
Kondensacijos pliūpsnio tyrimas

3. Nesikondensuojančių dujų įtaka

Raimondas Pabarčius,
Marijus Šeporaitis,
Kazys Almenas

*Lietuvos energetikos institutas,
Branduolinių įrenginių saugos
laboratorija,
Breslaujos g. 3,
LT-3035 Kaunas*

Trečiajame šios serijos straipsnyje nagrinėjama tarpfazinio paviršiaus šlyties intensifikavimo struktūrų bei nesikondensuojančių dujų įtaka kondensacijos pliūpsniui. Eksperimentų rezultatai patvirtina, kad kondensacijos proceso metu sistemoje esančių nesikondensuojančių dujų įtaka yra ne mažiau svarbi, nei dėl vandens įtekėjimo kylanti vandens turbulencija. Remiantis eksperimentų rezultatais, pateiktas kondensacinio proceso, užsibaigiančio pliūpsniu, fizikinis aiškinimas, įvertintos šilumos perdavimo koeficiento reikšmės įvairiomis kondensacijos fazėmis.

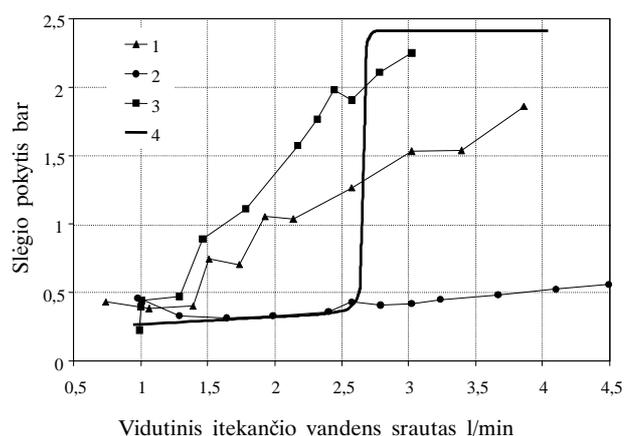
Raktažodžiai: kondensacija, pliūpsnis, šilumos ir masės mainai, nesikondensuojančios dujos

1. ĮVADAS

Pirmajame šios serijos straipsnyje [1] buvo supažindinta su tyrimo objektu, pateikti eksperimentinio įrenginio bei bandymų eigos aprašymai, siekiant dirbtinai sukelti kondensacijos pliūpsnį tiekiant peraušintą vandenį į garu užpildytą talpą (pulserį). Antrajame straipsnyje [2] aprašytos keturios kondensacijos proceso fazės ir, remiantis tyrimo rezultatais, įrodyta, kad vandens ir garo paviršiaus sutrikdymas, būtinas kondensacijos pliūpsniui pasiekti, pulseryje gali kilti savaime, parinkus kritinį vandens įtekėjimo į pulserį srautą. Tačiau tikslas nebuvo visiškai pasiektas, nes pastebėta, kad kai kuriais atvejais, net ir pasiekus kritinį vandens srautą, vanduo pašyla taip staigiai, jog prarandamas vandens peraušinimo potencialas, būtinas kondensacijos pliūpsniui įvykti. Atliktų bandymų metu sistemos slėgis kito ženkliai, tačiau tolygiai.

Siekiant parinkti optimalią srautų pulseryje schemą ir praplėsti kondensacijos vyksmo ribas, tolimesnės eksperimentinės studijos atliktos naudojant papildomai į pulserį įmontuotas šlyties intensifikavimo priemones [1]. Norint padidinti garo greičio horizontaliąją dedamąją, t. y. nukreipti garą lygiagrečiai vandens paviršiu ir taip padidinti šlytį vandens paviršiuje, buvo panaudota metalinė plokštė. Kitu atveju, siekiant sumažinti tarpfazinio paviršiaus bangavimą vandens įtekėjimo pradžioje, prie vandens įtekėjimo vietos buvo įmontuotas kūginis gaubtelis. Trečiu atveju, norint išsiaiškinti atstumo nuo garo įtekėjimo vietos iki vandens paviršiaus įtaką, panau-

