

Kondensacijos pliūpsniais varomos cirkuliacijos analizė panaudojant RELAP5 programų paketą

Mindaugas Valinčius,

Marijus Šeporaitis,

Raimondas Pabarčius,

Egidijus Babilas

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

Šiame straipsnyje pristatoma šiluminės-hidraulinės sistemos, kurioje vanduo cirkuliuoja dėl joje vykstančių periodinių kondensacijos pliūpsnių, analizė. Kadangi ši sistema pasyvi, jos privalumas yra tai, kad cirkuliacijai vykti nereikia papildomo išorinio energijos šaltinio. Pristatyta sistemos koncepcija, apibrėžtas jos veikimo principas. Šis principas buvo patikrintas atliekant skaitinį tyrimą, panaudojant RELAP5 programų paketą. Rezultatų analizė parodė, kad dėl kondensacijos pliūpsnių šiluminėje-hidraulinėje sistemoje cirkuliacija gali vykti cikliška ir nenutrūkstamai.

Kadangi šio darbo tikslas buvo patikrinti, ar tokiu principu cirkuliacija gali vykti, tai rezultatų analizė tik kokybinė. Norint pagrįsti jos taikymą praktikoje bei numatyti konkretaus pramoninio įrenginio veikimą, būtina ištirti kondensacijos pliūpsnio susidarymo sąlygas ir atlikti išsamesnius eksperimentinius bei skaitinius tyrimus.

Raktažodžiai: kondensacijos pliūpsnis, cirkuliacija, pasyvi sistema

1. ĮVADAS

Šilumos pernešimas ir šilumnešio cirkuliacija kontūre yra neatsiejami procesai tiek buitinyje, tiek pramoniniuose įrenginiuose. Pavyzdžiui, šilumos siurblyje, oro kondicionieriuje ar buitiniame šaldytuve cirkuliuoja šaldalas, šiluminėje ar branduolinėje jėgainėje – vanduo. Tačiau šių įrenginių veikimo užtikrinimui, kontūre turi vykti cirkuliacija. Cirkuliacija gali būti priverstinė – kai naudojami siurbliai, kompresoriai ir sukuriamas slėgių skirtumas arba natūrali – kai agentas kontūre cirkuliuoja dėl gravitacijos jėgų. Abiem atvejais turime spręsti papildomus techninius klausimus – priverstinei cirkuliacijai užtikrinti turime numatyti patikimą energijos tiekimą iš išorės, o natūrali cirkuliacija turi būti numatyta objekto projektavimo metu, tam parenkant pakankamą aukščių skirtumą reikiamo dydžio varomosios jėgos, t. y. slėgių skirtumui sukurti.

Lietuvos energetikos institute 2000 m. pradėti ir tęsiami kondensacijos pliūpsnio eksperimentiniai ir skaitiniai tyrimai [1–6]. Kondensacijos pliūpsnio metu susidaro ženklus slėgių skirtumas, kuris galėtų būti panaudotas naudingam darbui atlikti. Tyrimų programos metu eksperimentiniame stende Pulseris buvo atlikti bandymai, kurių metu nustatyta, kad kondensacijos pliūpsnį galima sukelti dirbtinai, tinkamai parinkus šiluminės-hidraulinės sąlygas [2–4]. Tokios ribinės

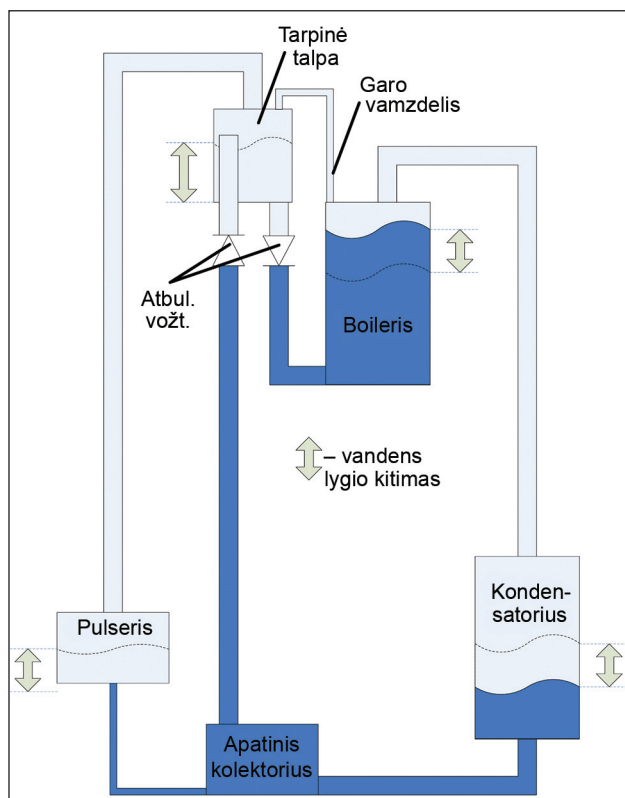
sąlygos gali susidaryti ir realiame įrenginyje, vykstant įprastiems pereinamiesiems procesams.

