



## DRĖGNOSE DUJOSE ŠYLANČIŲ VANDENS LAŠELIŲ ŠILUMOS IR MASĖS MAINAI PEREINAMŲJŲ FAZINIŲ VIRSMŲ REŽIME

Monika MAZIUKIENĖ<sup>1</sup>, Gintautas MILIAUSKAS<sup>2</sup>

*KTU Šilumos ir atomo energetikos katedra*

*El. paštas: <sup>1</sup>monika.maziukiene@ktu.lt; <sup>2</sup>gintautas.miliauskas@ktu.lt*

**Anotacija.** Įvairiai technologinei praktikai svarbus lašelių šilumos ir masės mainų pažinimas. Darbe skaitiškai sumodeliuotas skirtingo dispersiškumo vandens lašelių šilimas ir faziniai virsmai drėgname ore. Išskirtinis dėmesys skirtas kondensaciniam ir pereinamojo garavimo režimams. Lašelių temperatūros kitimas apibrėžtas pagal iteracinę skaitinę schemą, kuri grįsta prie lašelio paviršiaus pritekančių ir nutekančių šilumos srautų balansu. Atsižvelgta į pernašos procesų tarpusavio sąveiką. Lašelių fazinių virsmų režimus apibrėžiančiais parametrais įvardyta išpurškiamojo vandens temperatūra, oro temperatūra ir drėgnumas bei lašelių šildymo procesas. Įvertinta jų įtaka lašelių energinei būsenai bei faziniams virsmams.

**Reikšminiai žodžiai:** vandens lašeliai, drėgnos dujos, fazinių virsmų režimų ciklas.

### Įvadas

Skysčio išpurškimas turi didelę praktinio pritaikymo įvairovę. Jau tradicinėmis technologijomis laikomos skystojo kuro išpurškimo vidaus degimo varikliuose ir kūryklose (Seoksu 2016; Wang *et al.* 2016) bei vandens išpurškimo oro kondicionavimo sistemose technologijos (Mucke *et al.* 2016). Vandens išpurškimas taip pat pritaikomas įvairiems technologiniams procesams maisto (Feldung *et al.* 2017), farmacijos (Suzzi *et al.* 2010) bei elektrotechnikos pramonėje (Nistal *et al.* 2015). Didžioji dalis šių ir kitų skysčio išpurškimo technologijų grindžiamos sudėtiniais lašelių šilumos ir masės mainų procesais. Vienose jų svarbus vandens garo kondensacijos procesas, o kitose esminis yra skysčio išgarinimo procesas (Abramzon, Sirignano 1989).

Vandens išpurškimo procesas yra labai svarbus utilizuojant šilumą iš šalinamų biokuro dūmų ir kartu sprendžiant aplinkosaugines problemas, susijusias su šiluminio užterštumo mažinimu ir gamtos užteršimu kietosiomis dalelėmis ir cheminiais junginiais. Plėtojant ekonomiškai darnias biokuro degimo technologijas, ne tik gerinami ekonominiai katilinių našumo rodikliai, bet ir mažinamas aplinkos šiluminis ir cheminis užterštumas (Miliauskas *et al.* 2016). Siekiant išvengti aplinkos užterštumo kietosiomis dalelėmis bei įvairiais oksidais, labai svarbiu procesu tampa dūmų valymas vandeniu disperguotu pavidalu.

Šalinamų dūmų valymo proceso metu utilizuojama vandens garo fazinių virsmų šiluma. Tiesioginiu vandens išpurškimu į biokuro šalinamus dūmus grindžiamos kontaktinių kondensacinių ekonomazerių technologijos, kuriose vandens garas kondensuojamas tiesiog ant vandens lašelių ir juo pašildomas. Čia iškyla lašelių paviršiaus temperatūros kontrolės problema, kad lašeliai nepašiltų aukščiau rasos taško temperatūros ir garuodami vėl nepridrėkintų dūmų.

### Pažymėjimų sąrašas

$a$  – temperatūros laidumo koeficientas,  $m^2/s$ ;  $B_T$  – Spoldingo šilumos pernašos parametras;  $c_p$  – savitoji šiluma,  $J/(kg \cdot K)$ ;  $D$  – vandens garo difuzijos koeficientas dujose,  $m^2/s$ ;  $k_c^-$  – efektyvusis šilumos laidumo parametras;  $Fo$  – Furje kriterijus;  $L$  – fazinių virsmų šiluma,  $J/kg$ ;  $m_g$  – garo srauto tankis,  $kg/(m^2 \cdot s)$ ;  $M$  – molekulinė masė,  $kg/kmol$ ;  $Nu$  – Nuselto kriterijus;  $n$  – nario indeksas begalinėje sumoje;  $p$  – slėgis, Pa;  $P$  – lašelio šilumos ir masės mainų bemačio parametro bendrasis žymėjimas;  $q$  – šilumos srautas,  $W/m^2$ ;  $r$  – lašo radialinė koordinatė, m;  $R$  – lašo spindulys, m;  $Re$  – Reinoldso kriterijus;  $R_\mu$  – universalioji dujų konstanta,  $J/(kmol \cdot K)$ ;  $Pr$  – Prandtlio kriterijus;  $T$  – temperatūra, K;  $w$  – greitis, m/s.

*Specialūs simboliai*  $\eta$  – bematė radialinė koordinatė;  $\lambda$  – šilumos laidžio koeficientas, W/(m K);  $\mu$  – dinaminės klampos koeficientas;  $\rho$  – tankis, kg/m<sup>3</sup>;  $\tau$  – laikas, s.

*Indeksai*  $c$  – konvekcija;  $f$  – faziniai virsmai;  $g$  – garas;  $d$  – dujos;  $gd$  – garo-dujų mišinys;  $it$  – iteracijos indeksas skaitinėje schemoje;  $I$  – kontrolinio laiko indeksas skaitinėje schemoje;  $J$  – lašelio paviršiaus radialinės koordinatės indeksas skaitinėje schemoje;  $ko$  – kondensacija;  $l$  – skystis;  $pf$  – pereinamasis fazinių virsmų režimas; + išorinė lašo paviršiaus pusė; – vidinė lašo paviršiaus pusė;  $\Sigma$  – suminis; 0 – pradinė būseną;  $\infty$  – toli nuo lašelio.

Rekuperacinių kondensacinių ekonomazerių technologijose vanduo išpurškiamas vamzdeliais tekančių biokuro drėgnų dūmų ir kondensato plėvelės hidrodinamikai pagerinti. Iki patekdami į vamzdelius vandens lašeliai iš dalies išgaruoja. Čia svarbu įvertinti papildomą dūmų pridrekinimą ir atausinimą, kad būtų galima apibrėžti į vamzdelių pluoštą įtekančių dūmų parametrus ir pradinį vamzdelių viduje tekančios plėvelės debitą. Taigi šilumos utilizavimo iš šalinamų biokuro drėgnų dūmų technologijoms svarbus įpurkšto vandens lašelių kondensacinio ir garavimo režimų pažinimas ir galimos jų kaitos įvertinimas.

