

Dūmuose slystančių vandens lašelių faziniai virsmai

Gintautas Miliauskas,

Kristina Norvaišienė,

Giedrius Miliauskas

Šilumos ir atomo energetikos katedra,

Kauno technologijos universitetas,

K. Donelaičio g. 20,

LT-44239 Kaunas

El. paštas: gimil@ktu.lt

Sumodeliuotas dūmuose slystančių vandens lašelių šilimas nestacionariųjų fazinių virsmų režime, kuomet vandens įpurškimas dūmų parametrams reikšmingesnės įtakos neturi, o dvifazio srauto judėjimo dinamika užtikrina nekintančiu Reinoldso kriterijumi apibrėžtas lašelių konvekcinių šildymo sąlygas. Dūmuose slystančių lašelių kondensacinis fazinių virsmų režimas ištirtas pasirėmus Furjė kriterijumi, įvertinančiu laiko mastelį. Pateiktos laidumu šildomų lašelių kondensacinio fazinių virsmų režimo universalios trukmės diagramos bei diagramos lašelių slydimo įtakai įvertinti.

Raktažodžiai: vandens lašelių slydimas dūmuose, kondensacinis augimas ir šilimas, pernašos procesų sąveika

1. ĮVADAS

Ekonominė pažanga, paremta šiuolaikine technika ir technologija, gerina žmonijos gyvenimo gerovę, tačiau kartu skatina intensyvių žaliavų bei energijos išteklių naudojimą ir didina į aplinką išmetamų teršalų kiekį. Oro tarša kenkia žmonių sveikatai ir aplinkai. Švaresnio oro poreikis pripažįstamas jau keletą dešimtmečių, imamasi veiksmų nacionaliniu ir ES lygiu [1] bei aktyviai dalyvaujama tarptautinėse konvencijose. Energetikoje ir pramonėje sudeginama daug kuro. Degant vandeniliui susidaro vandens garas. Be jo degimo produktai papildomai sudrėksta išgaruojant kure esančiai drėgmei. Dėl deginamo kuro drėgnumo vandens garas dūmuose gali užimti iki 50 % jų tūrio. Vandens garas kartu su anglies dvideginiu, metanu ir azoto oksidais yra svarbiausių pasaulinių atšilimą lemiančių dujų sąrašė. Be to, su išmetamais į atmosferą dūmais prarandama juose sukaupta vandens fazinių virsmų šiluma.

Ilgą laiką į prarandamą su išmetamais dūmais šilumą nebuvo kreipiama dėmesio. Kad rekuperacinių šilumokaičių paviršių temperatūra nebūtų žemesnė už rasos taško temperatūrą, normatyviniais dokumentais buvo ribojamas išmetamų dūmų ataušinimo gylis. Išaugus energetinių išteklių kainoms, prisiminta ir su išmetamais dūmais prarandama šiluma. Pasaulyje, šiuo metu ir Lietuvoje, energetiniuose objektuose diegiami rekuperaciniai šilumokaičiai fazinių virsmų šilumai iš dūmų utilizuoti. Pagrindinis šių šilumokaičių trūkumas yra jų brangumas, kadangi jie gaminami iš spalvotųjų metalų. Rekuperaciniai šilumokaičiai pasiteisina didelio šiluminio pajėgumo energetiniuose objektuose. Plačiam vietinių katilinių tinklui šis šilumokaičių tipas yra per brangus. Perspektyvu

fazinių virsmų šilumą utilizuoti iš dūmų kontaktiniuose šilumokaičiuose į dūmus tiesiogiai įpurškiant vandenį. Tačiau tokios technologijos plėtojimą stabdo žinių apie šilumos ir masės pernašos procesų drėgnuose dūmuose išpurkšto vandens sistemose intensyvumą ir jo valdymo galimybes trūkumas. Utilizuojant iš dūmų fazinių virsmų šilumą negalima leisti vandens lašeliams pašilti labiau nei rasos taško temperatūra, kadangi pasikeitus faziniam virsmų režimui jų paviršiuje ir pradėjus vandeniui garuoti, vėl būtų prarandama fazinių virsmų šiluma. Papildomo dėmesio reikalauja galimas vandens užteršimas lašeliams tiesiogiai kontaktuojant su dūmais. Todėl perspektyvu išmetamų dūmų šilumą utilizuoti trimis etapais [2]. Pirmajame etape dūmus reikia gerai išvalyti. Tam gali praversti energetiniame objekte esamos sauso dūmų valymo technologijos bei papildomas dūmų valymas šlapiojo valymo technologijomis, pvz., leisti dūmams burbuliuoti ribotame vandens kiekyje arba praleisti juos pro drėgną įkrovą. Antrajame etape būtų utilizuojama dūmų fizinė šiluma juos ataušinant ir išpurkštą vandenį neužteršiant. Galimas papildomas dūmų sudrėkinimas valant dūmus ar utilizuojant fizinę jų šilumą problemos nesudaro, nes dūmuose sukaupta fazinių virsmų šiluma utilizuojama trečiajame etape.

Auštančių dūmų šilumai utilizuoti į juos galima įpurškšti aukštesnės nei rasos taško temperatūros vandenį. Šiame etape esminis vaidmuo tenka šilumos ir masės mainų procesams tarp dūmų ir vandens garuojančių lašelių ir vandenį galima pašildyti iki lašelių pusiausviro garavimo temperatūros. Vandens lašelių nestacionarusis garavimas yra gana visapusiškai ištirtas [3, 4]. Siekiant utilizuoti išmetamuose dūmuose sukaupią fazinių virsmų šilumą, į juos reikia įpurškšti

žemesnės nei rasos taško temperatūros vandenį. Šiame darbe modeliuojamas vandens lašelių šilimas dūmuose kondensaciniame fazinių virsmų režime.