doti skirtingo ilgio vamzdžiai. Eksperimentų, atliktų naudojant tarpfazinio paviršiaus šlyties intensifikavimo priemones, rezultatai parodyti 1 pav. Kiekvienas taškas paveiksle žymi atskirame eksperimente užfiksuotą slėgio pokytį per vandens įtekėjimo laiką. Sujungti taškai atitinka bandymų serijas, kuriose kiekvienas eksperimentas buvo atliekamas su vis didesniu įtekančio vandens srautu. Kaip matyti, parinktų šlyties intensifikavimo priemonių naudojimas ne tik nepagerino sąlygų kondensacijos pliūpsniui sukelti, bet ir netgi pablogino jas, palyginti su eksperimentų rezultatais, gautais tuščiaame pulseryje (4 kreivi-



1 pav. Slėgio pokyčio priklausomybė nuo įtekančio vandens srauto, naudojant paviršiaus šlyties intensifikavimo priemones: 1 – su plokšte; 2 – su kūginiu gaubteliu (30/25/14); 3 – su tiesiu garo tiekimo vamzdžiu (ilgis 40 mm); 4 – pulseris be papildomų struktūrų

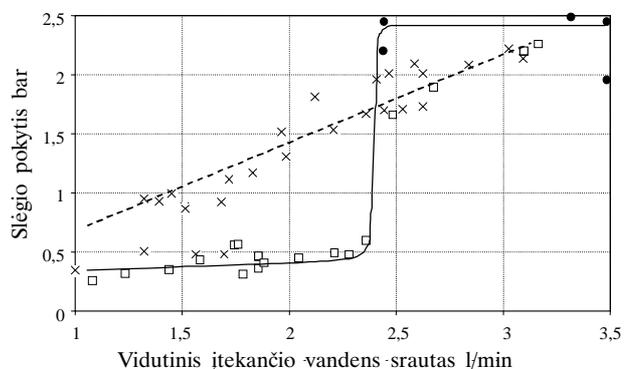
vė). Taip pat klausimų sukėlė nevienoda kondensacijos srauto priklausomybė nuo įtekančio vandens srauto. Šios eksperimentų serijos rezultatai nebuvo įtikinami, bandymai tomis pačiomis sąlygomis sunaikiami pakartojami ir išmatuoti dydžiai labai skyrėsi. Iškelta hipotezė, kad tai yra susiję su neįvertinta ir kol kas netyrinėta nesikondensuojančių dujų įtaka. Tai kiek komplikavo planuotą eksperimentinį tyrimą, kadangi šiame eksperimentiniame stende [1] nebuvo numatyta matuoti pulseryje esančio nesikondensuojančių dujų kiekio.

2. NESIKONDENSUOJANČIŲ DUJŲ ĮTAKA KONDENSACIJAI

Garui kondensuojantis ant tarpfazinio paviršiaus, gaire esančios nesikondensuojančios dujos telkiasi prie jo, taip sudarydamos papildomą varžos sluoksnį [3]. Ši varža atsiranda dėl dviejų priežasčių. Viena jų tai, kad garo molekulėms prie kondensacijos paviršiaus tenka skverbtis per koncentruotą oro sluoksnį difuziniu būdu. Kita kliūtis susidaro dėl to, kad nesikondensuojančioms dujoms koncentruojantis prie kondensacijos paviršiaus mažėja dalinis garo slėgis, kartu mažėja ir jo soties temperatūra. Sumažėjęs vietinis temperatūros skirtumas tarp vandens paviršiaus ir garo taip pat riboja kondensaciją. Jei nesikondensuojančios dujos sunkesnės (pvz., vyraujant orui), tai atsiranda natūrali jų cirkuliacija vertikalia kryptimi, tačiau virš horizontalaus paviršiaus susikaupęs dujų sluoksnis išlieka stabilus. Jis gali būti suardytas judančio garo ar vykstant priverstinei konvekcijai. Klasikiniai tyrimai [3, 4] rodo, kad priklausomai nuo to, kokia – natūrali ar priverstinė – cirkuliacija vyksta, 2–10% (masės dalys) nesikondensuojančių dujų koncentracija sumažina kondensacijos srautą kelis kartus. Daugeliui tekėjimų (įvairios formos kanalais, vamzdžiais ir pan.) žemesnės nei 2% nesikondensuojančių dujų koncentracijos įtaka neženkliai. Į šiuos įvertinimus buvo atsižvelgta nagrinėjant mūsų anksčiau atliktų eksperimentų rezultatus bei atliekant papildomus bandymus. Esant savitoms tekėjimo (tiesioginis vandens ir garo sąlytis, maži garo greičiai prie tarpfazinio paviršiaus) ypatyboms pulseryje susidaręs nesikondensuojančių dujų (oro) sluoksnis prie paviršiaus yra labai stabilus, todėl net ir maža oro koncentracija tampa svarbi. Čia pasireiškia du vienas prieš kitą veikiantys efektai: 1) dinaminio kondensacijos proceso pradžioje prie paviršiaus susidaręs sluoksnis riboja energijos ir masės mainus (papildoma varža) ir sulėtina vandens pašilimą, 2) lygiagrečiai paviršiui judantis garas sklaido šį sluoksnį, todėl energijos srautas į tarpfazinį paviršių didėja. Teigiamas oro efektas yra tai, kad vandeniui tekant į pulserį susikaupęs oro sluoksnis padeda išlaikyti vandens peraušimo temperatūros

