

Drėgnuose dūmuose šylančių lašelių kondensacinis augimas

Giedrius Miliauskas,

Gintautas Miliauskas,

Romualdas Montvilas

*Kauno technologijos universitetas,
Šilumos ir atomo energetikos katedra,
K. Donelaičio g. 20, LT-44403 Kaunas
El. paštas: gmil@mf.ktu.lt*

Sumodeliuotas lašelių terminės būsenos kitimas ir kondensacinis augimas drėgnuose dūmuose, siekiant išryškinti juose sukauptos fazinių virsmų šilumos utilizavimo vandens įpurškimo optimalias sąlygas. Iširta, jog skysčio garo kondensacijos intensyvumui lašelių paviršiuje bei trukmei turi įtakos įpurškiamo vandens temperatūra, lašelių dispersiškumas bei dūmų temperatūra ir drėgnumas. Šilumos ir masės mainų kraštinių sąlygų įtakai išryškinti patogiau naudoti Furje kriterijumi išreikštą laiko mastelį, kadangi Furje kriterijumi išreikštoje trukmėje lašelių terminė būsena bei vandens garo kondensacijos proceso parametrai visiems lašeliams kinta identiškai pagal būdingąsias kreives, kuomet šiluminę energiją nuo dūmų jie gauna laidumu, o išpurškiamo vandens ir dūmų parametrais apibrėžtos pradinės šilumos ir masės mainų sąlygos visiems lašeliams yra vienodos. Kondensacinio fazinių virsmų režimo atveju lašelių šildymas intensyvesnis už analogiškos kietosios dalelės atvejį.

Raktažodžiai: drėgni dūmai, vandens lašeliai, kondensacinis augimas ir šilimas, pernašos procesų sąveika

1. ĮVADAS

Vandens garo kondensacija lašelių paviršiuje – dažnas reiškiny gamtoje, aktuali ji ir terminėse technologijose. Klasikiniu pavyzdžiu čia laikytinas oro sausinimo vandens įpurškimo oro kondicionavimo sistemos garinimo kameroje procesas. Kiek netikėtai vandens garo kondensacijos lašelių paviršiuje proceso pažinimo svarba išryškėja šiuolaikinių terminų technologijų, susijusių su į atmosferą išmetamuose drėgnuose dūmuose sukauptos fazinių virsmų šilumos utilizavimu, efektyvumo didinimo aspektu. Vandens garas dūmuose sukaupiamas išgaruojant kure esančiai drėgmei bei degant kuro sudėtyje esančiam vandeniliui. Ypač didelio natūralaus drėgnumo dūmai gaunami deginant biokurą. Papildomai dūmai drėkinami dirbtinai naudojant vandens garą skystojo kuro išpurškimo technologijose bei į kūrį purškiant vandenį ekologiniais tikslais, kai siekiama mažinti azoto oksidų susidarymą reguliuojant degimo fako maksimalią temperatūrą. Utilizuoti į atmosferą išmetamuose dūmuose su vandens išgaravimu susijusių jų entalpijos dedamąją įmanoma tik kondensuojant vandens garą. Tradiciškai tam naudojami rekuperaciniai kondensacinio tipo šilumokaičiai, kuriuose išmetamais dūmais šildomas į katilą tiekiamas maitinantis vanduo. Kondensacijos procesas galimas tik žemesnės temperatūros už rasos taško temperatūrą terpėje, kuri palanki korozijos procesams. Todėl vandeniui nuo dūmų atskirti naudojamos spalvotų metalų sienelės.

Dėl kondensacinio įrenginio brangumo toks drėgnuose dūmuose sukauptos fazinių virsmų energijos utilizavimo būdas pasiteisina didelio našumo šiluminės energijos generavimo sistemose, o plačiam smulkių katilinių tinklui praktiškai yra neprieinamas. Čia plačias galimybes atvertų tiesioginiu vandens

įpurškimu į drėgnus dūmus besiremiantys kontaktiniai šilumokaičiai. Tarp privalumų galima išskirti šilumos ir masės mainų dvifaziame išpurkšto vandens ir dūmų sraute didelio intensyvumo nulemtą kontaktinio šilumokaičio kompaktiškumą, palyginti žemą šiluminės energijos generavimo sistemos rekonstrukcijos savikainą bei galimą gerą dūmų išvalymą nuo teršalų. Pašildomo vandens užteršimo problemą galima sėkmingai išspręsti daugiapakopės vandens įpurškimo sistemos atveju, kuomet pirmosiose pakopose dūmai gerai išvalomi, o vėlesnėse pakopose utilizuojama fazinių virsmų šiluma. Siekiant optimaliai valdyti drėgnuose dūmuose išpurkšto vandens pašildymo procesą, reikia giliai pažinti sudėtinių šilumos ir masės mainų skysčio lašelių sistemoje dėsningumus vandens garo kondensacijos metu.

Taigi kontaktinių šilumokaičių su vandens įpurškimu praktinis įgyvendinimas reikalauja kruopščios išpurkšto skysčio terminės būsenos kontrolės, siekiant išvesti vandenį iš kontaktinio šilumokaičio kuo arčiau jam pašilus iki rasos taško temperatūros, tačiau pastarosios neviršijus. Išmetamų dūmų šilumos utilizavimo proceso kontrolę apsunkina pernašos procesų nestacionarumas, kurį lemia nuolatinis šilumos ir masės mainų kraštinių vyksmų sąlygų kitimas išpurkšto vandens lašelių ir dūmų dvifaziame sraute. Dūmai šiluminę energiją išpurkštam skysčiui perduoda šilumos konvekcija ir spinduliavimu dėl energinio lygmens skirtumo. Kartu lašeliams suteikia fazinių virsmų energiją jų paviršiuje besikondensuojant dūmuose esančiam vandens garui. Dūmai, atiduodami šiluminę energiją lašeliams, aušta ir sausėja, o vandens lašeliai intensyviai šyla ir auga. Anksčiau minėtų veiksnių įtakai kondensaciniam lašelių augimui ir šilumai įvertinti būtina nuosekli sisteminė pernašos procesų sąveikos palyginamoji analizė. Pastarajai atlikti reikalingas gerai pažintas atraminis lašelio šilumos mainų kondensaciniam

fazinių virsmų režime atvejais. Garuojančių lašelių šilumos ir masės mainų modeliavimo patirtis [1–3] leidžia teigti, jog juo gali tarnauti laidumu šildomo „vienišo“ lašelio modelis, numatantis dujų terpės būsenos pastovumą ir leidžiantis išgryninti šildymo būdo įtaką lašelio termininei būsenai ir faziniams virsmams. Modeliuojant skirtingos pradinės temperatūros stambių vandens lašelių šilumą sausame ore [1], garuojančių lašelių terminės būsenos kitimas nestacionariojo garavimo režime pateiktas charakteringosiomis $T_{R, ch}(Fo) \equiv f_{Fo}(T_{R, 0}, T_g)$ kreivėmis, atspindinčiomis begalinės aibės skirtingo stambumo lašelių paviršiaus temperatūros kitimą, kai naudojamas Furje kriterijumi išreikštas laiko mastelis. Furje kriterijų Fo / Fo_{ch} santykiu išreikštos trukmės universalumas lašelio nestacionariajam temperatūros laukui apibrėžti pagrįstas [3]. Charakteringosiomis Furje kriterijaus reikšmėmis rekomenduojama imti nestacionariųjų fazinių virsmų trukmę ($Fo_{ch} \equiv Fo_e$) arba garuojančio lašelio egzistavimo trukmę ($Fo_{ch} \equiv Fo_f$).