2. DŪMUOSE SLYSTANČIO LAŠELIO FAZINIŲ VIRSMŲ MODELIS

Utilizuoti dūmuose fazinių virsmų šilumą galima tik kondensuojant juose esantį vandens garą, todėl vandenį reikia pašalinti iš kontaktinio šilumokaičio lašeliams nepašilus iki rasos taško temperatūros. Į dūmus įpurškus šaltą vandenį, vandens lašeliai gaus nuo dūmų energinį poveikį, kurio intensyvumą sąlygos šilumos suminio srauto tankis jų paviršiaus išorinėje pusėje (R^+) bei jame besikondensuojančio vandens garo fazinių virsmų šiluma: $q_L \equiv q_{\Sigma}^+ + q_f^+$. Suminių šilumos srautą dūmuose slystančių lašelių paviršiuje lems šilumos konvekcija nuo dūmų bei dūmų ir juos ribojančių paviršių spinduliuotė: $q_{\Sigma}^+ \equiv q_c^+ + q_r^+$. Spinduliuotės įtaka santykinai žemos temperatūros dūmų utilizavimo atveju nebus esminė. Auštančių dūmų entalpijos kitimo spartą lems santykinis debitu $\bar{g} \equiv G_L / G_g$ nusakomas į juos įpurškiamo vandens kiekis bei šilumos ir masės kaitos procesų vandens lašelių paviršiuje intensyvumas:

$$\frac{\partial \{ \rho_{v,g}(\tau) [c_{p,g}(\tau) \cdot T_g(\tau) + g_v(\tau) \cdot L(\tau)] \}}{\partial \tau} = 4\pi \sum_{i=1}^n [N_i \cdot R_i^2(\tau) \cdot q_{L,i}(\tau, R_i^+)] + q_v(\tau); \quad (1)$$

čia $\rho_{v,g}$ ir $c_{p,g}$ – atitinkamai dūmų tankis ir savitoji šiluma; g_v – vandens garo masinė dalis dūmuose; L – vandens fazinių virsmų šiluma; R – lašelio spindulys. Tam tikrą poveikį dūmų aušimui turės ir jų tūriui perskaičiuoti šilumos nuostoliai pro srautą ribojančius paviršius q_v . Į dūmus išpurškamas vanduo susiskaido į tam tikrą lašelių ansamblį, kuriame skirtingo stambumo lašelių santalka N_i jų grupėse yra apibrėžta. Kiekvienos lašelių grupės vaidmenį dūmų šilumos utilizavimo procese lems jai tenkanti išpurškiamo vandens dalis: $\bar{g}_i \equiv G_{L,i} / G_g$. Visų lašelių pradinė terminė būseną vienoda ir nusakoma išpurškiamo vandens temperatūra $T_{L,0}$. Vandens lašelyje šilimo tempą sąlygoja suminis šilumos srautas lašelio paviršiaus vidinėje pusėje (R^-). Kondensaciniame fazinių virsmų režime jis atitiks dūmų energinį poveikį šilumos srauto tankiui. Skirtingo stambumo lašelių šilimo tempas ir fazinių virsmų sparta bus individualūs. Todėl kondensacinio režimo trukmė jiems bus skirtinga. Tai apsunkina dūmuose sukauptos fazinių virsmų šilumos utilizavimo proceso kontrolę. Todėl pageidautinas kuo tolygesnis vandens išpurškimo dispersiškumas. Dėl pasipriešinimo jėgų poveikio lašelių judėjimo dūmuose dinamika kis, todėl kis ir lašelių šildymo režimas. Fazinių virsmų šilumos srauto tankį $q_{f,i}^+ \equiv m_{v,i}^+ \cdot L$ nusako vandens garo srauto tankis garo kondensacijos lašelio paviršiuje metu [5]:

$$m_{v,i}^+(\tau) = \frac{D_{vg} \cdot \mu_v}{T_R \cdot R_{\mu} \cdot R} \left[p_{v,R} - p_{v,\infty} + \frac{\mu_k}{\mu_g} \left(p \cdot \ln \frac{p - p_{v,\infty}}{p - p_{v,R}} - p_{v,R} + p_{v,\infty} \right) \right]; \quad (2)$$

čia D_{vg} – vandens garo difuzijos koeficientas dūmuose; μ_v ir μ_g – atitinkamai vandens garo ir dūmų molekulinė masė; R_{μ} – universali dujų pastovioji. Garo srauto tankiui lašelio paviršiuje turi įtakos difuziniai procesai lašelio apsuptyje bei Stefano hidrodinaminis srautas. Sąlygojančiais parametrais yra lašelio paviršiaus temperatūra (T_R) bei tūrinė vandens garo dalis dūmuose ($\bar{p} \equiv p_{v,\infty} / p$). Dėl intensyvios garo kondensacijos lašelio paviršiuje kondensaciniame fazinių virsmų režime vandens lašeliai intensyviai šyla ir jų paviršiaus temperatūra sparčiai kinta. Galimas lašelių išlaikymo kontaktiniame šilumokaityje laikas bus savitas. Jis priklausys nuo įpurškiamo vandens temperatūros, kiekio, išpurškimo dispersiškumo ir dūmų parametų. Dūmų ir vandens temperatūrų skirtumas bei lašelių slydimo dūmuose greitis sąlygoja šilumos teikimo lašeliui konvekcija intensyvumą. Vandens lašelių galimo išlaikymo kontaktinio šilumokaičio pakopoje trukmės apskaičiavimui labai svarbu, kaip vanduo bus įpurškiamas į dūmus. Tai lemia lašelių judėjimo dūmuose schema. Vandenį įpurškiant pagal dūmų tekėjimo kryptį, sudaroma pasrovinio dvifazio srauto tekėjimo schema. Vandenį išpurškus prieš dūmų srautą, gaunama priešrovinė dvifazio srauto tekėjimo schema. Nepaisant vandens įpurškimo į dūmus būdo, kontaktinio šilumokaičio šiluminis skaičiavimas remiasi „lašo“ uždavinio modeliais. Jie gana nuosekliai apžvelgti [6]. „Lašo“ uždavinys apima sudėtinį šilumos plitimą pusskaidriame lašelyje (vidinis „lašo“ uždavinys) bei šilumos ir masės mainus tarp lašelio ir jo apsupties (išorinis „lašo“ uždavinys). Kauno technologijos universiteto Šilumos ir atomo energetikos katedroje yra išvystyta kombinuota analitinio ir skaitinio „lašo“ uždavinio sprendimo metodologija [4, 7, 8]. Iteracinė tyrimo schema sudaroma šilumos plitimą pusskaidriame lašelyje spinduliuoimu ir laidumu aprašančios integralinės ir diferencialinės energijos lygties sprendiniui, išreikštam netiesinių integralinių lygčių begaline eilute. Tuomet spinduliuojančių dujų sraute slystančio pusskaidrio skysčio lašelio šilimas ir faziniai virsmai aprašomi algebrinių, integralinių ir pirmojo laipsnio diferencialinių lygčių netiesine sistema:

$$T(r, t) = T_R + \frac{2}{r} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi r}{R} \int_0^t f_n \exp \left[-a \left(\frac{n\pi}{R} \right)^2 (t - \tau) \right] d\tau, \quad (3)$$

