AUDRIUS GRAŽEVIČIUS

DVIFAZIO-DVIKOMPONENČIO FLUIDO NATŪRALIOS KONVEKCIJOS IR TERMINĖS STRATIFIKACIJOS PROCESŲ SKAITINIS TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJOS SANTRAUKA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI, ENERGETIKA IR TERMOINŽINERIJA (T 006)

Kaunas
2020

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
LIETUVOS ENERGETIKOS INSTITUTAS

AUDRIUS GRAŽEVIČIUS

DVIFAZIO-DVIKOMPONENČIO FLUIDO NATŪRALIOS KONVEKCIJOS IR TERMINĖS STRATIFIKACIJOS PROCESŲ SKAITINIS TYRIMAS

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija (T 006)

2020, Kaunas

Disertacija rengta 2015–2019 metais Lietuvos energetikos institute, Branduolinių įrenginių saugos laboratorijoje.

Mokslinis vadovas:
Doc. habil. dr. Algirdas KALIATKA (Lietuvos energetikos institutas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija, T 006).

Redagavo: Irma Urbonavičienė

Energetikos ir termoinžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:
Dr. Egidijus URBONAVIČIUS (Lietuvos energetikos institutas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija, T 006) – **pirmininkas**;
Prof. dr. Francesco D'AURIA (Pizos universitetas, Italija, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija, T 006);
Dr. Algis DŽIUGYS (Lietuvos energetikos institutas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija, T 006);
Doc. dr. Raimondas PABARČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija, T 006);
Dr. Giedrė STRECKIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija, T 006).

Disertacija bus ginama viešame energetikos ir termoinžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2020 m. rugpjūčio 26 d. 14 val. Lietuvos energetikos instituto posėdžių salėje.

Adresas: Breslaujos g. 3-330, 44403 Kaunas, Lietuva.
Tel. (370) 37 300 042; faks. (370) 37 324 144; el. paštas doktorantura@ktu.lt.

Disertacijos santrauka išsiųsta 2020 m. liepos 24 d.
Su disertacija galima susipažinti internetinėje svetainėje http://ktu.edu, Kauno technologijos universiteto (K. Donelaičio g. 20, 44239 Kaunas) ir Lietuvos energetikos instituto (Breslaujos g. 3, 44403 Kaunas) bibliotekose.

TURINYS

ĮVADAS....4
1. LITERATŪROS APŽVALGA....9
1.1. Natūrali konvekcija ir terminė stratifikacija....9
1.2. CFD programų apžvalga....9
1.3. Natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos procesų skaitinių tyrimų apžvalga....9
2. SKAITINIO TYRIMO METODIKA....12
2.1. CFD programos pasirinkimas ir skaičiavimo ištekliai....12
2.2. Programos *ANSYS Fluent* struktūra....13
2.3. Skaitinio modelio geometrijos ir tinklelio kūrimas....13
2.4. Pasienio sluoksnio modeliavimas....13
2.5. Turbulencijos modeliavimas....14
2.6. Daugiafazio fluido modeliavimas....15
2.7. Konvergavimas ir pereinamieji skaičiavimai....16
2.8. Vartotojo aprašomoji funkcija....16
3. EKSPERIMENTINIAI STENDAI IR JŲ SKAITINIAI MODELIAI....17
3.1. KAERI eksperimentinis stendas....17
3.2. Osakos universiteto eksperimentinis stendas....19
3.3. Skaitiniai eksperimentinių stendų modeliai....20
4. TYRIMŲ REZULTATAI....23
4.1. KAERI eksperimento tarpiniai skaičiavimai....23
4.2. KAERI eksperimento finalinis skaičiavimas....23
4.3. Osakos universiteto eksperimento tarpiniai skaičiavimai....32
4.4. Osakos universiteto eksperimento finalinis skaičiavimas....34
IŠVADOS....41
LITERATŪROS SĄRAŠAS....42
MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS....46
RESUME....49

ĮVADAS

Pasyvių aušinimo sistemų svarba, užtikrinant branduolinių reaktorių aušinimą, išaugo po Fukušimos branduolinės avarijos, įvykusios 2011 m. kovo 11 d. Japonijoje. Todėl šiuolaikinės branduolinės jėgainės projektuojamos kartu su pasyviomis aušinimo sistemomis, kurios dėl paprasto veikimo ir kurioms nereikia išorinio energijos tiekimo, padeda užtikrinti branduolinę saugą. Norint įdiegti pasyvias aušinimo sistemas naujai statomoje ar projektuojamoje naujos kartos branduolinėje jėgainėje, būtina įvertinti tokių pasyvių aušinimo sistemų galimybę efektyviai aušinti branduolinį reaktorių ar atmosferą apsauginiame kiaute, ir tai tiesiogiai sietina su avarijų valdymu. Istoriniame kontekste avarijų valdymas ar jų pasekmių sumažinimas panaudojant pasyvias aušinimo sistemas ypatingai svarbus eksploatuojant branduolinius įrenginius, nes, blogiausiu atveju, galimas radioaktyviųjų medžiagų išmetimas, o tai potencialiai gali paveikti darbuotojus, gyventojus ir / ar mus supančią aplinką. Vis tik tokių pasyvių aušinimo sistemų panaudojimas nebranduoliniuose objektuose ir įrenginiuose irgi svarbus, pirmiausia, nes jų yra daugiau eksploatuojama, antra, pramonės sektoriuje kuriasi vis didesni įvairių įmonių parkai, kurių šilumos šaltiniu įvairiausiuose technologiniuose procesuose (stiklo, trąšų ir pan. gamyba) tarnauja vienas didelės galios šiluminės energijos generacijos įrenginys. Antriniuose pramonės objektų (nebranduoliniuose ir branduoliniuose) kontūruose natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos procesai turi tą pačią prigimtį ir priežastinius dėsnius / ryšius, todėl minėtų procesų aiškinimas, besiremiant branduolinių įrenginių eksploatacijos patirtimi ar susijusių atliktų natūrinių tyrimų rezultatais, yra teisingas ir taikytinas panašiems ar analogiškiems šiluminės energetikos objektams.

Didelio tūrio aušinimo baseinas yra vienas iš pasyvios aušinimo sistemos komponentų, kuris skirtas kaupti didelius šilumos kiekius, gaunamus iš reaktoriaus aktyviosios zonos ar apsauginio kiauto avarijos atveju, kai branduolinė jėgainė netenka bet kokio elektros energijos tiekimo. Įprastai aušinimo baseino apačioje yra įrengti šilumokaičiai, kurių paskirtis perduoti iš šilumos šaltinio paimamą šilumą aušinimo baseino vandeniui. Virš aušinimo baseino laisvai cirkuliuoja oras. Vykstant šilumos mainams per šilumokaičių sieneles, apiplaunančio vandens tankis prie šilumokaičių sumažėja, dėl to mažesnio tankio vanduo dėl plūdrumo jėgos pradeda kilti į viršų. Šiltesnis vanduo, pasiekęs vandens ir oro tarpfazinį paviršių, vėsta ir maišosi su apačioje esančiu šaltesniu vandeniu bei vėl apiplauna baseine esančius šilumokaičius. Taip baseine virš šilumokaičių susiformuoja natūralios konvekcijos reiškinys, kai tuo tarpu vanduo po šilumokaičiais nejuda. Taigi, po kurio laiko baseine susiformuoja terminė stratifikacija. Į baseiną iš šilumos šaltinio nukreipiant vis didesnius šilumos kiekius vandens temperatūra artėja link soties būsenos, vanduo pradeda intensyviai maišytis po šilumokaičiais – terminė stratifikacija dingsta. Su šiais

procesais susiduriama ne tik minėtame aušinimo baseine, bet ir panaudoto branduolinio kuro baseine ar net branduoliniame reaktoriuje. Kadangi šie natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos procesai tarpusavyje glaudžiai susiję ir jie yra ypatingai svarbūs pagrindžiant branduolinių įrenginių saugą, jie visada domino ir išlieka aktualūs inžinieriams, inspektoriams ir mokslininkams. Šiuo metu ypač išaugęs susidomėjimas šių procesų modeliavimu naudojant CFD programas. Nors CFD programos sparčiai plėtojamos, šie procesai įprastai modeliuojami priimant daugybę supaprastinimų, pavyzdžiui, priimamos nekintančios fluido termodinaminės-fizikinės savybės, nagrinėjamas vienfazis fluidas, dažniausiai sprendžiami stacionarūs laiko uždaviniai, priimamos stacionarios kraštinės sąlygos, nevertinama šoninių sienelių įtaka ir pan. Atliekant tyrimus su šiomis supaprastintomis prielaidomis prarandama galimybė atlikti detalų ir išsamų branduolinės saugos vertinimą. Todėl vystant šiandieninę bei kuriant ateities branduolinę energetiką yra būtina išplėtoti tyrimo metodiką, kuri leistų atlikti natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos procesų, vykstančių aušinimo baseinuose, kompleksinį modeliavimą, t. y. įvertinti šilumos mainų procese dalyvaujančio fluido kintančias termodinamines-fizikines savybes, kintantį dvifazio-dvikomponenčio fluido tekėjimo rėžimą, šilumos išsiskyrimo ir šilumos mainų per šilumokaičio sieneles dinamiką, neišvengiamus fazinius virsmus ir kitus kintamus parametrus bei reiškinius.

Šioje disertacijoje pristatoma dvifazio-dvikomponenčio fluido natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos procesų, vykstančių aušinimo baseine, modeliavimo metodika taikant CFD programą. Modeliavimo metodika buvo išplėtota remiantis atliktų dviejų tarptautinių eksperimentų rezultatais. Pirmasis eksperimentas atitiko atvejį, kai aušinimo baseine šilumokaičiai patalpinti horizontaliai (horizontalus šildantysis paviršius), ir tai atitinka pasyvios aušinimo sistemos sudėtinę dalį, diegiamos šiuolaikinėse naujos kartos branduolinėse jėgainėse. Antrasis eksperimentas – tai sustabdyto, atidengto ir parengto perkrovimui suslėgto vandens reaktoriaus aušinimo atvejis (vertikalus šildantysis paviršius).

Darbo aktualumas

Eksploatuojant didelės galios pramoninį objektą(us) labai svarbu suprasti jame vykstančius procesus, prognozuoti nusistovėjusias ar besikeičiančias situacijas bei valdyti galimas ar netikėtas avarijas. Siekiant apsisaugoti nuo galimų kritinių tokių avarinių situacijų pasekmių, taip pat siekiant jas maksimaliai sumažinti, šiuolaikiniuose pramonės objektuose yra diegiamos ar projektuojamos pasyvios aušinimo sistemos, nereikalaujančios išorinio energijos šaltinio kritinių situacijų ar avarijų metu. Šis klausimas ypač aktualus branduolinėse jėgainėse, nes galimos avarijų pasekmės šiuose objektuose gali būti skaudžios. Natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos procesai, vykstantys pasyvių sistemų aušinimo baseinuose, tarpusavyje glaudžiai susiję, jų vyksmas lemia įrenginių

saugą ir jie visada domina ir išlieka aktualūs inžinieriams, inspektoriams ir mokslininkams. Nors susidomėjimas šių procesų modeliavimu naudojant CFD programas ypač išaugęs, be to šie procesai įprastai modeliuojami priimant daugybę supaprastinimų. Tačiau detalios kompleksinės šių procesų modeliavimo metodikos kol kas nėra arba ji dar nėra viešai publikuota.

Tyrimo objektas

Dvifazio-dvikomponenčio fluido natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos procesai, vykstantys šiluminiuose įrenginiuose.

Darbo tikslas

Išplėtoti dvifazio-dvikomponenčio fluido natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos procesų, vykstančių šiluminiuose įrenginiuose, modeliavimo metodiką taikant CFD programą.

Darbo uždaviniai

1. Sukurti eksperimentinių stendų su horizontaliais ir vertikaliais šildančiaisiais paviršiais skaitinius modelius.
2. Modeliuojant natūralią konvekciją ir terminę stratifikaciją eksperimentiniuose stenduose, nustatyti pradinių ir ribinių sąlygų bei skaitinio modelio parametrų įtaką modeliavimo rezultatams.
3. Sukurti ir programine kalba aprašyti vartotojo funkciją, skirtą aprašyti šilumos išsiskyrimo, šildančiuosiuose paviršiuose, dinamiką.
4. Patikrinti išplėtotą metodiką pagal eksperimentų, kurie reprezentuoja dvifazio-dvikomponenčio fluido natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos procesus aušinimo baseine, modeliavimą, ir atlikti gautų rezultatų analizę.

Darbo mokslinis naujumas

- Atliekant dviejų pasirinktų eksperimentų modeliavimą, išplėtota dvifazio-dvikomponenčio fluido natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos procesų, vykstančių šiluminiuose įrenginiuose, modeliavimo metodika taikant CFD programą. Iki šiol šie procesai naudojant CFD programas buvo modeliuojami priimant daug supaprastinimų.
- Išplėtota metodika leidžia įvertinti ne vieną, o kelis skirtingus fluidus (dvikomponentis) vienoje analizuojamoje sistemoje, kintant tų fluidų termodinaminėms-fizikinėms savybėms, taip pat įgalina įvertinti fluidų tarpusavio sąveiką, pereinamuosius ir fazių virsmų procesus bei besikečiančius šilumos mainus per sieneles.

Darbo praktinė vertė

Išplėtota metodika leidžia atlikti dvifazio-dvikomponenčio fluido natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos procesų kompleksinius skaitinius tyrimus naudojant CFD programą. Metodika gali būti taikoma šių procesų, vykstančių energetiniuose ar pramonės įrenginiuose (pasyvios aušinimo sistemos baseinas, panaudoto branduolinio kuro baseinas, branduolinis ar cheminis reaktorius, ir pan.), modeliavimui, objekto ar įrenginio saugos įvertinimui, avarijų valdymo metodologijos sudarymui ir kt. Antrasis šios metodikos pritaikymas – jos panaudojimas kuriant ir tobulinant CFD programas.