Ar egzistuoja vandens lašelių kondensacinį šilumą ir augimą aprašančios charakteringosios kreivės? Ar prasmingas Furje kriterijų $Fo / Fo_{ch=ko}$ santykiu išreikštos kondensacinio fazinių virsmų režimo trukmės įvedimas? Į šiuos klausimus siekiama atsakyti šiame darbe.

2. LAŠELIO KONDENSACINIO AUGIMO IR ŠILIMO MODELIS

Drėgnuose dūmuose šylančio lašelio masės kitimą lemia skysčio garo srautas jo paviršiuje:

$$\frac{\partial M_L(\tau)}{\partial \tau} = -g_g(\tau). \quad (1)$$

Fazinių virsmų lašelio paviršiuje spartą nusako skysčio garo srauto tankis, kurio ypatumus gerai atspindi Šorino–Kuzikovskio lašelio fazinių virsmų modelis [4, 5]:

$$g_g(\tau) = 4\pi \cdot R^2(\tau) \cdot m_g^+(\tau) = 4\pi \frac{D_{gd}(\tau) \mu_g R(\tau)}{T_{R, gd}(\tau) R_{\mu}} \times \left\{ p_{g, R}(\tau) - p_{g, \infty}(\tau) + \frac{\mu_g}{\mu_{gd}(\tau)} \left[p \cdot \ln \frac{p - p_{g, \infty}(\tau)}{p - p_{g, R}(\tau)} - p_{g, R}(\tau) + p_{g, \infty}(\tau) \right] \right\}. \quad (2)$$

Lašelio tūrio augimą kondensaciniame fazinių virsmų režime sąlygoja jo paviršiuje besikondensuojantis vandens garas bei veikia šylančio skysčio plėtimasis:

$$\rho_L(\tau) \frac{\partial R^3(\tau)}{\partial \tau} = R^3(\tau) \frac{\partial \rho_L(\tau)}{\partial \tau} - 3R^2(\tau) \cdot m_g^+(\tau). \quad (3)$$

Stambių skysčio lašelių atveju, kuomet temperatūros ir garo slėgio šuolių lašelius supančiame Knudseno sluoksnyje galima nepaisyti, (1) išraiškoje garo ir dujų mišinio prie lašelio temperatūra yra artima jo paviršiaus temperatūrai: $T_{R, gd}(\rho) \equiv T_R(\tau)$, o vandens garo slėgis lašelio paviršiuje atitinka pagal paviršiaus temperatūrą parinktą sočiojo garo slėgį: $p_{g, R}(\tau) \equiv p_s[T_R(\tau)]$. Lašelio paviršiuje kondensuos vandens garas, kol lašelio paviršius pašils iki rasos taško temperatūros. Kondensacijos procese vandens garo dalinis slėgis dujose viršija garo slėgį prie lašelio. Tuomet (2) išraiškoje Stefano logaritmo vertė yra neigiama, o (1) išraiška aprašoma lašelio masė auga. Rasos taško temperatūros vertę lemia dūmų drėgnumas, kurį patogiu nusakyti vandens

garo tūrinę dalį dujų mišinyje atitinkančiu vandens garo dalinio slėgio ir aplinkos slėgio santykiu: $\bar{p}_g \equiv p_{g, \infty} / p$.

Lašelio paviršiaus temperatūros kitimą lemia energijos srautų sąveika jame. Šilumos ir masės pernašos procesų kvazistacionarumo prielaida leidžia teigti, jog lašelio paviršiaus temperatūros kitimas užtikrina prie jo pritekančių ir nutekančių energijos srautų balansą, kurį galima aprašyti formalia išraiška:

$$q_{\Sigma}^+(\tau) + q_f^+(\tau) + q_{\Sigma}^-(\tau) \equiv 0. \quad (4)$$

(4) išraiška atspindi glaudų šilumos ir masės pernašos procesų dūmuose bei pusskaidrio skysčio lašelyje ryšį. Ji tarnauja lašelio „išorinio“ ir „vidinio“ uždavinių sprendinius jungiančia lygtimi, kuri apskritai atspindi trečios eilės kraštines sąlygas. Siekiant apskaičiuoti suminių šilumos srautų lašelio paviršiaus pusėse tankius $q_{\Sigma}^+(\tau) = q_r^+(\tau) + q_c^+(\tau)$ bei fazinių virsmų šilumos srauto tankį $q_f^+(\tau) = m_g^+(\tau) \cdot L(\tau)$, šilumos ir masės mainus tarp išpurkšto vandens lašelių ir dūmų būtina modeliuoti susietai su sudėtine šilumos pernaša lašeliuose. Kauno technologijos universiteto Šilumos ir atomo energetikos katedroje išplėtotą analitinio ir skaitinio tyrimo „lašo“ uždavinio, kuris apima sferinio lašelio išorinius ir vidinius šilumos ir masės mainus, sprendimo metodologija. Jos esmė tai, jog kontakto tarp fazių temperatūra apskaičiuojama iš lašelio vidinių ir išorinių šilumos ir masės mainų jungtinio uždavinio (4) integralinio sprendinio. Čia iškyla sudėtinio šilumos nestacionariojo plitimo pusskaidrėje terpėje įvertinimo problema. Pastarosios sprendimą juntamai apsunkina spinduliuotės srauto sugėrimą pusskaidriame skystyje lydintys šviesos spindulio lūžio bei atspindžio lašelio išoriniame paviršiuje, taip pat stebimi šviesos daugkartinio ir viso atspindžio vidiniu lašelio paviršiumi spektriniai efektai. Į jų įtaką atsižvelgus pagal [2] metodiką, nestacionarusis temperatūros laukas lašelyje šilumai jame plintant spinduliuoimu ir laidumu aprašomas begaline integralinių lygčių eilute:

$$T(r, t) = T_R(t) + \frac{2}{r} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi r}{R} \cdot \int_0^r \frac{1}{R(\tau) \cdot \rho \cdot c_p} q_r(r, \tau) \times \left(\sin \frac{n\pi r}{R} - \frac{n\pi r}{R} \cos \frac{n\pi r}{R} \right) \cdot dr + (-1)^n \frac{R(\tau) dT_R(\tau)}{n\pi d\tau} \cdot \exp \left[-a \cdot \left(\frac{n\pi}{R} \right)^2 \cdot (t - \tau) \right] \cdot d\tau, \quad (5)$$

kurioje lašelio paviršiaus temperatūra ir jos kitimo tempas yra apibrėžti (4) sąlyga. Apskaičiavus iš (5) išraiškos nestacionariojo temperatūros lauko gradientą bei efektyvioju šilumos laidžio koeficientu atsižvelgus į galimą vandens cirkuliaciją lašelyje: $\lambda_{L, ef} \equiv \lambda_L \cdot k_c^-$ [6], apibrėžiamas suminio šilumos srauto lašelyje konvekcinis sandas:

$$q_c^-(\tau) = -\lambda_{L, ef} \cdot \left. \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right|_{r=R}. \quad (6)$$