$$q_k(r, \tau) = 2\lambda_l \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{n\pi}{rR} \cos \frac{n\pi r}{R} - \frac{1}{r^2} \sin \frac{n\pi r}{R} \right) f_n \exp \left[-a \left(\frac{n\pi}{R} \right)^2 (t - \tau) \right] d\tau, \quad (4)$$

$$q_c^-(\tau) \equiv k_{ef}^- \cdot q_k(r \equiv R^-, \tau), \quad (5)$$

$$q_r(r, \tau) \equiv 2\pi \int_0^{\pi/2} \cos \varphi \cdot \sin \varphi \cdot [I_{\omega,R} \cdot \exp(-\Theta_r^R) - I_{\omega,R} \cdot \exp(-\Theta_{r \sin \varphi}^R - \Theta_{r \sin \varphi}^r)] + \int_0^R n_{\omega}^2 I_{\omega,0} \cdot \exp(-\Theta_r^r) d\Theta_r^r - \int_{r \sin \varphi}^R n_{\omega}^2 I_{\omega,0} \cdot \exp(-\Theta_{r \sin \varphi}^r) d\Theta_{r \sin \varphi}^r - \int_{r \sin \varphi}^R n_{\omega}^2 I_{\omega,0} \cdot \exp(-\Theta_{r \sin \varphi}^r - \Theta_{r \sin \varphi}^r) d\Theta_{r \sin \varphi}^r \cdot d\varphi \cdot d\omega, \quad (6)$$

$$\Theta_{r_1}^{r_2} \equiv \int_{r_1}^{r_2} d\Theta_{r_1}^{r_2} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\chi_{\omega} dr'}{\left(1 - \frac{r}{r'} \cdot \sin^2 \varphi\right)^{1/2}}, \quad (7)$$

$$q_r^-(\tau) \equiv q_r, \quad (r \equiv R^-, \tau), \quad (8)$$

$$q_c^+(\tau) = \frac{\lambda_{vg}(\tau) \cdot \text{Nu}}{2R(\tau)} \cdot [T_g(\tau) - T_R(\tau)] \cdot f(B_r), \quad (9)$$

$$B_r(\tau) = \frac{c_{p,vg}(\tau) \cdot [T_g(\tau) - T_R(\tau)] \cdot q_c^+(\tau)}{L \cdot q_c^+(\tau)}, \quad (10)$$

$$\frac{d[\rho_f(\tau) \cdot R^3 \rho_f(\tau)]}{d\tau} = -3R^2(\tau) \cdot m_v^+(\tau); \quad (11)$$

čia a – temperatūros laidumo koeficientas B_r – Spoldingo šilumos pernešimo parametras; I_{ω} – spektrinis spinduliuotės intensyvumas; $I_{\omega 0}$ – absoliučiai juodo kūno spektrinis spinduliuotės intensyvumas; Nu – Nuselto kriterijus kietai dalelei; n – nario indeksas begalinėje sumoje; r – lašelio koordinatė; t – kontrolinis laikas; λ – šilumos laidžio koeficientas; τ – laikas; φ – kampas tarp normalės ir šviesos spindulio sklidimui priešingos krypties; χ_{ω} – spektrinis sugėrimo koeficientas; ω – banginis skaičius; Indeksai: c – konvekcija; g – dujos; vg – garo ir dujų mišinys; l – skystis; R – lašelio paviršius; r – spinduliuotė. Šaltinio funkcija f_n nestacionario temperatūros lauko lašelyje (3) lygtyje įvertina lašelio paviršiaus temperatūros kitimo tempą bei vandenyje sugeriamo spinduliuotės srauto įtaką lašelio termininei būsenai [7], o neizotermiškos pradinės būsenos „lašo“ modelyje papildomai atsižvelgia į pradinio temperatūros lauko lašelyje ypatumus [8]. (5) išraiškoje efektyviuoju parametru k_{ef} , kuris yra Pekle kriterijaus funkcija [9], atsižvelgiama į vandens galimo cirkuliavimo lašelyje įtaką šilumos plitimui jame. Kondensacijos procese vandens garo dalinis slėgis dujose viršija garo slėgį prie lašelio. Tuomet (2) išraiškoje Stefano logaritmo vertė yra neigiama, o (11) išraiška aprašomas lašelio tūris auga. Spoldingo šilumos pernašos parametro funkcija $f(B_r)$ (9) išraiškoje atsižvelgiama į Stefano hidrodinaminio srauto poveikį lašelio konvekciniio šildymo intensyvumui. Funkciją $f(B_r)$ aprašant pagal metodiką [9], (9)–(10) išraiškos atspindi jau klasikinį tapusį garuojančio lašelio konvekciniio šildymo modelį. (9)–(10) konvekciniio šildymo modelio taikymo ypatumai kondensaciniame fazinių virsmų režime aptarti [10]. Lokalinį spinduliuotės srauto tankį lašelyje aprašant (6)–(8) modeliu [4] atsižvelgta, jog pusskaidris skystis paviršiumi spinduliuotės srauto nesugeria, o temperatūros laukas lašelyje bus žinomas. Apskritai (2)–(11) lygčių sistema apibrėžta, kai žinoma lašelio paviršiaus temperatūros kitimą aprašanti $T_R(\tau)$ funkcija. Ji konkretizuojama greičiausio nusileidimo metodu minimizuojant prie lašelio paviršiaus pritekantių ir nuo jo nutekantių energijos srautų balansą aprašančia lygtimi:

$$\bar{q}_{\Sigma}^+(R, \tau) + \bar{q}_f^+(R, \tau) + \bar{q}_{\Sigma}^-(R, \tau) \equiv 0, \quad (12)$$

kuri praverčia kaip kraštinė sąlyga (2)–(11) lygčių sistemai. Taigi kontaktinio šilumokaičio skaičiavimo schemoje kerti-

nis yra lašelio paviršiaus temperatūros apskaičiavimo iteracinis ciklas, kuriame nustatoma lašelio paviršiaus momentinė temperatūra, šimtosios procento pasikliautinumu užtikrinanti prie lašelio paviršiaus pritekantių ir nuo jo nutekantių energijos srautų atitikimą, aprašomą (12) išraiška.