Šiame straipsnyje pristatoma šiluminės hidraulinės sistemos, kurioje vanduo cirkuliuoja dėl joje vykstančių periodinių kondensacijos pliūpsnių, analizė. Toks veikimo principas yra visiškai naujas ir iki šiol nenagrinėtas, nors pati kondensacija ir jos sukeliama reiškiniai bei fluidų tekėjimas dėl kondensacijos kitų autorių buvo tyrinėti ir anksčiau [7–9].

2. ŠILUMINĖS-HIDRAULINĖS SISTEMOS KONCEPCIJA

Kontroliuojamas kondensacijos pliūpsnio reiškinys – tai tik priemonė naudingam darbui atlikti. Šiluminės energijos vertimui darbu reikia sukurti šiluminės-hidraulinės sistemos koncepciją ir pagrįsti jos veikimo principą, kur šis reiškinys galėtų būti panaudotas. Kartu su Lietuvos energetikos instituto (LEI) mokslininkų grupe buvo sudaryta šiluminės-hidraulinės sistemos schema (1 pav.). Čia vaizduojamas kontūras, kuriame boileriulyje vanduo verda, o kondensatoriuje garas kondensuojasi. Sistemos darbui užtikrinti reikia vandenį iš kondensatoriaus pumpuoti į boilerį.

Tokia sistema galėtų būti panaudota, pavyzdžiui, avariniam branduolinio reaktoriaus aušinimui, kai nutrūksta



1 pav. Šiluminės-hidraulinės sistemos koncepcinė schema

elektros energijos tiekimas iš išorės bei sustoja pagrindinis cirkuliacinis siurblys.

Veikimo principas. Tarkime, kad iš pradžių boileris beveik užpildytas vandeniu, o kondensatorius beveik tuščias. Tokioje būsenoje šilumos mainai efektyviausi – boileryje vanduo intensyviai verda, o kondensatoriuje garas sparčiai kondensuojasi. Boileryje šiluma efektyviai sunaudojama vandens virimui, o pasigaminęs garas teka į kondensatorių ir jame virsta vandeniu. Jei nėra priverstinės cirkuliacijos, t. y. neveikia siurblys, boileryje vanduo garuoja ir jo mažėja, tuo tarpu kondensatas kaupiasi kondensatoriuje. Lygiagrečioje boilerio-kondensatoriaus kontūrinio linijoje prijungtas papildomas įrenginys – pulsoris, kuriame vandens lygis kinta dėl vandens lygio kondensatoriuje. Taigi proceso metu į pulsorį teka šaltas vanduo, lygis jame kyla ir, analogiškai eksperimentų metu tyrinėtiems atvejams [2–4], susidarius ribinėms sąlygoms įvyksta kondensacijos pliūpsnis. Po kondensacijos pliūpsnio šiluminėje-hidraulinėje sistemoje susidaro žemo slėgio zona, link kurios garas ir vanduo teka iš didesnio slėgio zonų. Kadangi vandens tiekimo į pulsorį vamzdžio skersmuo yra mažas, todėl srautas iš apačios yra ribotas. Kadangi kiekviena šiluminė-hidraulinė sistema siekia pusiausvyrinės būsenos, lengviausias kelias atstatyti slėgių pusiausvyrą – vanduo turi tekėti iš apatinio kolektoriaus į tarpinę viršutinę talpą. Ji sumontuota tam, kad būtų sumažintas slėgis, kai boileryje vis dar yra vandens. Garo vamzdelis iš boilerio į tarpinę talpą reikalingas tam, kad slėgiai tarp šių indų susilygintų ir vanduo sutektų į boilerį. Šio vamzdelio skersmuo taip pat yra

labai mažas, todėl kondensacijos pliūpsnio metu garo srautas yra ribojamas. Vamzdyje, pro kurį vanduo iš tarpinės talpos suteka į boilerį, sumontuotas atbulinis vožtuvas, neleidžiantis kondensacijos pliūpsnio metu vykti priešpriešiniam tekėjimui.

Tokiu būdu proceso pabaigoje boileris vėl prisipildo vandens, kondensatorius lieka beveik tuščias, o pulseryje esantis vanduo išteka į apatinį kolektorių. Taip pasiekiamos pradinės sąlygos ir ciklas kartojasi.