Išpurkšto vandens lašelių šilumos ir masės mainų procesų sistemingai analizei atlikti lašelių paviršiuje vykstančius fazinių virsmų procesus patogiu pateikti fazinių virsmų režimų ciklu (Miliauskas 2014):

$$\tau \equiv 0 \div \tau_{ko} \div \tau_{pf} \div \tau_f. \quad (1)$$

Lašelio fazinių virsmų ciklo pradžią apibrėžia vandens įpurškimas į biokuro dūmus, sąlygiškai numatant  $\tau = 0$  prielaidą. Ciklo (1) fazinių virsmų režimus apibrėžia lašelio paviršiaus temperatūra. Kondensacinis režimas vyksta tol, kol lašelio paviršius pašyla iki rasos taško temperatūros. Laikas  $\tau_{ko}$  apibrėžia kondensacinio režimo trukmę ir nusako laiko  $\tau = \tau_{ko}$  momentą, kuomet lašelio paviršiuje įvyksta fazinių virsmų režimo kaita iš kondensacijos į garavimą. Pereinamojo garavimo fazinių virsmų režime lašelis pašyla iki pusiausviro garavimo temperatūros. Laikas  $\tau_{pf}$  apibrėžia pereinamųjų į pusiausvirą garavimą fazinių virsmų trukmę ir nusako laiko  $\tau = \tau_{pf}$ , nuo kurio lašeliui teikiama visa šiluma pradeda garinti vandenį. Lašo paviršiaus temperatūros kitimą fazinių virsmų cikle (1) aprašančios  $T_R(\tau)$  funkcijos determinavimas yra raktas biokuro dūmuose išpurkšto vandens lašelių šilumokaitos ir masės mainų procesams apibrėžti.

Darbe sumodeliuotas į drėgno oro srautą įpurkšto vandens lašelių fazinių virsmų režimų ciklas. Didžiausias dėmesys skirtas pereinamųjų fazinių virsmų kondensacinį ir garavimo režimus apibrėžiantiems faktoriams išryškinti ir jų įtakai įvertinti.

## Metodika

Vandens garo kondensacija grindžiamose technologijose esminis yra dujų išsausinimą apibrėžiantis vandens garo kondensacijos procesas, o skysčio garinimu grindžiamose technologijose esminis yra dujų drėkinimą arba skysčio garo sudeginimą apibrėžiantis skysčio išgaravimo procesas. Kondensacijos ir garavimo procesų greitį apibrėžia garo srauto lašelių paviršiuje tankis, kurį galima aprašyti pagal Stefano formulės pagrindu sudarytą analitinę išraišką (Shorin 1964):

$$m_g(\tau) = \frac{\mu_v}{R_\mu} \frac{D_{gd}(\tau)}{T_{gd}(\tau) \cdot l_D(\tau)} p \ln \frac{p - p_{g,\infty}(\tau)}{p - p_{g,R}(\tau)}. \quad (2)$$

Sferinės formos lašelį supantis difuzinio sluoksnio storis yra proporcingas sferos spinduliui:  $l_D \equiv R$  [9]. Skysčio garo sklidimą sukeliančią varančiąją jėgą apibrėžia skysčio garo dalinio slėgio prie lašelio ir difuzinio sluoksnio riboje skirtumas:

$$\Delta p_g(\tau) = p_{g,R}(\tau) - p_{g,\infty}(\tau). \quad (3)$$

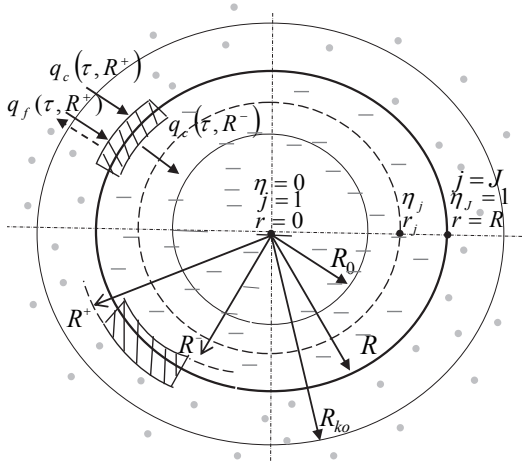
Lašelis garuoja, kai skysčio garo dalinis slėgis prie lašelio yra didesnis už skysčio garo slėgį dujose. Lašelio paviršiuje kondensuojasi skysčio garas, kai skysčio garo dalinis slėgis dujose didesnis už skysčio garo slėgį prie lašelio. Garo srautas lašelio paviršiuje apibrėžiamas garo srauto tankio ir lašelio paviršiaus ploto sandauga, o fazinių virsmų šilumos srauto tankis apibrėžiamas vandens fazinių virsmų šilumos ir garo srauto tankio sandauga:

$$g_g(\tau) = 4\pi R^2(\tau) \cdot m_g(\tau), \quad (4)$$

$$q_f(\tau) = L(\tau) \cdot m_g(\tau). \quad (5)$$

Pagal (3) išraišką apskaičiuotas garo srauto tankis lašelio paviršiuje kondensaciniame režime yra neigiamo ženklo dydis, o garavimo režime yra teigiamo ženklo dydis. Taigi (2, 4) matematinis modelis užtikrina savaiminį apskaičiuoto garo srauto lašelio paviršiuje vektoriaus krypties pokytį keičiantis lašelio fazinių virsmų režimui. O (2, 5) matematinis modelis užtikrina savaiminį apskaičiuoto fazinių virsmų šilumos srauto tankio lašelio paviršiuje vektoriaus krypties pokytį keičiantis lašelio fazinių virsmų režimui. Tai patogiu šilumos srautų kitimo lašelio paviršiuje universaliam modeliui sudaryti. Belieka

prie (2, 5) fazinių virsmų šilumos srauto modelio kūrybingai priderinti lašelio išorinės ir vidinės šilumokaitos modelius. Tam numatoma lašelio matmens sferiškai simetriško kitimo (1) fazinių virsmų cikle geometrinė interpretacija ir apibrėžiama šilumos srautų kitimo faziniuose režimuose schema (1 pav.).