potencialą. Kai šis sluoksnis suardomas, gaunamas gilus kondensacijos pliūpsnis. Tai iliustruoja 2 pav. pateikta anksčiau atliktų eksperimentų duomenų suvestinė. Paveiksle pateiktas slėgio pokytis, apskaičiuotas pagal matavimus, atliktus pradėjus ir baigus tiekti šaltą vandenį į pulserį. Kaip minėta, šių eksperimentų metu į oro įtaką nebuvo atsižvelgta, todėl oro koncentraciją įvertinsime tik kokybiškai. Pirmą bandymų seriją (stačiakampiai ir taškai 2 pav.) atlikta iš eilės išlaikant vienodas pradines sąlygas, taigi oro kiekis sistemoje buvo panašus. Matyti, kad pasiekus kritinį vandens įtekėjimo srautą ~2,4 l/min, kondensacijos srautas išauga staigiai ir ženkliai (dideli slėgio pokyčiai). Tai sudaro galimybę pliūpsniui įvykti (juodi taškai 2 pav.). Tačiau atskirais atvejais, net ir pasiekus kritinį vandens srautą, kondensacijos pliūpsnio sukelti nepavyko. Taip atsitiko todėl, kad į pulserį įtekantis vanduo per greit pašilo ir peraušimo potencialas, reikalingas pliūpsniui įvykti, buvo nepakankamas. 2 pav. kryžiukais pažymėti taškai atitinka kitu laiku atliktą bandymų seriją išlaikant tokias pačias pradines sąlygas. Šiuo atveju slėgio pokyčio priklausomybė nuo įtekančio vandens srauto labai skiriasi. Aiškiai matyti tiesinė priklausomybė, nors ir būtų galima išvelgti kritinį įtekančio vandens srautą intervale 1,5–1,7 l/min. Padaryta prielaida, kad tokį šių bandymo serijų rezultatų išsiskyrimą nulemia skirtingas oro kiekis sistemoje.

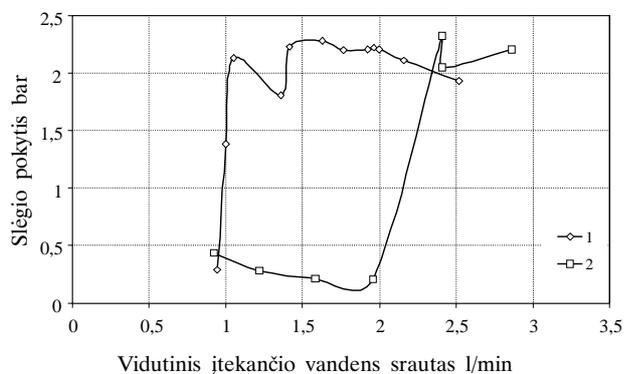
Norint patikrinti savo prielaidas ir kokybiškai įvertinti oro įtaką, buvo atlikti papildomi eksperimentai. Jie buvo kartojami kelis kartus išlaikant tas pačias sąlygas. Prieš atliekant bandymus iš sistemos buvo pašalinamas oras (keletą kartų į sistemą prileidžiant ir išleidžiant garą), taip sumažinant nesikondensuojančių dujų koncentraciją iki ~10 (mg oro / l garo). Kita bandymų serija atlikta į pulserį iš papildomos suslėgto oro talpos įleidžiant nustatytą oro kiekį (oro koncentracija sistemoje ~1300 (mg oro / l