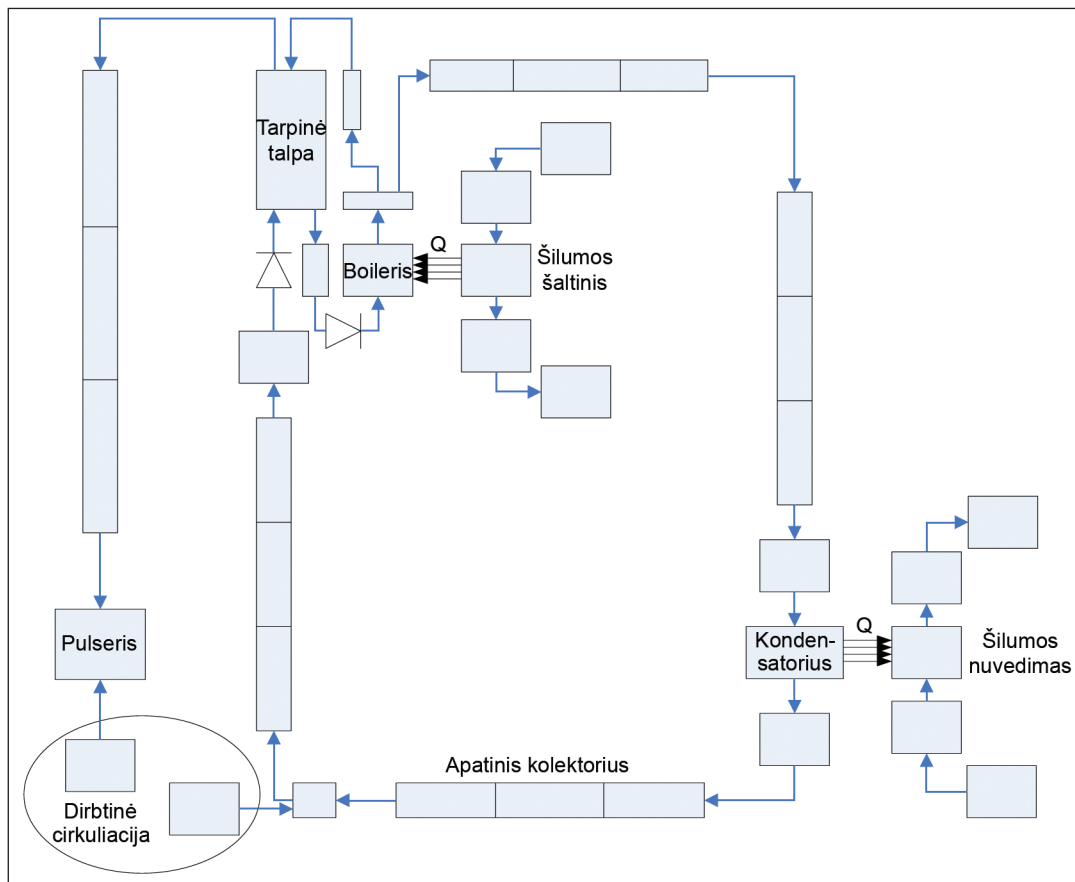
3. RELAP5 SISTEMOS MODELIS

Norint patikrinti, ar ši sistema galėtų cikliškai funkcionuoti, reikia atlikti išsamius eksperimentinius tyrimus bei išnagrinėti vykstančius fizikinius reiškinius. Naudojant kompiuterinius programų paketus, galima sumodeliuoti tokios sistemos veikimą bei prognozuoti kontūre vykstančių procesų eigą.

Pirmiausia, prieš atliekant skaitinius tyrimus, reikia įsitikinti, ar pasirinktas programų paketas geba sumodeliuoti reiškinius, kurie prognozuojami pasirinktoje sistemoje. Šiuo atveju didžiausios abejonės kyla dėl kondensacijos pliūpsnio vyksmo – itin dinamiško proceso – modeliavimo. Darbe [1] parodyta, kad originali RELAP5 programų paketo versija negali apskaičiuoti kondensacijos pliūpsnio, tačiau įtraukus pakeitimus programoje, kondensacijos pliūpsnis buvo sumodeliuotas ir modeliavimo rezultatai gerai atitiko eksperimentinius duomenis. Tam buvo dirbtinai keičiama šilumos perdavimo koeficiento ir paviršiaus ploto sandauga, o kondensacijos pliūpsnio pradžia buvo žinoma iš eksperimentinių duomenų. Nors šie pakeitimai negali būti naudojami fundamentinių tyrimų metu vykstančio kondensacijos pliūpsnio prognozavimui, tačiau mūsų atveju toks metodas leidžia patikrinti pramonėje taikytinos šiluminės-hidraulinės sistemos reakciją į šio reiškinio sukeltus slėgio pokyčius.

