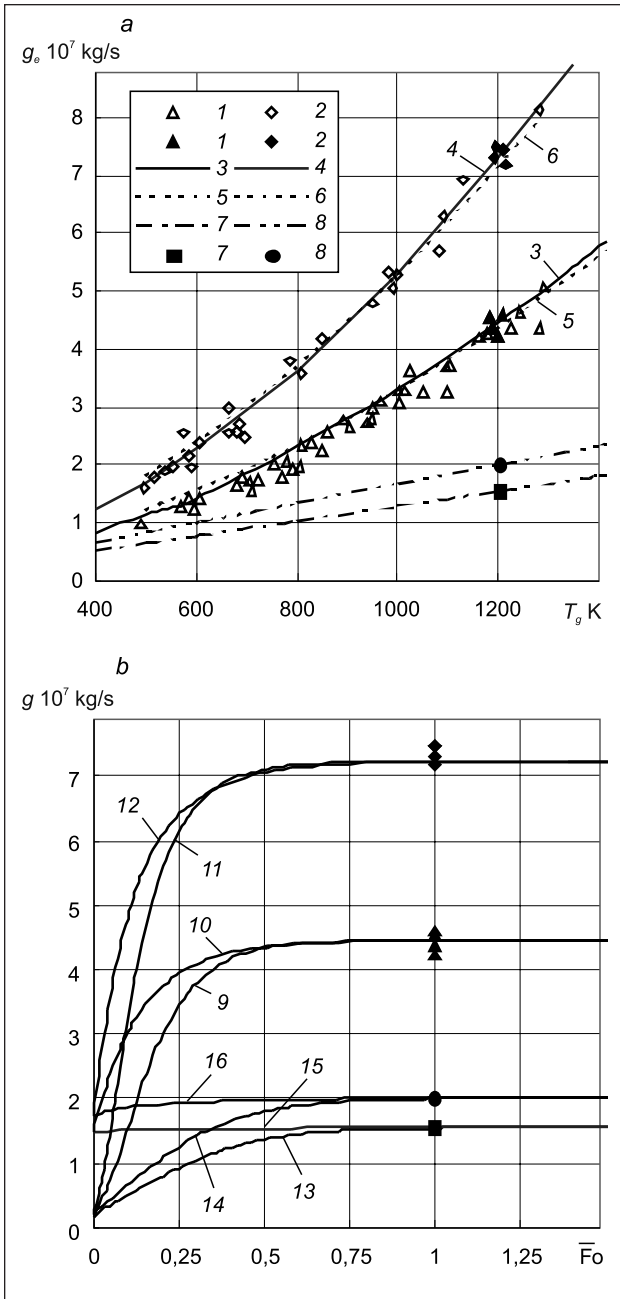
$$\bar{P}_{in,k} \equiv \frac{P_{in,k} - P_{in,0}}{P_{in,e,k} - P_{in,0}} \quad (7)$$



5 pav. Laidumu šildomo hipotetinio lašelio garavimo greičio kitimas nestaciona-rijo garavimo režime: a – realiame laike, b – Furjė kriterijumi išreikštame laike. $R_0 \cdot 10^6$ (m): 1 – 200, 2 – 350, 3 – 650; $T_g = 1133$ K; $T_0 = 293$ K