2 pav. Slėgio pokyčio priklausomybė nuo vidutinio vandens įtekėjimo srauto, kai pradinis sistemos slėgis 3,5 bar (vandens įtekėjimo atvamzdžio skersmuo 17 mm): juodi taškai – pliūpsnis įvyko; stačiakampiai ir kryžiukai – pliūpsnis neįvyko, skirtinga oro koncentracija sistemoje

garo)). Šis metodas turi trūkumą – įleistas į pulserį oras sistemoje pasiskirsto nevienodai. Pakeitus oro įleidimo vietą (oras buvo leidžiamas tiesiog į pulserį arba į garo resiverį) gauti skirtingi rezultatai. Tai dar kartą patvirtino, kad vietinė oro koncentracija prie tarpfazinio paviršiaus yra labai svarbi. Analizuojant šių dviejų bandymų serijų, su skirtinga oro koncentracija sistemoje (koncentracija skiriasi daugiau nei 100 kartų), rezultatus, 3 pav. galima pastebėti, kad esant minimaliai oro koncentracijai (1 kreivė) kondensacijos metu gaunami dideli slėgių pokyčiai (~2 bar), tačiau eksperimentų metu slėgis krinta monotoniškai ir pliūpsnio neįvyksta. Didėjant vandens įtekėjimo srautui ir kai sistemoje oro yra daug (2 kreivė), slėgio pokytis eksperimentų metu išlieka maždaug stabilus, kol pasiekus kritinį vandens srautą ~2,4 l/min Δp staigiai išauga. Tai įvyksta, kai oro sluoksnis prie paviršiaus yra suardomas (nupučiamas garo).

Taigi pateiktų rezultatų analizė patvirtino, kad kondensacijos proceso metu sistemoje esančių nesikondensuojančių dujų įtaka yra ne mažiau svarbi, nei vandens turbulencija. Gauti rezultatai aiškiai rodo mažos oro koncentracijos įtaką ir leidžia nusakyti staigų kondensacijos pliūpsnį sukeliančių procesų eigą.



3 pav. Slėgio pokyčio priklausomybė nuo vidutinio vandens įtekėjimo srauto esant skirtingam oro kiekiui sistemoje, kai pradinis sistemos slėgis 3,5 bar (vandens įtekėjimo atvamzdžio skersmuo 10 mm): 1 – oro koncentracija 0,01 g/l garo; 2 – oro koncentracija 1,3 g/l garo

3. KONDENSACIJOS PLIŪPSNĮ SUKELIANČIŲ PROCESŲ EIGA ESANT ORO ĮTAKAI

Pliūpsniu užsibaigiančios kondensacijos eigą vandens ir garo sistemoje apžvelgsime, nagrinėdami pagrindines masės/energijos pernešimo per tarpfazinį paviršių ypatybes. Kondensuojantis garui tarpfazinio paviršiaus temperatūra labai greitai (kelios ms [3]) pasiekia artimą garo sočiai temperatūrą ir tada kondensaciją pradeda riboti šilumos atidavimo į vandens

gilumą greitis. Pavyzdžiui, vandens ir garo sistemoje šilumos nuvedimo nuo kondensacijos paviršiaus greitis yra 10^3 – 10^5 kartų mažesnis nei garas galėtų jį tiekti. Taigi kondensacijos greitį nulemia efektyvusis vandens laidumas, kuris priklauso nuo vandens turbulencijos, bei realus tarpfazinio paviršiaus plotas, priklausantis nuo bangavimo. Šioms ypatybėms turi įtakos garo tekėjimo greitis lygiagrečiai fazių kontakto paviršiui (fazių trintis, paviršiaus nestabilumas), kartu su kondensacijos dedamosios sukeliama šlytimi. Kai sistemoje yra nesikondensuojančių dujų, atsiranda dar vienas svarbus veiksnys. Visų veiksnių tarpusavio sąveikoje atsiranda teigiamas grįžtamasis ryšys, dėl kurio prasideda ir didėja paviršiaus bangavimas. Kadangi tarpfazinis paviršius kuo toliau tuo vis stipriau trikdomas, susidaro palankios sąlygos kondensacijos pliūpsniui įvykti.