Šiluminės-hidraulinės sistemos modelio RELAP5 programų paketui schema parodyta 2 paveiksle. Skaitinis modelis sukurtas pagal koncepcinę sistemos schemą, įvedant tam tikrus supaprastinimus.

Kadangi buvo tikrinama šios šiluminės-hidraulinės sistemos funkcionavimo koncepcija, todėl atliktas tik kokybinis jos vertinimas. Šilumos nuostoliai į aplinką nebuvo vertinami. Natūrali vandens cirkuliacija tarp pulsorio ir kontūro taip pat nemodeliuota. Apskritai, natūralios cirkuliacijos modeliavimas sisteminiiais programų paketais vis dar išlieka problema. Norint tai kompensuoti, į pulsorį pradedamas tiekti vanduo iš išorės tada, kai vandens lygis kondensatoriuje pakyla iki reikiamo 1,5 m. Kai vanduo užpildo 40 % pulsorio tūrio, inicijuojamas kondensacijos pliūpsnis. Kondensacijos pliūpsnis programoje vykdomas staiga keičiant šilumos perdavimo koeficientus. Šie koeficientai buvo nustatyti atliekant eksperimentinio stendo pulsoris skaitinį tyrimą, kai įvykdo kondensacijos pliūpsnis. Kaip minėta, po kondensacijos pliūpsnio vanduo iš pulsorio pašalinamas vamzdzium, o kad visoje sistemoje būtų išlaikoma masės pusiausvyrą, susidaręs kondensatas dirbtinai grąžinamas į kontūro apačią.



2 pav. Sistemos RELAP5 modelio schema

Sudarant sistemos modelį, reikėjo priimti konkrečius geometrinis kontūro parametrus. Priimta, kad kondensatorius bei boileris atitinka lengvojo vandens reaktoriaus (LWR) realius įrenginius. Kontūro komponentų altitudės parinktos atsižvelgiant į Ignalinos AE konfigūraciją (pvz., aukščių skirtumas tarp boilerio ir kondensatoriaus – 30 m). Modeliuojamo „reaktoriaus“, t. y. boilerio, šildymo galia priimta apie 27 MW. Tokia galia realiame branduolinės jėgainės komponente lieka praėjus daugmaž 1 parai po RBMK-1500 reaktoriaus sustabdymo, t. y. kai reaktorių jau gali būti aušinamas vien natūralios cirkuliacijos būdu nenaudojant cirkuliacinių siurblių.

4. REZULTATAI

Skaitinio tyrimo metu buvo nagrinėjamas sistemos parametrų kitimas laiko atžvilgiu, iš kurių galima spręsti apie sistemos būsenas, vykstančius pereinamuosius procesus, visos šiluminės-hidraulinės sistemos efektyvumą ir darbo ciklą. Sistemos parametrai paveiksluose parodyti esant jau nusistovėjusiam ir besikartojančiam ciklui.

3 paveiksle pateikiamas slėgio kitimas pulseryje bei boileryje. Čia matyti, jog pulserio linijoje slėgis sumažėja, nors boileris ir yra beveik užpildytas verdančiu vandeniu. Jeigu pulsieris būtų prijungtas prie boilerio be tarpinės talpos, slėgio jame nepavyktų sumažinti tol, kol neišgaruotų visas boileriame esantis vanduo, o sistema su tuščiu boileriu veiktų neefekty-

