

Kondensacijos pliūpsnio tyrimai: konstrukcinis pulserio kriterijus

Marijus Šeporaitis,

Raimondas Pabarčius,

Kazys Almenas

*Lietuvos energetikos institutas,
Branduolinių įrenginių saugos laboratorija,
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas,
el. paštas marijus@mail.lei.lt*

Šiame straipsnyje pristatomas analitinis ir eksperimentinis darbas yra anksčiau atliktų tyrimų tęsimas. Nagrinėjamas kondensacijos pliūpsnio, įvykstančio dėl dvifazės sistemos hidrodinaminio nestabilumo, atvejis, kai sąveikauja tiekiami į horizontalų cilindrinį indą (pulserį) garas ir šaltas vanduo. Pristatomas analitiškai pagrįstas konstrukcinis pulserio kriterijus Ja^* , nusakantis inde esančio vandens ir garo nutolimą nuo šiluminės pusiausvyros. Nustatyta $Ja^* \approx 5$ kondensacijos pliūpsnio atsiradimo sąlyga nagrinėjamame pulseryje.

Raktažodžiai: dvifazis tekėjimas, bangavimas, kondensacija

1. ĮVADAS

Daugelyje technologijos sričių yra naudojami įrenginiai, palaipsniui kaupiantieji energiją, o ją sukaupe – staiga atiduodantieji (pvz., kondensatoriai, lazeriai, spaudžiamos spyruoklės ir kt.). Tokie įrenginiai gali būti ypač naudingi, jei procesas periodiškai ir nenutrūkstamas. Šiluminės hidraulikos srityje „mišrūs“, t. y. hidrauliniai ir mechaniniai, tokio tipo įrenginiai egzistuoja, bet kol kas nėra sukurtas vien hidraulinis įrenginys. Pagrindinė tokio hidraulinio „kondensatoriaus“ idėja – kaupti savyje energiją, palaipsniui nutolinant stratifikuotą skysčio–garo sistemą nuo pusiausvyros. Jei ši energija būtų staiga atiduodama ir jeigu tai veiktų periodiškai, toks įrenginys turėtų nemažai panaudojimo variantų. Dalį šiluminės energijos paverčiant darbu, periodiškai tekanti pulsacija būtų galima priversti skystį tekėti prieš gravitacijos jėgą. Potencialūs taikymo įrenginiai – fluidų siurbimas, maišymo pagerinimas, vidinis vožtuvų perjungimas. Unikalus privalumas yra tai, kad toks šiluminės energijos virsmas darbu nereikalautų jokių judančių dalių. Tikslus pritaikymo apibūdinimas ir nauda priklausys nuo įrenginiui keliamų reikalavimų.

Vykstant kondensacijai stratifikuota sistema artėja termodinaminės pusiausvyros link, gali susidaryti sąlygos atsirasti teigiamam grįžtamam besikondensuojančio garo srauto ir tarpfazinio paviršiaus trikdyto ryšiu. Greitai keičiantis tekėjimo režimui besikondensuojančio garo srauto didėjimas gali būti toks staigus, kad viršytų fazių pritekėjimo galimybių ribas. Vietinis slėgis tuomet staigiai mažėja iki pusiausvyrinio, ir sistemoje atsiradęs slėgių skirtumas gali sukelti staigų fluidų tekėjimą. Induose, kurie nepritaikyti atlaikyti tokius slėgių pokyčius, šie procesai gali sukelti avarines situacijas. Tačiau tikslingai sukonstruotose sistemose šis vidinis slėgių skirtumas gali būti panaudotas mechaninam darbui atlikti.

Toks staigus sukauptos energijos atidavimas stratifikuotose dvifaziuose tekėjimuose yra gerai žinomas ir tyrinėtas. Techninėje literatūroje šis reiškinys vadinamas „kondensacijos hidraulinis smūgis“. Kaip matyti iš pavadinimo, šis reiškinys paprastai įvyksta netikėtai, yra nepageidaujamas ir daugumoje ankstesnių studijų buvo tiriama kaip jo išvengti [1–4]. Patirtis rodo, kad vandens–garo sistemose kondensacijos hidraulinio smūgio metu vietinis slėgių skirtumas gali išaugti iki kelių MPa [1, 5]. Akivaizdžiai įrodyta, kad šio proceso metu išskiriama energija, taigi pagrindinis tyrimų tikslas yra sukonstruoti tokį įrenginį, kuriame kondensacijos pliūpsniai galėtų būti sukelti planuotai ir būtų kontroliuojamo dydžio. Trumpai tariant, tai būtų įrenginys, turintis šiluminę energiją verčiantis vietiniu slėgių skirtumu. Siekiant sukurti tokį įrenginį, Lietuvos energetikos institute (LEI) 2000 m. pradėta eksperimentinių ir analitinių tyrimų programa [6–8]. Remiantis prof. K. Almeno patirtimi [9, 10] ir žiniomis apie kondensacijos pliūpsnio sąlygas [11, 12], buvo sudaryta tyrimų programa bei sukonstruotas eksperimentinis įrenginys. Šių tyrimų metu parodyta, kad kondensacijos pliūpsnis gali būti pasiektas tiekiant šaltą vandenį į garu užpildytą palyginti mažo tūrio ($0,027 \text{ m}^3$) horizontalų cilindrinį pulserį. Nustatyta, kad kondensacijos pliūpsnis pulseryje atsiranda dėl tarpfazinio paviršiaus sutrikdymo, kurį sukelia garo ir vandens įtekmių sąveika.

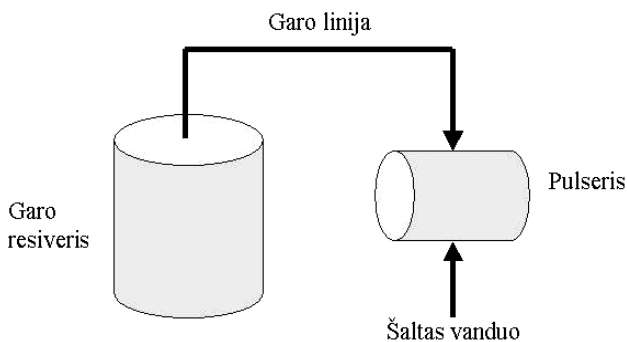
Reiškiniai, lemiantys lygaus tarpfazinio vandens–garo paviršiaus sutrikdymą, yra gerai žinomi ir nagrinėti daugelyje studijų. Trinties ir kondensacinės šlyties jėgos gali lemti šią tarpfazinio paviršiaus sutrikdymo seką: 1) kapiliarinės bangos; 2) gravitacinės bangos; 3) lūžtančios bangos; 4) bangų keterų pasiurbimas; 5) skysčio suskaidymas lašeliais. 1–4 minėtuose etapuose tekėjimas gali būti stabilus (arba kvazistabilus), todėl jį galima iširti eksperimentiškai. Iki šiol atlikta nemažai

tyrimų [13–18], kurių metu nustatyti vidutiniai šilumos perdavimo koeficientai esant lygiam bei šurkščiam tarpfaziniam paviršiui, nustatytos sąlygos, kurioms esant pasireiškia skysčio pasiurbimas [19]. Bangų keturų nestabilumas nuolat aktyviai tyrinėjamas [20]. Uždarame inde visos minėtos pakopos gali egzistuoti ribotą laiką, tačiau tam, kad įvyktų kondensacijos pliūpsnis, būtinai turi būti pasiekta 5-oji pakopa, t. y. skysčio suskaidymas lašeliais. Šioje pakopoje kondensacijos šlyties ir tarpfazinio paviršiaus didėjimo teigiamas grįžtamasis ryšys yra toks stiprus, kad procesas yra labai dinamiškas ir kvazistabilios būsenos neįmanomos. Procesas nutrūksta tik tuomet, kai visas vanduo sušyla iki beveik soties temperatūros. Paskutinė proceso pakopa yra tokia staigi, kad susidaro didelis slėgių skirtumas [5], ir fluidas sistemoje pradeda labai greitai judėti.