Pažymėtina, kad (1)–(12) matematiniu modeliu aprašomas vandens lašelių šilumos ir masės mainų auštančiuose ir sausejančiuose dūmuose apskaičiavimo būdas pasrovinio ir priešrovinio vandens įpurškimo į dūmus atvejais yra skirtingas. Dūmų aušimo (1) modelio skaičiavimo algoritmas gerai dera su (2)–(12) „lašo“ modelio skaičiavimo iteraciniu algoritmu pasrovinio vandens įpurškimo atveju, kadangi tuomet pradiniame skaičiuotino kanalo pjūvyje žinomi ir vandens, ir dūmų parametrai. Tuomet taikoma nuoseklaus skaičiavimo schema ir dūmų parametrai patikslinami po kiekvieno lašelio paviršiaus temperatūros iteracinio apskaičiavimo ciklo. Dūmų sausinimo ir aušinimo skaičiavimas priešrovinio lašelių tekėjimo atveju – komplikotas, kadangi vanduo įpurškiamas dūmų ištekėjimo iš kanalo skerspjūvyje, o lašeliai šilumokaitį palieka dūmų įtekėjimo skerspjūvyje. Iškyla pagrindinės tekėjimo krypties šilumokaityje pasirinkimo klausimas. Ja dažniausiai pasirenkama vandens lašelių tekėjimo kanale kryptis, nes tuomet patogiau organizuoti kertinį lašelio paviršiaus temperatūros apskaičiavimo iteracinį ciklą. Tačiau šį ciklą pradėti galima tik tuomet, kai dūmų būseną vandens įpurškimo pjūvyje bus žinoma. Todėl priešrovinio tekėjimo schemas kontaktiniame šilumokaityje atveju kartu su lašelio paviršiaus iteracinio apskaičiavimo ciklu būtina vykdyti ir dūmų parametru kitimo šilumokaityje apskaičiavimo papildomą iteracinį ciklą. Dvigubo iteracinio skaitinio tyrimo ciklo patikimumo vertinimui būtini paprastesnių atvejų kontroliniai sprendiniai. Jais gali tarnauti „vienišo“ lašelio modelių pagrindu vandens lašelių šilumos ir masės mainų dūmuose tyrimo rezultatai. „Vienišo“ lašelio atveju išpurkšto vandens šilimas ir faziniai virsmai nepakeičia dūmų būsenos, todėl (1) lygties spręsti nebereikia. Tokios šilumos ir masės mainų sąlygos stebimos kontaktiniuose šilumokaityuose, kai į dūmus įpurškiami nežymūs vandens kiekiai, todėl dūmų parametrai juose šylant vandens lašeliams nedaug tepakinta.

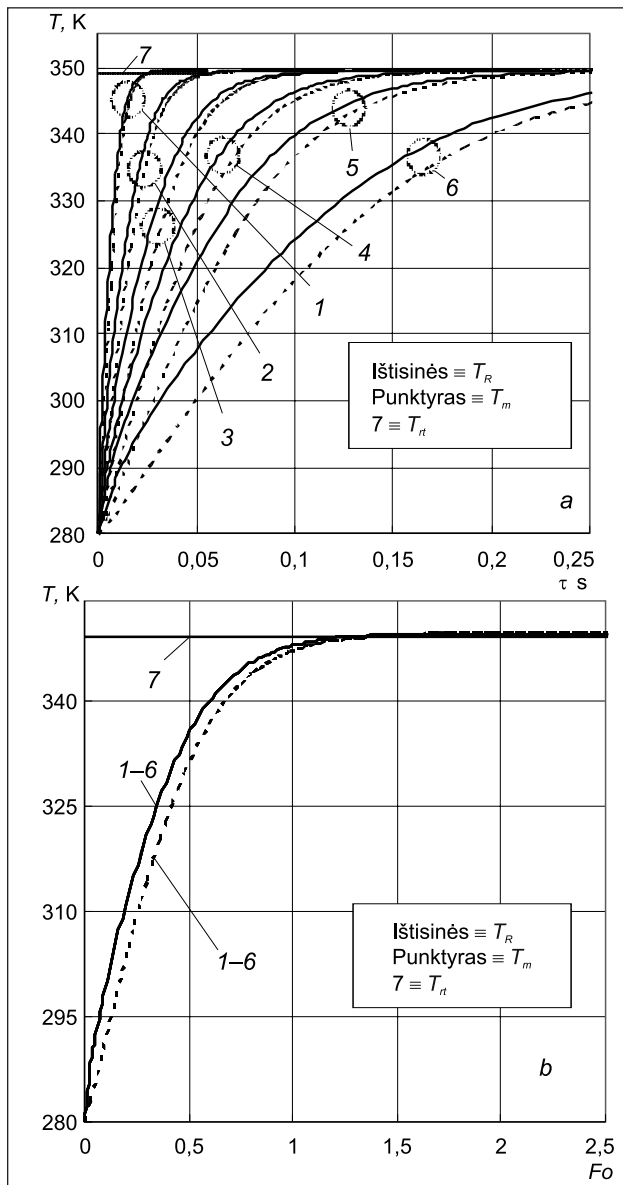
(2)–(12) algebrinių ir integralinių lygčių sistemos skaitinio sprendimo schema sudaroma numatytą lašelio šildymo t kontrolinę trukmę padalijus į baigtinių skaičių τ_i tarpinių verčių, o bematę lašelio koordinatę $\eta_j \equiv r_j / R$ skaidant į baigtinių skaičių tarpinių $\Delta\eta_j = \eta_{j+1} - \eta_j$ intervalų. Determinuojant lašelio paviršiaus temperatūros kitimą aprašančią $T_R(\tau)$ funkciją, iteracijai reikalingi, tačiau dar nežinomi lašelio šilumos ir masės mainų parametrai prilyginami ankstesniojoje iteracijoje apskaičiuotiesiems.