1 pav. Lašelio geometrinė interpretacija ir šilumos srautų jo paviršiuje schema

Lašelio spindulys kondensaciniame režime išauga nuo  $R_0$  iki  $R_{ko}$ , pereinamojo garavimo režime sumažėja nuo  $R_{ko}$  iki  $R_{pf}$ , o pusiausviro garavimo režime toliau sparčiai mažėja tol, kol lašelis visiškai išgaruoja, todėl  $R_f = 0$ . Kiekviename fazinių virsmų režime lašelio energinės būsenos interpretacija yra savita. Jai aprašyti sąlygiškai numatomos išorinė ir vidinė lašelio paviršiaus pusės, kurios apibrėžiamos  $R^+$  ir  $R^-$  spinduliais atitinkamai, numatant, jog  $|R^+| \equiv |R^-| = R$ . Daroma  $T_R(\tau) < T_d$  prielaida. Lašelio išorinio konvekcinio šildymo intensyvumas apibrėžiamas konvekcines šilumos srauto tankiu pagal modifikuotą Niutono dėsnį:

$$q_c(\tau, R^+) = \lambda_{gd}(\tau) \frac{T_d - T_R(\tau)}{2R(\tau)} \text{Nu}(\tau) \cdot f_{B_T}(\tau),$$

$$\text{Nu}(\tau) = 2 + 0.552 \text{Re}^{\frac{1}{2}}(\tau) \text{Pr}^{\frac{1}{2}}(\tau),$$

$$B_T(\tau) = c_{p,gd}(\tau) \frac{T_d - T_R(\tau)}{L(\tau)} \frac{q_f(\tau, R^+)}{q_c(\tau, R^+)}.$$
(6)

Spoldingo šilumos pernašos  $B_T$  parametro  $f_{B_T}$  funkcija aprašoma pagal Abramzon-Sirignano modelį [10]. Garo ir dujų mišinio fizikinės savybės parenkamos pagal  $T = T_R + (T_d - T_R)/3$ .

Skysčio lašelyje konvekcinio šildymo intensyvumas apibrėžiamas pagal modifikuotą Furje šilumos laidumo

dėsnį temperatūros gradientą lašelyje aprašius pagal metodiką  $q_r \equiv 0$  prielaidos rėmuose (Miliauskas 2001):

$$q_c(\tau, R^-) = -\frac{2}{\pi} k_c(\tau, R^-) \cdot \lambda_l(\tau) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n n \times$$

$$\int_0^{\tau} \left[ (-1)^n \frac{R(\tau_*)}{n\pi} \frac{dT_R(\tau_*)}{d\tau_*} \right] \exp \left[ a \left( \frac{n\pi}{R_{\tau_*}} \right)^2 (\tau_* - \tau) \right] d\tau_*. \quad (7)$$

Efektivioju šilumos laidumo  $k_c$  parametru (7) išraiškoje atsižvelgiama į dujose slystančiame lašelyje paviršinės trinties jėgų sukeltos priverstinės skysčio cirkuliacijos įtaką šilumos plitimui lašelyje pagal [10] metodiką. Šilumos srautų ryšys lašelio paviršiuje fazinių virsmų (1) ciklo režimuose apibrėžiamas savitai:

$$|q_c(\tau, R^-)| = |q_c(\tau, R^+) + q_f(\tau, R^+)|, \text{ kai } \tau < \tau_{ko}; \quad (8)$$

$$|q_c(\tau, R^-)| = q_c(\tau, R^+), \text{ kai } \tau = \tau_{ko}; \quad (9)$$

$$|q_c(\tau, R^-)| = |q_c(\tau, R^+) - q_f(\tau, R^+)|, \text{ kai } \tau_{ko} < \tau < \tau_{pf}; \quad (10)$$

$$q_c(\tau, R^-) = 0, \text{ kai } \tau = \tau_{pf}; \quad (11)$$

$$q_c(\tau, R^-) = q_f(\tau, R^+) - q_c(\tau, R^+), \text{ kai } \tau > \tau_{pf}. \quad (12)$$

Į išraiškomis (8–12) aprašomos lašelio energinės būsenos kitimo fazinių virsmų režimų (1) cikle savitumus atsižvelgiama šilumos srautų balanso lašelio paviršiuje lygtimi:

$$q_c(\tau, R^+) - q_f(\tau, R^+) - q_c(\tau, R^+) = 0. \quad (13)$$

Išraiškoje (13) šilumos srautų modulius ir vektorių krypčių savitumus fazinių virsmų (1) ciklo režimuose savaime apibrėžia garo srauto tankio (2) bei šilumos srauto lašelyje (7) išraiškos. Lašelio išorinio konvekcinio šildymo šilumos apskaičiuotasis srautas pagal (6) išraišką yra visame cikle (1) teigiamas. Pagal išraišką (2) apskaičiuotasis garo srauto lašelio paviršiuje tankis kondensaciniame režime yra neigiamo ženklo dydis, o garavimo režimuose yra teigiamo ženklo dydis. Pagal (7) išraišką apskaičiuotasis konvekcines šilumos srautas lašelyje yra neigiamo ženklo dydis tol, kol temperatūros lauko gradientas lašelyje yra teigiamo ženklo dydis. Tai patogu išraiškos (13) skaitinio sprendimo schemai sudaryti.

Tačiau būtina pastebėti, jog išorinį konvekcinį šilumos srautą aprašanti (6) išraiška yra transcendentinė lygtis, kadangi Spoldingo šilumos pernašos parametrai apibrėžti reikalinga, kad konvekcinis šilumos srautas būtų jau žinomas. Be to, konvekcinį šilumos srautą lašelyje aprašanti (7) išraiška reikalauja, kad jau būtų žinoma dar

tik ieškoma lašelio paviršiaus temperatūros  $T_R(\tau)$ . Ši funkcija ir yra (13) išraiškos sprendinys ir ją galima apibrėžti tik pagal iteracinę skaitinę schemą.