Iš dūmų pusės lašeliui teikiamos šilumos suminio srauto tankio konvekcinis sandas:

$$q_c^+(\tau) = \lambda_{gd}(\tau) \frac{Nu_f(\tau)}{2R(\tau)} \cdot [T_d - T_R(\tau)]. \quad (7)$$

Lašelio paviršiuje vykstantys faziniai virsmai turi įtakos konvekciniio šildymo intensyvumui. Nuo garuojančio lašelio sklindantis garas priešinasi karštų dujų pritekėjimui prie lašelio paviršiaus, todėl išauga šiluminio pasienio sluoksnis [7] ir garuojančio lašelio konvekciniio šildymo intensyvumas, lyginant su kietos dalelės analogiško šildymo atveju, sumažėja. Skysčio garavimo įtaka tradiciškai įvertinama į kietos dalelės konvekciniio šildymo empirines formules įtraukiant Spoldingo šilumos pernešimo parametro funkcijas [6, 7]:

$$\text{Nu}_{f=fg}(\tau) = \text{Nu}(\tau) \cdot f[B_T(\tau)]. \quad (8)$$

Negaruojančios dalelės konvekciniio šildymo modeliai aptarti [8]. Lašelio fazinių virsmų modeliuose populiaros klasikinė $f(B_T) = B_T^{-1} \cdot \ln(1 + B_T)$ bei eksperimentinės koreliacijos $f(B_T) = (1 + B_T)^{-0.7}$ pataisos bei jas jungiantis Abramzono–Sirignano modelis: $\text{Nu}_j = [2 + F_T^{-1} \cdot (\text{Nu} - 2)] \cdot B_T^{-1} \cdot \ln(1 + B_T)$; $F_T = (1 + B_T)^{0.7} B_T^{-1} \cdot \ln(1 + B_T)$ [9].

Link lašelio paviršiaus sklindantis skysčio garo srautas kondensaciniio fazinių virsmų režimo atveju sudarys palankesnes sąlygas lašelio konvekciniio šildymui. Daroma prielaida, jog tokio pat intensyvumo skysčio garo srautas garavimo ir kondensacijos atvejais sukels kiekybiškai analogišką poveikį lašelio konvekciniio šildymo intensyvumui, tačiau kondensaciniio fazinių virsmų režime konvekciniio šildymą spartins:

$$\text{Nu}_{f=ko}(\tau) \cdot f[B_T(\tau)] = \text{Nu}(\tau). \quad (9)$$

Pusiausvirai garuojančiam ir laidumu šildomam lašeliui Spoldingo šilumos pernašos parametras aprašomas klasikine išraiška [10]:

$$B_T = \frac{c_{p,gd} \cdot (T_d - T_R)}{L}. \quad (10)$$

Lašelio fazinių virsmų kitomis sąlygomis naudojama modifikuota Spoldingo šilumos pernašos parametro išraiška:

$$B_{T,f}^m = \frac{C_{p,gd} \cdot (T_d - T_R)}{L - \frac{q}{m}}, \quad (10a)$$

kurioje q/m santykiu atsižvelgiama į lašelio šildymo bei jo paviršiuje vykstančių fazinių virsmų ypatumus, šilumos srauto q tankį suprantant kaip fazinių virsmų energinio srauto tankį, susilpnintą išorinės šilumos konvekcijos srauto tankiu:

$$q \equiv q_f^+ - q_c^+. \quad (11)$$

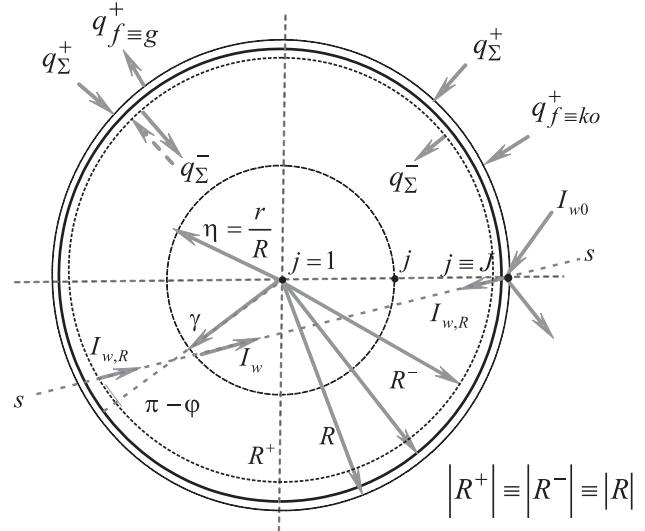
Garų srauto tankį lašelio paviršiuje atspindi fazinių virsmų energijos srauto tankio ir skysčio garavimo šilumos santykis:

$$m_g^+ \equiv \frac{q_f^+}{L}. \quad (12)$$

Atsižvelgus į (11) ir (12) išraiškas, konkretizuojama modifikuoto Spoldingo šilumos pernašos parametro (10a) išraiška:

$$B_{T,f}^m = \frac{c_{p,gd} \cdot (T_d - T_R)}{L \cdot \left(1 - \frac{q_f^+ - q_c^+}{q_f^+}\right)} \equiv B_T \cdot \frac{q_f^+}{q_c^+}. \quad (13)$$

Garavimo režime fazinių virsmų energinio srauto $q_{f=fg}^+$ tankį (1 pav.) nusako suminių šilumos srautų tankių skirtumas lašelio paviršiaus išorinėje ir vidinėje pusėse:



1 pav. Energijos srautų lašelio paviršiuje schema

$$\begin{aligned} q_{f=fg}^+ &\equiv q_{\Sigma}^+ - q_{\Sigma}^- = q_r^+ + q_c^+ - q_r^- - \\ &- q_c^- \equiv q_c^+ - q_c^- = q_c^+ - \lambda_{L,ef} \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R^-}. \end{aligned} \quad (14)$$

(14) išraiškoje atsižvelgta, jog pusskaidrio skysčio lašelis spinduliuotę sugeria tūriu, todėl spinduliuotės srautas lašelio paviršiaus terminės būsenos tiesiogiai neveikia. Tačiau jo įtaka pasireiškia nestacionariojo temperatūros lauko lašelyje deformacijų sukeltais gradiento pokyčiais [1–3]. Atsižvelgus į (14), modifikuotas Spoldingo šilumos pernašos parametras lašelio garavimo režime aprašomas išraiška:

$$B_{T,f=fg}^m \equiv B_T \cdot \left(1 - \frac{q_c^-}{q_c^+}\right). \quad (15)$$