3. TYRIMO REZULTATAI

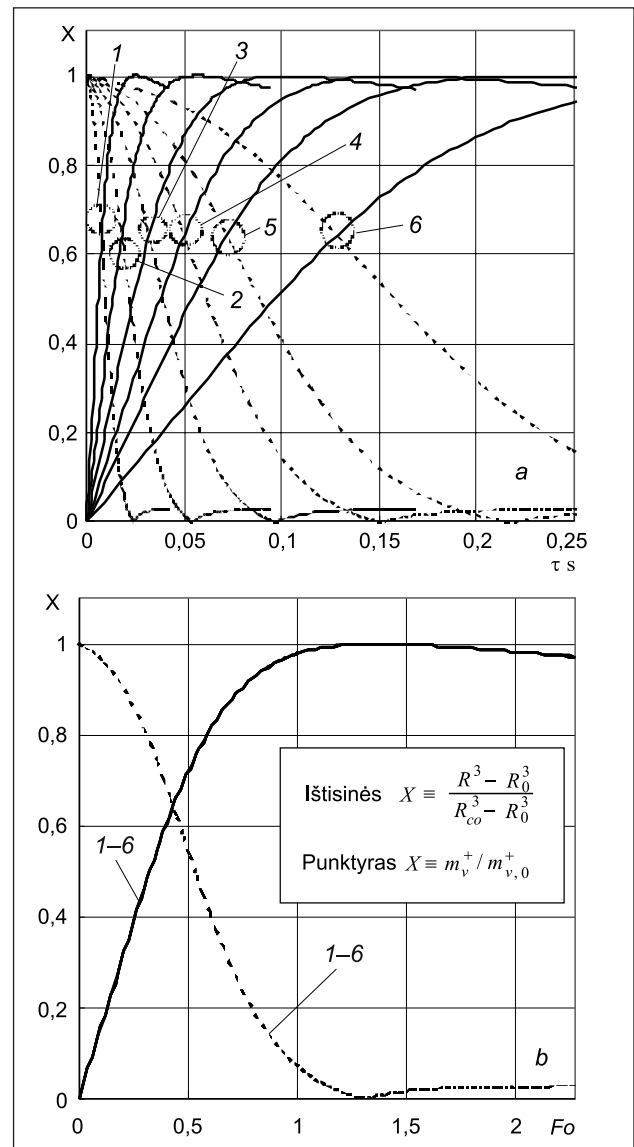
Lašelio slydimo intensyvumą dūmuose apibrėžia Reinoldso kriterijus (Re). Vienišo vandens lašelio nestacionariųjų šilumos ir masės mainų tyrimo rezultatai pasrovinio vandens įpurškimo atveju išryškino be slydimo ($Re \equiv 0$) neša-

mų lašelių terminės būsenos kitimo pažinimo svarbą [4]. Neslystantys dūmuose lašeliai yra šildomi laidumu. Tuomet Furjė kriterijumi, įvertinančiu laiko mastelį, lašelių terminė būsena (1 pav.) ir jų faziniai virsmai (2 pav.) aprašomi būdingosiomis kreivėmis. Pastarosios atspindi lašelių, kurių šilumos ir masės mainams Knudseno sluoksnio poveikis yra nežymus, šilimo dinamiką ir fazinių virsmų spartos kaitą. Šios kreivės yra svarbios sudėtingesnių už lašelio šildymą laidumu šilumos mainų sąlygų įtakos palyginamajam vertinimui. Lašelių gyvavimą dūmuose atspindi vieningas laiko ciklas $0 - Fo_{co} - Fo_e - Fo_f$. Jį būdingosios Furjė kriterijaus vertės suskaido į savitus intervalus. $Fo \equiv 0$ apibrėžia vandens įpurškimo į dūmus momentą. $Fo \equiv Fo_{co}$ apibrėžia fazinių virsmų lašelių paviršiuje prigimties pokyčio momentą garo

kondensacinį režimą keičiant vandens garavimui. Todėl intervalas $0 - Fo_{co}$ atspindi kondensacinio fazinių virsmų režimo trukmę. $Fo \equiv Fo_e$ apibrėžia pusiausvirų fazinių virsmų pradžios momentą, kuomet vandenį pradeda garinti visa lašeliui iš išorės teikiama šiluma. Todėl intervalas $0 - Fo_e$ atspindi nestacionariųjų fazinių virsmų trukmę. Intervalas $0 - Fo_f$ apibrėžia lašelio egzistavimo laiką iki jis išgaruoja. Minėtame lašelio gyvavimo cikle svarbūs be slydimo dūmų nešamų lašelių atveju stebimos Furjė kriterijaus būdingosios reikšmės: $Fo_{co, Re=0}$, $Fo_e, Re=0$, ir $Fo_f, Re=0$. Pastarąsias panaudojus kaip normuojančiąsias, lašelių šildymo laidumu atveju gaunami būdingų masės mainų procesų kitimo universalūs intervalai: $Fo / Fo_{co, Re=0} \equiv 0-1$ atspindi laidumu šildomų lašelių kondensacinio režimo universalią trukmę;



1 pav. Laidumu šildomo ($Re \equiv 0$) vandens lašelio paviršiaus temperatūros (T_R) ir jo masės vidutinės temperatūros (T_m) kitimas realiaje laike (a) ir Furjė kriterijaus laiko mastelyje (b). $R_0 \cdot 10^6$, m: (1) 50, (2) 75, (3) 100, (4) 125, (5) 150, (6) 200; $m_{v,0}^+ \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$: (1) 0,191, (2) 0,127, (3) 0,0954, (4) 0,0763, (5) 0,0636, (6) 0,0477. $T_g = 373 \text{ K}$; $\bar{p} \equiv p_{v,\infty} / p = 0,4$; $T_{i,0} = 280 \text{ K}$