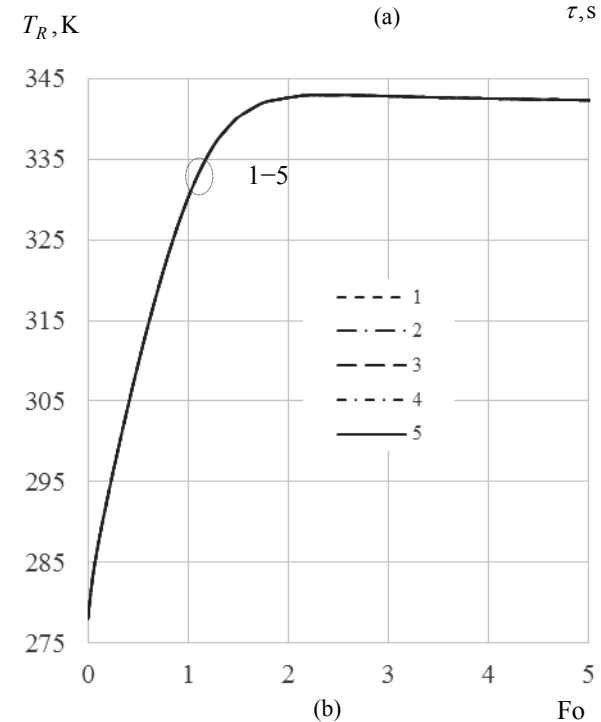
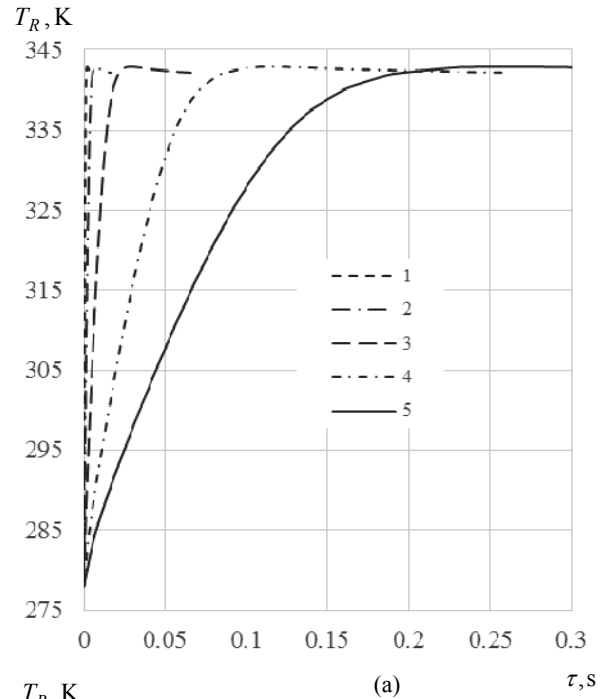
Skaitiškai modeliuojamo (1) ciklo trukmė parenkama laisvai:  $\tau_f = \tau_{parinktas}$ . Cikle (1) apibrėžiamas baigtinis skaičius kontrolinių laiko  $\tau_{i>1} = \tau_{i-1} + \Delta\tau$ , kai  $\Delta\tau = \tau_{parinktas} / (I-1)$ . Modeliuotais atvejais  $I = 201$ . Lašelio skersmuo fazinių virsmų cikle kinta. Todėl skaitinėje schemoje lašelio vidiniai sluoksniai graduoti bemačius radialinės  $\eta = r / R_i$  koordinatės atžvilgiu:  $\eta_{j>1} = \eta_{j-1} + \Delta\eta$ , kai  $\Delta\eta = 1 / (J-1)$ . Modeliuotais atvejais  $J = 41$ . Tai patogu, kadangi visame fazinių virsmų (1) cikle išlieka pastovus vienetinis lašelio bemačius skersmuo  $\eta_{j=J} = 1$ . Kiekvienu, pradedant  $\tau_{i=2}$ , laiko momentu greičiausio nusileidimo metodu organizuojamas iteracinis  $it \equiv 1 \div IT$  ciklas lašelio paviršiaus momentinei  $T_{R,i}$  temperatūrai apibrėžti. Baigiamajai  $IT$  iteracijai keliamas reikalavimas, kad parinktoji  $T_{R,i,it=IT}$  temperatūra pagal apskaičiuotuosius šilumos srautus lašelio paviršiuje užtikrintų išraiškos (13) reikalavimą penkių šimtųjų procentinio punkto pasikliautinumui. Tuomet momentinei lašelio paviršiaus temperatūrai priskiriama  $T_{R,i} = T_{R,i,it=IT}$  vertė. Esant apibrėžtai lašelio paviršiaus temperatūrai pagal anksčiau pateiktą matematinį modelį visi lašelio šilumos ir masės mainų parametrai  $P_i$  apskaičiuojami vienareikšmiškai.

### Rezultatai ir jų analizė

Skaitinis vandens lašelių fazinių virsmų tyrimas buvo pritaikytas išpurkšto vandens lašelių faziniams virsmams drėgnuose biokuro dūmuose apibrėžti. Tai svarbu šilumos utilizavimo iš šalinamų biokuro drėgnų dūmų praktikai. Į kondensacinį ekonomizerį patenkantys dūmai apibrėžti  $T_d = 450$  K temperatūra. Jų drėgnumas apibrėžtas tūrine vandens garo dalimi drėgno oro dujų mišinys  $\bar{p}_g = p_{g,\infty} / p \equiv 0 \div 0.3$ , kai  $p = 0.1$  MPa. Praktikoje įmanomai ilgiausiai kondensacinio režimo trukmei įvertinti modeliuotas į dūmus išpurkšto šalto  $T_0 = 278$  K temperatūros vandens lašelių fazinių virsmų ciklas. Dūmų spinduliuotės įtaka paneigta ir lašelių konvekcinis šildymas apibrėžtas pradiniu Reinoldso kriterijumi  $Re_0 = 2R_0\rho_d |w_l - w_d| / \mu_{gd} \equiv 0 \div 100$ .

Lašelių fazinių virsmų ciklą apibrėžiančios  $T_R(\tau)$  funkcijos grafikas yra labai jautrus vandens išpurškimo dispersiškumui (2 pav. a). Smulkieji lašeliai iki rasos taško 338.14 K temperatūros pašyla labai sparčiai, o stambesniųjų pašilimo laikas žymiai ilgesnis:

$\tau_{ko,s} \equiv 0.001; 0.004; 0.0161; 0.0643$  ir  $0.145$ , kai lašelio skersmuo atitinkamai yra  $2R_0 \cdot 10^6, m \equiv 20; 40; 80; 160$  ir  $240$ . Lašelių pašilimas iki pusiausviro garavimo  $342.91$  K temperatūros taip pat individualus:  $\tau_{pf,s} \equiv 0.001865; 0.00746; 0.0298; 0.1193$  ir  $0.2685$ .