Kuriant tokį įrenginį, reikia apibrėžti ribas, kurios atitiktų būtinas šiluminės-hidraulines ir konstrukcines sąlygas kondensacijos pliūpsniui atsirasti. Šio darbo tikslas buvo parinkti kompleksinį kriterijų, kuriuo vadovaujantis jos būtų išpildomos.

2. KONDENSACIJOS PLIŪPSNIS HORIZONTALIAME INDE

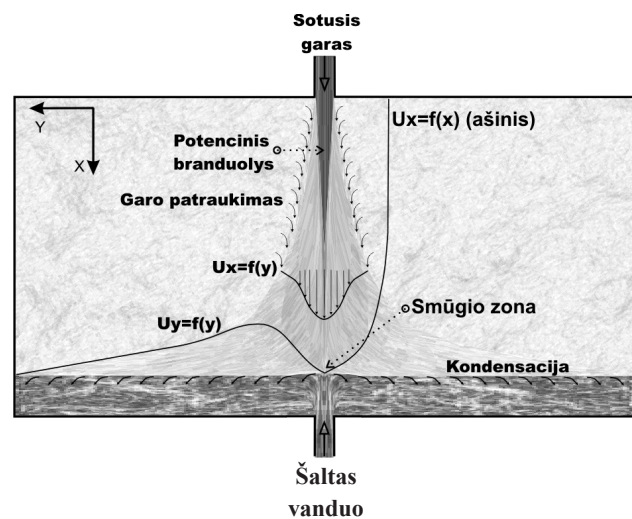
Parodyta (1 pav.) supaprastinta eksperimentinio įrenginio, kuriame atlikti šiame darbe pristatyti tyrimai, schema. Įrenginį sudaro garo resiveris ($0,05 \text{ m}^3$), horizontalus cilindrinis indas, vadinamas pulseriu ($0,027 \text{ m}^3$), juos jungiantis vamzdis garui pritekėti bei atvamzdis vandeniui tiekti į pulserio apačią. Vykstant kondensacijai pulseryje garas į jį laisvai teka iš resiverio. Detalus įrenginio aprašymas ir matavimų schema pateikiama [5].



1 pav. Eksperimentinio įrenginio supaprastinta schema

Iš pradžių visa sistema užpildoma garu. Į pulserį pradėjus tiekti šaltą vandenį, jame prasideda garo kondensacija ir ima mažėti slėgis. Tada į jį jungiamoju vamzdiu pradeda tekėti garas iš resiverio. Kadangi pulseris yra horizontalaus cilindro formos, tai į jį įtekančio vandens paviršiaus plotas didėja. Toliau tiekiant šaltą vandenį besikondensuojančio garo srautas ir į pulserį įtekančio garo greitis didėja. Pulserio erdvėje virš vandens susiformuoja besiplečianti įtekančio garo čiurkšlė (2 pav.). Besikondensuojančio garo srautas per tarpfazinį paviršių nėra tolygus (ties šalto vandens tiekimo vieta jis yra didesnis). Įtekančio garo srautas, priklausantis

nuo greičio $U_x(y)$, nesutampa su besikondensuojančio garo srautu per tarpfazinį paviršių. Todėl garas teka ir lygiagrečiai tarpfaziniam paviršiui kryptimi greičiu $U_y(y)$. Virš tarpfazinio paviršiaus tekantis garas sukelia jo bangavimą. Susidariusios bangėlės didina tarpfazinio paviršiaus plotą ir besikondensuojančio garo srautas dar labiau didėja. Vis didėjantis įtekančio garo greitis dar labiau trikdo paviršių ir didina jo plotą. Dėl šio teigiamo grįžtamojo besikondensuojančio garo srauto ir tarpfazinio paviršiaus trikdymo ryšio visiškai suardomas tarpfazinis paviršius ir pasikeičia tekėjimo režimas. Tada besikondensuojančio garo srautas staiga padidėja ir įvyksta kondensacijos pliūpsnis. Šio proceso metu vanduo greitai skaidomas lašeliais ar putomis [11]. Jis nutrūksta, kai įtekančio garo greitis tampa nepakankamas tekėjimo režimui su dideliu tarpfaziniu paviršiumi išlaikyti arba pasiekiamą šiluminę pusiausvyrą.

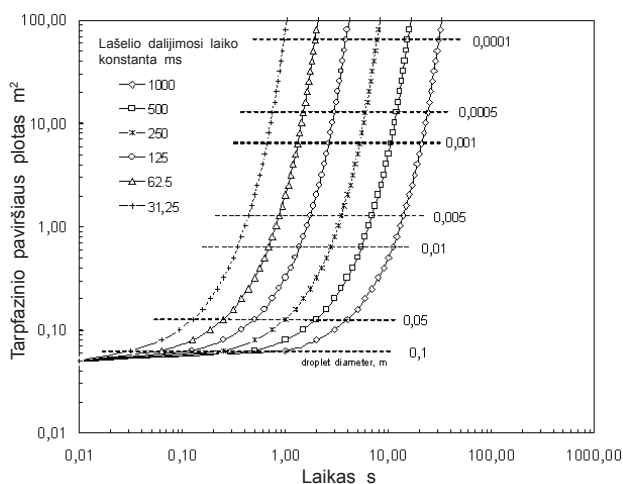


2 pav. Pulseryje vykstantys fiziniai procesai

Norint nustatyti, kokių jėgų reikia, kad skystis būtų suskaidytas lašeliais, galima vartoti klasikinių We kriterijų. Pavyzdžiui, 427 K temperatūros vandeniui išskaidyti 10^{-6} m lašeliais reikia apie 20 m/s greičių skirtumo tarp lygiagrečių garo ir vandens tėkmių. Kondensacijos pliūpsnio metu garas į pulserį įteka ženkliai didesniais greičiais. Kokiu greičiu tai vyksta, galima atsakyti tik apytiksliai. 3 pav. pavaizduota kreivių šeima, rodanti, kaip keičiasi tarpfazinio paviršiaus plotas, apskaičiuotas atsižvelgus į lašelių dalijimosi laiko konstantą. Ši informacija įrodo, kad realybėje tokiam parametru pasikeitimui reikia tam tikro laiko.