Ginamieji disertacijos teiginiai

1. $k-\varepsilon$ *Realizable* turbulencijos modelis su pasienio sluoksnio modeliavimo parinktimi (angl. *Enhanced Wall Treatment*) tiksliau atspindi terminės stratifikacijos reiškinį, negu $k-\omega$ SST turbulencijos modelis.
2. Išorinių sienelių įtraukimas į skaitinį modelį turi reikšmingą įtaką dvifazio-dvikomponenčio fluido natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos procesų modeliavimo rezultatų tikslumui.
3. Šildančiųjų paviršių šilumos išsiskyrimo dinamikos aprašymui tinkama priemonė – tai skaitinio tyrimo metu naudojamos specialios suprogramuotos vartotojo aprašomosios funkcijos, įterpiamos į skaitinį modelį.
4. Išplėtota metodika leidžia atlikti dvifazio-dvikomponenčio fluido natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos procesų, vykstančių sudėtingų formų sistemose, kompleksinį modeliavimą.

Autoriaus indėlis

Disertacijos autorius išanalizavo mokslinius duomenis apie dvifazio-dvikomponenčio fluido natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos procesus, vykstančius stačiakampių formų geometrijose su cilindriniu kaitinimo elementu, ir šių procesų skaitinius tyrimus naudojant CFD programas. Remdamasis dviem eksperimentais ir pasinaudodamas programomis ICEM CFD bei *ANSYS Fluent*, sukūrė eksperimentinių stendų detalius skaitinius modelius ir ištyrė dvifazio-dvikomponenčio fluido natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos procesus. Išplėtojo metodiką, skirtą atlikti minėtų procesų kompleksinius skaitinius tyrimus naudojant CFD programą. Sukūrė ir suprogramavo vartotojo aprašomąją funkciją šilumos išsiskyrimo šildančiuosiuose paviršiuose dinamikai aprašyti. Atliko jautrumo analizę, nustatė pradinių ir ribinių sąlygų bei skaitinio modelio parametrų įtaką modeliavimo rezultatams.

Darbo aprobavimas

Disertacijos tema paskelbti 2 moksliniai straipsniai „Clarivate Analytics“ duomenų bazėje „Web of Science Code Collection“ referuojamuose žurnaluose ir 5 moksliniai straipsniai bei pranešimai paskelbti, ir pristatyti tarptautinėse konferencijose.

Darbo struktūra ir apimtis

Disertaciją sudaro įvadas, literatūros apžvalga, metodika, eksperimentų ir skaitinių modelių aprašymas, rezultatai ir jų aptarimas, išvados, literatūros sąrašas, disertacijos tema paskelbtų mokslinių publikacijų sąrašas ir 2 priedai. Darbo apimtis 98 puslapiai, iš jų 86 paveikslai, 8 lentelės, 77 nuorodos į literatūros šaltinius ir 2 priedai.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Natūrali konvekcija ir terminė stratifikacija

Natūrali konvekcija yra masės ir šilumos pernešimo procesas, kuris įvyksta dėl fluide susiformavusio temperatūros gradiento, o ne dėl išorinio energijos šaltinio (siurblys, ventiliatorius ir kt.) sukurtos jėgos. Natūralios konvekcijos atveju dėl šilumos mainų tarp fluido esančio aplink šildantį paviršių ir šildančio paviršiaus fluido tankis sumažėja, fluidas tampa lengvesnis ir veikiamas plūdrumo jėgos pradeda kilti į viršų, o sunkesnis fluidas leidžiasi žemyn. Taip sistemoje susiformuoja natūralios konvekcijos procesas, kuris gali būti įvertinamas Grashofo, Relėjaus, Ričardsono ar kitais bedimensiniais skaičiais.

Terminė stratifikacija – tai procesas, vykstantis horizontaliuose fluido sluoksneliuose, kai mažesnio tankio fluido sluoksneliai yra aukščiau didesnio tankio fluido sluoksnelių. Terminė stratifikacija gali būti sutrikdyta atsiradus fluido tekėjimui. Šis procesas gali būti įvertinamas bedimensiniu stratifikacijos skaičiumi, modifikuotais Relėjaus ar Ričardsono bedimensiniais skaičiais bei kitais bedimensiniais skaičiais.

1.2. CFD programų apžvalga

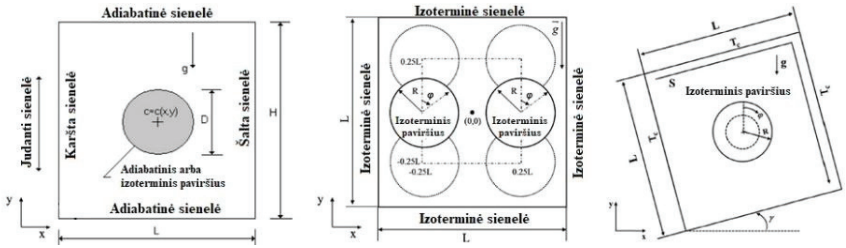
Ilgą laiką kompiuteriai yra naudojami spręsti įvairius uždavinius, susijusius su termohidromechanika. Nuo 1970 metų pradėti kurti CFD (angl. *Computational Fluid Dynamics*) programų sprendimo algoritmai. Pirmosios CFD programos atsirado 1980 metų pradžioje ir buvo naudojamos tik mokslo srityje. Bėgant metams CFD programos ir kompiuteriai sparčiai tobulėjo, buvo galima greičiau ir tiksliau išspręsti norimus uždavinius. CFD programos pradėtos naudoti ne tik mokslo, bet ir pramonės srityse. Šiuo metu yra daugybė įvairių CFD programų, tokių kaip ANSYS CFX/Fluent, OpenFOAM, STAR-CCM+, STAR-CD, FLOW-3D, PHOENICS, COMSOL *Multiphysics* ir *Code Saturne*, kurios naudojamos įvairiems skaitiniams tyrimams atlikti. Nors dauguma CFD programų yra skirtos spręsti tuos pačius termohidromechanikos uždavinius, remiantis (1) literatūros šaltiniu yra sunku nustatyti, kuri programa yra geriausia.

1.3. Natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos procesų skaitinių tyrimų apžvalga

Daug mokslininkų skaitiškai tyrinėjo natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos procesus, vykstančius stačiakampių formų geometrijose, esant skirtingoms kraštinėms sąlygoms ir naudojant skirtingas CFD programas. Šioje disertacijoje, dėmesys yra skiriamas dvifazio-dvikomponenčio fluido natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos procesų, vykstančių stačiakampių formų geometrijose su cilindriniu kaitinimo elementu, skaitiniams tyrimams taikant CFD programą. Mokslininkai tyrinėdami šiuos reiškinius naudojo skirtingus tyrimo

metodus, prielaidas ir supaprastinimus. Galima išskirti dvimatį ir trimatį modeliavimo metodus.

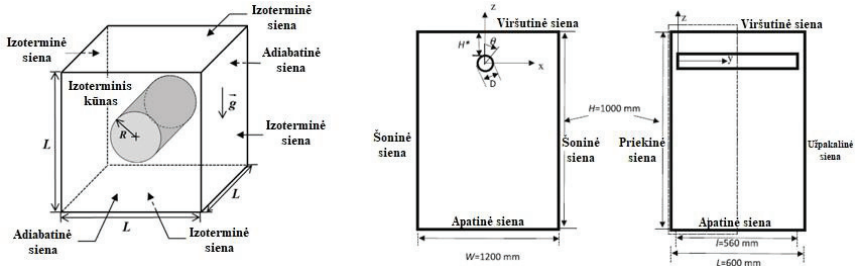
Daug skaitinių tyrimų buvo atlikta naudojant dvimatį modeliavimo metodą ir priimant skirtingas termodinamines sąlygas, skirtingus Ričardsono ir Relėjaus skaičius, skirtingus cilindrinių kaitinimo elementų skersmenis ir išdėstymo pozicijas. Dažniausiai buvo analizuojamas tik vienfazis fluidas (oras arba vanduo), išorinių sienų įtaka nebuvo įvertinama, priimamos nekintančios fluido termodinaminės-fizikinės savybės, sprendžiami stacionarūs laiko uždaviniai, priimamos stacionarios kraštinės sąlygos ir kt. Keli dvimačiai skaitiniai modeliai pateikti 1 paveiksle.



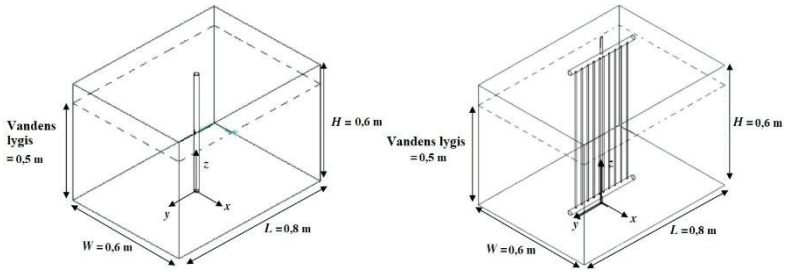
1 pav. Dvimačiai skaitiniai modeliai skirti tirti natūralios konvekcijos reiškinį (2–8)

H. F. Oztop ir kiti (2) tyrinėjo mišrią konvekciją kvadratinės formos geometrijoje su cilindriniu kaitinimo elementu, kai vienas paviršius juda. Y. G. Park ir kiti (3) tyrinėjo natūralios konvekcijos reiškinį, atsirandantį dėl temperatūrų skirtumo tarp šaltų išorinių paviršių ir dviejų kaitinimo elementų, kai kaitinimo elementai keičia savo poziciją vertikalia kryptimi. Tie patys autoriai tyrinėjo tuos pačius reiškinius ir kituose moksliniuose darbuose (4, 5), tačiau pagrindinis skirtumas nuo ankstesnių tyrimų buvo tas, kad du cilindriniai kaitinimo elementai buvo išdėstyti vertikaliai ir keturi kaitinimo elementai išdėstyti simetriškai kvadratinės formos geometrijoje. D. H. Kang ir kiti (6) tyrinėjo cilindrinio kaitinimo elemento pozicijos pokyčių įtaką natūralios konvekcijos ir šilumos mainų reiškiniams, kai $Ra = 10^7$. G. S. Mun ir kiti (7) tyrinėjo natūralios konvekcijos ir šilumos mainų reiškinius tarp šaltų paviršių ir kaitinimo elemento, esant skirtingiems kvadratinės formos geometrijos posvyrio kampams, kai $10^{-2} \leq Pr \leq 10^2$ ir $10^3 \leq Ra \leq 10^6$. Posvyrio kampas (γ) buvo $0° \div 45°$. C. Choi ir kiti (8) tyrinėjo natūralios konvekcijos reiškinį kvadratinės formos geometrijoje pakreiptoje $\gamma = 45°$ ir su apačioje patalpintu kaitinimo elementu, kai $10^3 \leq Ra \leq 10^7$.

Daug skaitinių tyrimų, naudojant trimatį modeliavimo metodą, buvo atlikta priimant tuos pačius supaprastinimus, kaip ir dvimačio modeliavimo atvejais (2 ir 3 paveiksluose).



2 pav. Trimačiai skaitiniai modeliai skirti tirti natūralios konvekcijos reiškinį (9–12)



3 pav. Trimačiai skaitiniai modeliai, skirti tirti terminės stratifikacijos reiškinį (13)

Y. M. Seo ir kiti (9) atliko natūralios konvekcijos reiškinio trimačius skaitinius tyrimus, kai cilindrinis kaitinimo elementas patalpintas kubo centre, esant $10^3 \leq Ra \leq 10^6$ ir $Pr = 0{,}7$ skaičiams bei esant skirtingiems kaitinimo elemento skersmenims $0{,}1L \leq R \leq 0{,}4L$. S. H. Lee ir kiti (10) taip pat tyrinėjo natūralios konvekcijos reiškinį aplink cilindrinį kaitinimo elementą, patalpintą kube, kai šilumos išsiskyrimas iš kaitinimo elemento kinta sinusoidiniu dėsniu, esant $Ra = 10^5$ ir $Ra = 10^6$ bei $Pr = 0{,}7$. B. Souayeh ir kiti (11) tyrinėjo oro natūralios konvekcijos reiškinį kube su cilindriniu kaitinimo elementu, kai $10^3 \leq Ra \leq 10^7$ ir kubo posvyrio kampas $\gamma = 0° \div 90°$. A. Kumar ir kiti (12) taip pat atliko oro natūralios konvekcijos reiškinio, vykstančio stačiakampės formos geometrijoje, dvimačius ir trimačius skaitinius tyrimus, esant $Ra = 1{,}3 \cdot 10^6$. M. S. Gandhi ir kiti (13, 14) atliko dvifazio fluido natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos reiškinių eksperimentinius ir skaitinius tyrimus. Šie procesai buvo tyrinėti stačiakampės formos inde, užpildytame vandeniui, indo centre, vertikaliai patalpinus 1 ir 10 cilindrinių kaitinimo elementų, kai $4{,}34 \cdot 10^{11} \leq Ra \leq 2{,}59 \cdot 10^{14}$. Tačiau sukurtame skaitiniame modelyje nebuvo vertinama oro ir sienų įtaka, naudojant simetrijos ašis, skaitinis modelis buvo supaprastintas. Jie taip pat atliko natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos reiškinių, vykstančių cilindro formos inde su skirtingos konfigūracijos kaitinimo elementu, eksperimentinius ir skaitinius tyrimus (15), esant tokiems patiems supaprastinimams.