2 pav. Lašelių dispersiškumo įtaka paviršiaus temperatūros kitimui realiaame laike (a) ir Furje kriterijaus laiko skalėje.  $Re_0 = 50$ ;  $T_0 = 278$  K;  $T_d = 450$  K;  $\bar{p}_g = 0.25$ ;  $R_0 \cdot 10^6$ : (1) 10, (2) 20, (3) 40 (4) 80, (5) 120

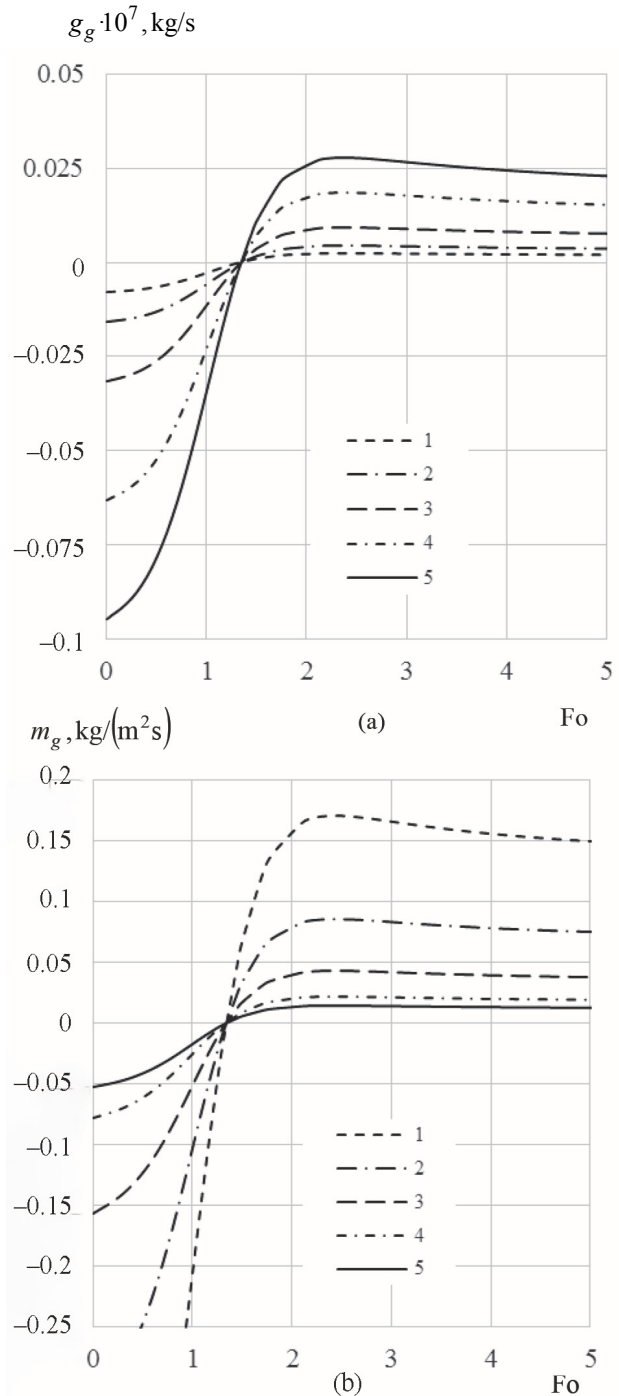
Svarbu tai, jog Furje kriterijumi išreikštoje laiko skalėje funkcijos  $T_R(Fo)$  grafikas visiems lašeliams yra universalus (2 pav. b) ir kondensacinio režimo bei pereinamųjų fazinių virsmų trukmės visiems lašeliams yra vienodos:  $Fo_{ko} = 1.345$  ir  $Fo_{pf} = 2.497$ . Kondensacinio režimo ir pereinamųjų fazinių virsmų režimų trukmės apibrėžtos pagal (9) ir (11) sąlygas.

Lašelio terminių parametrų  $P_T(Fo)$  funkcijų grafikų universalumo lašelių dispersiškumo atžvilgiu pastebėjimas yra labai svarbus, kadangi sudaro prielaidas siekti optimizuoti biokuro dūmuose išpurkšto vandens lašelių fazinių virsmų ciklo skaitinį modeliavimą: dūmų temperatūra ir drėgnumo bei lašelio pradine temperatūra ir pradinio  $Re_0$  apibrėžtu atveju pakanka sumodeliuoti laisvai parinkto skersmens lašelio ciklą ir lašelių terminių parametrų  $P_T(Fo)$  funkcijas galima pritaikyti pageidaujamo dispersiškumo lašelių šilumai aprašyti.

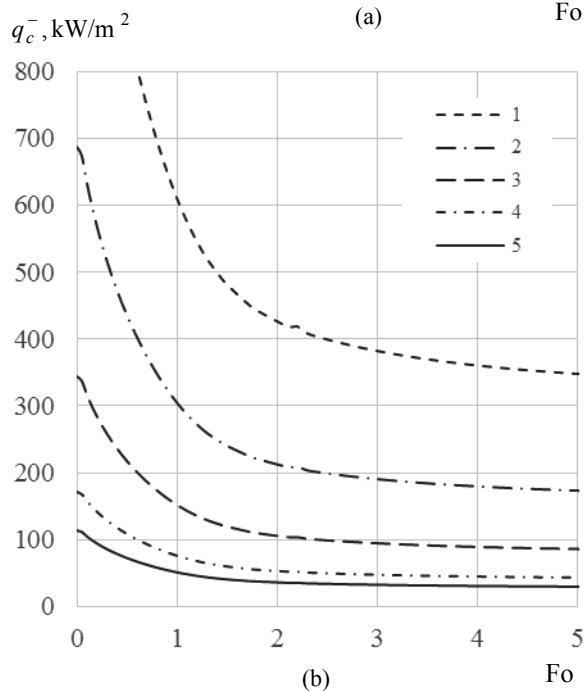
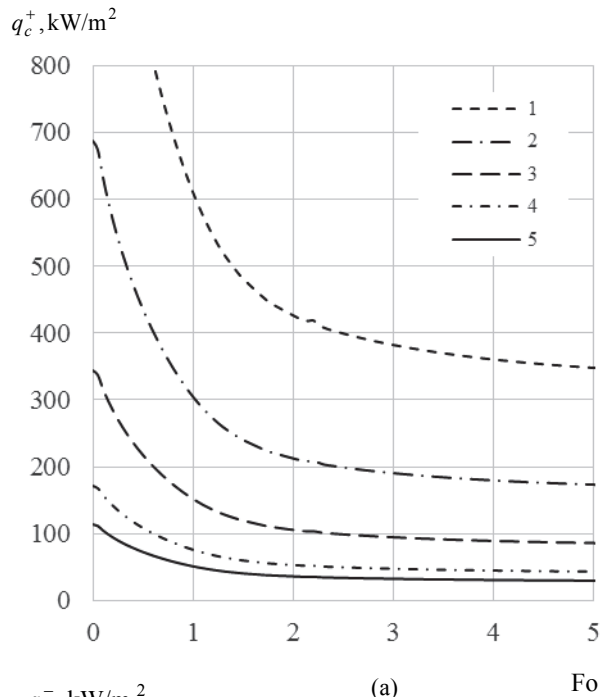
Tačiau iš lašelio garo srauto  $g_g(Fo)$  (3 pav. a) ir jo tankio  $m_g(Fo)$  (3 pav. b) bei lašelius šildančio konvekcinių šilumos srauto  $q_c^+(Fo)$  (4 pav. a) ir vandenį lašeliuose šildančio konvekcines šilumos srauto  $q_c^-(Fo)$  (4 pav. b) funkcijų grafikų matyti, jog lašelių dinaminiais, energiniais ir fazinių virsmų parametrus lašelių terminių parametrų atveju pastebėtas  $P_T(Fo)$  grafikų universalumas negalioja. 3 ir 4 paveiksluose galima pastebėti, jog juose pateiktų  $P_f(Fo)$  ir  $P_q(Fo)$  funkcijų grafikuose kreivės pagal lašelių dispersiškumą išsisluoksniuoja dėsningai. Todėl įvedamos fazinius virsmus aprašančios bematės formos  $\bar{g}_g = g_g / g_{g,0}$  ir  $\bar{m}_g = m_g / m_{g,0}$  funkcijos bei šilumos konvekcijos srautus aprašančios bematės formos  $\bar{P}_f = P_f / P_{f,0}$  ir  $\bar{P}_q = P_q / P_{q,0}$  funkcijos, kurių grafikai jau bus universalūs lašelių dispersiškumo atžvilgiu (5 pav. ir atitinkamai 6 pav.). Ši pastebėjimą galima išplėsti visiems lašelio šilumos ir masės mainų aprašantiems parametrus: lašelio šilumos ir masės mainų parametrų kitimą aprašančias funkcijas pateikus bematėje  $\bar{P}(Fo) = P(Fo) / P_0$  formoje, jų grafikai bus universalūs visam lašelių dispersiškumo spektrui.