3. KONDENSACINIO ŠILUMOS ATIDAVIMO KOEFICIENTO RIBOS EKSPERIMENTINIAME ĮRENGINYJE

Pirmosios eksperimentų serijos rezultatai [7] pabrėžia kondensacijos intensyvumo svarbą pirmojoje ciklo pusėje. Idealu, jei šilumos atidavimo koeficientas h būtų mažas pradžioje, o didėti pradėtų tik kai suteka reikiamas (kondensacijos pliūpsniui gauti) šalto vandens kiekis. Teoriškai tai yra pasiekiamas, nes vykstant šilumos



3 pav. Tarpfazinio paviršiaus ploto kitimas atsižvelgus į lašelio dalijimosi laiko konstantą (1 kg vandens, esant 0,1 MPa slėgiui ir soties temperatūrai)

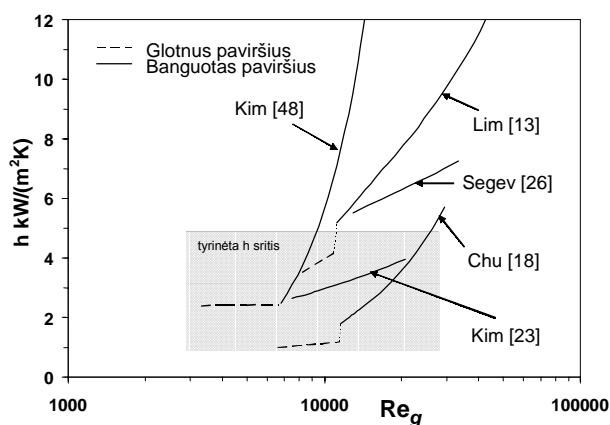
mainams h yra vienas labiausiai kintančių parametru. Apžvalginuose straipsniuose tokiose garo–vandens sistemose [21, 22] pateikiamos h reikšmės nuo $\sim 10^2$ iki 10^5 W/(m²K). Teorinės koeficiento ribos yra dar platesnės – nuo ~ 10 iki $\sim 10^7$ W/(m²K). Toks platus h kitimas galimas todėl, kad gryname garo–vandens mišinyje šilumos perdavimas per tarpfazinį paviršių priklauso tik nuo šiluminės varžos skysčio pusėje ir yra ribojamas skystyje susidarantių šiluminių gradientų. Apatinė energijos atidavimo riba priklauso nuo skysčio savitojo laidumo molekuliniam lygyje, o viršutinė riba – nuo molekulių greičio garo fazėje. Eksperimentiniame įrenginyje nei apatinė, nei viršutinė riba nebuvo pasiektos.

Turimi empiriniai garo–vandens kondensacijos intensyvumo duomenys skirstomi į dvi kategorijas: eksperimentai atlikti kanaluose [13, 18, 23–26] ir eksperimentai, kurių metu nėra vyraujančio skersinio garo tekėjimo [27–29]. Pastarieji atrodytų tinkamesni mūsų atvejui, tačiau „netekantio garo“ duomenų taikymas pulseriui yra keblus. Jų eksperimentuose naudojama vertikalaus cilindro konstrukcija ir koreliuojami duomenys (pvz., tiekiamo skysčio srautas, skysčio lygis virš tiekimo angos), kurie lemia skysčio turbulenciją prie tarpfazinio paviršiaus. Pabrėžtina, kad mažiausia turbulencija buvo pasiekta tų eksperimentų metu, kai h buvo išmatuotas mažesnis nei 1000 W/(m²K). Jei visame skysčio tūryje susidarytų netrikdomi temperatūros gradientai, Sonin ir kt. [27] išvesta koreliacija gali būti ekstrapoliuojama iki tokių žemų reikšmių, kaip ~ 200 W/(m²K).

Dvifazio tekėjimo eksperimentų, atliktų kanaluose, yra daugiau, juose ištirtas platesnis sąlygų spektras. Ypač naudinga tai, kad juose įvertinama fazinė turbulencija, kuri gali vesti prie bangų susidarymo, jų augimo ir jų suardymo pasiurbiant arba esant uždaram kanalui. Kai kurie autoriai [13, 18, 23] pateikia skirtingas koreliacijas lygiam ir banguotam paviršiui, vartodami fazių Re kriterijus. Kaip ir galima tikėtis, esant nesutrikdytam paviršiui, koreliacijos dažniausiai priklauso nuo skysčio Re kriterijaus Re_p , esant banguotam paviršiui Re_g (garo

Re kriterijus) tampa svarbesnis. 4 pav. h priklausomybės nuo Re_g , gautos naudojant skirtingas koreliacijas išvestas tekėjimui kanale. Sudarant šią kreivių šeimą buvo naudojamas vidutinis eksperimentinis Re_p , kai vandens greitis $\sim 0,4$ m/s. Patamsinta sritis nusako pulseryje išmatuoto h reikšmių ribas. Koreliuojantys rezultatai, parašyti 4 pav., nepratęsti už realiai išmatuotų ribų, todėl jie rodo, kad tekėjimo kanale atveju apatinė h riba yra ~ 1000 W/(m²K), tačiau apskritai h ribos yra platesnės.

Galimų pasiekti h reikšmių intervalo įvertinimas leido padaryti išvadą, kad kondensacijos pliūpsniai pulseryje gali būti sukelti didinant šiluminę varžą prie tarpfazinio paviršiaus (papildomai didinant nesikondensuojančių dujų koncentraciją [8]) arba keičiant konstrukciją taip, kad tarpfazinio paviršiaus plotas greitai kistų tik užpildymo vandeniu pabaigoje.



4 pav. Šilumos atidavimo koeficiento priklausomybė nuo garo Re_g (tekėjimui kanale)

4. EKSPERIMENTINIO PULSERIO KONSTRUKCINIS KRITERIJUS

Pradedant tyrimų programą eksperimentinis įrenginys buvo sukonstruotas atsižvelgiant į šiuos reikalavimus:

A) Kondensacijos pliūpsnis turi būti sukeliamas šiluminėmis-hidraulinėmis sąlygomis, kurios susidaro pulserio viduje (be išorinės įtakos).

B) Pulseryje turi būti galima sukelti pasikartojančius kondensacijos pliūpsnius.

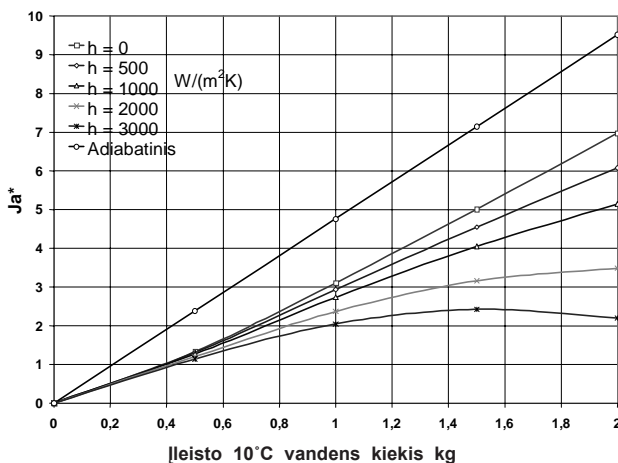
C) Šiluminė įtekėjusio vandens talpa, įvertinant jo pašilimą nuo karšto pulserio korpuso, turi būti pakankamai didelė, kad būtų sukeltas siekiamas vietinio slėgio kritimas (pvz., $\sim 1/2$ pradinio slėgio arba didesnis).