Lietuvos energetikos instituto eksperimentiniame įrenginyje [1] į pliūpsnį išsivystantį kondensacijos procesą galima suskirstyti:

Pradinė vandens įtekėjimo fazė. Iš pradžių įtekančiam vandeniui įkaitusios metalinės pulserio sienelės ir besikondensuojantis garas ploną vandens sluoksnį indo apačioje greitai pašildo iki sočiai artimos temperatūros. Vėliau prie pat tarpfazinio paviršiaus susiformavus dideliu temperatūros gradientui įtekėdamas vanduo tik mažina vandens temperatūrą pulseryje. Jei sistemoje yra oro, kondensacijos metu virš tarpfazinio paviršiaus pradeda kauptis koncentruotas nesikondensuojančių dujų sluoksnis ir kondensacija ženkliai mažėja. Susiformavus stratifikuotam kondensacijos paviršiui su jį dengiančiu oro sluoksniu, tolesnis procesas priklauso nuo į pulserį įtekančio vandens srauto (nuo jo priklauso tarpfazinio paviršiaus ploto didėjimo sparta ir vandens turbulencija) ir nuo nesikondensuojančių dujų koncentracijos gare. Toliau galimi trys kondensacijos proceso vyksmą nulemiantys pereinamieji režimai:

1 režimas. Koncentruoto oro sluoksnio suardymas.

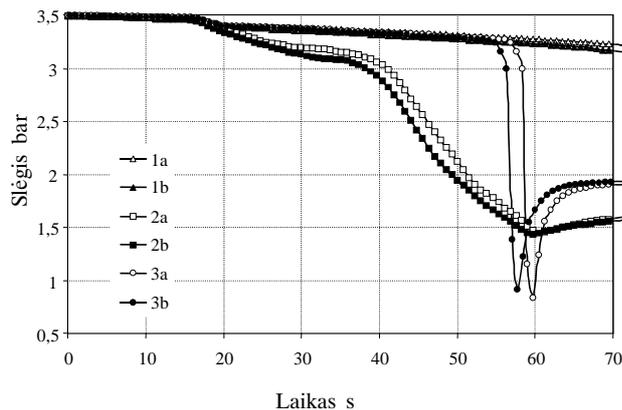
2 režimas. Tarpfazinio paviršiaus bangavimo pradžia.

3 režimas. Eksponentinis tarpfazinio paviršiaus trikdymas, peraugantis į visišką suardymą ir po to sekantį kondensacijos pliūpsnį.

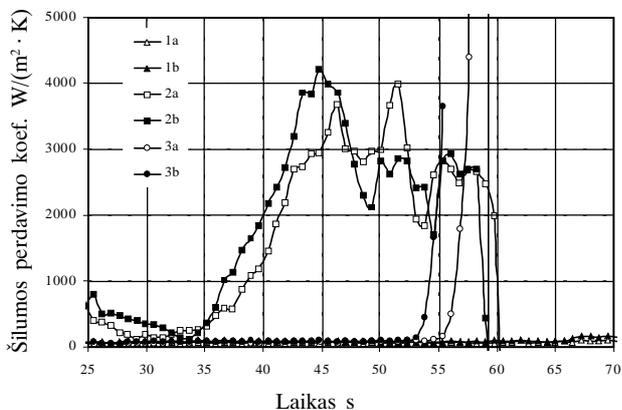
Minėti režimai gali keisti vieną kitą staiga arba jie gali vykti kartu, pvz., nesikondensuojančių dujų sluoksnio suardymas ir tarpfazinio paviršiaus bangų susidarymas. Atliktų eksperimentų metu užfiksuotų pereinamųjų režimų kaita pavaizduota 4 ir 5 pav. Šie bandymai atlikti, kai slėgis sistemoje 3,5 bar, kai 2 litrai šalto vandens į pulserį įteka tuo pačiu greičiu (2,4 l/min). Jie skiriasi tik pulseryje esančiu oro kiekiu. Siekiant parodyti parinktų būdingų trijų režimų „kartotinumą“, pateikta po du bandymus su panašia oro koncentracija (pa veiksluose pažymėti a ir b).