Būtina pastebėti, jog spinduliavimo ir lašelius supančio Knudseno sluoksnio poveikis lašelių šilumokaitai ir faziniams virsmams privalo būti paneigtas [12]. Kondensaciniame režime garo srautas ir jo tankis nuosekliai sumažėja iki nulio ir  $Fo_{ko} = 1.345$  laiko momentu įvyksta fazinių virsmų režimo kaita iš kondensacinio į garavimo režimą (5 pav.). Kondensacijos režime lašelį šildo išorinės šilumos konvekcijos srautas ir garo kondensacijos procese išsiskiriantis fazinių virsmų šilumos srautas,

todėl lašelio temperatūra kondensaciniame režime labai sparčiai auga (2 pav.).

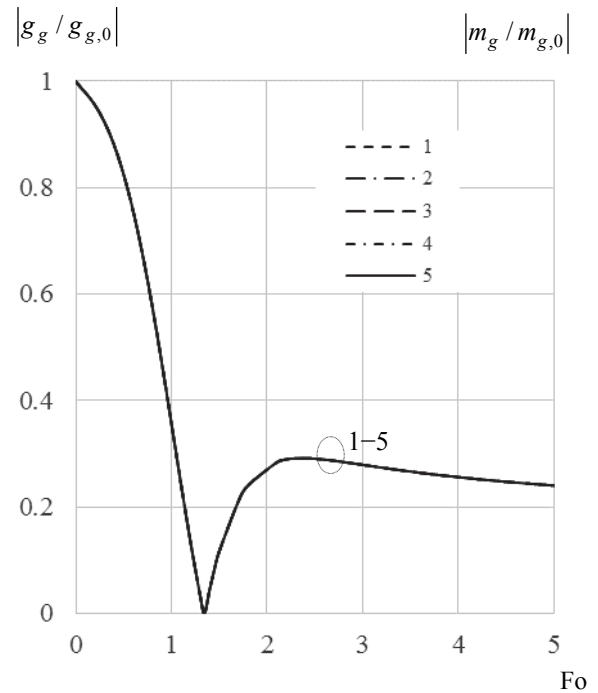


3 pav. Lašelių dispersiškumo įtaka garo srauto funkcijos  $g_g(Fo)$  grafikui (a) ir garo srauto tankio funkcijos  $m_g(Fo)$  grafikui (b). Kraštinės sąlygos kaip 2 pav.

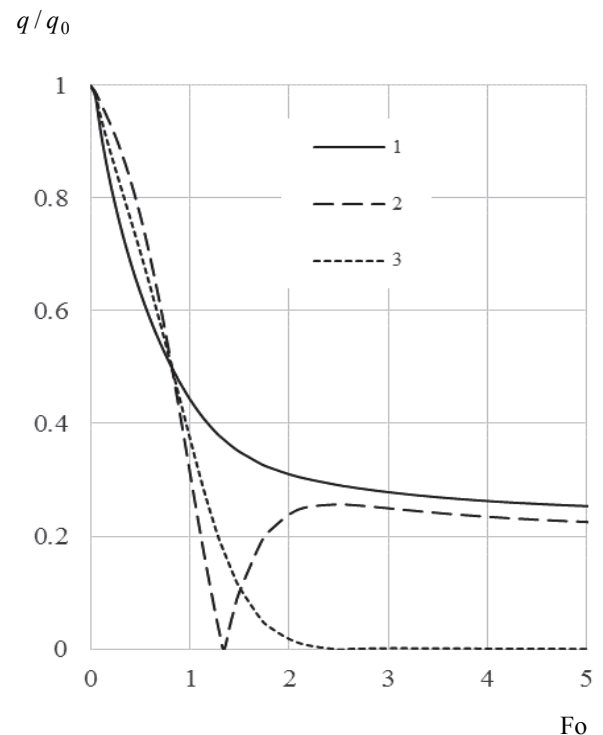


4 pav. Lašelio dispersiškumo įtaka konvekcines šilumos srautų  $q_c^+(Fo)$  ir  $q_c^-(Fo)$  funkcijų grafikams atitinkamai (a) ir (b). Kraštinės sąlygos kaip 1 pav.