Pulserio tūris, pulserio korpuso šilumos talpumas ir į jį įleisto šalto vandens kiekis buvo pasirenkami atsižvelgiant į C reikalavimą. Čia reikalaujama, kad vandens šilumos talpa (įvertinant jo pašilimą nuo karšto pulserio korpuso) viršytų šilumos kiekį, kondensacijos pliūpsnio metu išskiriamą pulseryje esančio garo. Tai įvertinantis kriterijus yra Jakobso skaičius Ja . Standartine forma tai vieno kilogramo vandens $C_p \times (T_{sat} - T_f)$ šilumos kiekio, reikiamo jam pasiekti soties temperatūrą, santykis su kondensacijos šiluma h_{fg} vienam kilogramui

garo. Ja priklauso tik nuo abiejų fazių termodinaminių savybių, o fluidų kiekiai neįvertinami. Projektavimui palengvinti buvo įtrauktas patobulintas pulserio Ja^* kriterijus:

$$Ja^* = \frac{M_f \cdot C_{p,f} \cdot (T_{sat} - T_f)}{M_g \cdot h_{fg}} \quad (6)$$

Tai yra nedimensinis kriterijus, proporcingas peraušinto vandens, esančio pulseryje M_f gebėjimui sukondensuoti pradinį garo kiekį M_g . Jame naudojamos soties T_{sat} ir vidutinė vandens T_f temperatūros apskaičiuojamos, įvertinant karšto korpuso metalo šilumos talpą, šilumos nuostolius į aplinką ir energijos atidavimą skysčiui kondensacijos metu. Iš esmės šis kriterijus nusako pulseryje esančio garo ir vandens nutolimą nuo šiluminės pusiausvyros, arba kiek kartų daugiau garo nei yra pulseryje gali sukondensuoti pulseryje esantis vanduo. Kriterijuje panaudotas vandens ir garo temperatūrų skirtumas bei jų masių santykis priklauso ne vien nuo patiektų garo ir vandens kiekių bei temperatūrų. Fazių šilumos mainai su korpusu ir aplinka bei šilumos ir masės mainai tarpusavyje keičia šį santykį. Sunkiausiai valdomas ir galintis kisti plačiausiose ribose yra kondensuojamo ant laisvo vandens paviršiaus garo srautas. Jis apibūdinamas garo šilumos atidavimo vandeniui koeficientu h , kuris susideda iš kondensacijos metu vandenį šildančių fazinio virsmo šilumos ir soties temperatūros kondensato. Ja^* reikšmių kitimas, priklausantis nuo į pulserį sutekėjusio vandens esant skirtingiems šilumos atidavimo koeficientams h , pavaizduotas 5 pav. Šilumos atidavimo koeficientą h galima reguliuoti keičiant įtekančio vandens srautą ir/ar vietinę oro koncentraciją. Temperatūros T_f ir T_{sat} gautos tam tikru žingsniu sprendžiant energijos tvermės lygtį, tariant, kad metalas su besiliečiančiu vandeniu pasiekia vienodą temperatūrą. Dėl vėlavimo visiškai metalo temperatūrų pusiausvyrai pasiekti tikrosios Ja^* reikšmės yra šiek tiek didesnės. Kondensuojamo garo įtaka įvertinama vartojant pastovų šilumos atidavimo koeficientą. Energijos ir masės perdavimas kiekviename žingsnyje yra skaičiuojami vartojant vidutines nominalias tarpfazinio paviršiaus ploto ir



5 pav. Ja^* , priklausantis nuo kondensacinio šilumos srauto į pulserio vandenį

temperatūrų skirtumo reikšmės tame laiko žingsnyje. Šioms reikšmėms apskaičiuoti lygtys buvo sprendžiamos iteraciniu būdu.

5 pav. matomas didelis skirtumas tarp adiabatines (vanduo visai nešildomas) ir „be-kondensacinės“ ($h = 0$) Ja^* reikšmių kitimo kreivių rodo didelę pulserio korpuso šiluminę įtaką. Kreivių polinkis rodo didėjančio kondensacijos intensyvumo įtaką. Jei kondensacijos šilumos perdavimo koeficientas išlaikomas ~ 1000 W/(m²K) per visą pripildymo ciklą, Ja^* kriterijus viršija 5 tik po to, kai įleidžiama 2 kg šalto vandens (eksperimentams pulseryje buvo naudojami 2 kg vandens).

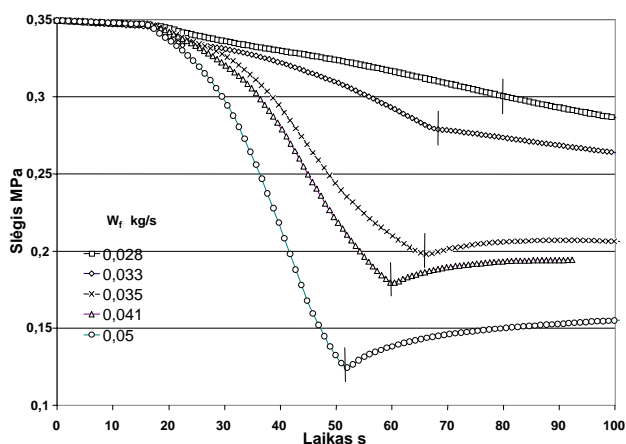
5 pav. pavaizduota informacija taip pat rodo ir potencialius sunkumus. Jei h reikšmė padidėja, Ja^* didėjimo priklausomybė nuo įtekėjusio vandens kinta nuožulniau. Faktiškai, h esant ~ 3000 W/(m²K) ši kitimo reikšmė tampa neigiama. Taip yra todėl, kad per didelė kondensacija ne tik šildo vandenį, bet ir mažina slėgį pulseryje ir garo resiveryje bei sumažina soties temperatūrą T_{sat} . Kondensacijos pliūpsnių, net jei jie ir būtų pasiekti, sukeltas slėgių skirtumas sumažėtų. Tai parodo, kad cilindrinės formos pulseriui pagrindinis parametras, nusakantis kondensacijos pliūpsnio veiklos pradžią arba ne, yra šilumos perdavimo koeficiento didžiausia vertė vandens įleidimo metu. Siekiant pagrįsti Ja^* atlikti eksperimentiniai tyrimai, kurių metu šis koeficientas buvo išlaikomas beveik pastovus arba ženkliai kito.