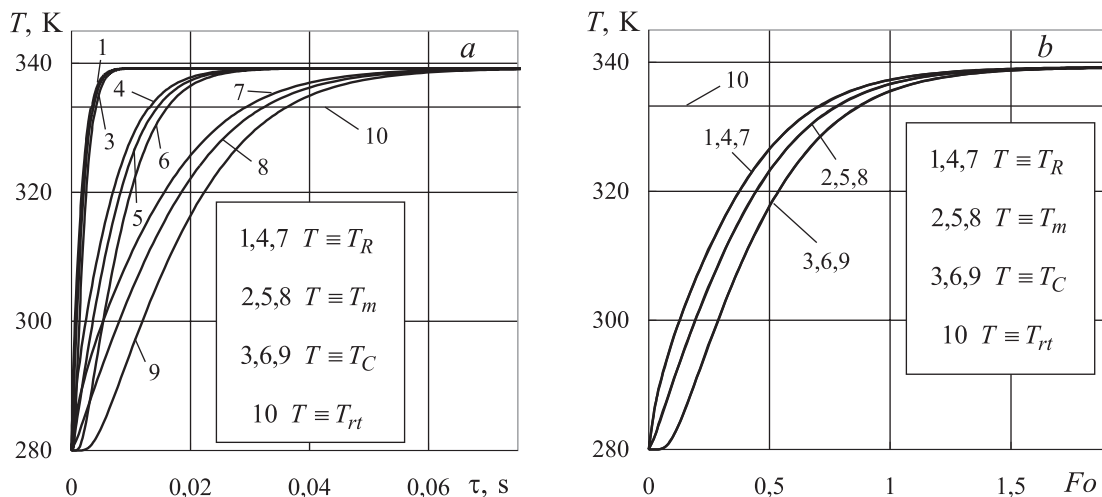
Kondensacijos režime fazinių virsmų energinio srauto $q_{f=ko}^+$ tankį (1 pav.) nusako suminių šilumos srautų tankių skirtumas lašelio paviršiaus vidinėje ir išorinėje pusėse:

$$\begin{aligned} q_f^+ &\equiv q_{\Sigma}^- - q_{\Sigma}^+ = q_r^- + q_c^- - q_r^+ - \\ &- q_c^+ \equiv q_c^- - q_c^+ \equiv \lambda_{L,ef} \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R^-} - q_c^+. \end{aligned} \quad (16)$$

Tuomet lašelio paviršiuje vykstant skysčio garo kondensacijai modifikuotas Spoldingo šilumos pernašos parametras aprašomas išraiška:

$$B_{T,f=ko}^m \equiv B_T \cdot \left(\frac{q_c^-}{q_c^+} - 1\right). \quad (17)$$

(1–17) algebrinių ir integralinių lygčių sistemos skaitinio sprendimo schema sudaroma numatytą lašelio šildymo t trukmę padalijus į baigtinių skaičių τ_i tarpinių verčių, o bematę lašelio koordinatę $\eta_j \equiv r_j/R$ skaidant į baigtinių skaičių tarpinių $\Delta\eta_j = \eta_{j+1} - \eta_j$ intervalų. Vykdomi iteraciniai skaičiavimai šylančio lašelio paviršiaus temperatūrą atrenkant greičiausio nusi-



2 pav. Vandens lašelių šilimas drėgnuose dūmuose realiaime laike (a) ir Furje kriterijumi išreikštoje trukmėje (b). $R_0 \cdot 10^6$, m: (1–3) 25, (4–6) 50, (7–9) 75; $\bar{p} \equiv p_{g,\infty} / p = 0,2$, $T_d = 500$ K

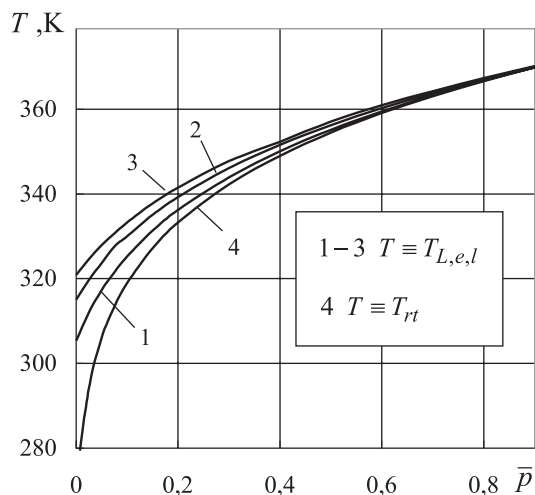
leidimo metodu ir reikalaujant (4) sąlygos tenkinimo šimtosios procento tikimybe. Kontroluojami laiko kitimo $\Delta\tau_i = \tau_i - \tau_{i-1}$ žingsniai, kad juose būtų užtikrintas šylančio lašelio masės vidutinės temperatūros pokytis iki 1 K. Determinuojant lašelio paviršiaus temperatūros kitimą aprašančią $T_R(\tau)$ funkciją, panaudojami iteracinės schemos privalumai: k -ajai iteracijai atlikti reikalingiems, tačiau dar nežinomiems, lašelio šilumos ir masės mainų (SMM) parametrų priskiriamos ankstesnėje iteracijoje apskaičiuotosios jų reikšmės: $SMM_{i,k} \equiv SMM_{i,k-1}$, o po to $SMM_{i,k}$ parametrai patikslinami pagal apskaičiuotąją $T_{R,i,k}$ temperatūrą. Skaitinės schemos stabilumui daroma prielaida: $R_{i,k} \equiv R_{i-1}$.

3. TYRIMO REZULTATAI

Vandens lašelių šildymas laidumu modeliuotas teigiant, jog juos dūmų srautas neša be slydimo. Teigta, jog vandens lašelių šilimas ir jų paviršiuje vykstantys faziniai virsmai dūmų temperatūros ir drėgnumo nepakeičia. Skaitinio eksperimento metu kontroliuojamas energijos srautų lašelio paviršiuje disbalansas. Kad atitiktų (4) sąlygą šimtosios procento tikimybe, teko atsižvelgti į šylančio lašelio paviršiaus temperatūros tūkstantosios laipsnio eilės pokyčius. Vandens sočiojo garo slėgiui lašelio paviršiuje aprašyti taikyta Gerry empirinė koreliacija [11].

Laidumu šildomuose lašeliuose galimas tik teigiamo gradiento nestacionarusis $T(r, \tau)$ temperatūros laukas, ryškiai kintantis nestacionariųjų fazinių virsmų metu ir artimas izotermiškam pusiausviro garavimo metu (2 pav.). Pusiausviro garavimu suprantame fazinių virsmų režimą, kuomet lašeliui teikiama šiluma tik garina vandenį. Lašelių paviršiuje vykstančių nestacionariųjų fazinių virsmų periode ryškiai išsiskiria kondensacinis ir garavimo režimai. Kondensacinio fazinių virsmų režimo metu lašeliai pašyla iki rasos taško temperatūros. Fazinių virsmų režimo kaitą iš kondensacinio į garavimo režimą skirtingo stambumo lašeliams atspindi jų paviršiaus temperatūros kitimo 1, 4 ir 7 kreivių susikirtimo su rasos taško temperatūros 10 kreive momentai (2 pav.). Nestacionariojo garavimo režimo atveju dūmuose laidumu šildomi vandens lašeliai, nepaisant jų stambumo, pašyla iki pusiausviro garavimo sąlygas atitinkančios temperatūros. Pusiausviro garuojančių laidumu šildomų lašelių

$T_{L,e,l}$ temperatūrą sąlygoja dūmų temperatūra ir jų drėgnumas (3 pav.). Kondensacinio režimo atveju sparčiai šyla paviršiniai lašelių sluoksniai. Prasidėjus nestacionariojo garavimo režimui, lašelių paviršinių sluoksnių šilimas sulėtėja ir neizotermiškumas juose mažėja.