Anksčiau minėtų mokslinių darbų apžvalga parodė, kad šoninės sienos labai retai įtraukiamos į skaitinius modelius, kai tyrinėjami natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos procesai. Tačiau jų įtraukimas arba neįtraukimas į skaitinį modelį turi reikšmingą įtaką skaitiniams rezultatams. Kelm ir kiti (16) atliko dviejų eksperimentų, kuriuose buvo tyrinėti fluido maišymosi procesai esant natūraliai konvekcijai, modeliavimą. Buvo pastebėta, kad vidinių ir išorinių sienų įtraukimas arba neįtraukimas į skaitinį modelį turi reikšmingos įtakos šilumos mainų reiškiniui. A. Papukchiev ir S. Buchholz (17) atliko ANSYS CFX programos validaciją, remdamiesi dvejais eksperimentais, kuriuose tirtas dujų ir skysto metalo tekėjimas. Buvo pastebėta, kad išorinių sienų įtraukimas į skaitinį modelį yra būtinas norint gauti patikimus rezultatus.

Literatūros apžvalga parodė, kad dvifazio-dvikomponenčio fluido natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos procesai modeliuojami priimant daug supaprastinimų, tokių kaip nagrinėjamas vienfazis fluidas, priimamos nekintančios fluido termodinaminės-fizikinės savybės (išskyrus plūdrumo jėgą), dažniausiai sprendžiami stacionarūs laiko uždaviniai, priimamos stacionarios kraštinės sąlygos, nevertinama šoninių sienų įtaka, naudojamos simetrijos ašys, ir pan. Minėti procesai, vykstantys šiluminiuose įrenginiuose, modeliuojami priimant šiuos supaprastinimus, todėl prarandama galimybė atlikti detalų ir išsamų šių reiškinių modeliavimą, įrenginių saugos vertinimą ir kt. Todėl yra būtina išplėtoti dvifazio-dvikomponenčio fluido natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos reiškinių, vykstančių šiluminiuose įrenginiuose, modeliavimo metodiką taikant CFD programą.

2. SKAITINIO TYRIMO METODIKA

2.1. CFD programos pasirinkimas ir skaičiavimo ištekliai

Skaitinių modelių geometrijų ir tinklelių kūrimui buvo pasirinkta ICEM CFD programa. Ši programa buvo pasirinkta todėl, kad tinklelis kuriamas iš kvadrato ar stačiakampio formos elementų. Atsižvelgus į CFD specialistų iš GRS ir NRG tyrimų centrų ir mano patirtį, tikslesni rezultatai buvo gaunami naudojant būtent kvadrato ar stačiakampio formos elementus. Kitos priežastys, lėmusios šios programos pasirinkimą, – plačios skaitinio modelio geometrijos ir tinklelio kūrimo galimybės bei patirtis, įgyta dirbant šia programa GRS tyrimų centre stažuotės metu.

Programos *ANSYS Fluent* pasirinkimą skaičiavimams nulėmė daugybės procesų modeliavimo galimybė, UDF (angl. *User-defined function*) naudojimo galimybė, skaičiavimo valdymas naudojant įvairias komandas, be to, dauguma mokslinėse publikacijose paskelbtų skaitinių tyrimų, susijusių su branduoline sauga, atlikti naudojant būtent šią programą. Pažymėtinas puikus programos *ANSYS Fluent* suderinamumas su aukšto našumo skaičiavimų kompiuteriais. Programos pasirinkimui įtakos turėjo ir tai, kad Lietuvos energetikos institutas turi

naujausią programos versiją bei aukšto našumo skaičiavimų kompiuterį, be to stažuočių metu GRS ir NRG tyrimų centruose, sukaupta svari programos *ANSYS Fluent* naudojimo patirtis. Skaitiniai tyrimai atlikti pasitelkiant programos *ANSYS Fluent* 17,2 versiją (18, 19) ir aukšto našumo skaičiavimų kompiuterį *SGI Altix ICE 8400*, kurį sudaro 20 skaičiavimo nodų, kurių kiekvieno galia yra 48 GB RAM ir 12 branduolių po 3,33 GHz.

2.2. Programos *ANSYS Fluent* struktūra

Programa *ANSYS Fluent* skaitiškai sprendžia hidrodinamikos ir masės pernešimo lygtis visuose uždaviniuose. Jeigu uždavinyje papildomai tiriami šilumos mainai arba spūdumas – papildomai sprendžiama energijos lygtis. Skaitinis modelis suskaidomas į baigtinius tūrius (tinklelio elementus), kur kiekviename baigtiniame tūryje skaitiškai sprendžiamos minėtos lygtys. Dalinės diferencialinės lygtys diskretizuojamos į algebrines lygtis, kurias sprendžiant skaitiškai gaunamos fluido tekėjimo, masės ir šilumos mainų kryptys bei kiti aktualūs srauto kintamieji. Lygtims spręsti buvo pasirinktas slėgio pagrindu (angl. *pressure-based solver*) sprendžiamų lygčių metodas ir atskirasis lygčių sprendimo algoritmas (angl. *segregated algorithm*) bei dvigubo tikslumo metodas (angl. *double-precision solver*).

2.3. Skaitinio modelio geometrijos ir tinklelio kūrimas

Skaitinių modelių geometrijos ir tinkleliai sukurti remiantis OECD/NEA (20, 21), ECORA (22), ERCOFTAC (23) ir ANSYS (24) rekomendacijomis.

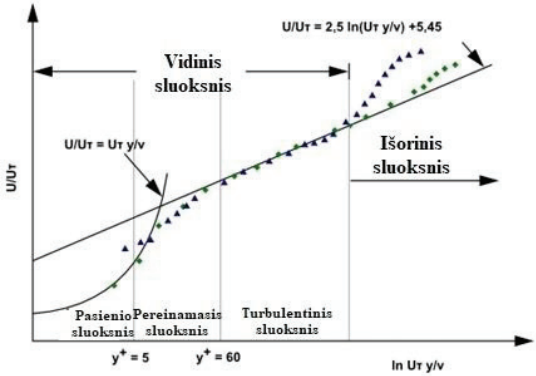
Tinklelio kokybė turi didelę įtaką visam skaičiavimo procesui, t. y. greičio ir temperatūros gradientams, skaičiavimo greičiui, skaičiavimo ištekliams, konvergavimui ir kt. Kuriant tinklelį svarbiausia rasti kompromisą tarp tikslumo, efektyvumo ir lengviausio būdo sukurti tinklelį. Sukurtas tinklelis turėtų tinkamai pavaizduoti procesus, vykstančius skaitinio modelio pasienio sluoksnyje ir jo viduje. Kaip jau minėta, tikslesni rezultatai gali būti gaunami naudojant kvadratinės ar stačiakampio formos elementus, negu tetraedro ar kitos formos elementus kai lyginamų elementų dydžiai yra vienodi. Kiekvieno skaitinio tyrimo metu būtina atlikti modeliavimo rezultatų priklausomybės nuo tinklelio tankio analizę.

2.4. Pasienio sluoksnio modeliavimas

Tinklelio elementų dydis pasienio sluoksnyje turi didelę įtaką greičio, temperatūros, turbulencijos ir kitų kintamųjų modeliavimui. Norint tinkamai sumodeliuoti procesus pasienio sluoksnyje, naudojama bedimensinė Y^+ reikšmė. Y^+ reikšmė nusako pasienio sluoksnyje esančio pirmo tinklelio elemento aukštį.

Y^+ bedimensinio dydžio formulės pateiktos (25) literatūroje. Pasienio sluoksnių schema pateikta 4 paveiksle. Pirmame pasienio sluoksnyje fluido tekėjimas yra laminarinis ir fluido klampumas daro įtaką fizikiniams procesams,

vykstantiems šiame sluoksnyje. Pereinamajame sluoksnyje klampumo ir turbulencijos reiškiniai tampa lygiavertės svarbos, o turbulentiniame sluoksnyje dominuoja turbulencijos reiškinys. Norint tiksliai įvertinti visus procesus, vykstančius skaitinio modelio pasienio sluoksnyje, pirmo elemento aukštis turi būti $Y^+<5$ bei vienas iš $k-\omega$ turbulencijos modelių arba vienas iš $k-\varepsilon$ turbulencijų modelių turi būti naudojamas su pasienio sluoksnio modeliavimo parinktimi (angl. *Enhanced Wall Treatment*) (18, 19, 25). Skaitinių modelių tinklelis sukurtas taip, kad $Y^+<5$.



4 pav. Pasienio sluoksnio schema (25)

2.5. Turbulencijos modeliavimas

Turbulencija – tekėjimo rėžimas, kai fluido tekėjimas tampa nestabilus viršijus tam tikrą Reinodlso skaičiaus reikšmę. Esant turbulencijai fluido greitis ir kiti tekėjimo parametrai yra nestabilūs ir chaotiški, net esant nekintančioms kraštinėms sąlygoms.

Turbulencija aprašoma Navje-Stokso lygtimis. Modeliuojant daugumą procesų, kuriuose vyrauja turbulencija, beveik neįmanoma sumodeliuoti daugybės kintamųjų pagal laiką ir erdvę naudojant tiesioginį skaitinį modeliavimą dėl tam reikalingų didelių skaičiavimo išteklių. Todėl Reinoldso vidurkio Navje-Stokso lygtys (angl. *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) dažniausiai naudojamos modeliuojant turbulencijos reiškinius. Naudojant RANS lygtis, momentiniai turbulencijos kintamieji parametrai yra pakeičiami suvidurkintais kintamaisiais parametrais.

Populiariausi RANS turbulencijos modeliai yra dviejų lygčių modeliai: $k-\varepsilon$ grupės (*Standard*, RNG, *Realizable*) ir $k-\omega$ grupės (*Standard*, BSL, SST) turbulencijos modeliai. Pažangiausi turbulencijos modeliai yra $k-\varepsilon$ *Realizable* ir $k-\omega$ SST turbulencijos modeliai. Relėjaus skaičius KAERI eksperimentui – $Ra=3{,}92\cdot 10^{11}$, o Osakos universiteto eksperimentui – $Ra=6{,}17\cdot 10^{9}$, todėl

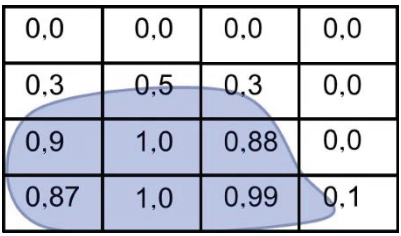
priimama, kad natūrali konvekcija eksperimentų metu buvo turbulentinė. k – ε *Realizable* turbulencijos modelis su pasienio sluoksnio modeliavimu pasirinktas kaip pagrindinis turbulencijos modelis, tačiau papildomi skaičiavimai atlikti naudojant ir k – ω SST turbulencijos modelį.

2.6. Daugiafazio fluido modeliavimas

Dauguma natūraliai gamtoje ar žmogaus sukurtuose įrenginiuose tekančių srautų yra daugiafaziai. Egzistuoja trys fazės: dujinė, skysta ir kieta. Daugiafazė tėkmė gali būti skirstoma į kategorijas: dujinė-skysta, skysta-skysta, dujinė-kieta, skysta-kieta arba trifazė tėkmė. Remiantis pasirinktais eksperimentais (3 skyrius), šioje disertacijoje analizuojama dvifazė-dvikomponentė tėkmė (dujinė-skysta), t. y. oras-vanduo-vandens garas.

Atsižvelgus į eksperimentiniuose stenduose buvusį tekėjimo rėžimą, Eulerio-Eulerio metodas ir VOF (angl. *Volume of Fluids*) modelis pasirinkti eksperimentų modeliavimui. Eulerio-Eulerio metodas skirtingas fluido fazes matematiškai traktuoja taip, kad vienos fazės užimamas tūris negali būti užimamas kitos fazės. Taip atsiranda fazinė tūrio dalies sąvoka. Visų fazių tūrio dalių suma lygi vienetui. VOF modelis yra tarpfazinio paviršiaus sekimo modelis, taikomas dujų ir skysčio tėkmei modeliuoti.

VOF modelis naudojamas modeliuojant dviejų ar daugiau kaip dviejų tarpusavyje nesimaišančių fluidų tėkmę (rezervuaro prisipildymas, bangos atviruose kanaluose, burbulų judėjimas skystyje ir kt.). VOF modelį aprašančių lygčių rinkinys naudojamas kiekvienos fazės tėkmei aprašyti, pvz., fazės tūrio dalies formulė naudojama aprašyti kiekvienos fazės užimamą tūrį tinklelio elemente. Todėl kiekviename tinklelio elemente fazių tūrių suma turi būti lygi 1. Visi daugiafazės tėkmės kintamieji / parametrai yra bendri visoms fazėms ir vaizduojami kaip vidutiniai kintamieji / parametrai pagal fazės užimamą tūrį tinklelio elemente (5 paveikslas).



5 pav. Teorinis dviejų skirtingų fazių (dujos-skystis) pasiskirstymo tinklelio elementuose pavyzdys (19)

Įprastai VOF modelis naudojamas atliekant pereinamuosius skaičiavimus (angl. Transient) ir yra naudojamas su slėgio pagrindu sprendžiamų lygčių

metodu. Garavimo ir kondensacijos reiškiniai modeliuojami naudojant Lee modelį.

2.7. Konvergavimas ir pereinamieji skaičiavimai

Kiekviename tinklelio langelyje yra sprendžiamos uždavinį aprašančios lygtys. Šių lygčių sprendiniai turi tenkinti tam tikrus konvergavimo kriterijus. Energijos lygčiai pasirinktas 10^{-6} konvergavimo kriterijus, o srauto vientisumo, k, omega, X, Y ir Z greičio lygtims 10^{-5} konvergavimo kriterijus. Turi būti pasirinktas toks iteracijų skaičius ir laiko žingsnio dydis, kad šių lygčių sprendiniai pasiektų nustatytus konvergavimo kriterijus.