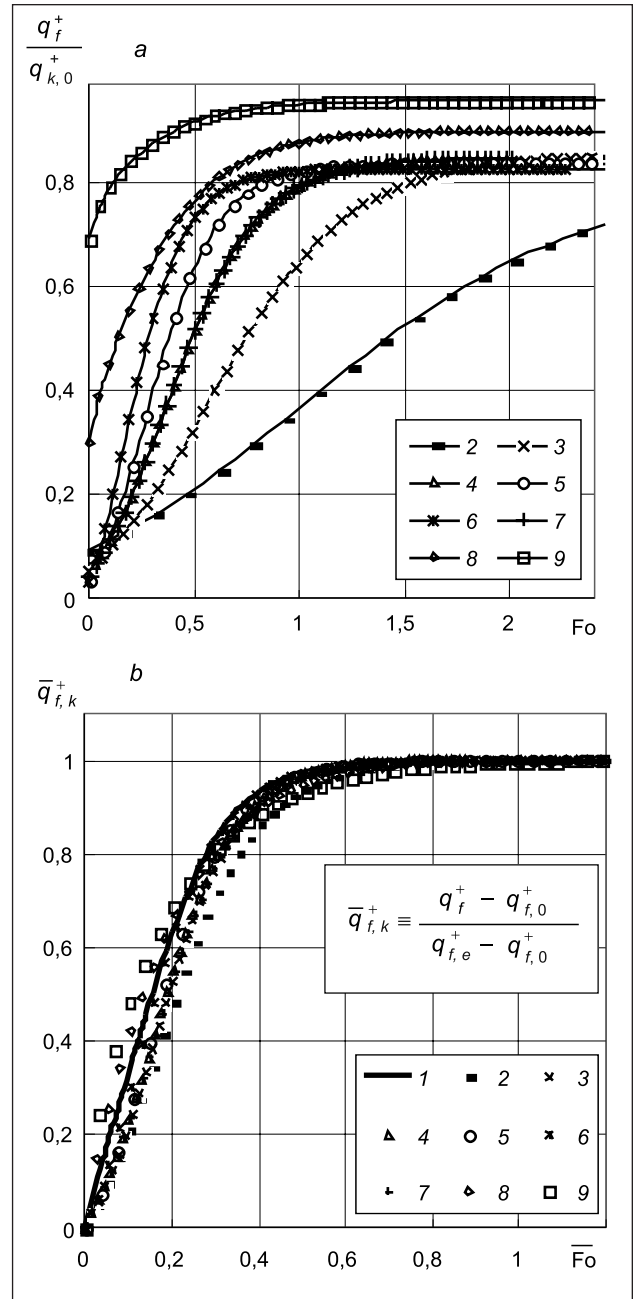


6 pav. Lašelio dispersiškumo įtaka garavimo greičiui sudėtinio šildymo atveju: $R_0 \cdot 10^6$ (m): 2 – 50, 3 – 200, 4 – 350, 5 – 500, 6 – 650, 7 – 900, 8 – 1200; $T_g = 1133$ K; $T_0 = 293$ K. Laidumu šildomo lašelio pusiausviro garavimo grei-tis $g_{e,k} \cdot 10^7$ (kg/s): 2 – 0,0836; 3 – 0,3343; 4 – 0,5853; 5 – 0,8364; 6 – 1,087; 7 – 1,507; 8 – 2,011, 1 – būdinga garavimo greičio kitimo kreivė



7 pav. Šildymo būdo įtaka vandens lašelių pusiausviro garavimo greičiui (a) ir hipotetinio lašelio garavimo greičiui nestacionariųjų fazinių virsmų režime (b). (1–6, 9–12) – sudėtinis šildymas; (7, 8, 13–16) – šildymas laidumu; 1, 2 – eksperimentas [13]; skaitinis tyrimas: 3, 4, 7, 8 – [15]; 5, 6 – [1]; 9–16 – šio darbo rezultatai. T_g (K): 1, 3, 5, 7, 9, 10, 13, 14 – 981, 2, 4, 6, 8, 11, 12, 15, 16 – 1133; T_0 (K): 9, 11, 13, 14 – 293; 10, 12, 15, 16 – 333

Laidumu šildomų lašelių fazinių virsmų srautų kitimo būdingas kreives pateikus (7) išraišką, jos atspindimos universalioje kreivėje (8 pav., b). Išsamesnė analizė patvirtino, jog konvekcines šilumos $\bar{q}_{c,k}^+$ ir $\bar{q}_{e,k}^+$ srautų kitimo kreivės yra tapčios pateiktai $\bar{q}_{f,k}^+$ kreivei.