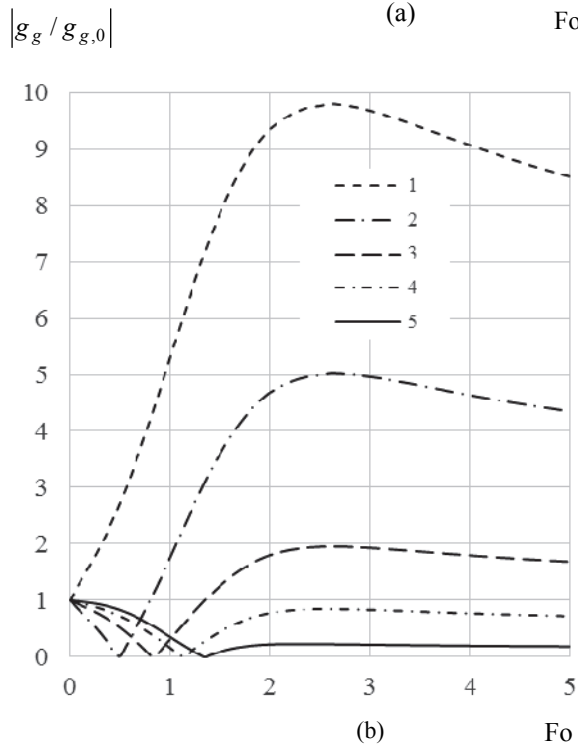
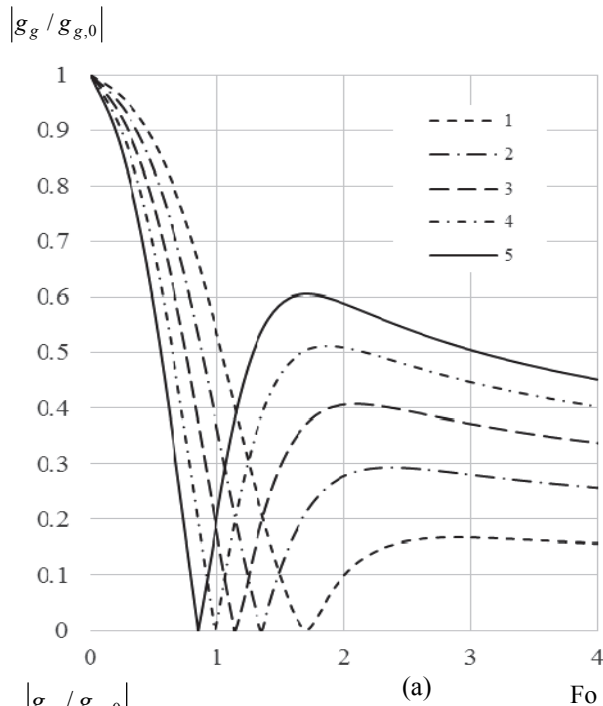
Kondensaciniame režime fazinių virsmų šilumos srautas sumažėja iki nulio (6 pav.), todėl konvekcines šilumos srautas lašelyje susilygina su išorinės konvekcines šilumos srautu  $q_c^-(Fo = Fo_{ko}) \equiv q_c^+(Fo = Fo_{ko})$ . Šių srautų vertės labai priklauso nuo lašelių dispersiškumo ir yra 509.7, 254.8, 127.4, 63.7 ir 42.48 kW/m<sup>2</sup>, kai lašelio  $R$  mikrometrais yra 10, 20, 40, 80 ir atitinkamai 120.



5 pav. Garo srauto ir jo tankio universalus grafikas.  $g_{g,0} \cdot 10^7$ , kg/s: (1) 0.00789, (2) 0.0158, (3) 0.0316 (4) 0.0631, (5) 0.0947;  $m_{g,0}$ , kg/(m<sup>2</sup>s): (1) 0.628, (2) 0.314, (3) 0.157 (4) 0.0785, (5) 0.0523. Kraštinės sąlygos kaip 1 pav.

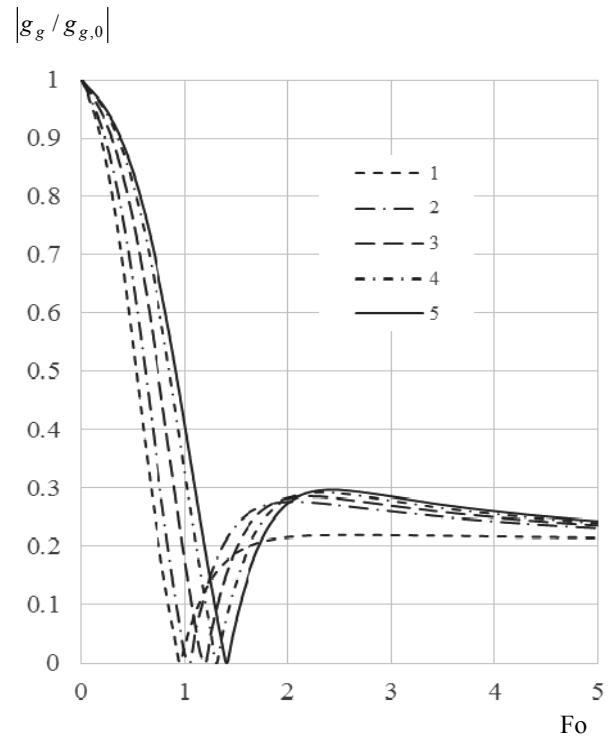


6 pav. Šilumos srautų lašelio paviršiuje  $\bar{q}(Fo)$  funkcijų universalūs grafikai.  $q$ : (1)  $q_c^+$ , (2)  $q_f^+$ , (3)  $q_c^-$ ;  $q_c^+$ , kW/m<sup>2</sup>: (1) 1374.5, (2) 687.2, (3) 343.62 (4) 171.81, (5) 114.54;  $q_f^+$ , kW/m<sup>2</sup>: (1) 1547.9, (2) 773.9, (3) 386.97 (4) 193.49, (5) 128.99;  $q_c^-$ , kW/m<sup>2</sup>: (1) 2922.4, (2) 1461.1, (3) 730.59 (4) 365.3, (5) 243.53; Kraštinės sąlygos kaip 1 pav.



7 pav. Dujų temperatūros (a) ir drėgnumo (b) įtaka garo srautui.  $R_0 = 50 \cdot 10^{-6}$  m;  $Re_0 = 50$ ;  $T_0 = 278$  K; (a):  $\bar{p}_g = 0.25$ ;  $T_d$ , K (1) 400, (2) 450, (3) 500, (4) 550, (5) 600;  $|m_{g,0}|$ ,  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$  (1) 0.114, (2) 0.126, (3) 0.137, (4) 0.15, (5) 0.163; (b):  $T_d = 450$  K;  $\bar{p}_g$ : (1) 0, (2) 0.025, (3) 0.05, (4) 0.1, (5) 0.3;  $|m_{g,0}|$ ,  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$  (1) 0.00406, (2) 0.0078, (3) 0.0198, (4) 0.0445, (5) 0.156

Pereinamojo garavimo režime konvekcinės šilumos srautas lašelyje nuosekliai sumažėja iki nulio, o garavimo šilumos srautas išauga iki išorinės konvekcinės šilumos srauto. Todėl pusiausviro garavimo pradžios momentu garavimo šilumos ir išorinės konvekcinės šilumos srautai atitinka ir yra 398.6, 199.3, 99.68, 49.83 ir 33.22  $\text{kW}/\text{m}^2$ , kai lašelio  $R$  mikrometrais yra 10, 20, 40, 80 ir atitinkamai 120. Bematėje  $\bar{P}_q(Fo)$  formoje skirtingo skersmens lašeliams atitinkami šilumos srautai yra vienodi (6 pav.) ir  $\bar{q}_c^+(Fo = Fo_{ko}) = 0.3708$ ,  $\bar{q}_c^-(Fo = Fo_{ko}) = 0.1744$ ,  $\bar{q}_c^+(Fo = F_{pf}) = 0.29$  ir  $\bar{q}_f^-(Fo = F_{pf}) = 0.258$ .