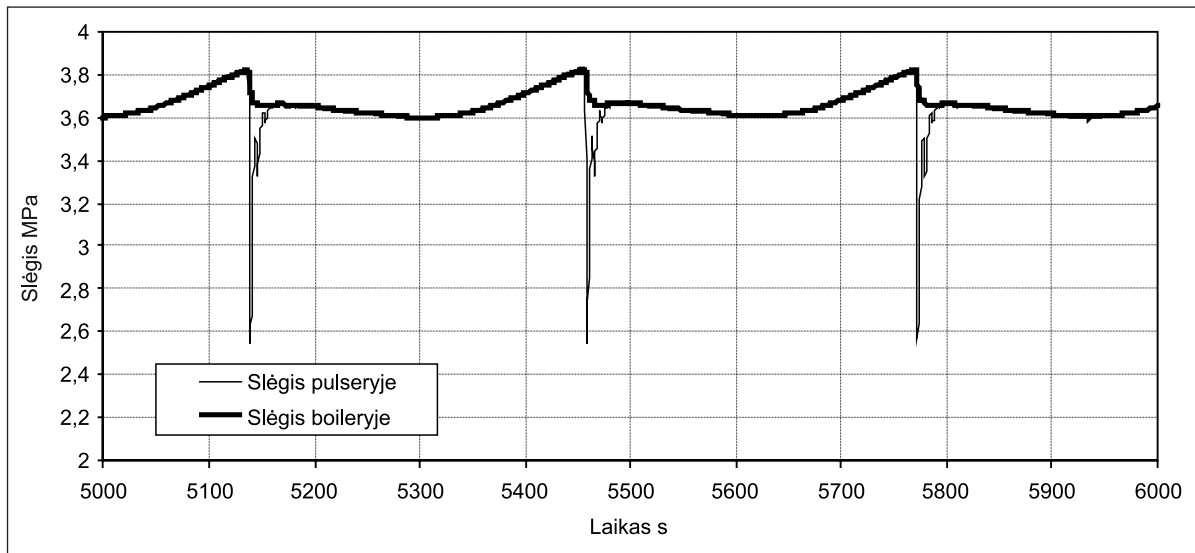
viai, galbūt ir pavojingai. Kaip matyti šiame paveiksle, slėgis pulseryje kondensacijos pliūpsnio metu (staigus slėgio sumažėjimas) krenta nuo 3,8 iki 2,6 MPa, o antroje ciklo dalyje, pasiurbus vandens į tarpinę talpą, nusistovi ~3,6 MPa. Kylant vandens lygiui kondensatoriuje, jo efektyvumas mažėja, nes lieka mažiau kondensacinio paviršiaus šilumokaityje. Todėl boileriame generuojama daugiau garo nei jo sukondensuojama, ir slėgis po truputį pradeda kilti. Toliau ciklas kartojasi iš naujo.

Procesams pulseryje apibūdinti 4 paveiksle pateikiamas konstrukcinio pulserio parametro [6] – modifikuoto Jacobso kriterijaus kitimas. Jis apskaičiuojamas taip:

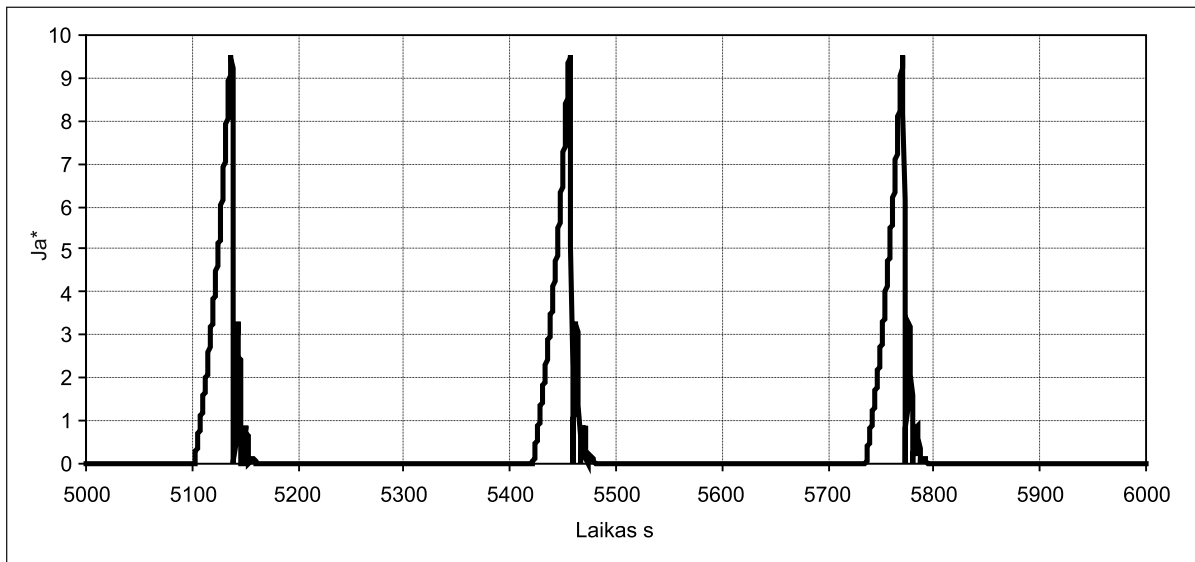
$$Ja^* = \frac{m_f c_f (T^s - T_f)}{m_g h_{fg}};$$

čia m_f ir m_g – atitinkamai skysčio (vandens) ir garo masė, T^s ir T_f – soties ir skysčio temperatūra, c_f – savitoji skysčio šiluminė talpa, h_{fg} – savitoji garavimo šiluma.