Slėgio kitimas bandymų metu pavaizduotas 4 pav., kuriame aiškiai matyti difuzinio oro sluoksnio susidarymas bei suardymas. Tik patekus šaltam vandeniui į pulserį, jame iš karto prasideda garo kondensacija (krinta slėgis). Esant santykinai dideliame oro kiekiui sistemoje (~0,04 g/l garo) oro sluoksnis virš paviršiaus susidaro labai greitai, todėl kondensacijos srautas sumažėja iki minimumo (1, 3 kreivės). Kai gare yra mažiausia oro koncentracija (~0,01 g/l garo), šis nesikondensuojančių dujų sluoksnis susiformuoja per ilgesnį laiką (2a, 2b kreivės). Oro sluoksnio nupūtimą rodo staigus slėgio kritimas. Ankstesniame straipsnyje [2] buvo pademonstruota, kad sukuriamas kondensacijos srautas proporcingas slėgio mažėjimui. Tai patvirtina [3, 4] išdėstytus teiginius, kad didesnė nei 2% (masės dalys) nesikondensuojančių dujų koncentracija ženkliai sumažina kondensaciją. Mūsų atveju (1, 3 kreivės) koncentracija siekė 2,2% (masės dalys).

Šilumos perdavimo koeficiento kitimas šiuose perinamuosiuose procesuose akivaizdžiai skirtingas (5 pav.). Palyginkime apskaičiuoto koeficiento reikš-



4 pav. Slėgio kitimas esant skirtingai oro koncentracijai sistemoje kai pradinis sistemos slėgis 3,5 bar: 1 – oro koncentracija 0,042 g/l; 2 – 0,01 g/l; 3 – 0,038 g/l.



5 pav. Šilumos perdavimo koeficiento kitimas (žr. 4 pav.)

mes su kitų autorių rezultatais. Tyrinėjant stratifikuotą dvifazį tekėjimą kanalais [5–7] tiek vandens, tiek garo turbulencija yra didesnė nei mūsų atveju. Priklausomai nuo turbulencijos kanale šilumos perdavimo koeficientas gali kisti 200–35000 W/(m² · K) ribose. Anksčiau kitų autorių atliktuose eksperimentuose buvo pastebėtas kondensacijos proceso nepastovumas keičiantis tarpfazinio paviršiaus morfologijai, t. y. atsirandant bangoms. Šilumos perdavimo koeficientui apskaičiuoti parinktos atitinkamos koreliacijos esant lygiam ir banguotam tarpfaziniam paviršiui [5, 7]. Šios koreliacijos negali būti tiesiogiai naudojamos įvertinant kondensaciją mūsų pulseryje, kadangi įtekėjimo pobūdis labai skiriasi, palyginti su tekėjimu kanale. Vis dėlto, literatūroje pateikti duomenys nurodo šilumos perdavimo koeficiento reikšmes, kurias galime pasiekti esant didesnei vandens ir garo turbulencijai pulseryje. Remiantis mūsų gautais eksperimentų rezultatais apskaičiuotas šio koeficiento reikšmes galime palyginti su darbe [8] pateiktais rezultatais, kurie gauti tyrinėjant lėtai judantį skystį. Šiomis sąlygomis priklausomai nuo skysčio tekėjimo greičio ir jo turbulencijos šilumos perdavimo koeficientas gali kisti ~200–3000 W/(m² · K) ir tai sutampa su mūsų skaičiavimo rezultatais (5 pav.). Didžiausios reikšmės ~3500 W/(m² · K) (2a, 2b kreivės) atitinka tiesioginę garo kondensaciją ant vandens, kurio paviršinių sluoksnių turbulencija nedidelė. Mažiausios reikšmės ~100–200 W/(m² · K) pasiekiamos, kai garas kondensacijos metu turi difuzijos būdu skverbtis per susikaupusių nesikondensuojančių dujų sluoksnį (1a, 1b kreivės).