Ja* esant aukštomis h reikšmėms (maža nesikondensuojančių dujų koncentracija)

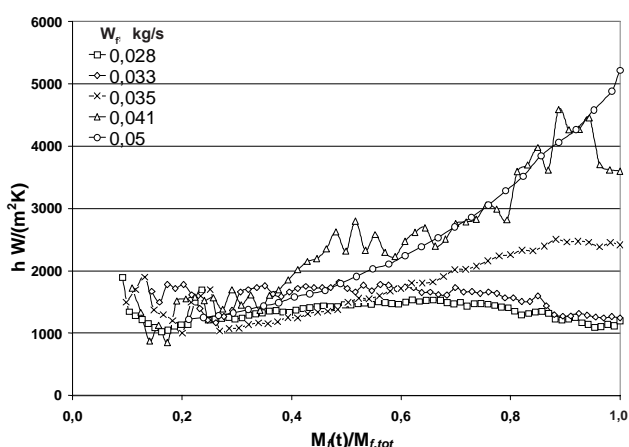
Šių tyrimų metu oro koncentracija buvo sumažinta iki labai mažų reikšmių (mažiau nei 0,001 molinė dalis). Eksperimentų metu pulseris ir garo resiveris sudarė uždara sistemą, todėl kondensacijos intensyvumas buvo nusakomas slėgio kitimu. Eksperimentai skyrėsi tik vandens tiekimo į pulserį srautu (kituose paveiksluose parodytas vidutinis vandens srautas W_f bandymų metu). Vandens įtekėjimo į pulserį greitis lemia pradinį turbulencijos intensyvumą ir nustato kondensacijos šilumos perdavimo koeficiento reikšmę proceso pradžioje. Kai tik tarpfazinis paviršius padidėja ir besikondensuojančio garo srautas išauga, vandens turbulenciją veikia ir turbulencija garo srityje.

Išmatuoti slėgių kitimai (6 pav.) rodo, kad esant tiekiama vandens srautui didesniai nei 0,033 kg/s, atsiranda pakankamas kondensacijos pliūpsniui pasiekti teigiamas grįžtamasis kondensacijos intensyvumo ir vandens maišymosi ryšys. Vertikaliomis linijomis pažymėta vandens tiekimo pradžia ir pabaiga. Esant mažiems tiekimo srautams, slėgio kitimo nuožulnumas yra proporcingas tarpfazinio paviršiaus didėjimui, todėl grįžtamasis ryšys neatsiranda. Vandenį tiekiant sparčiau, slėgio mažėjimas rodo itin didėjančią besikondensuojančio garo srautą. Tačiau staigaus slėgio kritimo, kurį sukeltų kondensacijos pliūpsnis, nebuvo užfiksuota.

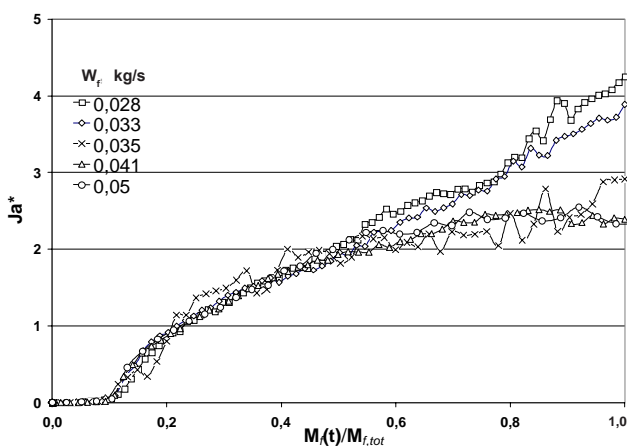
Šios nesėkmės priežastys išanalizuotos 7 ir 8 paveiksluose. 7 pav. pavaizduota kondensacinio šilumos atidavimo koeficiento h priklausomybė nuo laiko, gauta



6 pav. Slėgio kitimas atsižvelgus į laiką esant skirtingam vandens tiekimo į pulserį srautui



7 pav. Šilumos atidavimo koeficiento kitimas atsižvelgus į įtekėjusio į pulserį vandens kiekį esant skirtingam jo tiekimo srautui



8 pav. Ja^* kitimas atsižvelgus į įtekėjusio į pulserį vandens kiekį esant skirtingam jo tiekimo srautui

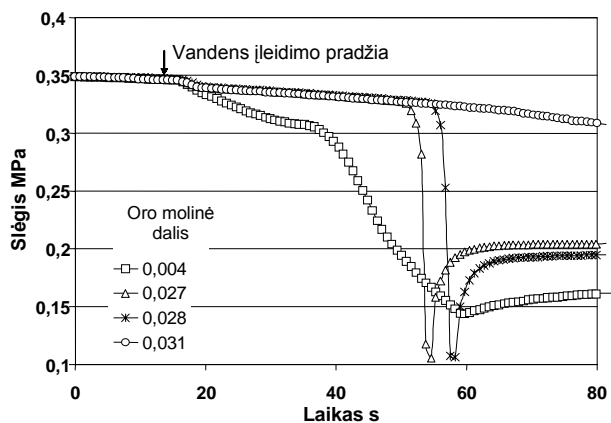
eksperimentų metu iš kondensacijos intensyvumo (apskaičiuoto pagal slėgio kitimą) ir vidutinės vandens temperatūros. Šilumos atidavimo koeficientas pateiktas atsižvelgus į vandens tiekimo santykį $M_f(t)/M_{f,tot}$ (šis santykis lygus 1, kai suteka visas patiektais vanduo). Tai leidžia palyginti koeficiento reikšmes esant vienodam tarp-

fazinio paviršiaus plotui. 7 pav. matyti, kad pirmojoje vandens užpildymo ciklo dalyje h yra 1000–2000 $W/(m^2K)$. Vandeni tiekiant sparčiau, h pakyla dėl kondensacijos sukeltos vandens turbulencijos. Jis pasiekia $\sim 5000 W/(m^2K)$ reikšmę, tačiau šis procesas nėra eksponentinis. Akivaizdu, kad teigiamas grįžtamasis kondensacijos ir skysčio turbulencijos ryšys susidaro, tačiau jo didėjimas nuslopsta. To priežastis yra per greitas įtekėjusio vandens pašilimas.

Įtekantį vandenį šildo pulserio korpusas ir besikondensuojantis garas. 8 pav. matyti, kokią įtaką tai turi Ja^* kriterijui. Kaip parodyta, eksperimentuose, kuriuose susidaro teigiamas grįžtamasis ryšys, Ja^* yra mažiau už 2. Rezultatų netolydumas (7 ir 8 pav.) yra susijęs su eksperimentiškai gautų vidutinių temperatūrų svyravimais. Šių eksperimentų serijos analizė rodo, kad Ja^* reikšmė pasiekia 4 tik pačioje vandens įleidimo proceso pabaigoje ir yra nepakankama kondensacijos pliūpsniui įvykti.

Ja^* esant pastoviam vandens tiekimo srautui ir kintant nesikondensuojančių dujų koncentracijai

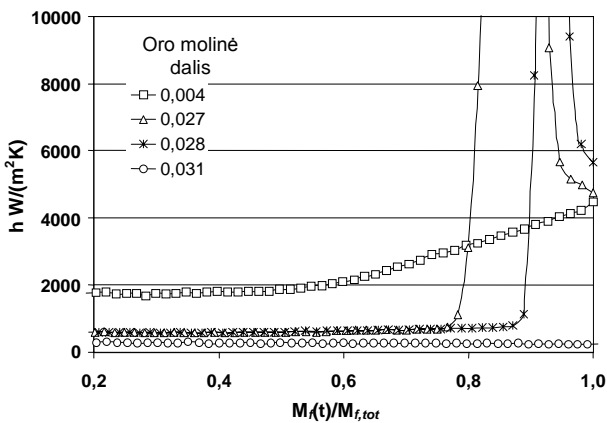
Kitų tyrimų metu vanduo buvo tiekiamas vienodai (vienoda turbulencija), kito tik oro koncentracija. Molinė oro dalis gare buvo keičiama nuo 0,004 iki 0,03 (pradinė vidutinė koncentracija pulseryje). Vidutinė oro koncentracija buvo nustatoma prieš eksperimentą į sistemą įleidžiant žinomą oro kiekį.