3 pav. Rasos taško temperatūros bei laidumu šildomų vandens lašelių pusiausviro garavimo temperatūros priklausomybė nuo dūmų drėgnumo. T_d K: (1) 400, (2) 500, (3) 600

Platus skaitinis eksperimentas ir visapusiška jo rezultatų analizė leidžia teigti, jog laidumu šildomų lašelių terminės būsenos kitimas Furje kriterijumi išreikštame laiko mastelyje, nepaisant fazinių virsmų režimo, yra identiškas (2 pav. b), nors realiaime laike skirtingo skersmens lašelių nestacionariųjų fazinių virsmų režimo trukmės ryškiai skiriasi (2 pav. a). Taigi laidumu šildomų lašelių terminės būsenos kitimą galima apibrėžti lašelių paviršiaus ir centro temperatūrų bei jų masės vidutinės temperatūros kitimo būdingomis $T_R(Fo)$, $T_C(Fo)$ bei $T_{L,m}(Fo)$ kreivėmis (2 pav. b), kurių egzistavimas rodo nestacionariojo temperatūros lauko automodeliškumą. Lašelio masės vidutinės temperatūros kitimo tempas, išreikštas $\partial T_{L,m}(Fo) / \partial Fo$ funkcija, atspindi visų išpurkšto vandens lašelių terminės būsenos kitimo

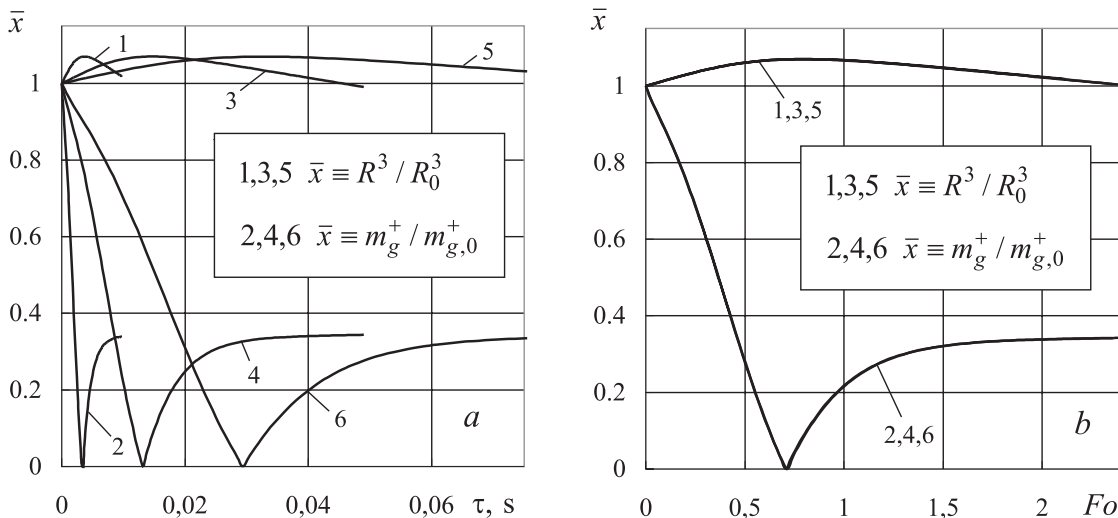
intensyvumą. $T_R(Fo)$ funkcija, kartu su rasos taško temperatūros $T_{rt}(Fo)$ funkcija, apibrėžia universalią kondensacinio fazinių virsmų režimo Fo_{ko} trukmę. $T_R(Fo)$ funkcija kartu su pusiausviro garavimo temperatūros $T_{L,e,l}(Fo)$ funkcija apibrėžia universalią nestacionariųjų fazinių virsmų režimo Fo_e trukmę. Lašelių paviršiaus ir centro temperatūrų skirtumo $T_R(Fo) - T_C(Fo)$ funkcija atspindi šylančių lašelių universalų neizotermiškumą, kuris gali lemti vandens natūralios cirkuliacijos kilimą.

Drėgnuose dūmuose išpurkštų vandens lašelių tūrio kitimą lemia jų paviršiuje vykstantys faziniai virsmai ir skysčio plėtimasis lašelio šilimo metu (4 pav.). Fazinių virsmų spartą nusako vandens garo srauto tankio dinamika lašelio paviršiuje, kuri skirtingo stambumo lašeliams yra savita (4 pav. 2, 4, 6 kreivės). Pradžioje lašelių paviršiuje vyksta intensyvi drėgnuose dūmuose esančio vandens garo kondensacija, lašeliams šylant ji sparčiai slopsta. Fazinių virsmų lašelių paviršiuje režimo kaitos momentu garo srauto tankio modulis pereina nulinę vertę ir jo vektorius pakeičia kryptį. Tuomet nuo lašelių paviršiaus pradeda garuoti vanduo. Jo garavimo intensyvumas sparčiai auga (4 pav.). Šie fazinių virsmų ypatumai ryškiai atsispindi šiluminės energijos lašelių paviršiuje srautų dinamikoje (5 pav.). Vandens garo kondensacijos metu lašelio paviršiuje išsiskyrusi fazinių virsmų šiluma bei išorinio konvekcinio šildymo šiluma lemia vandens lašelyje šilimą, kurio intensyvumą nusako šilumos laidumo srauto lašelyje tankis: $q_l^-(\tau < \tau_{ko}) \equiv q_l^+(\tau) + q_{f=ko}^+(\tau)$. Pastarojo vertei ryškus lašelio stambumo faktorius ir ji didžiausia kondensacijos pradžioje, vėliau sparčiai slopsta (5 pav. a 3, 6 kreivės). Fazinių virsmų kaitos iš kondensacijos į garavimo režimą momentu šilumos laidumo srauto lašelyje kitimo kreivė kerta išorinės šilumos konvekcijos srauto kitimo kreivę: $q_l^-(\tau \equiv \tau_{ko}) \equiv q_l^+(\tau \equiv \tau_{ko})$, ir nuo šio momento lašelį šildo tik vandens garavimo procese nedalyvaujanti išorinės šilumos konvekcijos srauto dalis: $q_l^-(\tau > \tau_{ko}) \equiv q_l^+(\tau) - q_{f=g}^+(\tau)$. Nuosekliai mažėdamas, šilumos laidumo srauto tankis lašelyje pasiekia nulinę vertę: $q_l^-(\tau \equiv \tau_e) \equiv 0$, o fazinių virsmų šilumos srauto kreivė susilieja su išorinės šilumos konvekcijos srauto kreive. Tuomet vandenį pradeda garinti visas išorinės šilumos konvekcijos srautas:

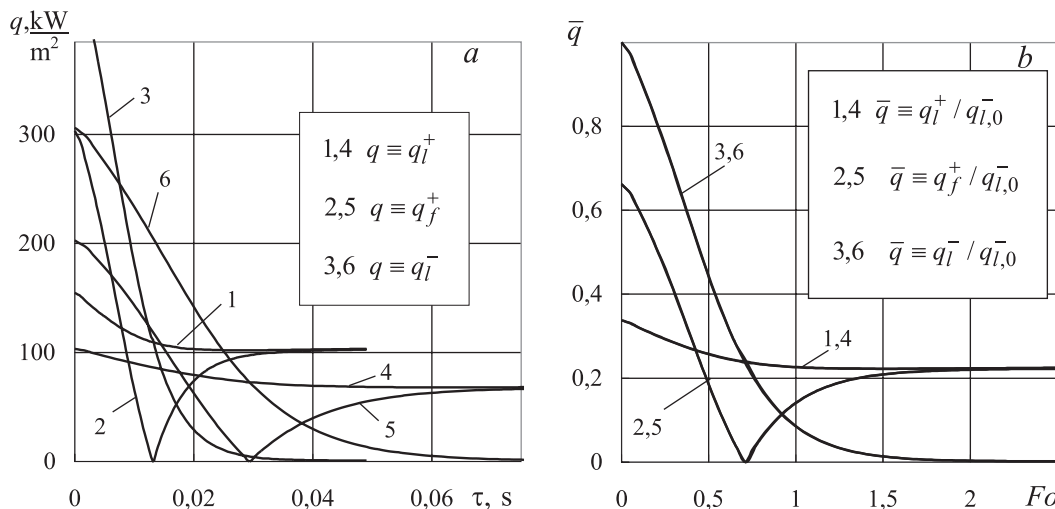
$q_{f=g}^-(\tau > \tau_e) \equiv q_l^+(\tau)$, ir prasideda pusiausviro garavimo režimas. Vandens garo kondensacija bei šylančio vandens plėtimasis lemia juntamą lašelių tūrio augimą (4 pav. 1, 3, 5 kreivės). Pasibaigus kondensaciniam režimui lašeliai dar šyla, todėl jų tūris toliau auga, kol vandens plėtimosi įtaka dar stipresnė už vandens garavimo efektą. Garavimo faktoriui imant viršų, lašelių tūrio kitimo kreivėse stebimas ekstremumo taškas. Pastebėta, jog Furje kriterijumi išreikštoje trukmėje laidumu šildomų lašelių fazinių virsmų intensyvumą bei tūrį, juos sunormavus pradinį verčių atžvilgiu, galima aprašyti būdingosiomis atitinkamai $m_g^+(Fo) / m_{g,0}^+$ ir $R^3(Fo) / R_0^3$ kreivėmis (4 pav. b). Spėjama, jog laidumu šildomų lašelių terminės būsenos dinamikos bei fazinių virsmų parametrų dinamikos būdingųjų kitimo kreivių egzistavimas galimas tik esant energijos srautų ekvivalentiškumui skirtingo stambumo lašelių paviršiuje. Siekiant sudaryti energijos srautų lašelio paviršiuje kitimo būdingąsias kreives, iškyla normuojančio parametro pasirinkimo problema. Pastebėta, jog patogiausią analizei normuotų energijos srautų kitimo nestacionariųjų fazinių virsmų eigoje 0–1 intervalą užtikrina pradinio šilumos srauto tankio lašelyje normuojanti reikšmė (5 pav.b). Matyti, jog didesnę vandens garo kondensacijos proceso trukmės dalį lašelio paviršiuje išsiskyrusi fazinių virsmų šiluma vyrauja prieš išorinės konvekcijos šilumą. Ji pradinėje kondensacijos proceso stadijoje sudaro per 60% lašeliams suteikiamos šilumos.

Furje $Fo_{ko,l}$ kriterijumi išreikšta vandens garo kondensacijos lašelių paviršiuje trukmė yra vienoda visiems vandens lašeliams, kuomet jie šildomi laidumu vienodomis išpurškimo temperatūra bei dujų parametrais apibrėžtomis šilumos ir masės mainų sąlygomis. Norint įvertinti minėtų parametrų įtaką vandens garo kondensacijos procesui, patogu naudoti Furje kriterijų $Fo / Fo_{ko,l} \equiv \bar{Fo}$ santykiu išreikštą universalios 0–1 kondensacijos trukmės mastelį.

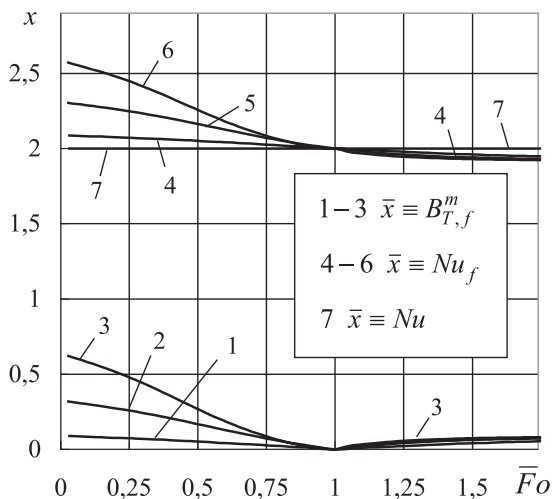
Vandens garo kondensacija lašelių paviršiuje yra palanki jų konvenciniam šildymui ir pastarąjį juntamai sustiprina: $Nu_{f=ko} > Nu$ (6 pav.). Čia labai ryški dūmų drėgnumo įtaka, lemianti savitą Spoldingo šilumos pernašos parametro kitimą



4 pav. Drėgnuose dūmuose šylančio vandens lašelio tūrio bei vandens garo srauto tankio jo paviršiuje kitimas realiaime laike (a) ir Furje kriterijumi išreikštoje trukmėje (b). $R_0 \cdot 10^6$ m: (1, 2) 25, (3, 4) 50, (5, 6) 75; $m_{g,0}^+$ kg/(m² s): (2) 0,255, (4) 0,127, (6) 0,085; $\bar{p} = p_{g,\infty} / p = 0,2$; $T_d = 500$ K; $T_{l,0} = 280$ K