8 pav. Lašelių slydimo dujose įtaka garo srautui.  $Re_0$ : (1) 0, (2) 10, (3) 20, (4) 40, (5) 80;  $T_0 = 278$  K;  $R_0 = 50 \cdot 10^{-6}$  m;  $T_d = 450$  K;  $\bar{p}_g = 0.25$ ;  $|m_{g,0}| = 0.126$   $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$

Lašelio paviršiuje vykstančių fazinių virsmų intensyvumui ryškų poveikį daro biokuro dūmų temperatūra (7 pav. a), drėgnumas (7 pav. b) ir lašelio slydimo intensyvumas (8 pav.). Drėgnų  $\bar{p}_g = 0.25$  dūmų temperatūrai nuo 400 K išaugus iki 600 K pradinis kondensacijos garo srautas 100 mikrometrų skersmens lašelio paviršiuje išauga nuo  $35.8 \cdot 10^{-10}$   $\text{kg}/\text{s}$  iki  $51.2 \cdot 10^{-10}$   $\text{kg}/\text{s}$ , tačiau kondensacinis fazinių virsmų režimas sutrumpėja nuo  $Fo = 1.702$  iki  $Fo = 0.846$  (7 pav. a). Drėgniems  $\bar{p}_g = 0.3$  drėgnumo 450 K temperatūros dūmams išsausėjus iki  $\bar{p}_g = 0.025$  drėgnumo, pradinis kondensacijos garo srau-

tas 100 mikrometrų skersmens lašelio paviršiuje sumažėja nuo  $48.87 \cdot 10^{-10}$  kg/s iki  $2.44 \cdot 10^{-10}$  kg/s ir kondensacinis fazinių virsmų režimas ryškiai sutrumpėja nuo  $Fo = 1.347$  iki  $Fo = 0.501$  (7 pav. b). Lašelio slydimas daro teigiamą poveikį kondensacinio režimo trukmei. Drėgnuose  $\bar{p}_g = 0.25$  450 K temperatūros dūmuose išpurškus 278 K temperatūros vandenį lašelių pradinio slydimo  $Re_0 = 80$  sąlygomis apskaičiuotoji kondensacinio režimo trukmė lašelių paviršiuje, palyginti su  $Re_0 = 0$  atveju, išauga nuo  $Fo = 0.959$  iki  $Fo = 1.4$  (8 pav.).

## Išvados

1. Drėgnuose biokuro dūmuose išpurškto vandens lašelių fazinių virsmų ciklo režimus veikia dūmų temperatūra ir drėgnumas, vandens temperatūra bei lašelių šilumokaitos sąlygos.

2. Augant dūmų temperatūrai ir žemėjant jų drėgnumui, kondensacinis režimo lašelių paviršiuje trukmė mažėja. Šiluma utilizuojama iš santykinai žemos temperatūros šalinamų dūmų, todėl lašelių šilumokaitos sąlygas apibrėžiančiu pagrindiniu faktoriumi yra laikytinas lašelių slydimo dūmuose intensyvumas.

3. Modeliuotais 278 K temperatūros vandens lašelių šilumokaitos dūmuose, kai jų temperatūra neviršijo 600 K ir  $\bar{p}_g$  drėgnumas siekė iki 0.3, apibrėžta, jog lašelių slydimui išaugus iki  $Re_0 = 80$ , kondensacinio režimo trukmė gali išaugti iki 50 procentų.

## Literatūra

- Seoksu, M. 2016. Novel insights into the dynamics structure of biodiesel and conventional fuel sprays from high-pressure diesel injectors, *Energy* 115: 79–93.
- Wang, Z.; Xing, Y.; Liu, X.; Zhao, L.; Ji, Y. 2016. Computer modeling of droplets impact on heat transfer during spray cooling under vibration environment, *Applied Thermal Engineering* 107: 453–462. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.176>
- Mucke, L.; Fleig, D.; Vajen, K.; Jordan, U. 2016. Hybrid liquid desiccant air-conditioning systems: a conceptual study with respect to energy saving potentials, *International Journal of Refrigeration* 69: 64–73. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.04.027>
- Feldung, D., N.; Adler-Nissen, J.; Jensen, B.; Wilson, D. I. 2017. Flow pattern and cleaning performance of a stationary liquid jet operating at conditions relevant for industrial tank cleaning, *Food and Bioprocess Technology* 101: 145–156. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.11.001>

- Suzzi, D.; Radl, S.; Khinast, J. G. 2010. Local analysis of the tablet coating process: impact of operation conditions on film quality, *Chemical Engineering Science* 65: 5699–5715. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.07.007>
- Nistal, A.; Garcia, E.; Garcia-Diego, C.; Osendi, M. I.; Miranzo, P. 2015. Flame spraying of adherent silicon coatings on SiC substrates, *Surface & Coatings Technology* 270: 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.03.025>
- Miliauskas, G. 2014. *Grynojo skysčio lašelių fazinių virsmų režimų universalusis ciklas. 1. Ciklo sudarymo metodas ir pernašos procesų skaitinio modeliavimo metodika* 60: 77–95.
- Shorin, S. N. *Teploperedacha*. Vishaja Shkola, Moskva, 1964.
- Abramzon, B.; Sirignano, W. A. 1989. Droplet vaporization model for spray combustion calculations, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 32: 1605–1618. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(89\)90043-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(89)90043-4)
- Miliauskas, G. 2001. Regularities of unsteady radiative-conductive heat transfer in evaporating semitransparent liquid droplets, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 44: 785–798. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(00\)00127-7](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(00)00127-7)
- Miliauskas, G.; Maziukienė, M.; Ramanauskas, V. 2016. Peculiarities of the transit phase transformation regime for water droplets that are slipping in humid gas, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 102: 302–314. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.008>

## HEAT AND MASS TRANSFER IN WATER DROPLETS HEATED IN HUMID GAS AT THE TRANSIT PHASE TRANSFORMATION REGIME

M. Maziukienė, G. Miliauskas

### Summary

Knowledge on the heat and mass transfer in droplets is important for technological practice. In this work, water droplets at different dispersions were heated and phase transformations in humid air were modelled numerically. The main attention was paid to condensation and transit evaporation regimes. The variation of droplet temperature was defined according to iterative numerical scheme, which is based on by the equivalence of heat flows that flow in and from the droplet surface. The self-interaction of transfer processes was taken into account. The defining parameters of droplet phase transformation regimes were identified: the temperature of spraying water, air temperature and humidity, and droplet heating process. Their influence on droplet energy state and phase transformations was evaluated.

**Keywords:** water droplets, humid gas, phase transformation regime cycle.