Dauguma gamtoje vykstančių procesų yra pereinamieji ir norint juos sumodeliuoti reikalingi pereinamieji skaičiavimai. Skaitiniams tyrimams pasirinkti eksperimentai turi būti modeliuojami atliekant pereinamuosius skaičiavimus, nes procesai vykę eksperimentų metu – kintantys. Atliekant pereinamuosius skaičiavimus reikalingi papildomi įvesties parametrai ir papildomos žinios norint gauti konverguojančius sprendinius. Vienas iš pagrindinių įvesties parametrų yra laiko žingsnis. Laiko žingsnio dydis turi būti gana mažas, kad būtų galima spręsti pereinamuosius procesus. CFL (angl. *Courant–Friedrichs–Lewy*) skaičius dažnai yra naudojamas norint įvertinti ar pasirinktas laiko žingsnio dydis yra tinkamas. Šis skaičius parodo tinklelio elementų, kuriuos fluidas prateka per vieną laiko žingsnį, skaičių. Įprastai, atliekant pereinamuosius skaičiavimus, CFL skaičius neturėtų būti didesnis kaip 1. Labai svarbus įvesties parametras yra iteracijų skaičius laiko žingsnyje. Laiko žingsnio dydis ir iteracijų skaičius turi būti toks, kad konvergencija būtų pasiekta maždaug po 5–10 iteracijų. Eksperimentų modeliavimui pasirinktas CFL<1 ir 50 iteracijų laiko žingsnyje.

2.8. Vartotojo aprašomoji funkcija

Vartotojo aprašomoji funkcija (angl. *User-defined function*), tai C programine kalba aprašyta funkcija, kuria papildomas skaitinis modelis. Tokiu būdu labai praplečiamos modeliavimo galimybės. Šių vartotojo aprašomųjų funkcijų pagalba galima aprašyti masės, impulso ar energijos šaltinius. Taip pat galima aprašyti kintančias kraštines sąlygas. Norint gauti kuo tikslesnius pasirinktų eksperimentų modeliavimo rezultatus ir tinkamai sumodeliuoti šilumos išsiskyrimo šildančiuosiuose paviršiuose dinamiką, sukurta ir į skaitinį modelį įtraukta speciali aprašomoji funkcija. Aprašomosios funkcijos matematinė išraiška:

$$P = Q \cdot t; \tag{1}$$

čia: P – šilumos srautas, W/m^2; Q – šilumos srautas išsiskiriantis per sekundę, W/m^2; t – laikas, s.

Suprogramuota vartotojo funkcija:

```
/*==========================================================
 *
 * KINTANČIO ŠILUMOS SRAUTO MODELIS
 *
 * Sukurta: 2018 m. liepos 17 d., A. Graževičius, NRG, Petenas, Nyderlandų
Karalystė
 * Koreguota: 2018 m. rugpjūčio 18 d., A. Graževičius, NRG, Petenas,
Nyderlandų Karalystė
 *
*==========================================================*/

#include "udf.h"

/* Kintantis šilumos srautas */

DEFINE_PROFILE(heater_rods,t,i)
{
 face_t f;
 real flow_time = CURRENT_TIME;

 begin_f_loop(f,t)
  {
 /* tiesinis šilumos srauto didėjimas A s (šilumos srautas B W/m2 / A s (C W / A
s)) */
   if (flow_time > A.) flow_time = A.;
     F_PROFILE(f,t,i) = D * flow_time;
  }
 end_f_loop(f,t)
}

/*----------------------------------------------------------*/
```

čia: A – laikas, reikalingas pasiekti visišką šiluminę galią, s; B – šilumos srautas, W/m^2; C – šilumos srautas, W; D – šilumos srautas išsiskiriantis per sekundę, W/m^2; flow_time – laikas, s.

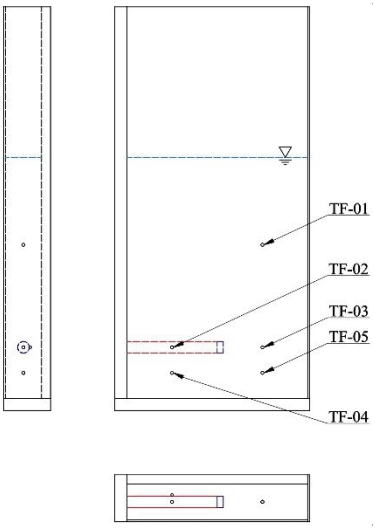
3. EKSPERIMENTINIAI STENDAI IR JŲ SKAITINIAI MODELIAI

3.1. KAERI eksperimentinis stendas

KAERI eksperimentinis stendas atitinka atvejį, kai aušinimo baseine šilumokaičiai patalpinti horizontaliai (horizontalus šildantysis paviršius), ir tai

atitinka pasyvios aušinimo sistemos sudėtinę dalį, diegiamos šiuolaikinėse naujos kartos branduolinėse jėgainėse (26, 27).

Eksperimentinis stendas yra stačiakampės formos, jo apačioje horizontaliai patalpintas kaitinimo elementas. Eksperimentinio stendo ilgis – 300 mm, plotis – 60 mm, aukštis – 650 mm. Eksperimentinis stendas užpildytas dejonizuotu vandeniu, vandens lygis siekia 400 mm ribą. Cilindrinio kaitinimo elemento skersmuo – 19,05 mm, ilgis – 160 mm, iš kurių 150 mm yra kaitinama dalis, o likusi 10 mm dalis nekaitinama. Galinė siena pagaminta iš polikarbonato (storis 15 mm), priekinė ir dešinė sienos pagamintos iš „Pyrex“ stiklo (storis 3 mm), apatinė ir kairė sienos pagamintos iš „304“ plieno (storis 20 mm). Kaitinimo elemento šiluminė galia 600 W. Penkios termoporos yra naudojamos temperatūros matavimams. Eksperimento trukmė 5 valandos. Aplinkos, eksperimentinio stendo ir jame esančio vandens pradinė temperatūra yra 15 °C. 6 paveiksle pavaizduotas eksperimentinis stendas.



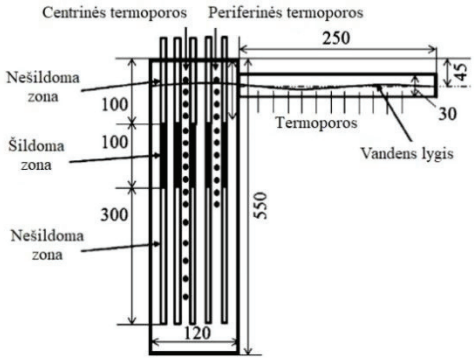
6 pav. KAERI eksperimentinis stendas

Pažymėtina, kad literatūros šaltiniuose (26, 27) trūksta informacijos apie šilumos nuostolius eksperimento metu. Nėra tikslaus paaiškinimo, ar schemos, kaip eksperimentinio stendo sienos yra sujungtos tarpusavyje. Nėra pateiktos dejonizuoto vandens ir eksperimentinio stendo sienų termodinaminės-fizikinės savybės.

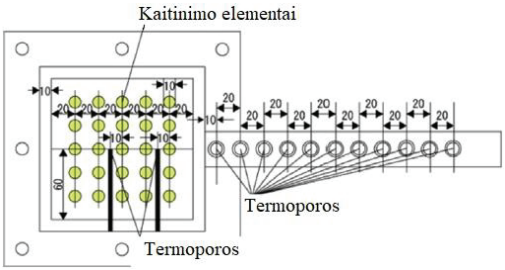
3.2. Osakos universiteto eksperimentinis stendas

Osakos universiteto mokslininkų atliktas eksperimentas – tai sustabdyto, atidengto ir parengto perkrovimui suslėgto vandens reaktoriaus aušinimo atvejis (vertikalus šildantysis paviršius), kai branduolinė jėgainė netenka bet kokio elektros energijos tiekimo (28).

Eksperimentinis stendas yra stačiakampės formos su dešinėje pusėje, viršuje, pritvirtintu cilindro formos kanalu. Eksperimentinio stendo sienos pagamintos iš „Lucite“ stiklo, sienų storis – 10 mm, plotis ir ilgis – 120 mm, aukštis – 550 mm, kanalo skersmuo – 30 mm, ilgis – 250 mm. Eksperimentiniame stende vertikaliai patalpinti 25 cilindrinės formos kaitinimo elementai. Kiekvieno kaitinimo elemento skersmuo yra 10 mm, šildančio paviršiaus aukštis – 100 mm, likusi dalis nešildoma. Eksperimentiniame stende 16 termoporų įrengtos centre, 11 periferijoje ir 11 kanale. Eksperimento trukmė 1357 sekundės. Eksperimentinis stendas užpildytas dejonizuotu vandeniu. Vandens-oro tarpfazinis paviršius yra ties kanalo centru. Pradinė vandens temperatūra 9 ℃, o aplinkos ir eksperimentinio stendo 12 ℃. Šiluminė galia 4,4 kW/m^2. Eksperimentinis stendas pavaizduotas 7 ir 8 paveiksluose.



7 pav. Eksperimentinio stendo vaizdas iš priekio (28)

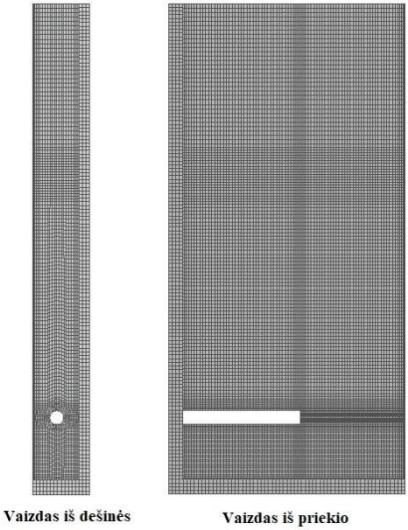


8 pav. Eksperimentinio stendo vaizdas iš viršaus (28)

Literatūros šaltinyje (28) nėra pateikta informacijos apie cilindrinio kanalo sienelės storį, taip pat nėra pateiktos dejonizuoto vandens ir eksperimentinio stendo sienų termodinaminės-fizikinės savybės, kaip ir šilumos nuostoliai eksperimento metu.

3.3. Skaitiniai eksperimentinių stendų modeliai

Sukurtas KAERI eksperimentinio stendo detalus skaitinis modelis, kuriame priimtas vienas supaprastinimas – nevertintos kaitinimo elemento sienelės. Priimta, kad šilumos atidavimo koeficientas 18,95 W/m^2·K. Skaitinis modelis pateiktas 9 paveiksle, o išorinių sienų termodinaminės-fizikinės savybės 1 lentelėje.

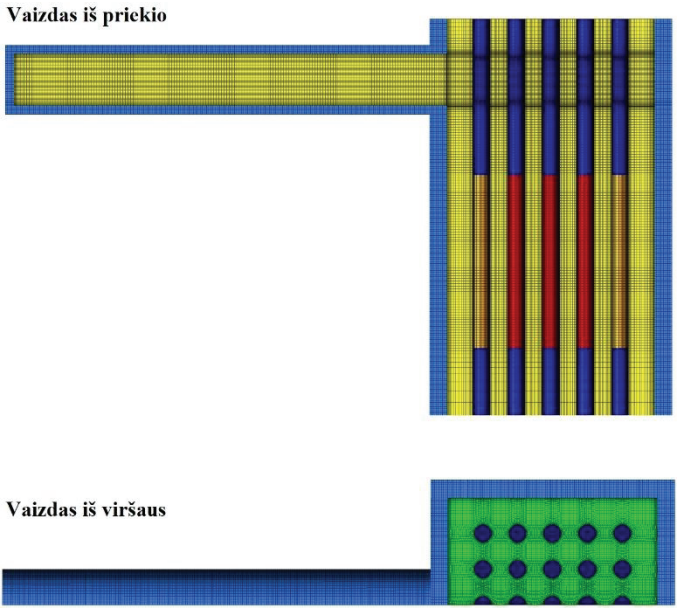


9 pav. KAERI eksperimentinio stendo CFD modelis (313964 elementai)

1 lentelė. Išorinių sienų termodinaminės-fizikinės savybės (29-31)

Savybės	Polikarbonatas	„Pyrex“ stiklas	„304“ plienas
Tankis, kg/m^3	1200	2230	8030
Savitoji šiluma, J/kg·K	1200	753	500
Šilumos laidumas, W/m·K	0,19	1,1	16,2

Osakos universiteto eksperimentinio stendo skaitinis modelis taip pat labai detalus. Jame priimti du supaprastinimai: naudojama simetrijos plokštuma ir nevertintos kaitinimo elementų sienelės. Skaitinis modelis pateiktas 10 paveiksle, o išorinių sienų termodinaminės-fizikinės savybės 2 lentelėje.



10 pav. Osakos universiteto eksperimentinio stendo CFD modelis (3478277 elementai)

2 lentelė. Išorinių sienų termodinaminės-fizikinės savybės (32)

Savybės	Lucite
Tankis, kg/m^3	1180
Savitoji šiluma, J/kg·K	1810
Šilumos laidumas, W/m·K	0,198

Abiejuose skaitiniuose modeliuose buvo vertinamos kintančios fluido termodinamines-fizikinės savybės, kurios pateiktos 3 lentelėje.