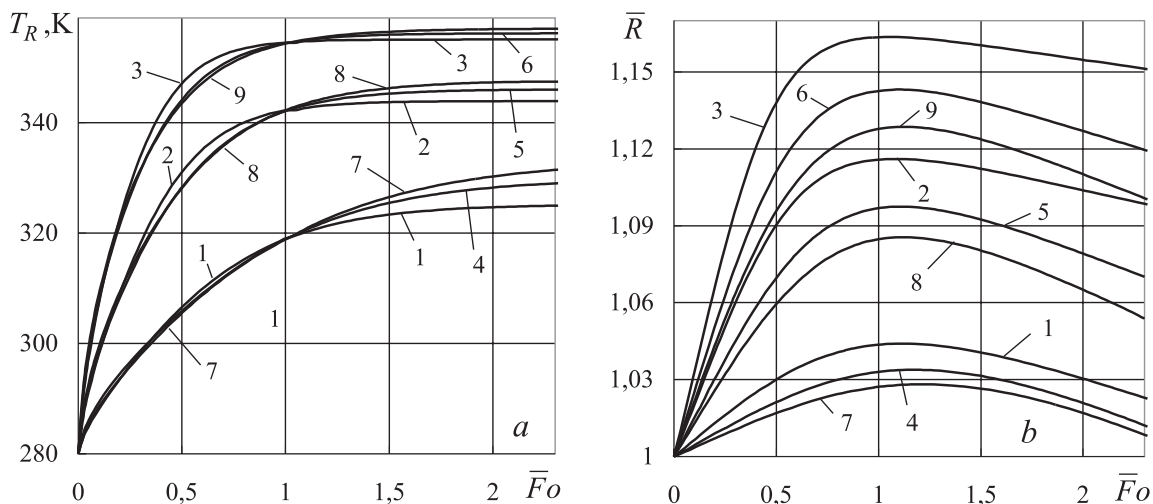


5 pav. Energijos srautų kitimas drėgnuose dūmuose šylančio vandens lašelio paviršiuje realiaime laike (a) ir Furje kriterijumi išreikštoje trukmėje (b) nestacionariųjų fazinių virsmų režimo atveju. $R_0 \cdot 10^6 \text{ m} : (1-3) 50, (4-6) 75$; $\bar{p} \equiv p_{g,\infty} / p = 0,2$; $T_d = 500 \text{ K}$; $T_{L,0} = 280 \text{ K}$

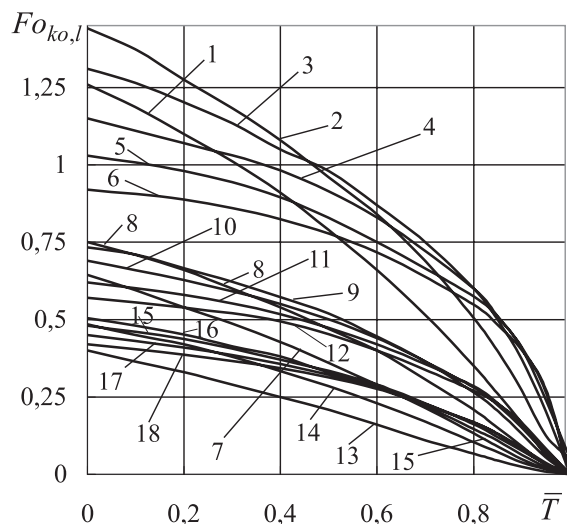


6 pav. Drėgnuose dūmuose šylančių vandens lašelių konvekcinio šildymo intensyvumo kitimas. $\bar{p} : (1, 4) 0,1; (2, 5) 0,3; (3, 6) 0,5; T_d = 500 \text{ K}$

(6 pav. 1–3 kreivės). Fazinių virsmų kaitos momentu vandens lašelių konvekcinio šildymo intensyvumo kitimo (4–6) kreivės kerta kietosios dalelės konvekcinio šildymo intensyvumo kitimo (7) kreivę (6 pav.). Garavimo režime $Nu_{f,fg} < Nu$. Laidumu šildomų lašelių šilumos ir masės mainų parametru kitimo būdingąsias kreives veikia dūmų temperatūra ir drėgnumas (7 pav.). Lašelių terminę būseną aprašančios temperatūros kitimo būdingosios kreivės kondensacinio fazinių virsmų režimo atveju esminė yra dūmų drėgnumo įtaka, tačiau dūmų temperatūrai jos nėra jautrios (7 pav. a). Tuo tarpu fazinių virsmų spartai ir lašelių tūrio kitimui ryškus abiejų minėtų dujų parametru poveikis (7 pav. b). Dūmuose sukauptos fazinių virsmų šilumos optimaliam utilizavimui vandens įpurškimu svarbu tinkamai kontroliuoti vandens garo kondensacijos proceso trukmę. Kondensacijos proceso lašelių paviršiuje trukmę ne tik sąlygoja dūmų parametrai, bet ir lemia įpurškiamo vandens temperatūra. Visiems laidumu šildomiems vandens lašeliams universali vandens garo kondensacijos jų paviršiuje trukmė pateikta 8 pav.



7 pav. Drėgnuose dūmuose šylančių vandens lašelių tūrio (a) bei jų paviršiaus temperatūros kitimo charakteringų kreivių priklausomybė nuo dūmų temperatūros ir drėgnumo. $T_d \text{ K} : (1-3) 400, (4-6) 500, (7-9) 600$; $\bar{p} : (1, 4, 7) 0,1; (2, 5, 8) 0,3; (3, 6, 9) 0,5$



8 pav. Kondensacinio fazinių virsmų režime vandens lašelių paviršiuje universalios trukmės diagrama. T_d K: (1–6) 400, (7–12) 500, (13–18) 600; p –: (1, 7, 13) 0,05; (2, 8, 14) 0,1; (3, 9, 15) 0,2; (4, 10, 16) 0,3; (5, 11, 17) 0,4; (6, 12, 18) 0,51; $\bar{T} = 1 - (T_n - T_{L,0}) / (T_n - 273,15)$.

diagrama, priklausanti nuo dūmų temperatūros ir drėgnumo bei rasos taško temperatūros atžvilgiu normuotos įpurškiamo vandens temperatūros.

Pagal nukrypimą nuo būdingųjų kreivių, atspindinčių begalinio skaičiaus skirtingo stambumo lašelių terminės būsenos ir fazinių virsmų parametrų kitimą lašelius šildant laidumu, galima įvertinti sudėtingesnių už šildymą laidumu šilumos ir masės mainų sąlygų įtaką drėgnuose dūmuose vykstančiai sudėtinės šilumos ir masės pernašos procesų sąveikai. Tai tolesnio tyrimo tematika.

4. IŠVADOS

1. Kondensaciniame fazinių virsmų režime lašelius šildo išorinė šilumos konvekcija (neslystančių lašelių atveju – šilumos laidumas) ir fazinių virsmų energijas. Visa lašelio paviršiumi suteikta šiluminė energija šilumos konvekcija (vandeniui lašelyje necirkuliuojant – laidumu) nuvedama į lašelį: $q_c^- \equiv q_c^+ + q_{f=ko}^+$.

2. Pradinėje fazinių virsmų stadijoje kondensacinės šilumos srautas vyrauja, palyginti su išorinės konvekcijos šilumos srautu. Vėliau fazinių virsmų kondensacinės šilumos srautas sumažėja iki nulinės reikšmės, o nestacionariojo garavimo metu fazinių virsmų energinis srautas auga ir palaipsniui pasiekia išorinės konvekcijos šilumos srauto reikšmę. Tai įvyksta pusiausviros garavimo pradžios momentu.