9 pav. Slėgio kitimas esant skirtingai oro koncentracijai ($W_f = 0,039 kg/s$)

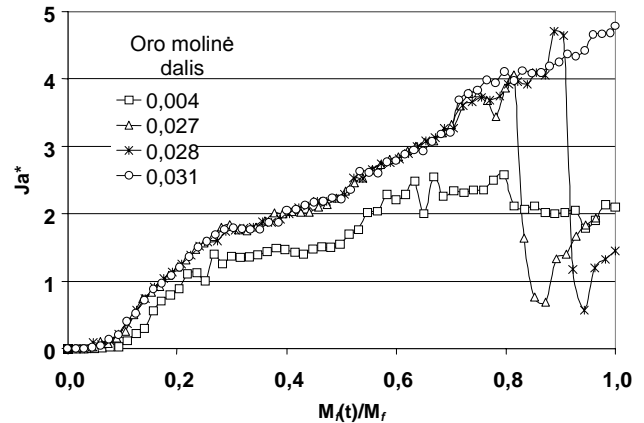
Mažas vietinės oro molinės koncentracijos pasikeitimas gali lemti visiškai skirtingą procesų eigą pulseryje (9 pav.). Kadangi oras yra nesikondensuojančios dujos, jis kaupiasi prie kondensacijos paviršiaus. Dalinis garo slėgis prie tarpfazinio paviršiaus sumažėja ir todėl riboja besikondensuojančio garo srauto tankį. Tačiau didėjant tarpfazinio paviršiaus plotui ir garo įtekėjimo į pulserį greičiui šis barjerinis oro sluoksnis gali būti nupūstas. Tada besikondensuojančio garo srauto tankis staigiai padidėja ir gali įvykti kondensacijos pliūpsnis. Garo šilumos atidavimo vandeniui koeficiento pokyčiai šių bandymų metu pavaizduoti (10 pav.). Matyti, kad esant

oro molinei koncentracija, 0,031, šilumos atidavimo koeficientas h yra pakankamai mažas ($\sim 300 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$), kad tarpfazinis paviršius išliktų lygus. Grįžtamasis ryšys nesudaro, ir garo–vandens stratifikacija išlieka stabili. Sumažinus oro molinę koncentraciją iki 0,027, h padidėja iki $\sim 600 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Šiuo atveju kondensacijos intensyvumo – skysčio maišymosi teigiamas grįžtamasis ryšys susidaro didėjant tarpfazinio paviršiaus plotui ir besikondensuojančio garo srautas staiga išauga. 10 pav. matyti, kaip Ja^* kriterijų veikia įtekėjusio į pulserį vandens pašilimas dėl didesnės kondensacijos esant mažai oro koncentracijai. Tačiau visuose trijuose su didesne nei 0,027 oro molinės dalies koncentracija eksperimentuose Ja^* kriterijus pakyla iki ~ 4 . Jei paviršius nesutrikdomas ir grįžtamasis ryšys nesudaro, Ja^* padidėja iki 5. Jei vanduo būtų ir toliau tiekiamas, Ja^* ir toliau didėtų. Kitaip procesas vyksta, jei Ja^* pakilus iki 4–5 vandens paviršius yra sutrikdomas ir susidaro teigiamas grįžtamasis ryšys. Ja^* tuomet staiga nukrenta iki 0. $Ja^* \sim 0,5$ reikšmė, apskaičiuota pagal išmatuotus parametrus, paaiškinama tuo, kad kondensacijos pliūpsnis nutrūksta, nespėjant garui pritekėti į pulserį. T. y. termodinaminė pusiausvyrą pasiekama tik pulseryje ir labai trumpam. Aukščiausia reikšmė, kai sukeliamas pliūpsnis priklauso ne tik nuo pulserio tūrio, bet ir nuo prijungtos garo tiekimo linijos tūrio bei pasipriešinimų. Tai parodo, kad būtina pasiekti tam tikrą Ja^* reikšmę, tačiau tai yra nepakankama sąlyga, kad įvyktų kondensacijos pliūpsnis. Visam procesui aprašyti reikia papildomos informacijos, nusakančios skysčio turbulenciją.



10 pav. Šilumos atidavimo koeficiento kitimas atsižvelgus į įtekėjusio į pulserį vandens kiekį esant skirtingai oro koncentracijai ($W_f = 0,039 \text{ kg/s}$)

Informacija (9 ir 10 pav.) rodo, kad esant mažoms oro koncentracijoms (0,004), pulseryje vykstančių procesų eiga ir kondensacijos intensyvumas yra gana skirtingi. Šiomis sąlygomis h išlieka apie $2000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ iki ~ 40 s. Tai yra nominali h reikšmė esant lygiam garo–vandens tarpfaziniam paviršiui. Maždaug ~ 40 -ąją sekundę ($M_f(t)/M_{f,tot} \approx 0,6$), kai paviršius padidėja iki 0,07 m² (laikant vandens paviršių lygiu), prasideda kiti reiškiniai. Dėl įtekančio garo atsiradusi turbulencija sukelia bangas. Atsiranda teigiamas kondensacijos intensyvumo



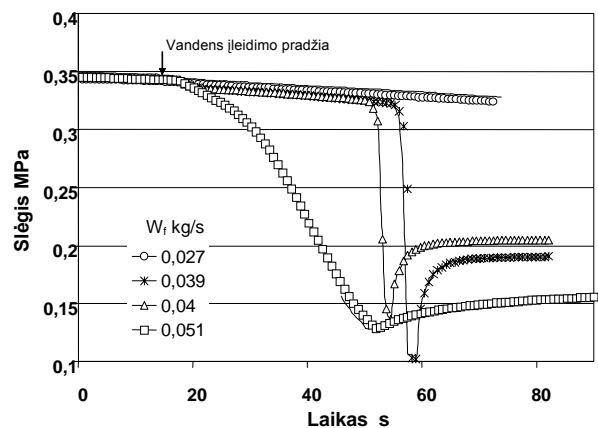
11 pav. Ja^* kitimas atsižvelgus į įtekėjusio į pulserį vandens kiekį esant skirtingoms oro koncentracijoms ($W_f = 0,039 \text{ kg/s}$)

ir vandens turbulencijos grįžtamasis ryšys, tačiau vanduo šiuo atveju yra šiltesnis, todėl šis ryšys yra „silpnėsnis“, ir kondensacijos pliūpsnis neįvyksta.