3 lentelė. Kintančios fluido termodinaminės-fizikinės savybės (33–37)

Duomenų taškas	Temperatūra, K	Tankis, kg/m^3	Savitoji šiluma, J/kg·K	Šilumos laidumas, W/m·K	Dinaminė klampa, kg/m·s	Molekulinis svoris, kg/kg·mol
Oro termodinaminės-fizikinės savybės						
1	273,15	Idealios dujos	1005	0,02364	$1,729 \cdot 10^{-5}$	28,97
2	333,15			0,02808	$2,008 \cdot 10^{-5}$	
3	393,15			0,03095	$2,181 \cdot 10^{-5}$	
Vandens termodinaminės-fizikinės savybės						
1	273,15	999,8	4217	0,6	0,001792	18,02
2	293,15	998,0	4182		0,001002	
3	313,15	992,1	4179		0,000653	
4	333,15	983,3	4185		0,000467	
5	353,15	971,8	4196		0,000355	
6	373,15	957,9	4217		0,000282	
Vandens garo termodinaminės-fizikinės savybės						
1	-	0,59	2026,7	0,0261	$1,2 \cdot 10^{-5}$	18,02

4. TYRIMŲ REZULTATAI

4.1. KAERI eksperimento tarpiniai skaičiavimai

Skaitiniame modelyje sukurti stebėsenos taškai, kurie atitinka TF-01...TF-05 termoporas. Šiuose taškuose apskaičiuotos temperatūros buvo lyginamos su eksperimento metu išmatuotomis temperatūromis. Atliekant įvairius tarpinius skaičiavimus buvo tirta turbulencijos modelių įtaka, tinklelio dydžio įtaka, laiko žingsnio dydžio įtaka ir skirtingų kraštinių sąlygų įtaka modeliavimo rezultatams. Dėl reikalingų didelių skaičiavimo išteklių šiam eksperimentui modeliuoti, tarpiniai skaičiavimai buvo atliekami maždaug iki eksperimento 5300 sekundės. Pagrindinis skaičiavimas atliktas iki eksperimento 10558 sekundės (iki virimo proceso).

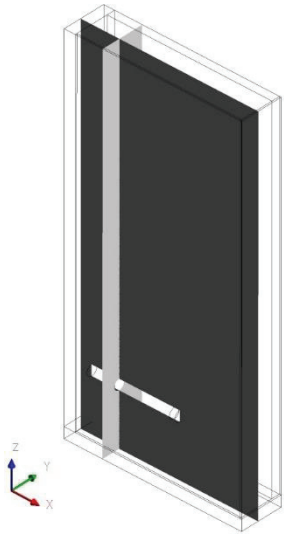
Atlikus tarpinius skaičiavimus buvo pastebėta, kad $k-\varepsilon$ *Realizable* turbulencijos modelis su pasienio sluoksnio modeliavimo parinktimi tiksliau modeliuoja terminės stratifikacijos reiškinį, negu $k-\omega$ SST turbulencijos modelis.

Tinklelio įtakos modeliavimo rezultatams analizei buvo sukurti keturi skirtingo dydžio tinkleliai: 218313, 313964, 570610 ir 922736 elementų. Atlikus skaičiavimus nustatyta, kad 313964 elementų tinklelis yra optimalus, t. y. atliekant skaičiavimus su dar tankesniais tinkleliais rezultatų ir matavimo skirtumas nebesikeičia.

Atliekant tarpinius skaičiavimus pastebėta, kad apskaičiuotos TF-01…TF-03 temperatūros gerai atitinka išmatuotas temperatūras, tačiau TF-04…TF-05 temperatūros išsiskiria. Tam atlikti papildomi skaičiavimai su užduotomis skirtingomis šilumos išsiskyrimo sąlygomis, pvz., šilumos nuostoliai per apatinę sieną yra didesni, negu per kitas sieneles; iš kaitinimo elemento išsiskiria mažesnė šiluminė galia; viršutinis kaitinimo elemento paviršius išskiria 70 %, o apatinis 30 % šiluminės galios; naudojant sukurtą vartotojo aprašomąją funkciją nustatyta, kad šiluminė galia pasiekiama per skirtingą laiką. Atlikus šių papildomų skaičiavimų rezultatų analizę, pastebėtas toks pats TF-04...TF-05 temperatūrų neatitikimas.

4.2. KAERI eksperimento finalinis skaičiavimas

Finalinio skaičiavimo rezultatai pateikti ZX ir ZY skerspjūviuose (11 paveikslas).

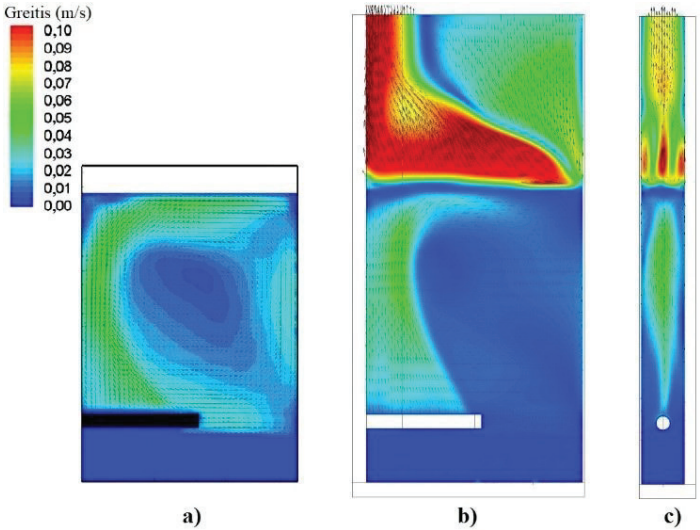


11 pav. ZX ir ZY skerspjūvių pozicijos skaitiniame modelyje

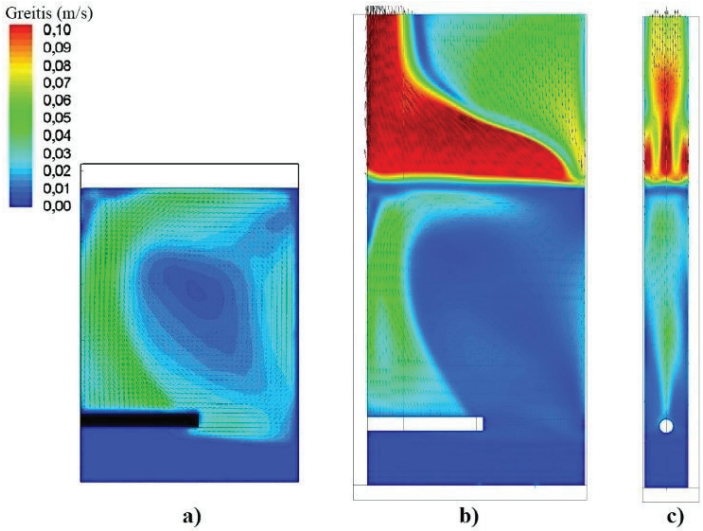
Dėl šilumos mainų tarp kaitinimo elemento ir vandens, vandens temperatūra ties kaitinimo elementu kyla. Dėl šylančio vandens ir sumažėjusio jo tankio aplink kaitinimo elementą pradeda veikti plūdrumo jėga ir mažesnio tankio vanduo pradeda kilti aukštyn. 12 paveiksle pateikta, mažesnio tankio vanduo kyla ties kaire siena. Pasiekęs oro-vandens tarpfazinį paviršių, vanduo pradeda tekėti horizontalia kryptimi link dešinės sienos ir, besimaišydamas su šaltesniu vandeniu, ties dešine siena pradeda leistis žemyn. Taip susiformuoja natūralios konvekcijos reiškinys virš kaitinamojo elemento, kai tuo tarpu vanduo po kaitinimo elementu nejuda. Taigi, po kurio laiko po kaitinimo elementu susiformuoja terminė stratifikacija.

Vandens ir oro greičių laukai, kai vandens temperatūra 72 ℃ pavaizduoti 12 paveiksle. Modeliavimo metu gautas greičių laukas labai panašus į eksperimento metu užfiksuotą greičių lauką. Tačiau modeliavimo rezultatai rodo mažesnį greitį ties dešine siena ir nešildančia kaitinimo elemento dalimi. Dėl vis labiau šylančio vandens, per oro-vandens tarpfazinį paviršių šiluma perduodama orui, kuriame taip pat pradeda vykti natūralios konvekcijos reiškinys. Šaltas oras leidžiasi ties dešine siena ir ties oro-vandens tarpfaziniu paviršiumi teka link kairės sienos. Dėl šilumos mainų, vykstančių oro-vandens tarpfaziniame paviršiuje, įšilęs oras ties kaire siena pradeda kilti į viršų. Panašūs rezultatai pavaizduoti 13 paveiksle, kai vandens temperatūra 91,3 ℃. Vandens temperatūrai artėjant link soties būsenos, vanduo pradeda intensyviai maišytis po kaitinimo elementu – terminė stratifikacija dingsta (14 paveikslas). 12–14 paveikslai rodo, kad modeliavimo rezultatai palyginti gerai atitinka eksperimentinius rezultatus.

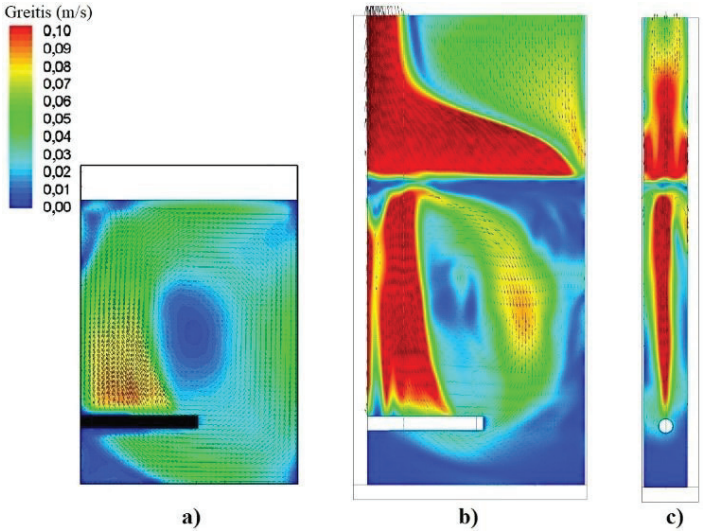
Modeliavimo metu užfiksuotas temperatūros gradiento pokytis pateiktas 15 paveiksle. Vandeniui šylant iki 91,3 ℃, šiluma po kaitinimo elementu perduodama tik laidumu. Nėra galimybės palyginti modeliavimo metu užfiksuoto temperatūros gradiento pokyčio su eksperimentiniais duomenimis, nes literatūros šaltinyje (27) nėra pateiktas temperatūros gradiento pokytis.



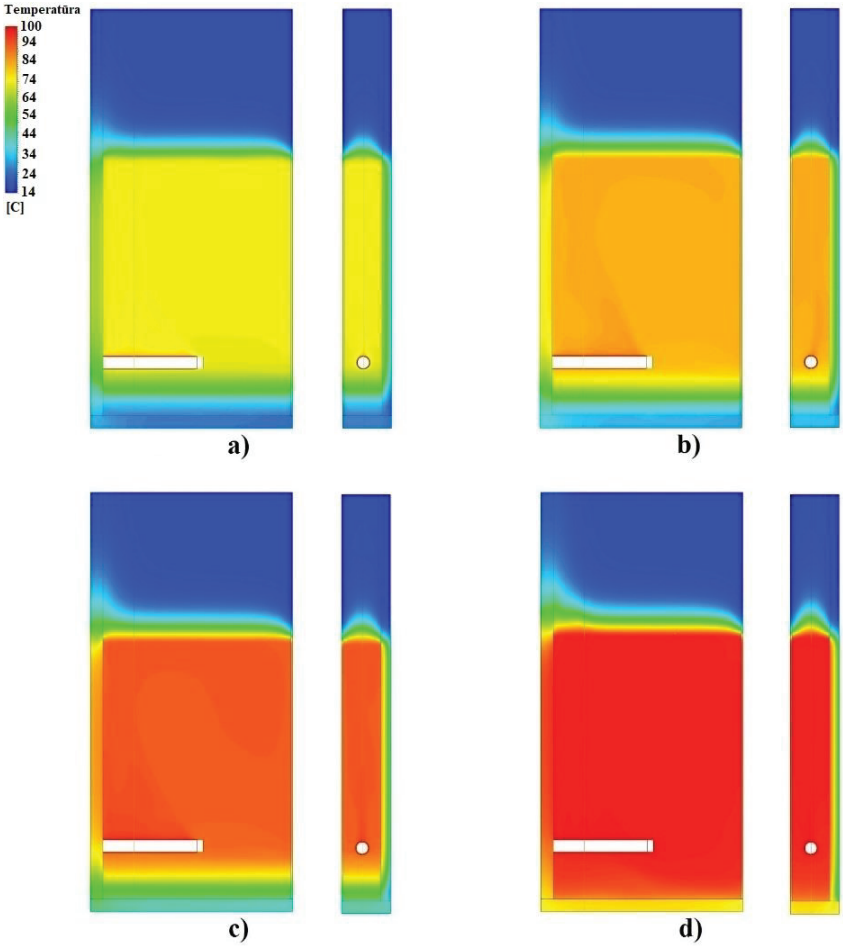
12 pav. Greičių laukas, kai vandens temperatūra 72 ℃: a) eksperimentas (27); b) CFD (ZX pjūvis); c) CFD (ZY pjūvis)



13 pav. Greičių laukas, kai vandens temperatūra 91,3 °C: a) eksperimentas (27); b) CFD (ZX pjūvis); c) CFD (ZY pjūvis)

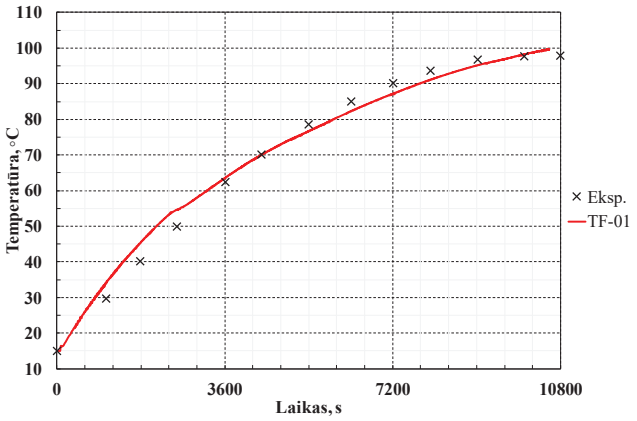


14 pav. Greičių laukas, kai vandens temperatūra 98,1 °C: a) eksperimentas (27); b) CFD (ZX pjūvis); c) CFD (ZY pjūvis)