Skaičiuojant šį parametą, buvo vertinami įleidžiamo vandens bei garo kiekiai pulseryje (m_f, m_g). Kadangi natūrali cirkuliacija nebuvo modeliuojama, į pulsierį buvo įleidžiamas tokios temperatūros vanduo, kokios jis išteka iš kondensatoriaus. Darbe [6] buvo padaryta išvada, jog Ja^* kriterijus turi būti ne mažesnis nei 4–5, norint sukelti kondensacijos pliūpsnį. 4 paveiksle pateikti modeliavimo rezultatai rodo, jog ši sąlyga tenkinama.



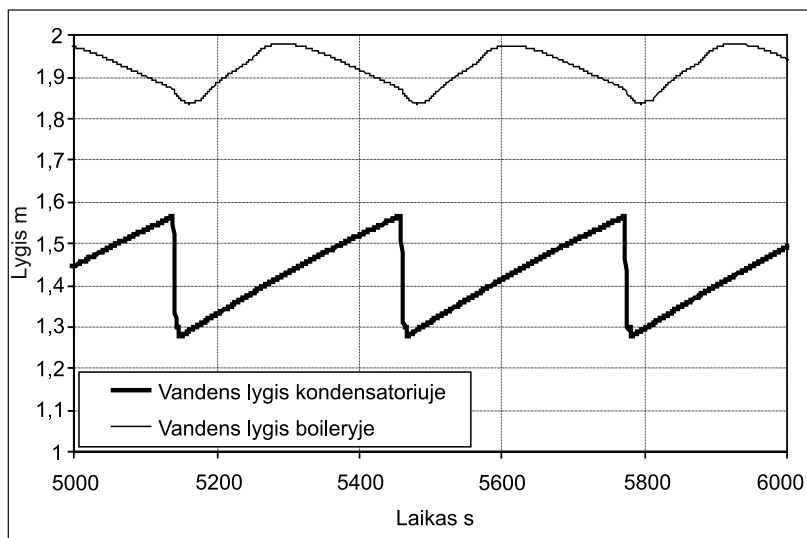
3 pav. Slėgio kitimas „pulseryje“ ir boileryje

4 pav. Kriterijaus Jg^* kitimas

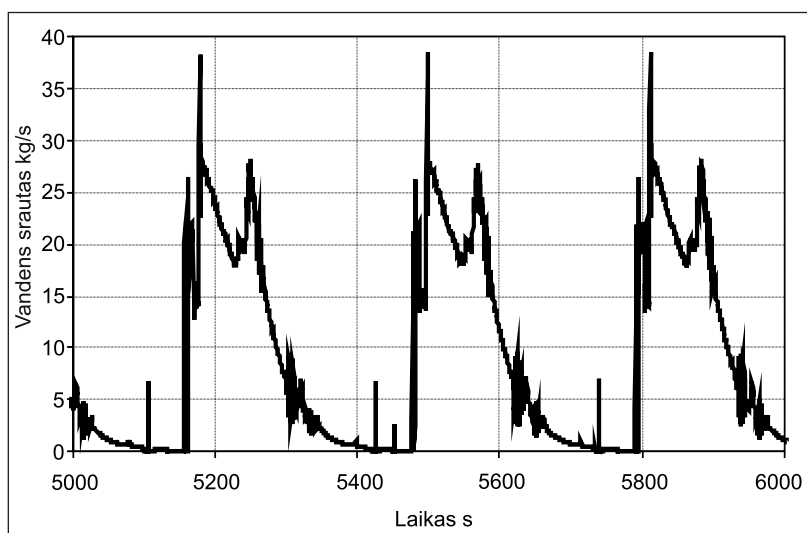
5 paveiksle pateiktas vandens lygio kitimas kondensatoriuje ir boileryje. Šių parametru kitimas yra skirtingas. Kondensatoriuje garas kondensuojamas, ir vandens lygis jame kyla. Jam pakilus iki tam tikros ribos, įvyksta kondensacijos pliūpsnis ir vanduo staiga pasiurbiamas iš kontūro apatinės dalies į tarpinę talpą kontūro viršuje. Taigi kondensatoriuje lygis staiga sumažėja ir po truputį vėl pradeda didėti, nes daugiau vandens nebeįteka, o garas nuolat kondensuojasi. Kadangi vanduo patenka ne tiesiai į boilerį (per tarpinę talpą), pasiurbtam vandeniui sutekėti į boilerį reikia tam tikro laiko. 6 paveiksle parodytas vandens srauto į boilerį kitimas. Kol vandens srautas yra didesnis nei 10 kg/s, vandens lygis boileryje kyla. Tačiau vandens lygiui tarpinėje talpoje mažėjant, taip pat mažėja vandens srautas į boilerį. Todėl boileryje vandens išgarinama daugiau nei jo priteka, ir vandens lygis jame pradeda mažėti.