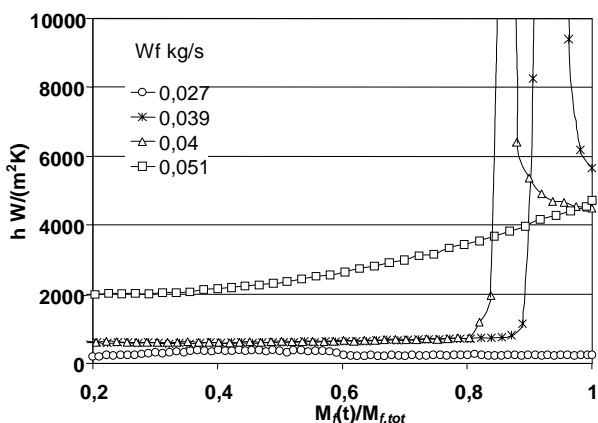
Ja^* esant pastoviai oro koncentracijai, kintant vandens tiekimo srautui

Šių tyrimų metu oro molinė koncentracija buvo pastovi (0,028), o kito tik vandens srautas. Pradinėje ciklo stadijoje, prieš atsirandant garo–vandens grįžtamajam ryšiui, skysčio srautas yra pagrindinis parametras, lemiantis skysčio turbulenciją. Vandens įtekėjimas ir pasiskirstymas pulseryje: vanduo įteka iš apačios ir išsisklaido link pulserio sienelių. Todėl sunku turbulenciją įvertinti vartojant standartinį Re kriterijų. Modifikavus įtekėjimo atvamzdį, t. y. uždėjus vandens turbulenciją mažinančią gaubtelį, išmatuotas toks pat kondensacijos intensyvumas. Tai rodo, kad pagrindinis parametras vis dėlto yra vandens srautas. Eksperimentų metu vandens srautas skyrėsi beveik dvigubai, t. y. 0,027 ir 0,051 kg/s.

Slėgio kitimas (12 pav.) kiekybiškai panašus į išmatuotą, kai bandymų metu buvo skirtinga oro koncentracija. Esant mažam pradiniam vandens tiekimo srautui, kai $W_f = 0,027 \text{ kg/s}$, paviršius nėra trikdomas, virš jo susidaro nesikondensuojančių dujų sluoksnis, ir proceso metu h išlieka mažas. Kai vandens srautas $W_f = 0,051 \text{ kg/s}$,



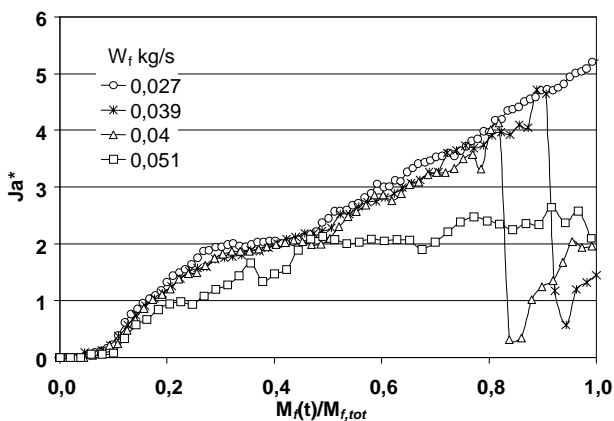
12 pav. Sistemos slėgio kitimas esant skirtingiems vandens tiekimo srautams (molinė oro dalis 0,028)



13 pav. Šilumos atidavimo kitimas atsižvelgus į įtekėjusio į pulserį vandens kiekį esant skirtingam jo tiekimo srautui (molinė oro dalis 0,028)

kondensacija yra pakankamai intensyvi, paviršius banguoti pradeda anksčiau, h padidėja iki $5000 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$ ir vanduo pašyla (13 pav.). Todėl Ja^* pasiekia reikšmes, artimas 2 (14 pav.), ir kondensacijos pliūpsnis neįvyksta. Kai vandens tiekimo srautas vidutinis ($W_f \approx 0,04 \text{ kg/s}$), jis pašyla vėliau ir tarpfaziniam paviršiui išsiplėtus besikondensuojančio garo srautas tampa pakankamas sukelti paviršiaus bangavimą. Garo–vandens turbulencijos grįžtamasis ryšys dėl kondensacijos didėjimo ir toliau auga labai staigiai, kol sukelia kondensacijos pliūpsnį.

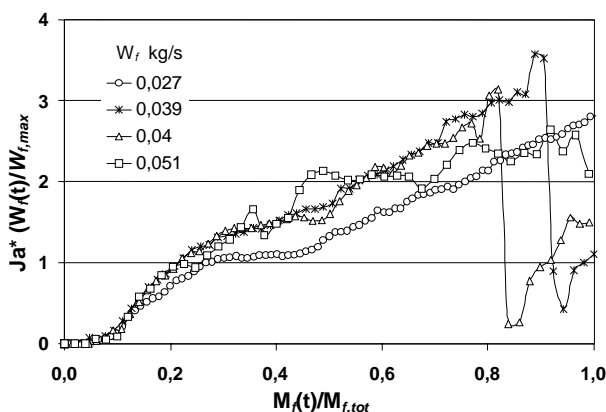
Parinktas konstrukcinis kriterijus Ja^* nusako, kada stratifikuota garo–vandens sistema yra pajėgi sukelti kondensacijos pliūpsnį. Vis dėlto jame nėra informacijos



14 pav. Ja^* kitimas atsižvelgus į įtekėjusio į pulserį vandens kiekį esant skirtingam jo tiekimo srautui (molinė oro dalis 0,028)

apie abiejų fazių turbulenciją, jis negali nusakyti, ar kondensacijos pliūpsnis iš tiesų įvyks. Analizuojant eksperimentinius duomenis buvo panaudotas kompleksas $Ja^* \times (W_f(t)/W_{f,max})$, kuriame $W_{f,max}$ yra maksimalus vandens srautas ($W_{f,max} = 0,061 \text{ kg/s}$), pasiektas šiuose eksperimentuose. Kaip parodyta 15 pav., gautas santykis leidžia atskirti režimus, kurių metu gali/negali įvykti kondensacijos pliūpsnis. Išraiška $Ja^* \times (W_f(t)/W_{f,max})$ kinta nuo ~ 3 , kai kondensacijos pliūpsnis įvyksta, iki $\sim 2,5$, kai jis

neįvyksta. Tai, kad šios ribos yra siauros, nestebina. Kondensacijos pliūpsnis yra netiesiškas procesas. Teigiamo grįžtamojo ryšio mechanizmai padidina palyginti mažus pradinių sąlygų skirtumus iki visiškai skirtingų galutinių rezultatų. Taigi atitinkančios parinktą Ja^* kriterijų sąlygos yra būtinos, bet nepakankamos šiluminiam-hidrauliniam komponentui, kuriame kondensacijos pliūpsniai galėtų būti sukelti patikimai, veikti.



15 pav. $Ja^* \times (W_f(t)/W_{f,max})$ kitimas atsižvelgus į įtekėjusio į pulserį vandens kiekį esant skirtingam jo tiekimo srautui (molinė oro dalis 0,028)

5. IŠVADOS

Remiantis atliktais eksperimentiniais matavimais parinktas šiluminio-hidraulinio įrenginio – pulserio, kuriame galima sukelti kontroliuojamus vandens garo kondensacijos pliūpsnius konstrukcinis kriterijus Ja^* . Nustatyta, kad Ja^* turi siekti ne mažiau kaip 4–5, norint sukelti kondensacijos pliūpsnį. Tačiau tai yra tik būtina, bet nepakankama sąlyga siekiant patikimo įrenginio veikimo. Atlikta eksperimentinių duomenų analizė rodo, kad kuriant šiluminę hidraulinę sistemą, veikiančią kondensacijos pliūpsnius generuojančio įrenginio pagrindu, jos projektavimo stadijoje turėtų būti vartojamas konstrukcinis pulserio kriterijus Ja^* .