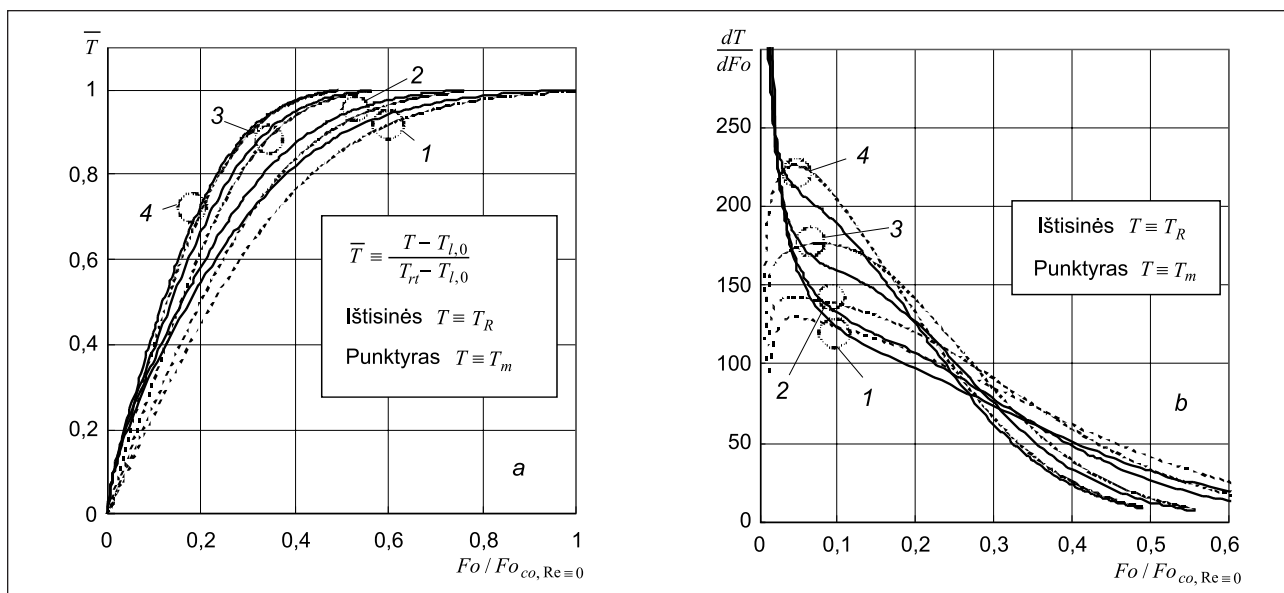
2 pav. Laidumu šildomo ($Re \equiv 0$) vandens lašelio normuoto tūrio bei normuoto garo srauto tankio jo paviršiuje kitimas kondensaciniame fazinių virsmų režime. $R_0 \cdot 10^6$, m: (1) 52,34, (2) 78,52, (3) 104,69, (4) 130,86, (5) 157,04, (6) 209,38; $m_{v,0}^+ \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$: (1) 0,191, (2) 0,127, (3) 0,0954, (4) 0,0763, (5) 0,0636, (6) 0,0477. Kraštinės sąlygos kaip 1 pav.

$Fo / Fo_{e, Re=0} \equiv 0-1$ atspindi laidumu šildomų lašelių nestacionariųjų fazinių virsmų režimo universalią trukmę; $Fo / Fo_{f, Re=0} \equiv 0-1$ atspindi laidumu šildomų lašelių fazinių virsmų dūmuose universalią trukmę. Jie svarbūs sudėtingesnių už lašelio šildymą laidumu šilumos mainų sąlygų įtakos palyginamajam vertinimui. Nukrypimas nuo šių masės mainų procesų trukmės būdingų intervalų atspindės lašelio sudėtingo šildymo poveikį lašelio šilumai ir faziniams virsmams. Pasrovinio tekėjimo atveju vandens lašelių slydimo dūmuose intensyvumą nusako dūmų ir išpurkšto vandens lašelių greičių skirtumas pradiniam kontaktinio šilumokaičio skerspjūvyje. Galima numanyti, jog pasrovinio tekėjimo atveju lašelių slydimas dūmuose sparčiai slops veikiant trinties jėgoms. Todėl bus palankios sąlygos palengva įsivyravuti lašelių šildymui laidumu. Priešrovinio tekėjimo atveju lašelių slydimo dūmuose greitį nusakys lašelių ir dūmų judėjimo greičių suma. Pagal lašelių judėjimo kryptį pirmajame šilumokaičio skerspjūvyje lašelių slydimo greitį lems jų pradinis greitis ir dūmų ištekėjimo iš šilumokaičio greitis. Tolesniuose šilumokaičio pjūviuose lašelių greičiai turės įtakos du priešingo poveikio efektai: dėl laisvojo kritimo lašeliai turėtų greitėti, o dėl trinties jėgų poveikio – lėtėti. Todėl galimi įvairūs lašelių judėjimo dinamikos atvejai, netgi pereinant į pasrovinio judėjimo schemą. Krintančių lašelių greitėjimą pristabdant pasipriešinimo jėgoms, o pastovaus skerspjūvio šilumokaityje dūmų tekėjimo greičiui praktiškai nekintant, priešroviniam šilumokaityje galima lašelių judėjimo dinamika, užtikrinanti lašelius šildantį šilumos konvekcijos srautą nedaug bekintančio Reinoldso kriterijaus sąlygomis. Lašelių slydimo dūmuose įtakos jų kondensaciniam fazinių virsmų režimui pirminiam vertinimui atliktas skaitinis eksperimentas, kai vandens priešrovinio įpurškimo į dūmus atveju galioja prielaida, jog $Re(Fo) \approx \text{const} \equiv Re_0$. Tuomet „vienišo“ lašelio šilumos ir

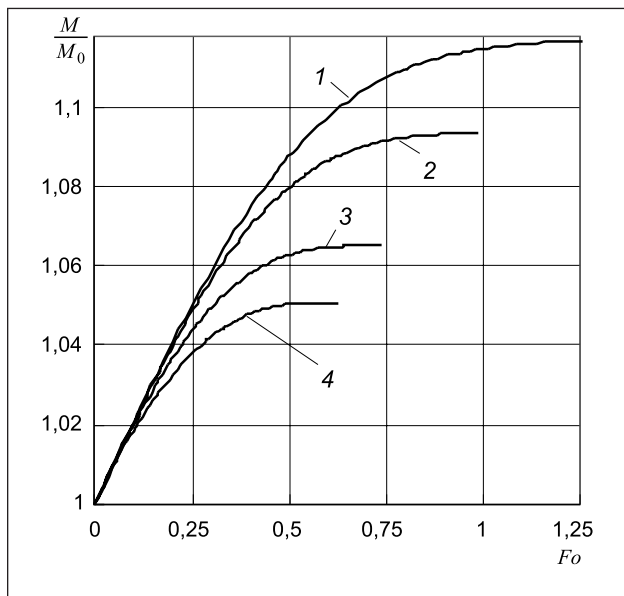
masės mainams dūmuose priešrovinio vandens įpurškimo atveju tirti galima pritaikyti pasrovinio tekėjimo modelį.