3. Nors energijos srautų kitimas kondensacinio ir garavimo režimų atvejais yra ryškiai savitas ir kiekybiškai priklauso nuo lašelio stambumo, tačiau Furje kriterijumi išreikštoje trukmėje jų kitimą galima aprašyti būdingosiomis kreivėmis. Tam reikia pavartoti normuojantį parametą, kuriuo gerai tarnauja šilumos konvekcijos lašelyje šilumos srauto pradinė reikšmė, o proceso trukmę išreikšti Furje kriterijumi apibrėžtame laiko mastelyje.

4. Energijos srautų kitimo ekvivalentiškumas skirtingo stambumo lašeliuose juos šildant laidumu sudaro prielaidas lašelių terminę būseną ir fazinius virsmus aprašančių būdingųjų kitimo

kreivių egzistavimui. Pastarosios galioja visai lašelių egzistavimo trukmei, nepaisant fazinių virsmų jų paviršiuje režimo kaitos.

5. Išryškintos laidumu šildomų lašelių terminės būsenos bei šilumos ir masės mainų parametrų kitimą aprašančios būdingosios kreivės įgalina optimaliai atlikti palyginamąjį sudėtingesnių už šildymą laidumu šilumos ir masės mainų sąlygų išpurkšto skysčio sistemose vertinimą.

Žymėjimai

a – temperatūros laidumo koeficientas m^2/s ; B_T – Spoldingo šilumos pernešimo parametras; c_p – savitoji šiluma $J / (K \text{ kg})$; D – difuzijos koeficientas m^2/s ; Fo – Furje kriterijus; g – srautas kg/s ; I_{ω} – spektrinis spinduliuotės intensyvumas $W/(m \text{ ster})$; $I_{\omega 0}$ – absoliučiai juodo kūno spektrinis spinduliuotės intensyvumas $W/(m \text{ ster})$; L – garavimo šiluma J/kg ; M – masė kg ; m – garo srauto tankis $kg/(m^2 \cdot s)$; 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 $J / (kmol \text{ K})$; r – lašelio koordinatė m ; t – kontrolinis laikas s ; T – temperatūra K ; s – laisvai parinkta kryptis m ; $\eta = r/R$ – bematė koordinatė; λ – šilumos laidžio koeficientas $W/(K \text{ m})$; μ – molekulinė masė $kg/kmol$; ρ – tankis kg/m^3 ; τ – laikas s .

Indeksai apačioje: c – konvekcija; C – lašelio centras; ch – charakteringas; d – dujos; e – pusiausvros garavimas; f – faziniai virsmai; g – garavimas, gd – garo ir dujų mišinys; k – iteracijos indeksas; ko – kondensacija; L – skystis; l – laidumas; m – masės vidutinis; R – lašelio paviršius; r – spinduliuotė; rt – rasos taškas; s – sočioji būseną; Σ – suminis; 0 – pradinė būseną; ∞ – toli nuo lašelio.

Indeksai viršuje: m – modifikuotas; $+$ – išorinė lašelio paviršiaus pusė; $-$ – vidinė lašelio paviršiaus pusė.

Gauta 2008 07 03

Priimta 2008 07 25

Literatūra

1. Miliauskas G., Sabanas V. Interaction of transfer processes during unsteady evaporation of water droplets // Int. J. Heat Mass Transfer. 2006. Vol. 49. P. 1790–1803.
2. Miliauskas G. Regularities of unsteady radiative-conductive heat transfer in evaporating semitransparent liquid droplets // Int. J. Heat Mass Transfer. 2001. Vol. 44. P. 785–798.
3. 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. Heat Mass Transfer. 2008, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer. 16 p.
4. Шорин С. Н. Теплопередача. Москва: Высшая школа, 1964.
5. Кузиковский А. В. Динамика сферической частицы в мощном оптическом поле // Известия ВУЗ, Физика. 1970. Т. 5. С. 89–94.
6. Abramzon B., Sirignano W. A. Droplet vaporization model for spray combustion calculations // Int. J. Heat Mass Transfer. 1989. Vol. 32. N 9. P. 1605–1618.

7. Renksizbulut M., Yuen M. C. Численное исследование испарения капель в высокотемпературном потоке // Теплопередача. 1983. Т. 105. С. 149–158.
8. Niazmand H., Renksizbulut M. Transient three-dimensional heat transfer from rotating spheres with surface blowing // Chem. Engng. Sci. 2003. Vol. 58. P. 3535–3554.
9. Sazhin S. S. Advanced models of fuel droplet heating and evaporation // Progress in Energy and Combustion Science. 2006. Vol. 32. P. 162–214.
10. Renksizbulut M., Nafziger R, Li X. A mass transfer correlation for droplet evaporation in high-temperature flows // Chem. Engng. Sci. 1991. Vol. 46. P. 2351–2358.
11. Vukalovitch M. P. Thermodynamic properties of water and steam. Berlin: VEB Verlag TECHNIK, 1958.

Giedrius Miliauskas, Gintautas Miliauskas, Romualdas Montvilas

CONDENSATION GROWTH AND HEATING DROPLETS IN HUMIDITY SMOKE

Summary

The variation of the thermal state of droplets and their condensational growth in humid flue gas was modelled in order to highlight optimal conditions for utilization of phase transformation heat accumulated in these droplets using water spraying. It has been determined that the intensity of liquid vapour condensation at the droplet surface and its duration are influenced by the temperature of sprayed water and droplet dispersity as well as by flue gas temperature and humidity. Time scale expressed through the Fourier criterion is convenient for exploration of the influence of boundary heat and mass transfer conditions, as droplets' thermal state and water vapour condensation parameters change identically for all droplets in the time scale expressed through the Fourier criterion, according to characteristic curves when these

droplets receive thermal energy from flue gas through conduction, and the initial heat and mass transfer conditions determined by the parameters of water spray and flue gas are uniform for all droplets. Heating of droplets is more intensive in the condensational phase transformation mode, comparing with the case of an analogous solid particle.

Key words: humidity smoke, water droplet, condensation grow and heating, interaction of transfer processes

Гедрюс Миляускас, Гинтаутас Миляускас, Ромуалдас Монтвилас

КОНДЕНСАЦИОННЫЙ РОСТ И НАГРЕВ КАПЕЛЬ ВО ВЛАЖНОМ ДЫМОВОМ ГАЗЕ

Резюме

Смоделировано изменение термического состояния и конденсационный рост капель во влажном дымовом газе с целью выявить в нем оптимальные условия для утилизации теплоты фазовых превращений путем распыления воды. Установлено, что на интенсивность конденсации паров жидкости на поверхности капель и на ее продолжительность влияют температура впрыскиваемой воды, дисперсность капель, а также влажность и температура дымового газа. Для выявления влияния граничных условий тепло- и массообмена удобно использовать масштаб времени критерия Фурье, поскольку в этом случае термическое состояние капель и параметры процесса конденсации паров жидкости для всех капель изменяются идентично по характерным кривым, если тепловую энергию капли от дымового газа получают теплопроводностью и если граничные условия тепло- и массообмена, обусловленные параметрами распыляемой воды и дымового газа, для всех капель одинаковы. В конденсационном режиме фазовых превращений капли нагреваются интенсивнее твердой частицы.

Ключевые слова: влажный дым, капля воды, конденсационный рост и нагрев, взаимодействие процессов переноса