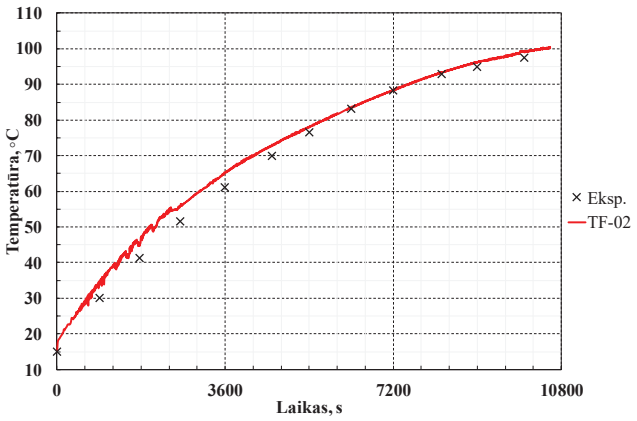


15 pav. Modeliavimo metu užfiksuotas temperatūros gradiento pokytis: a) 72 °C; b) 81,5 °C; c) 91,3 °C; d) 98,1 °C

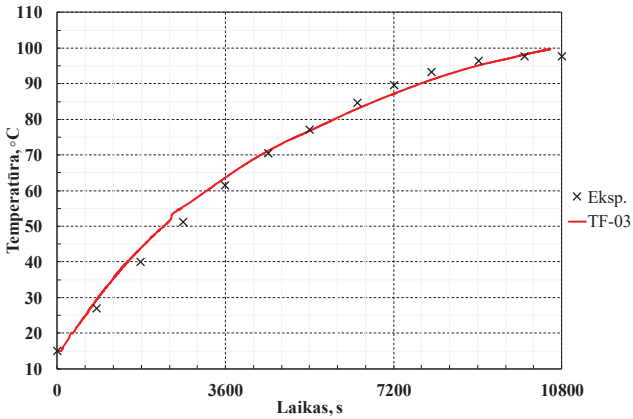
Užfiksuotas geras apskaičiuotų ir išmatuotų TF-01...TF-03 temperatūrų atitikimas (16–18 paveikslai). TF-01...TF-03 temperatūros parodo temperatūros pokyčius zonoje virš kaitinimo elemento. Ši zona sudaro apie 80 % viso vandens tūrio esančio eksperimentiniame stende. Nors nėra informacijos apie šilumos nuostolius eksperimento metu, tačiau geras TF-01...TF-03 temperatūrų atitikimas patvirtina, kad šilumos nuostoliai modeliavimo metu yra tokie patys kaip ir eksperimento metu.



16 pav. Išmatuotos ir apskaičiuotos TF-01 temperatūros palyginimas



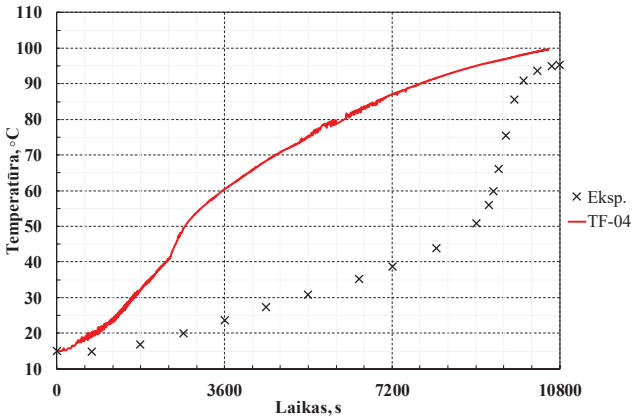
17 pav. Išmatuotos ir apskaičiuotos TF-02 temperatūros palyginimas



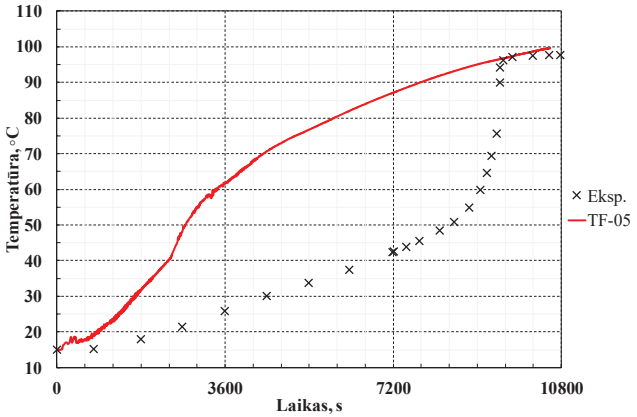
18 pav. Išmatuotos ir apskaičiuotos TF-03 temperatūros palyginimas

Eksperimento metu išmatuotos TF-04...TF-05 temperatūros rodo temperatūros kilimo vėlavimą, kai tuo tarpu apskaičiuotos temperatūros rodo daug didesnį kilimą (19 ir 20 paveikslai). Pastebėta, kad skirtumai tarp išmatuotų ir apskaičiuotų TF-04...TF-05 temperatūrų verčių gali atsirasti dėl nežinomų tikslių šilumos nuostolių eksperimento metu. Literatūros šaltinyje (27) pateikta tik tokia informacija, kad vandeniui šylant nuo 20 ℃ iki 90 ℃ šilumos nuostoliai buvo apie 310 W. Detalus šilumos nuostolių eksperimento metu tyrimas nebuvo atliktas. Remiantis geru TF-01...TF-03 temperatūrų atitikimu, daroma išvada, kad pasirinktas šilumos atidavimo koeficientas yra teisingas ir šilumos nuostoliai skaitinio tyrimo metu atitinka šilumos nuostolius eksperimento metu. Taip pat pastebėta, kad šilumos nuostoliai yra dideli lyginant su šilumine galia, todėl temperatūrų pokyčiams didelės įtakos turi išorinių sienų šiluminė inercija. Eksperimentinio stendo priekinė ir dešinė sienos pagamintos iš „Pyrex“ stiklo, kuris pasižymi dideliu šilumos laidumu ir turi mažą specifinės šilumos vertę. Sienų storis yra mažas, todėl šiluminė inercija neturi reikšmingos įtakos modeliavimo rezultatams. Apatinė, kairė ir galinė eksperimentinio stendo sienos storesnės (15–20 mm), jos pagamintos iš polikarbonato bei plieno. Remiantis šių medžiagų termodinaminėmis-fizikinėmis savybėmis, pateiktomis 1 lentelėje, šių sienų šiluminė inercija gali turėti reikšmingos įtakos modeliavimo rezultatams. Įvertinus šiuos pastebėjimus ir išanalizavus modeliavimo rezultatus, galima daryti išvadą, kad didžioji dalis šilumos nuostolių patenka į aplinką per priekinę ir dešinę sienas, o likusi šilumos nuostolių dalis naudojama apatinės, kairės ir galinės sienos temperatūrai pakelti. Literatūros šaltinyje (27) nėra pateikta informacijos apie eksperimentinio stendo sienų termodinamines-fizikines savybes, todėl galimi TF-04...TF-05 temperatūrų nuokrypiai. Be to pastebėta, kad procesai, vykstantys eksperimento metu, yra labai lėti, todėl nežinant tikslių šilumos nuostolių ir

eksperimentinio stendo sienų termodinaminių-fizikinių savybių, galimi dideli TF-04...TF-05 temperatūrų nuokrypiai. Norint suprasti TF-04...TF-05 temperatūrų nesutapimų priežastis, buvo atlikta daugiau papildomų skaičiavimų su įvairiomis skirtingomis kraštinėmis sąlygomis, pvz., be šilumos nuostolių į aplinką, skirtingais šilumos atidavimo koeficientais, dideliais šilumos nuostoliais per apatinę sieną, skirtingais tinklelių dydžiais, skirtingais turbulencijos modeliais, skirtinga kaitinimo elemento šiluminė galia ir kt. Tačiau visais atvejais gauta tokia pati TF-04...TF-05 temperatūrų neatitiktis. Taip pat negalima atmesti prielaidos, kad TF-04...TF-05 temperatūrų neatitikimą galėjo lemti tam tikra sisteminė klaida.

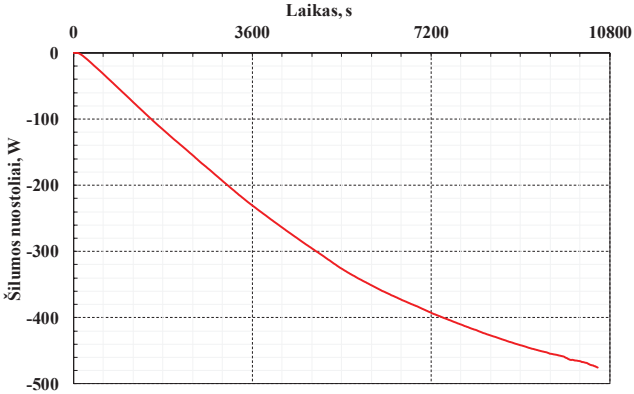


19 pav. Išmatuotos ir apskaičiuotos TF-04 temperatūros palyginimas



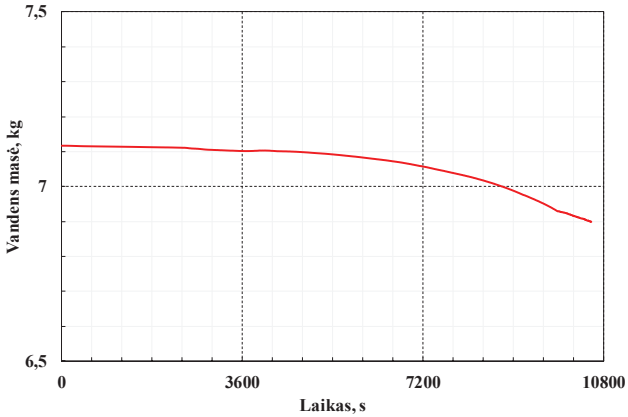
20 pav. Išmatuotos ir apskaičiuotos TF-05 temperatūros palyginimas

Šilumos nuostoliai į aplinką pavaizduoti 21 paveiksle. Šilumos srautas į aplinką žymimas su minuso ženklu.

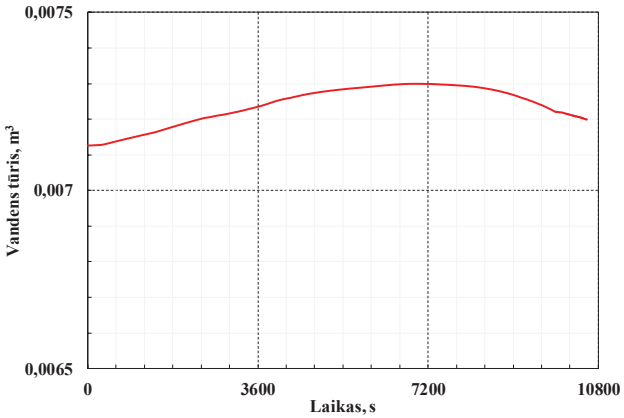


21 pav. Šilumos nuostoliai į aplinką

Vandens masės ir tūrio pokyčiai pavaizduoti 22 ir 23 paveiksluose. Nuo skaičiavimo pradžios iki 3600 sekundės vandens masė nekinta, o tūris padidėja dėl sumažėjusio tankio. Masė pradeda mažėti nuo 4200 sekundės iki skaičiavimo pabaigos, nes vanduo garuoja vis intensyviau. Vandens tūris didėja iki 7000-osios skaičiavimo sekundės, po to pradeda mažėti dėl vandens garavimo. 22 ir 23 paveikslai iliustruoja, kad buvo modeliuojami ne tik natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos procesai, bet ir vandens garo burbulų susidarymas aplink kaitinimo elementą bei vandens garavimo reiškinys.



22 pav. Vandens masės pokytis



23 pav. Vandens tūrio pokytis

Atlikus KAERI eksperimento modeliavimą, galima teigti, kad modeliavimo rezultatai atitinka eksperimentinius rezultatus, t. y. pavyko tinkamai sumodeliuoti natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos reiškinius, gauta gera TF-01...TF-03 temperatūrų (išskyrus TF-04...TF-05) atitiktis. Norint atlikti dvigubą metodikos patikrinimą ir pademonstruoti jos tinkamumą modeliuoti dvifazio-dvikomponenčio fluido natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos reiškinius, buvo pasirinktas Osakos universiteto mokslininkų atliktas eksperimentas, aprašytas 3.2. skyriuje. Eksperimentas buvo modeliuojamas naudojant tą pačią išplėtotą metodiką ir CFD programą.

4.3. Osakos universiteto eksperimento tarpiniai skaičiavimai

Atliekant tarpinius skaičiavimus buvo tiriama: iteracijų skaičiaus laiko žingsnyje, laiko žingsnio dydžio, šilumos atidavimo koeficiento, skirtingos šiluminės galios, skirtingo kaitinimo elementų įšilimo laiko, turbulencijos modelių ir tinklelio dydžio įtaka modeliavimo rezultatams. Skaitiniame modelyje buvo sukurti stebėsenos taškai, kurie atitinka eksperimentinio stendo centre, periferijoje ir cilindriniame kanale patalpintas termoporas. Beveik visi tarpiniai skaičiavimai buvo atliekami per visą eksperimento trukmę, t. y. iki 1357 sekundės.

Pirmi du skaičiavimai buvo skirti ištirti iteracijų skaičiaus įtaką modeliavimo rezultatams. Pirmasis skaičiavimas atliktas su 50 iteracijų laiko žingsnyje, antrasis su 4 iteracijomis laiko žingsnyje. Reikšmingų skirtumų tarp šių dviejų skaičiavimų nepastebėta, todėl, norint sutaupyti skaičiavimo laiko, visi kiti tarpiniai skaičiavimai atlikti su 4 iteracijomis laiko žingsnyje.