Gauta 2006 07 04
Parengta 2006 09 10

Literatūra

1. Bjorge R. W., Griffith P. Initiation of waterhammer in horizontal and nearly horizontal pipes containing steam and sub-cooled water // J. Heat Transfer. 1984. Vol. 106. P. 835–839.
2. Class G., Raff S., Meyder R. The mechanism of violent condensation shocks // Int. J. Multiphase Flow. 1987. Vol. 13. P. 33–46.
3. Izenson M. G., Rothe P. H., Wallis G. B. Diagnosis of condensation-induced waterhammer // Rept. NUREG/CR-5220, U.S. NRC, 1988.

4. Griffith P. Screening reactor steam/water piping systems for water hammer // Rept. NUREG/CR-6519, U.S. NRC, 1997.
5. Bankoff S. G. Some condensation studies pertinent to lwr safety // Int. J. Multiphase Flow. 1980. Vol. 6. P. 51–67.
6. Pabarčius R., Šeporaitis M., Almenas K. Kondensacijos pliūpsnio tyrimas. 1. Tyrimo objektas ir eksperimentinis standas // Energetika. 2003. Nr. 1. P. 86–89.
7. Pabarčius R., Šeporaitis M., Almenas K. Kondensacijos pliūpsnio tyrimas. 2. Vandens įtekėjimo greičio įtaka // Energetika. 2003. Nr. 2. P. 3–7.
8. Pabarčius R., Šeporaitis M., Almenas K. Kondensacijos pliūpsnio tyrimas. 3. Nesikondensuojančių dujų įtaka // Energetika. 2003. Nr. 4. P. 3–7.
9. Almenas K., Wu C. C., Ragulskis L., diMarzo M. An unstable condensation controlled two-phase natural circulation mode // Nuclear Engineering and Design. 1991. Vol. 131. P. 241–251.
10. Almenas K., Wang Z., Hsu Y. Y., diMarzo M., Unal C. Impact of rapid condensations of large vapor spaces on natural circulation in integral systems // Nuclear Engineering and Design. 1992. Vol. 133. P. 285–300.
11. Chun J. H., Shimko M. A., Sonin A. A. Vapor condensation onto a turbulent liquid. II. Condensation burst instability at high turbulence intensities // J. Heat Mass Transfer. 1986. Vol. 29. P. 1333–1338.
12. Liang K. S., Griffith P. Experimental and analytical study of direct contact condensation of steam in water // Nuclear Engineering and Design. 1994. Vol. 147. P. 425–435.
13. Lim I. S., Tankin R. S., Yuen M. C. Condensation measurement of horizontal cocurrent steam/water flow // J. Heat Transfer. 1984. Vol. 106. Transactions of the ASME. P. 425–432.
14. Taitel Y., and Dukler A. E. A model for predicting flow-regime transitions in horizontal and near horizontal gas liquid flow // AIChE Journal. 1976. Vol. 22(1). P. 47–55.
15. Mandhane J. M., Gregory G. A., Aziz K. A. A flow pattern map for gas–liquid flow in horizontal pipes // Int. J. Multiphase flow. 1974. Vol. 1. P. 537–551.
16. Baker O. Simultaneous flow of oil and gas // Oil Gas J. 1954. Vol. 53(12). P. 185–195.
17. Wallis G. B., Dobson J. E. The onset of slugging in horizontal stratified air–water flow // International Journal of Multiphase Flow. 1973.
18. Chu I. C., Lee K. W., Yu S. O., Chun M. H. Interfacial condensation for countercurrent steam–water stratified smooth/wavy flow in horizontal pipe // Proc. 2nd Japan–Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS2), Fukuoka, Japan, 2000.
19. Grolman E., Fortuin J. M. H. Transient gas–liquid flow in upward sloping pipes, approaching the wavy-to-slug flow transition // Gas–Liquid Flows-FED, 225, ASME, New York, 1995.
20. Duncan H. J., Qiao H., Philomin V., and Wenz Q. Gentle spilling breakers: crest profile evolution // J. Fluid Mech. 1999. Vol. 379. P. 191–222.
21. Celata G. P. Direct Contact Condensation of Steam on Sub-cooled Water // Phase-Interface Phenomena in Multiphase Flow / eds. G. F. Hewitt, F. Mayinger, J. R. Riznic, Hemisphere, 1991. P. 345–372 (chapter in a book).
22. 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.
23. 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.
24. Kim H. J., Lee S. C., Bankoff S. G. Heat transfer and interfacial drag in countercurrent steam–water stratified flow // Int. J. Multiphase Flow. 1985. Vol. 11. P. 593–606.
25. Thomas R. M. Condensation of steam on water in turbulent motion // Int. J. Multiphase Flow. 1979. Vol. 9. P. 1–15.
26. Segev A., Flanagan L. J., Kurth R. E., Collier R. P. Experimental study of countercurrent steam condensation // J. Heat Transfer. 1981. Vol. 103. P. 307–311.
27. Sonin A. A., Shimko M. A., Chun J. H. Vapor condensation onto a turbulent liquid. I. The steady condensation rate as a function of liquid-side turbulence // Int. J. Heat Mass Transfer. 1986. Vol. 29. No. 9. P. 1319–1332.
28. Celata G. P., Farello G. E., Focardi G., Cumo M. A theoretical model of direct contact condensation on horizontal surface // ENEA Rept. RT/TERM 86/1, Casaccia, Italy, 1986.
29. 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.

**Marijus Šeporaitis, Raimondas Pabarčius,
Kazys Almenas**

INVESTIGATION OF CONDENSATION IMPLOSION: PULSER DESIGN CRITERION

Summary

The work presented in the paper is a sequel of an earlier investigation. The subject of the paper is condensation implosion in a two-phase system due to hydrodynamic instability, which occurs because of the interaction of steam and sub-cooled water flows in a horizontal cylinder (pulser). Here, for the design purposes a modified Jacobs number criterion Ja^* is proposed. This criterion defines the divergence of steam–water mixture from the thermal equilibrium. $Ja^* \approx 5$ is defined as the minimum condition for initiating a condensation implosion event.

Key words: two-phase flow, waviness and condensation

Маринос Шепорайтис, Раймондас Пабарчиус,
Казис Алменас

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНДЕНСАЦИОННОЙ ИМПЛОЗИИ: КОНСТРУКТИВНЫЙ КРИТЕРИЙ ПУЛСЕРА

Резюме

Работа, представленная в настоящей статье, является продолжением предыдущих исследований. Здесь рассматривается конденсационная имплозия из-за неустойчивости

двухфазной термогидравлической системы, которая возникает при взаимодействии потоков пара и воды в цилиндрическом сосуде (пульсере). Для оценки конструктивных особенностей проектируемого пульсера предложен критерий модифицированного числа Jacobs Ja^* . Этот критерий указывает на отклонение пароводяной смеси от термического равновесия. Установлено, что $Ja^* \approx 5$ – минимальное значение для инициации конденсационной вспышки.

Ключевые слова: двухфазный поток, конденсация