4. IŠVADOS

Remiantis eksperimentuose gautais rezultatais įrodyta, kad kondensacijos pliūpsnio išsivystymui nesikondensuojančių dujų (oro) koncentracija sistemoje yra vienodai svarbi kaip ir turbulencija. Vykstant kondensacijai sistemoje esantis oras nesikondensuoja ir stabilizuojamas gravitacijos kaupiasi virš tarpfazinio paviršiaus. Ši kliūtis trukdo garo kondensacijai. Tačiau garo greičiui pasiekus tam tikrą ribą oro sluoksnio vientisumas suardomas. Tada padidėjus kondensacijos srautui fazių šlytis padidėja, trikdomas vandens paviršius pradeda banguoti ir įvyksta kondensacijos pliūpsnis.

Eksperimentų rezultatų analizė parodė, kad kondensacinis šilumos perdavimo koeficientas labai priklauso nuo sistemoje esančio oro kiekio. Jis gali kisti nuo ~100–300 W/(m² · K) (virš paviršiaus susidaręs oro sluoksnis) iki ~3000–4000 W/(m² · K) (virš paviršiaus oro sluoksnio nėra).

Literatūra

1. Pabarčius R., Šeporaitis M., Almenas K. Kondensacijos pliūpsnio tyrimas. 1. Tyrimo objektas ir eksperimentinis standas // Energetika. 2003. Nr. 1. P. 86–90.
2. Pabarčius R., Šeporaitis M., Almenas K. Kondensacijos pliūpsnio tyrimas. 2. Vandens įtekėjimo greičio įtaka // Energetika. 2003. Nr. 2. P. 3–7.
3. Collier J. G., Thome J. R. Convective Boiling and Condensation, 3rd edition. Oxford Science Publications, 1999.
4. Sparrow E. M., Minkowycz W. J., Saddy M. Forced convection condensation in the presence of non-condensables and interfacial resistance // Int. J. Heat Mass Transfer. 1967. Vol. 10. P. 1829–1845.
5. Kim H. J., Bankhoff S. G. Local heat transfer coefficients for condensation in stratified counter-current steam-water flows // J. of Heat Transfer., 1983. Vol. 105. P. 23–30.
6. Aya I., Nariai H. Evaluation of heat-transfer coefficient at direct-contact condensation of cold water and steam // Nuclear Engineering and Design. 1991. Vol. 131. P. 17–24.
7. Murata A., Hihara E., Saito T. Prediction of heat transfer by direct contact condensation at a steam-subcooled water interface // Int. J. Heat Mass Transfer. 1992. Vol. 35.
8. Celata, G. P., Cumo M., Farello G. E., Focardi G. Direct Contact Condensation on Slowly Moving Water // Nuclear Engineering and Design. 1986. Vol. 96. P. 21–29.

Raimondas Pabarčius, Marijus Šeporaitis, Kazys Almenas

INVESTIGATION OF CONDENSATION IMPLOSION EVENTS

3. INFLUENCE OF NON-CONDENSABLES

S u m m a r y

In the third article of this presentation set the influence of interface shear generated by additional structures in-

side the pulser and the influence of non-condensables during development of a condensation implosion event are analyzed. Analysis of the experimental results confirms that the influence of non-condensables in the system is of an equivalent importance as is the liquid side turbulence modulated by the rate of liquid introduction. A sequence of physical phenomena that lead to a condensation implosion event is described and the heat transfer coefficient for different condensation modes is estimated.

Key words: condensation, implosion, heat and mass transfer, non-condensables

Раймондас Пабарčius, Мариюс Шепорайтис, Казис Алменас

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНДЕНСАЦИОННЫХ ВСПЫШЕК

3. ВЛИЯНИЕ НЕКОНДЕНСИРУЮЩИХСЯ ГАЗОВ

Р е з ю м е

В третьей статье настоящей серии публикаций анализируется влияние структур, предназначенных для интенсификации сдвига межфазной поверхности, а также влияние неконденсирующихся газов в процессе развития конденсационной вспышки. Анализ результатов показал, что влияние неконденсирующихся газов во время конденсации водяного пара является не менее важной, чем турбулентция воды, созданная изменяя подаваемый в пульсер поток воды. На основе экспериментальных данных представлено физическое разъяснение процесса конденсации, который заканчивается вспышкой, а также определены характерные для коэффициента теплопередачи величины во время разных фаз конденсации.

Ключевые слова: конденсация, вспышка, тепло- и массообмен, неконденсирующийся газ