Trys skaičiavimai buvo atliekami norint nustatyti laiko žingsnio dydžio įtaką modeliavimo rezultatams. Pasirinkti laiko žingsniai: 0,015 s, 0,010 s ir 0,005 s. Visi trys skaičiavimai buvo stabilūs ir lygčių sprendiniai artėjo link nustatyto

konvergavimo kriterijaus. Skaičiavimas, naudojant 0,015 s žingsnį, užtruko dvi paras. Skaičiavimas, naudojant 0,010 s žingsnį, sustabdytas ties 1150 sekunde, o skaičiavimas, naudojant 0,005 s žingsnį sustabdytas ties 625 sekunde dėl per didelių skaičiavimo išteklių. Išanalizavus modeliavimo rezultatus, nustatyta, kad laiko žingsnio dydžio įtaka nėra reikšminga modeliavimo rezultatams.

Šio eksperimento metu šilumos nuostoliai, kaip ir KAERI eksperimento metu, nebuvo tyrinėjami. Todėl buvo būtina atlikti skirtingų šilumos atidavimo koeficientų įtakos modeliavimo rezultatams analizę. Remiantis (38) literatūros šaltiniu, šilumos atidavimo koeficientas oro aplinkoje esančiai vertikaliai sienelei yra tarp 5 ir 10 $W/m^2 \cdot K$. Tačiau detalesnei analizei atlikti buvo pasirinktos platestės šilumos atidavimo koeficiento ribos, t. y. 5, 30, 50, 70 ir 100 $W/m^2 \cdot K$. Atlikus rezultatų analizę, pastebėta, kad šilumos atidavimo koeficientas neturėtų būti didesnis kaip 30 $W/m^2 \cdot K$.

Kita tarpinių skaičiavimų dalis atlikta norint nustatyti sukurtos vartotojo aprašomosios funkcijos tinkamumą modeliuoti šilumos išsiskyrimo dinamiką ir kaitinimo elementuose. Vartotojo aprašomojoje funkcijoje aprašyti keli skirtingi šiluminės galios dinamikos variantai: 4400 W/m^2 šiluminė galia pasiekiama per 30, 60 ir 120 sekundžių. Nustatyta, kad į skaitinį modelį įtraukus sukurtą vartotojo aprašomąją funkciją gaunamas geresnis apskaičiuotų ir išmatuotų temperatūrų atitikimas.

Atlikus šių tarpinių skaičiavimų rezultatų analizę pastebėta, kad eksperimento šiluminė galia (4400 W/m^2) turėjo būti mažesnė, negu nurodyta literatūros šaltinyje (28). Atlikus kelių skirtingų eksperimento atvejų patikrinamąjį skaičiavimą pagal šilumos balanso lygtį, nustatyta, kad visais eksperimento atvejais nurodyta šiluminė galia yra apie 56–65 % didesnė už tikrąją šiluminę galią. Nurodytų ir apskaičiuotų šiluminių galių palyginimas pateiktas 4 lentelėje.

4 lentelė. Nurodytų ir apskaičiuotų šiluminių galių palyginimas

	Šilumos srautas, W/m^2		**Skirtumas, %**
	Nurodytas	**Apskaičiuotas**	~56
1	4400	~2470	~57
2	8800	~5042	~65
3	17800	~11319	~63
4	35500	~22014	~62

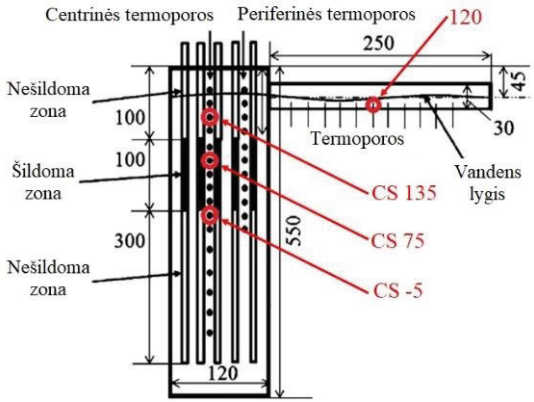
Papildomi tarpiniai skaičiavimai atlikti pasirinkus šias šilumines galias: 3500, 2700, 2600 ir 2500 W/m^2. Modeliavimo rezultatai taip pat patvirtina, kad eksperimento tikroji šiluminė galia yra apie 2500–2600 W/m^2.

Radus eksperimento tikrąją šiluminę galią, atlikta $k-\varepsilon$ *Realizable* su pasienio sluoksnio modeliavimo parinktimi ir $k-\omega$ SST turbulencijos modelių įtakos modeliavimo rezultatams analizė. Nepastebėti jokie reikšmingi modeliavimo rezultatų skirtumai.

Prieš atliekant tinklelio įtakos tyrimus buvo atlikti tarpiniai skaičiavimai naudojant 463176 elementų tinklelį ir 0,015 s žingsnį. Tinklelio įtakos tyrimams atlikti buvo sukurti trys skirtingo tankumo tinkleliai: 98550, 1125338 ir 2763037. Tinklelio elementų dydis buvo keičiamas pagal koeficientą 1,5, t. y. tinklelio elemento dydis 1,5 karto mažesnis, negu prieš tai buvusio tinklelio elemento. Laiko žingsnis, taip pat 1,5 karto mažesnis, negu prieš tai buvęs laiko žingsnis. Išanalizavus rezultatus nustatyta, kad geriausia atitiktis tarp skaitinių ir eksperimentinių rezultatų yra naudojant 2763037 elementų tinklelį su 0,00375 s žingsniu.

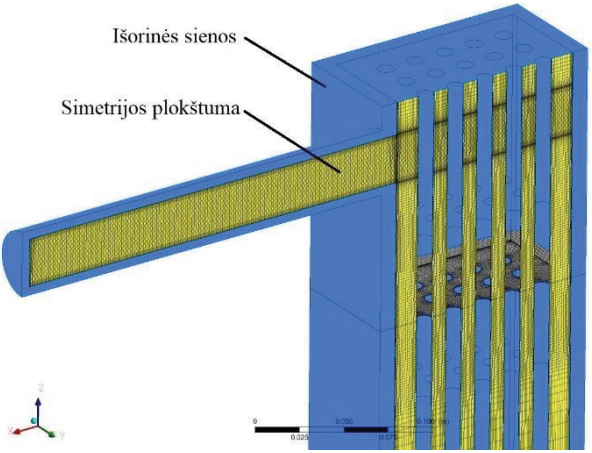
4.4. Osakos universiteto eksperimento finalinis skaičiavimas

Tiek tarpinių skaičiavimų metu, tiek finalinio skaičiavimo metu, skaitiniame modelyje buvo sukurti 38 stebėsenos taškai, kurie atitinka visas termoporas, patalpintas eksperimentiniame stende. 24 paveiksle parodyti pagrindiniai stebėsenos taškai ir termoporų (CS 135, CS 75, CS -5 ir 120) išdėstymo vietos rezultatams palyginti.



24 pav. Stebėsenos taškų ir termoporų išdėstymo schema

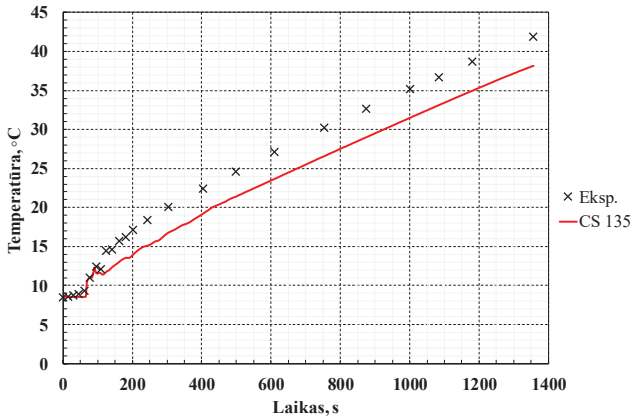
Finalinio skaičiavimo metu gauti temperatūros ir tankio gradientai bei šilumos srauto vaizdas pateiktas simetrijos plokštumoje ir išorinėse sienose (25 paveikslas).



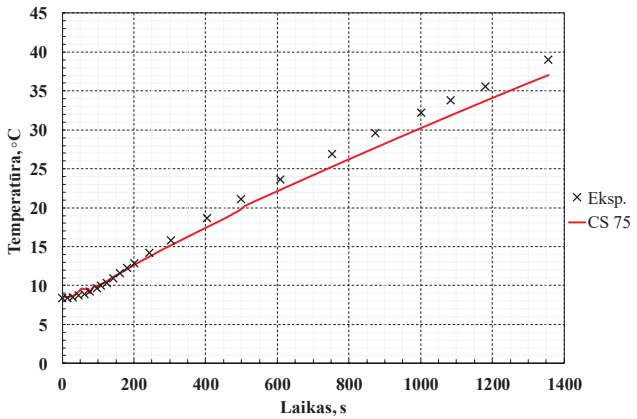
25 pav. Skaitinio modelio vizualizacija

Į finalinį skaičiavimą įtraukti visi geriausi parametrai ir nustatymai, gauti atliekant tarpinius skaičiavimus: 50 iteracijų laiko žingsnyje, 0,00375 s žingsnis, fluido zoną sudarantis 2763037 elementų tinklelis, kartu su sienų zoną sudarančiu 715240 elementų tinkleliu, vartotojo aprašomoji funkcija, kurioje nustatyta šiluminė galia 2600 W/m^2 pasiekiama per 30 sekundžių, šilumos atidavimo koeficientas 5 W/m^2·K, $k-\varepsilon$ *Realizable* turbulencijos modelis su pasienio sluoksnio modeliavimo parinktimi.

Atlikus finalinį skaičiavimą nustatyta, kad apskaičiuotos temperatūros viršutinėje nešildomoje ir šildomoje zonose yra šiek tiek mažesnės, negu išmatuotos temperatūros (26 ir 27 paveikslai). Šie temperatūrų skirtumai atsiranda dėl išorinių sienų, kurios buvo įtrauktos į skaitinį modelį. Norint kompensuoti sienų šiluminę inerciją, šildymo galia turėtų būti padidinta nuo 2600 iki 2800 W/m^2. Didžiausias temperatūros nuokrypis tarp apskaičiuotos ir išmatuotos temperatūros yra viršutinėje nešildomoje zonoje (9 %) ir šildomoje zonoje (5 %).

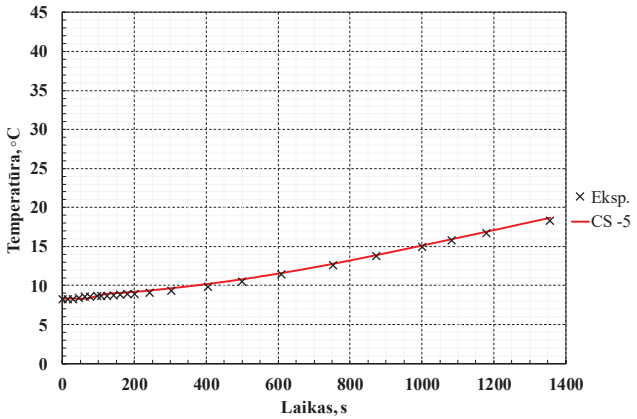


26 pav. Išmatuotos ir apskaičiuotos CS 135 temperatūros palyginimas

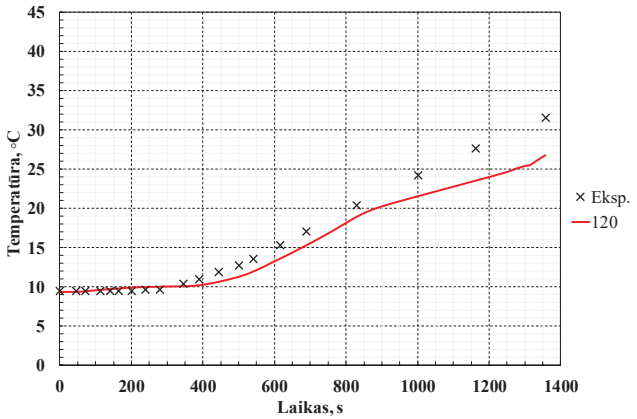


27 pav. Išmatuotos ir apskaičiuotos CS 75 temperatūros palyginimas

Išmatuotų ir apskaičiuotų temperatūrų terminės stratifikacijos zonoje palyginimas pateiktas 28 paveiksle. Didžiausias temperatūrų nuokrypis šioje zonoje yra 2,6 %. Tai įrodo, kad išplėtota metodika yra tinkama norint modeliuoti terminės stratifikacijos reiškinį naudojant CFD programą. Išmatuotų ir apskaičiuotų temperatūrų cilindriniame kanale palyginimas pateiktas 29 paveiksle. Didžiausias temperatūrų nuokrypis yra 14 %.

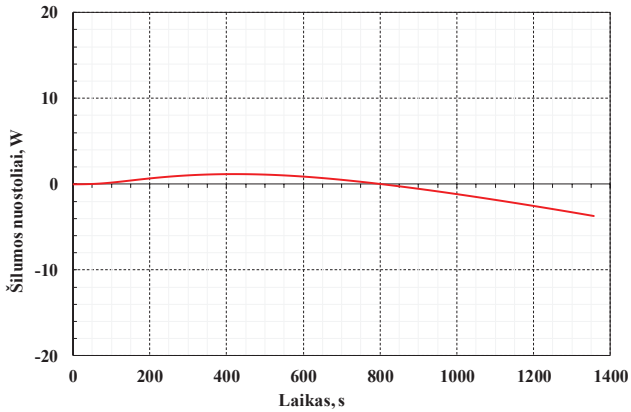


28 pav. Išmatuotos ir apskaičiuotos CS -5 temperatūros palyginimas



29 pav. Išmatuotos (termopora 120) ir apskaičiuotos temperatūros palyginimas

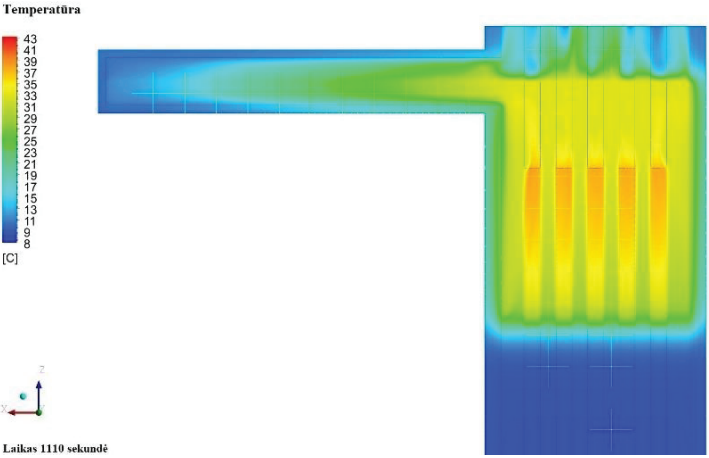
Jau minėta, kad informacijos apie šilumos nuostolius eksperimento metu nėra, todėl 30 paveiksle pateikti tik apskaičiuoti šilumos nuostoliai į aplinką. Pradinė vandens temperatūra yra 9 °C, aplinkos temperatūra – 12 °C, todėl pirmos skaičiavimo dalies metu (iki 800-osios sekundės) šiluma sklinda iš aplinkos į skaitinį modelį (šilumos srautas su pliuso ženklu). Įšilus sienoms ir vandeniui, maždaug po 800-osios sekundės šiluma pradeda sklisti į aplinką (šilumos srautas su minuso ženklu).