8 pav. Fazinių virsmų šilumos srauto kitimo būdingų kreivių priklausomumas nuo išpurškiamo vandens ir lašelio apsupties temperatūrų (a) ir etaloninė fazinių virsmų šilumos srauto kitimo kreivė (b). T_g K: 2 – 473; 3 – 673; 4, 7–11 – 873; 5 – 1073; 6 – 1273. T_0 K: 2–7 – 278; 8 – 310; 9 – 325

APIBENDRINIMAS

Lašelių fazinių virsmų analizei svarbūs (7) išraišką aprašomi $p_{in} \equiv m, p_{in} \equiv g$, bei $p_{in} \equiv R$ parametrai, o lašelių terminės būsenos kitimui $P \equiv T$ parametras, in indeksu išskiriant lašelio paviršiaus ($in \equiv R$), centro ($in \equiv C$) ir jo vidutinės masės ($in \equiv m$) būdingas temperatūras. Analizuojant šilumos srautus $P \equiv q$, in indeksu nurodomas pasirinktą šilumos srautą: $in \equiv c^+$, kai $P_{in} \equiv q_c^+$; $in \equiv c^-$, kai $P_{in} \equiv q_c^-$; $in \equiv f^+$, kai $P_{in} \equiv q_f^+$.

Sudarius skirtingų parametų $P_{in,c}$, $P_{in,k-r}$ bei $P_{in,c-r}$ kitimo kreives ir jas palyginus su laidumu šildomų lašelių atitinkamų parametų kitimo universaliomis kreivėmis galima pateikti sisteminį sudėtingesnių už laidumu lašelių šildymo atvejų įtakos jų termininei būsenai bei faziniams virsmams įvertinimą. Tai yra tolesnių tyrimų tikslas.

Žymėjimai

a – temperatūros laidumo koeficientas m^2/s ;
 B_T – Spoldingo šilumos pernešimo parametras;
 D – difuzijos koeficientas m^2/s ;
 Fo – Furjė kriterijus;
 g – garavimo greitis kg/s ;
 k_{ef} – efektyvaus šilumos laidumo parametras;
 L – garavimo šiluma J/kg ;
 m – garo srauto tankis $kg/(m^2s)$;
 Nu – Nuselto kriterijus;
 n – nario indeksas begalinėje sumoje;
 p – slėgis Pa ;
 q – šilumos srauto tankis W/m^2 ;
 R – lašelio spindulys m ;
 R_μ – dujų pastovioji $J/(kmol K)$;
 r – lašelio koordinatė m ;
 t – kontrolinis laikas s ;
 T – temperatūra K ;
 $\eta = r/R$ – bematė koordinatė;
 λ – šilumos laidžio koeficientas $W/(K m)$;
 μ – molekulinė masė $kg/kmol$;
 ρ – tankis kg/m^3 ;
 τ – laikas s .

Indeksai apačioje:

c – konvekcija;
 C – lašelio centras;
 e – pusiausviris garavimas;
 f – faziniai virsmai;
 g – dujos;
 k – laidumas;
 m – masės vidutinis;
 R – lašelio paviršius;
 r – spinduliavimas;
 v – garas;
 vg – garo ir dujų mišinys;
 Σ – suminis;
 0 – pradinė būsena;
 ∞ – toli nuo lašelio.

Indeksai viršuje:

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

Literatūra

1. Tseng C. C., Viskanta R. Enhancement of water droplet evaporation by radiation absorption. *Fire Safety J.* 2006. Vol. 41. P. 236–247.
2. Fuks N. A. *Evaporation and Droplet Growth in Gaseous Media*. London: Pergamum Press, 1959.
3. Williams A. Combustion of droplets of liquid fuels: a review. *Combust. Flame*. 1973. Vol. 21. P. 1–31.
4. Sirignano W. A. *Fluid Dynamics and Transport of Droplets and sprays*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
5. Sazhin S. S. Advanced models of fuel droplet heating and evaporation. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2006. Vol. 32. P. 162–214.
6. Miliauskas G., Šinkūnas S., Miliauskas G. Evaporation and condensing augmentation of water droplets in flue gas. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 2010. Vol. 53. P. 1220–1230.
7. Sazhin S. S., Krutitskii P. A., Gusev I. G., Heikal M. R. Transient heating of an evaporating droplet. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 2010. Vol. 53. P. 2826–2836.
8. Renksizbulut M., Nafziger R., Li X. A mass transfer correlation for droplet evaporation in high-temperature flows. *Chem. Eng. Sci.* 1991. Vol. 46. P. 2351–2358.
9. Abramzon B., Sirignano W. A. Droplet vaporization model for spray combustion calculations. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 1989. Vol. 32. N 9. P. 1605–1618.
10. Miliauskas G., Sabanas V. Interaction of transfer processes during unsteady evaporation of water droplets. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 2006. Vol. 49. P. 785–798.
11. Miliauskas G. Regularities of unsteady radiative-conductive heat transfer in evaporating semitransparent liquid droplets. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 2001. Vol. 44. P. 785–798.
12. Dombrovsky L., Sazhin S. Absorption of thermal radiation in a semi-transparent. *Int. J. of Heat and Fluid Flow*. 2003. Vol. 24. P. 919–927.
13. Shcukin E. P., Krasovitev V. G., Jalamov J. I. Evaporation and condensative growth of large and moderately large droplets in gaseous media at any temperature differences. *VINITI 3706-B091*. 1991.
14. 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. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 2008. Vol. 51. P. 4145–4160.
15. Miliauskas G., Šinkūnas S., Norvaišienė K. Influence of thermal radiation to the interaction of heat and mass transfer processes under evaporation of water droplets. *ICCHMT'2011: 7th International Conference on Computational Heat and Mass Transfer*. Turkey: Istanbul. 2011. P. 1–8.
16. Hale G. M., Querry M. R. Optical constants of water in the 200-nm to 200- μm wavelength region. *Appl. Opt.* 1973. Vol. 12. P. 555–562.
17. Kuzikovskij A. V. Dynamic of spherical particle in powerful optical field. *Izv. VUZ Fizika*. Vol. 5. P. 89–94.

Gintautas Miliauskas, Kristina Norvaišienė

INFLUENCE OF THERMAL RADIATION ON THE ENERGETIC STATE AND EVAPORATION OF WATER DROPLETS

Summary

The modelling of water droplet evaporation was carried out for droplets under combined heating when the temperature of the external radiant source equalled the ambient temperature of droplets. The results of research are presented in the universal time scale expressed by the Fourier number. The influence of thermal radiation on the energetic state and evaporation of droplets is estimated by assessing the deviation of curves describing the variation of energy flow and evaporation parameters from the etalon curves. The above-mentioned etalon curves considered as the curves representing the variation of the energy flows and evaporation parameters of conductively heated droplets as the time expressed by the Fourier number does not depend on the dispersity of droplets. The influence of the thermal radiation of evaporating droplets on the interaction of transfer processes is shown. Radiant influence on larger droplets is more significant and increases with the ambient temperature.

Key words: water droplets, evaporation and combined heating, interaction of transfer processes

Гинтаутас Миляускас, Кристина Норвайшене

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОЦЕСС ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ

Резюме

Смоделировано испарение капель воды в случае сложного их нагрева при наличии источника внешнего излучения, температура которого соответствует температуре каплю окружающей среды. Результаты исследования представлены в универсальном масштабе критерия Фурье. Влияние теплового излучения на энергетическое состояние и испарение капли оценено по степени отклонения кривых изменения энергетических потоков и параметров испарения от эталонных кривых. Ими были приняты кривые изменения энергетических потоков и параметров испарения при кондуктивном нагреве капли, которые в масштабе критерия Фурье не зависят от дисперсности капель. Выявлено влияние теплового излучения на взаимодействие процессов переноса испаряющейся капли. Влияние теплового излучения более существенно для крупных капель и возрастает с увеличением температуры среды.

Ключевые слова: капля воды, испарение и сложный нагрев, взаимодействие процессов переноса