7 paveiksle pateikta boileryje nuo šilumos šaltinio nuvedamos šilumos kiekio dinamika. Kaip matyti, jis irgi nėra pastovus veikiant šiluminei-hidraulinei sistemai. Boilerio efektyvumas priklauso nuo jame esančio vandens lygio. Kuo daugiau vandens, tuo efektyvesnis šilumos nuvedimas. Kaip žinoma, verdantis skystis kur kas geriau nuveda šilumą nuo sienelės nei kaitinamas garas. Tai ir matyti pateikiamame grafike – didžiausia nuvedama galia (28 MW) susiformuoja tada, kai vandens lygis boileryje didžiausias. Vidutinė boileryje nuvedama galia – 27 MW.

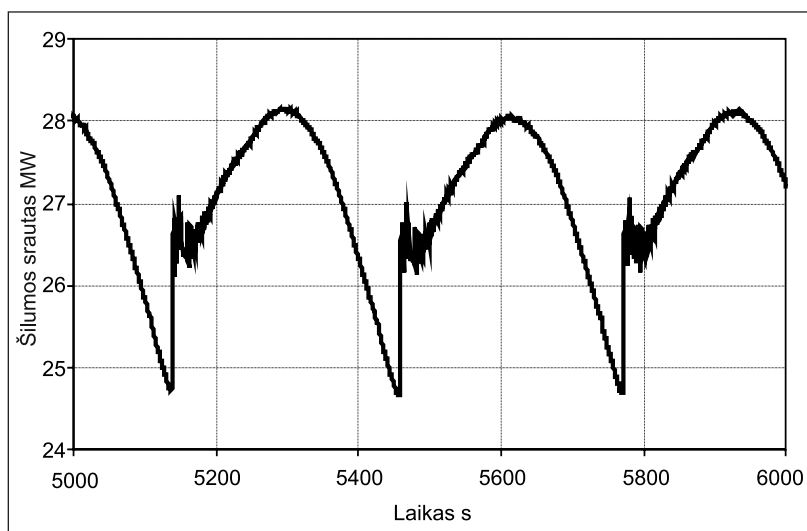
Modeliavimo rezultatai parodė, kad darbe pristatyta šiluminė-hidraulinė sistema veikia kaip ir tikėtasi – cikliška. Tačiau reikia nepamiršti taikytų prielaidų ir supaprastinamų, t. y. nemodeliuojamų, šilumos nuostolių, supaprastinto vandens tiekimo į pulsėrį, priverstinio kondensacijos pliūpsnio susidarymo, taip pat naudojamo vienmačio programų paketo



5 pav. Vandens lygio kitimas boileryje ir kondensatoriuje



6 pav. Vandens srauto iš tarpinės talpos į boilerį kitimas



7 pav. Šilumos srauto iš šilumos šaltinio į boilerį kitimas

RELAP5 ribotumo. Siekiant pašalinti tam tikrus supaprastinimus, pavyzdžiui, kondensacijos pliūpsnio „įjungimą“ tam tikru momentu, reikia atlikti detalius eksperimentinius tyrimus, taikyti pažangius modeliavimo, programinių paketų sujungimo metodus ir t. t. Būtent šia linkme – kondensacijos pliūpsnio susidarymo sąlygų nustatymas ir atliekami tolesni fundamentiniai eksperimentiniai ir skaitiniai tyrimai LEI.

Šiame darbe pateikta ir nagrinėta šiluminė-hidraulinė sistema yra tik vienas pavyzdžių, kur būtų galima taikyti šį veikimo principą. Tokio tipo sistemos gali būti naudojamos ir kituose pramonės įrenginiuose, kuriuose yra generuojama šiluminė energija ir būtina priverstinė cirkuliacija kontūre. Tokios sistemos privalumas yra tai, jog ji pasyvi, nereikalauja papildomos išorinės energijos, nėra besisukančių dalių (pvz., siurbliuose) ir t. t.

5. IŠVADOS

Šiame darbe pristatyta šiluminės-hidraulinės sistemos veikimo principo, paremto kondensacijos pliūpsnių periodiniu inicijavimu, analizė. Šio tyrimo metu sukurta šiluminės-hidraulinės sistemos koncepcija, apibrėžtas jos veikimo ciklas, sumodeliuotas jos veikimas bei atlikta skaičiavimo rezultatų kokybinė analizė. Darbo pagrindinės išvados:

1. Skaitiniai tyrimai parodė, kad sistema gali veikti cikliška ir nenutrūkstamai. Aprašytą darbo ciklo eigą patvirtina gauti modeliavimo rezultatai.

2. Šiame darbe nagrinėtoje sistemoje su priimtomis kraštinėmis sąlygomis ir prielaidomis, kondensacijos pliūpsnio reiškinys sukelia pakankamą slėgių skirtumą, kad vanduo būtų pasiurbiamas į kontūro viršuje esančią tarpinę talpą, taip sudarant sąlygas cikliška cirkuliacijai vykti.