Vandens terminės būsenos kitimo dūmų šilumos utilizavimo kontaktiniame šilumokaityje vertinimui yra svarbios vandens lašelio paviršiaus ir lašelio masės vidutinės temperatūros dinamikos. Lašelio paviršiaus temperatūros kitimo kontrolė svarbi dūmuose sukauptos fazinių virsmų šilumos utilizavimo proceso valdymui, o lašelio masės vidutinės temperatūros pokytis rodo vandens pašilimo kontaktiniame šilumokaityje laipsnį. Šylančio lašelio paviršiaus temperatūros pokytį kondensaciniame fazinių virsmų režime riboja ištekanti iš šilumokaičio dūmų drėgnumo sąlygota rasos taško temperatūra. Dūmuose šylančio lašelio masės vidutinė temperatūra kinta lėčiau už lašelio paviršiaus temperatūrą (3 pav., a). Tai lemia skirtingas šių temperatūrų kitimo tempas (3 pav., b). Lašelio paviršiaus temperatūros kitimo tempas kondensaciniame fazinių virsmų režime sparčiai slopsta. Lašelio masės vidutinės temperatūros tempas yra mažesnis, tačiau kurį laiką auga, o po to taip pat slopsta. Egzistuoja laiko momentas, kai minėtų temperatūrų kitimo tempai susilygina ir po to jau intensyviau kinta lašelio masės vidutinė temperatūra. Lašelio šilimo tempui turi įtakos jo slydimo dujos greitis. Dūmuose slystančio lašelio paviršiuje kylančios trinties jėgos verčia vandenį tekėti lašelio paviršiuje [9]. Susidarantys vandens sūkurių palaipsniui veikia vis gilesnius lašelio sluoksnius ir šilumos plitimas lašelyje konvekcija stiprėja. Tai užtikrina tolygesnį lašelių sluoksnių šilimą. Šilumos konvekcijos įtaka lašelio šilumai reikšmingesnė, kai lašelio slydimo dūmuose greitis didesnis (3 pav.). Dūmuose slystančiam lašeliui šiluma teikiama intensyviau, todėl kondensacinis fazinių virsmų režimas jo paviršiuje sutrumpėja ir vandens garo susikondensuoja mažiau (4 pav.).

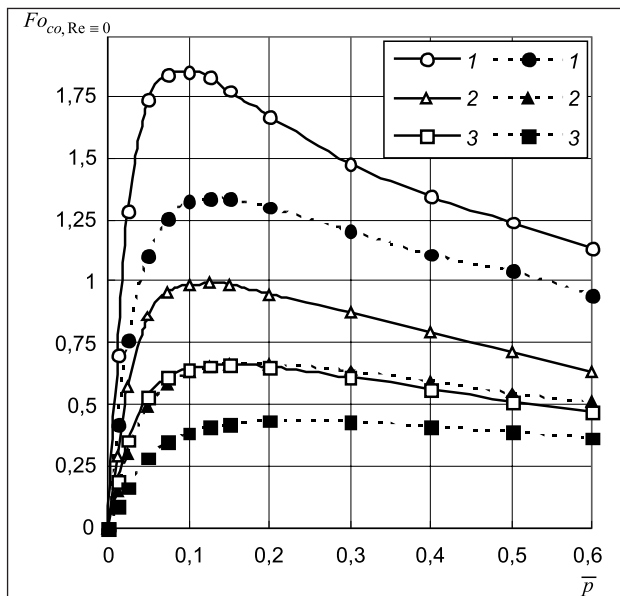
Lašelio slydimas dūmuose juntamai veikia lašelio energinį balansą (5 pav.): lašelio slydimo greičiui augant dūmai jį



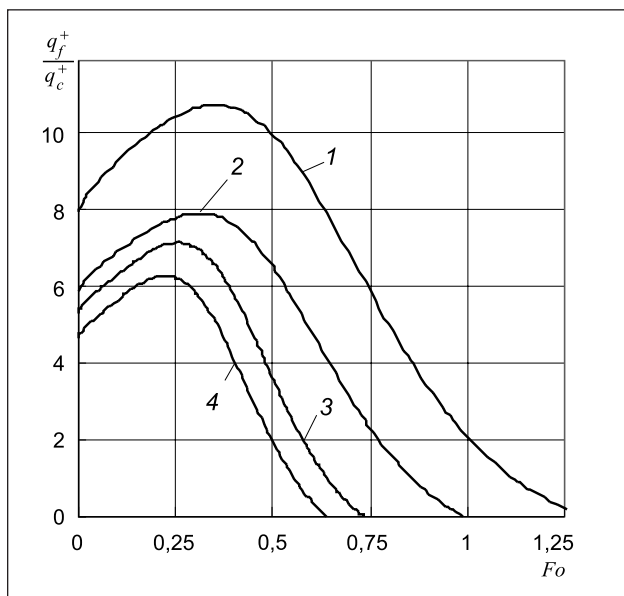
3 pav. Lašelio slydimo dūmuose įtaka jo šilimo dinamikai. Re: (1) 0, (2) 2,5, (3) 5, (4) 10; $T_g = 373$ K; $\bar{p} = 0,4$; $T_{l,0} = 280$ K



4 pav. Vandens lašelio masės priaugio kondensaciniame fazinių virsmų režime priklausomumas nuo lašelio slydimo dūmuose intensyvumo. Re: (1) 0, (2) 2,5, (3) 5, (4) 10; $T_g = 373$ K; $\bar{p} = 0,4$; $T_{l,0} = 280$ K

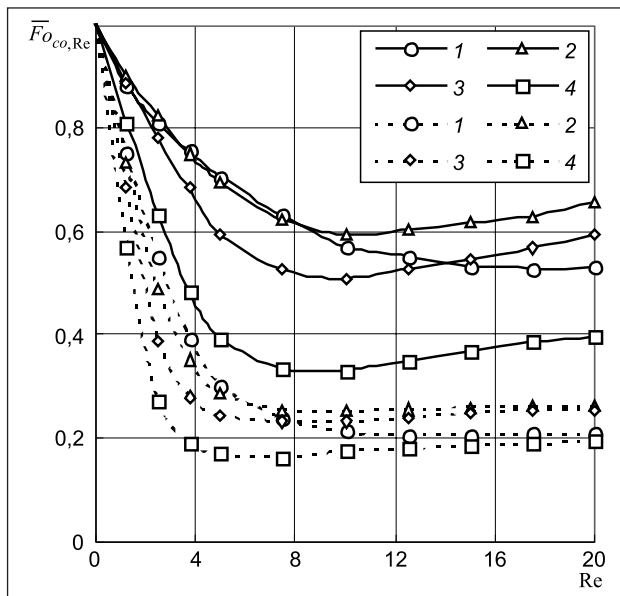


6 pav. Be slydimo dūmų nešamų lašelių kondensacinio fazinių virsmų režimo universalios trukmės diagrama. $\bar{T}_g \equiv T_g / 373,15$: (1) 1, (2) 1,25, (3) 1,5; $\bar{T}_{l,0} \equiv (T_{l,0} - T_{l,0}) / (T_{l,0} - 273,15)$: (ištinės linijos) 1, (punkttyras) 0,5; Re = 0