3. Šio principo pirminės analizės rezultatai patvirtina prielaidas jo praktinio taikymo platesniam tyrimui atlikti.

Ateityje, atlikus išsamių kondensacijos pliūpsnio susidarymo sąlygų analizę, būtų galima tokios šiluminės-hidraulinės sistemos veikimo ciklą patikrinti eksperimentiškai.

Literatūra

1. Valinčius M., Šeporaitis M., Pabarčius R. Uncertainty and sensitivity analysis of rapid condensation simulation results using the adapted RELAP5 version. *Heat Transfer Research*. 2009. Vol. 40. No. 1. P. 1–15.
2. Pabarčius R., Šeporaitis M., Almenas K. Kondensacijos pliūpsnio tyrimas. 1. Tyrimo objektas ir eksperimentinis stendas. *Energetika*. 2003. Nr. 1. P. 86–90.
3. Pabarčius R., Šeporaitis M., Almenas K. Kondensacijos pliūpsnio tyrimas. 2. Tiekimo vandens srauto įtaka. *Energetika*. 2003. Nr. 2. P. 3–7.
4. Pabarčius R., Šeporaitis M., Almenas K. Kondensacijos pliūpsnio tyrimas. 3. Nesikondensuojančių dujų įtaka. *Energetika*. 2003. Nr. 4. P. 3–7.
5. Almenas K., Pabarčius R., Šeporaitis M. Design and tests of a device for the generation of controlled condensation implosion events. *Heat Transfer Engineering*. 2006. Vol. 27. Iss. 3. P. 32–41.
6. Šeporaitis M., Pabarčius R., Almenas K. Kondensacijos pliūpsnio tyrimai: konstrukcinis pulserio kriterijus. *Energetika*. 2006. Nr. 3. P. 77–85.
7. Block J. A. Condensation-driven fluid motinos. *International Journal of Multiphase Flow*. 1980. Vol. 6. No. 1–2. P. 113–129.
8. Rothe P. H., Wallis G. B., Crowley C. J. Waterhammer in the feedwater systems of PWR steam generators. *Fluid Transients and Acoustics in the Power Industry*. ASMEWAM, New York, 1978.
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. No. 2. P. 241–251.

Mindaugas Valinčius, Marijus Šeporaitis,
Raimondas Pabarčius, Egidijus Babilas

RELAP5 ANALYSIS OF CIRCULATION DRIVEN BY CONDENSATION IMPLOSIONS

Summary

An analysis of a thermal-hydraulic system in which water is circulated by generating periodic condensation implosions is presented. This system is passive, and its most important advantage is that there is no need of an external power source to maintain the circulation. The concept of the system is presented, and its working principle is described. This principle was tested by performing a numerical analysis using the RELAP5 code. The analysis of the results showed that cyclical and uninterrupted circulation in a thermal-hydraulic system can be established by generating condensation implosion events.

Since the purpose of this work was just to test whether circulation may be maintained by this principle, the analysis of the results is only qualitative. For substantiation of its practical application and for predicting the operation of a specific industrial plant, condensation implosion initiation conditions should be analyzed, and a more detailed numerical and experimental study should be performed.

Key words: condensation implosion, circulation, passive system

Миндаугас Валинчюс, Мариюс Шепорайтис,
Раймондас Пабарчюс, Эгидиус Бабилас

АНАЛИЗ КОНДЕНСАЦИОННЫМИ ВСПЫШКАМИ ОБОСНОВАННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ, ИСПОЛЬЗУЯ ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ RELAP5

Резюме

В настоящей статье представлен анализ тепло-гидравлической системы, в которой вода циркулирует из-за создаваемых периодических конденсационных вспышек. Поскольку такая система пассивная, ее преимуществом является то, что ее функционирование не требует внешнего источника энергии для поддержания циркуляции. Представлена концепция системы и определен принцип ее работы. Этот принцип был проверен проводя численные исследования с помощью программного пакета RELAP5. Анализ результатов показал, что из-за конденсационных вспышек циркуляция в тепло-гидравлической системе может продолжаться циклично и непрерывно.

Поскольку цель данной работы – только проверить, может ли вода циркулировать по этому принципу, представлен лишь качественный анализ результатов. Чтобы обосновать практическое применение данного принципа и предусмотреть функционирование конкретного промышленного предприятия, необходимо исследовать условия формирования конденсационной вспышки, поэтому должны быть проведены более подробные численные и экспериментальные исследования.

Ключевые слова: конденсационная вспышка, циркуляция, пассивная система