5 pav. Vandens lašelio slydimo dūmuose įtaka jo energiniam balansui. Re: (1) 0, (2) 2,5, (3) 5, (4) 10; $T_g = 373$ K; $\Delta \bar{p} = 0,4$; $T_{l,0} = 280$ K

šildo vis intensyviau, todėl dūmuose sukauptos fazinių virsmų šilumos utilizavimo efektyvumas sumažėja. Konkretiems dūmų ir į juos įpurškiamo vandens parametrams kondensacinis fazinių virsmų režimas lašelių paviršiuje truks ilgiausiai, jeigu lašeliai bus šildomi laidumu (6 pav.). Galimas lašelių slydimas dūmuose kondensacinio fazinių virsmų režimo trukmę gana ryškiai sutrumpina (7 pav.). Aukštesnės temperatūros dūmuose slystantiems lašeliams kondensacinio režimo trukmės sumažėjimas, palyginti su lašelių šildymo laidumu atveju, yra ženklus, tačiau mažiau jautrus dūmų drėgnu-



7 pav. Lašelių slydimo dūmuose poveikis kondensacinio fazinių virsmų režimo jų paviršiuje trukmei. \bar{T}_g : (ištinės linijos) 1, (punkttyras) 1,5; \bar{p} : (1) 0,1, (2) 0,25, (3) 0,4, (4) 0,6; $\bar{Fo}_{co,Re} \equiv Fo_{co,Re} / Fo_{co,Re=0}$; $\bar{T}_{l,0} \equiv 1$

mui. Modeliuotais atvejais gauta, jog ryškiausi kondensacinio režimo lašelių paviršiuje trukmės pokyčiai stebimi Reinoldso kriterijui augant iki dešimties, o vėliau ji daugmaž nusistovi (7 pav.).

Lašelių slydimo dūmuose įtakos jų paviršiuje vykstančiai vandens garo kondensacijai išsamesniam vertinimui būtina gilesnė sudėtinio šilumos plitimo lašeliuose ir jų šildymo sąlygų kitimo įtakos kompleksinė analizė priešrovinio tekėjimo kontaktiniame šilumokaityje atveju.

4. IŠVADOS

1. Fazinių virsmų šilumos iš dūmų utilizavimas bus efektyvus, kai lašelių energiniame balanse vyraus jų paviršiuje besikondensuojančio vandens garo išskiriama šiluminė energija. Todėl verta iš pradžių dūmus giliai atausinti, o po to iš jų utilizuoti vandens fazinių virsmų šilumą.

2. Kondensacinio fazinio virsmų režimo vandens lašelių paviršiuje trukmei didelę įtaką turi dūmų drėgnumas ir temperatūra, įpurškiamo vandens parametrai bei lašelių šildymo būdas.

3. Dūmuose slystančio lašelio energiniame balanse stiprėjant šilumos konvekcijos įtakai, kondensacinis fazinių virsmų režimas sutrumpėja. Kondensacinio režimo lašelių paviršiuje trukmę galima prailginti mažinant lašelių slydimo dūmuose intensyvumą.

Gauta 2009 05 01

Priimta 2010 01 05

Literatūra

1. Communication from the Commission to The Council and the European Parliament. *Thematic Strategy on Air Pollution*. Brussels, 2005. P. 2.
2. Miliauskas G. G., Miliauskas G. J., Miknis A. Vandens lašelių kondensacinis šilimas dūmuose: praktinė svarba ir modeliavimas. *Konferencijos „Šilumos energetika ir technologijos“ pranešimų medžiaga*. Kaunas: KTU–LEI, 2006. 8 p.
3. Tseng C. C., Viskanta R. Enhancement of water droplet evaporation by radiation absorption. *Fire Safety Journal*. 2006. Vol. 41. P. 236–247.
4. Miliauskas G., Sabanas V. Interaction of transfer processes during unsteady evaporation of water droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2006. Vol. 49. P. 1790–1803.
5. Kuzikovskij A. V. Dynamic of spherical particle in powerful optical field. *Izvestiya VUZ. Fizika*. 1970. Vol. 5. P. 89–94.
6. Sazhin S. S. Advanced models of fuel droplet heating and evaporation. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2006. Vol. 32. P. 162–214.
7. Miliauskas G. Regularities of unsteady radiative-conductive heat transfer in evaporating semitransparent liquid droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2001. Vol. 44. P. 785–798.
8. Miliauskas G. Interaction of the transfer processes in semitransparent liquid droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2003. Vol. 46. P. 4119–4138.
9. Abramzon B., Sirignano W. A. Droplet vaporization model for spray combustion calculations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1989. Vol. 32. N 9. P. 1605–1618.
10. Miliauskas G. G., Miliauskas G. J., Montvilas R. Drėgnuose dūmuose šylančių lašelių kondensacinis augimas. *Energetika*. 2008. T. 54. Nr. 3. P. 17–24.

Gintautas Miliauskas, Kristina Norvaišienė,
Giedrius Miliauskas

PHASE TRANSFORMATIONS OF WATER DROPLETS THAT SLIP IN FLUE GAS

Summary

Heating of water droplets that slip in flue gas is modelled in the mode of unsteady phase transformations as the presence of water has no significant influence on the parameters of flue gas, and the dynamics of two-phase flow ensures the droplet convective heating conditions defined by the constant Reynolds number. The condensation mode of phase transformations of the droplets that slip in flue gas is analyzed using the Fourier number-based time scale. The diagrams showing the universal duration of the condensing phase transformations mode of conductively heated droplets and the influence of droplet slip are presented.

Key words: humid flue gas, water droplet, condensation growth and heating, interaction of transfer processes

Гинтаутас Миляускас, Кристина Норвайшене,
Гедриус Миляускас

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ СКОЛЬЗЯЩИХ В ДЫМОВОМ ГАЗЕ КАПЕЛЬ ВОДЫ

Резюме

В нестационарном режиме фазовых превращений смоделирован процесс нагрева в дымовом газе скользящих капель воды, когда впрыск воды не оказывает влияния на параметры дымового газа, а динамика движения двухфазного потока обеспечивает неизменным критерием Рейнольдса обусловленные условия конвективного нагрева капель. Конденсационный режим фазовых превращений скользящих в дымовом газе капель воды исследован с помощью критерия Фурье. Представлены диаграммы универсальной продолжительности конденсационного режима фазовых превращений при кондуктивном нагреве капель, а также диаграммы для учета влияния скольжения капель.

Ключевые слова: скольжение капель в дымовом газе, конденсационный рост и нагрев, взаимодействие процессов переноса