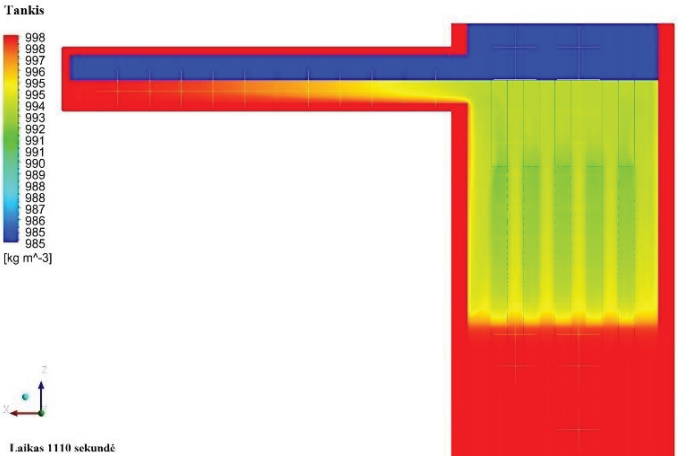
30 pav. Šilumos nuostoliai į aplinką

31 ir 32 paveiksluose pateikti temperatūros ir tankio gradientai simetrijos plokštumoje laiko taške 1110 s. Šiluminė galia (2600 W/m^2) pasiekiama per 30 pirmų skaičiavimo sekundžių. Dėl iš kaitinimo elementų išsiskiriančios šilumos, vanduo aplink juos pradeda šilti. Dėl sumažėjusio vandens tankio šiltesnis vanduo veikiamas plūdrumo jėgos, pradeda kilti į viršų link oro-vandens tarpfazinio paviršiaus. Tuo tarpu šaltesnis vanduo ties sienomis leidžiasi link šildomos zonos apačios. Taip susiformuoja natūralios konvekcijos reiškinys šildomoje, viršutinėje nešildomoje ir kanalo zonose, kai tuo tarpu vanduo po šildoma zona nejuda. Taigi, po kurio laiko po šildoma zona susiformuoja terminė stratifikacija.

Šiltesnis vanduo teka horizontaliomis kryptimis ties oro-vandens tarpfaziniu paviršiumi. Viršutiniame nešildomoje zonoje esantis vanduo yra šiltesnis už kanale esantį vandenį. Dėl susidariusio tankių skirtumo šiltesnis vanduo pradeda tekėti iš viršutinės nešildomos zonos į kanalo dalį ties oro-vandens tarpfaziniu paviršiumi. Tuo tarpu kanalo apačioje esantis šaltesnis vanduo pradeda tekėti į viršutinę nešildomą zoną, į kurią įtekėjęs šaltesnis vanduo iškart pradeda leistis žemyn ties siena link šildomos zonos apačios. Vandeniui vis labiau šylant, jis vis toliau teka į kanalo dalį, kurioje prasideda natūralios konvekcijos reiškinys. Dėl kanalo dalyje ties oro-vandens tarpfaziniu paviršiumi tekančio šiltesnio vandens pradeda šilti kanale esantis oras – susiformuoja oro natūralios konvekcijos reiškinys.



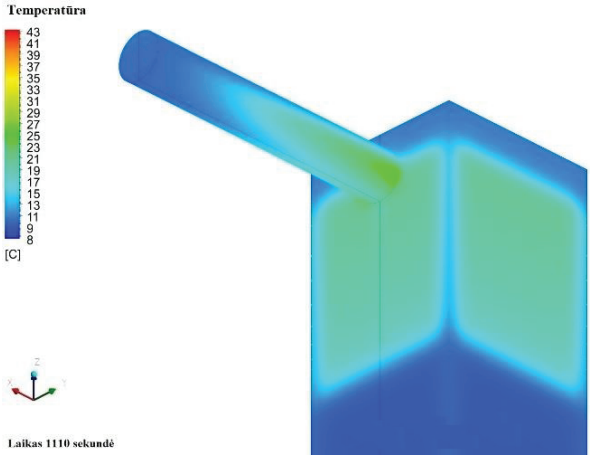
31 pav. Temperatūros laukas simetrijos plokštumoje



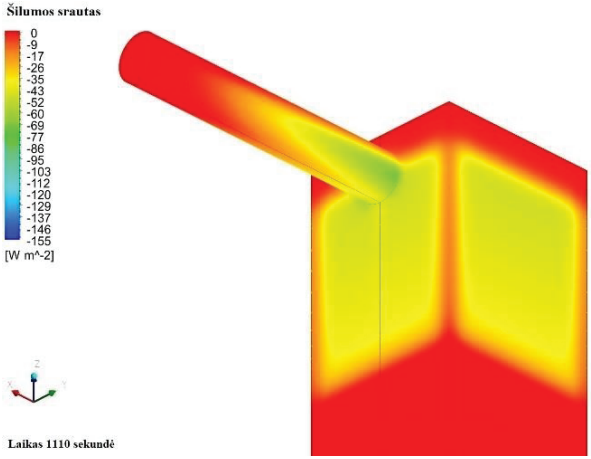
32 pav. Tankio laukas simetrijos plokštumoje

Temperatūros gradientas ir šilumos srautas ant išorinių sienų paviršių pateikti 33 ir 34 paveiksluose Iš šių paveikslų, kaip ir iš 31 bei 32 paveikslų, matyti, kad visi termohidrauliniai procesai vyksta viršutinėje eksperimentinio stendo dalyje. Bendra vandens masė eksperimentiniame stende yra apie 6,32 kg, tačiau tik apie 2,02 kg vandens yra šildoma intensyviausiai. 33 paveiksle gerai matomas kanalo sienų įšilimas bei šiltesnio vandens tekėjimas ties oro-vandens tarpfaziniu paviršiumi link kanalo pabaigos. 34 paveiksle pateiktas šilumos srautas

į / iš skaitinio modelio. Geltona ir žalios spalvos žymi šilumos srautą iš skaitinio modelio, raudona spalva žymi šilumos srautą į skaitinį modelį.



33 pav. Temperatūros laukas sienų išoriniuose paviršiuose



34 pav. Šilumos srautas sienų išoriniuose paviršiuose

IŠVADOS

Atlikti dvifazio-dvikomponenčio fluido natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos procesų, vykstančių pasyvių sistemų aušinimo baseinuose, kompleksiniai skaitiniai tyrimai, kurių pagrindu išplėtota ir patikrinta šių procesų modeliavimo metodika taikant CFD programą. Atlikus eksperimentų, kuriuose buvo tyrinėjami dvifazio-dvikomponenčio fluido natūralios konvekcijos ir terminės stratifikacijos procesai, vykstantys pasyvios aušinimo sistemos baseine ir sustabdyto branduolinio reaktoriaus aušinimo metu, modeliavimą, gautos išvados:

1. Modeliuojant terminės stratifikacijos reiškinį:
   1.1. Kai šildantysis paviršius patalpintas horizontaliai:
      a) naudojant $k-\varepsilon$ *Realizable* turbulencijos modelį su pasienio sluoksnio modeliavimo parinktimi (angl. *Enhanced Wall Treatment*), didžiausia temperatūros paklaida yra 5 %;
      b) naudojant $k-\omega$ SST turbulencijos modelį, didžiausia temperatūros paklaida yra 89 %.
   1.2. Kai šildantieji paviršiai patalpinti vertikaliai, naudojant tiek $k-\varepsilon$ *Realizable* turbulencijos modelį su pasienio sluoksnio modeliavimo parinktimi (angl. *Enhanced Wall Treatment*), tiek $k-\omega$ SST turbulencijos modelį, didžiausia temperatūros paklaida yra 6,5 %.
2. Šilumos mainai tarp fluido ir sienelės, kai jie vyksta natūralios konvekcijos atveju, turi reikšmingą įtaką modeliavimo rezultatams. Didžiausia temperatūros paklaida, kai šildantieji paviršiai patalpinti vertikaliai ir kai sienelės nėra arba yra įtraukiamos į skaitinį modelį (esant tai pačiai šiluminei galiai), yra 9 %. Sienelių aprašymas skaitiniame modelyje daro reikšmingą įtaką fluido maišymuisi ir šilumos mainams skaitinio modelio pasienio sluoksnyje ir visame tūryje.
3. Sukurta ir įtraukta į CFD modelį programine kalba aprašyta speciali vartotojo aprašomoji funkcija (angl. *User-defined function* UDF), leidžianti modeliuoti šildančiųjų paviršių šilumos išsiskyrimo dinamiką. Tokiu būdu, naudojant sukurtą vartotojo aprašomąją funkciją, išplėstos modeliavimo galimybės.
4. Metodikos tinkamumą įrodo gera skaitinių ir eksperimentinių rezultatų atitiktis:
   4.1. Kai šildantysis paviršius patalpintas horizontaliai, didžiausia temperatūros paklaida virš šildančio paviršiaus yra 12,5 %;
   4.2. Kai šildantieji paviršiai patalpinti vertikaliai, didžiausia temperatūros paklaida yra viršutinėje nešildomoje zonoje (9 %), šildomoje zonoje (5 %), terminės stratifikacijos zonoje (2,6 %) ir vamzdžio zonoje (14 %).

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. KESHMIRI, A., et al. Benchmarking of three different CFD codes in simulating natural, forced, and mixed convection flows. *Numerical Heat Transfer*. 2015, 67, 1324-1351.
2. OZTOP, H.F., et al. Fluid flow due to combined convection in lid-driven enclosure having a circular body. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2009, 30, 886-901.
3. PARK, Y.G., et al. Study on natural convection in a cold square enclosure with a pair of hot horizontal cylinders positioned at different vertical locations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013, 65, 696-712.
4. PARK, Y.G., et al. Natural convection in a square enclosure with two inner circular cylinders positioned at different vertical locations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014, 77, 501-518.
5. PARK, Y.G., et al. Natural convection in a square enclosure with four circular cylinders positioned at different rectangular locations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015, 81, 490-511.
6. KANG, D.H., et al. Bifurcation to unsteady natural convection in square enclosure with a circular cylinder at Rayleigh number of 10^7. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013, 64, 926-944.
7. MUN, G.S., et al. Thermo-dynamic irreversibility induced by natural convection in square enclosure with inner cylinder. Part-I: Effect of tilted angle of enclosure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016, 97, 1102-1119.
8. CHOI, C., et al. Effect of a circular cylinder's location on natural convection in a rhombus enclosure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014, 77, 60-73.
9. SEO, Y.M., et al. Three-dimensional flow instability of natural convection induced by variation in radius of inner circular cylinder inside cubic enclosure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016, 95, 566-578.
10. LEE, S.H., et al. Three-dimensional natural convection around an inner circular cylinder located in a cubic enclosure with sinusoidal thermal boundary condition. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016, 101, 807-823.
11. SOUAYEH, B., et al. Numerical simulation of three-dimensional natural convection in a cubic enclosure induced by an isothermally-heated circular cylinder at different inclinations. *International Journal of Thermal Sciences*. 2016, 110, 325-339.

12. KUMAR, A., et al. 3D CFD simulation of air cooled condenser-I: Natural convection over a circular cylinder. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014, 78, 1265-1283.
13. GANDHI, M.S. et al. Two phase natural convection: CFD simulations and PIV measurement. *Chemical Engineering Science*. 2011, 66, 3152-3171.
14. GANDHI, M. S., et al. Reduction in thermal stratification in two phase natural convection in rectangular tanks: CFD simulations and PIV measurements. *Chemical Engineering Science*. 2013, 100, 300-325.
15. GANDHI, M.S., et al. Study of two phase thermal stratification in cylindrical vessels: CFD simulations and PIV measurements. *Chemical Engineering Science*. 2013, 98, 125-151.
16. KELM, S., et al. A comparative assessment of different experiments on buoyancy driven mixing processes by means of CFD. *Annals of Nuclear Energy*. 2016, 93, 50-57.
17. PAPUKCHIEV, A., and S. BUCHHOLZ. Validation of ANSYS CFX for gas and liquid metal flows with conjugate heat transfer within the European project THINS. *Nuclear Engineering and Design*. 2017, 312, 338-350.
18. ANSYS. *ANSYS Fluent User's Guide, 17.2 Release*. August 2016. [žiūrėta 2020-03-01]. Prieiga per ANSYS Customer Portal.
19. ANSYS. *ANSYS Fluent Theory Guide, 17.2 Release*. August 2016, [žiūrėta 2020-03-01]. Prieiga per ANSYS Customer Portal.
20. MAHAFFY, J., et al. *Best Practice Guidelines for the use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications*. 2007. [žiūrėta 2020-03-01]. Prieiga per internetą: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/037/44037877.pdf?r=1&r=1
21. MAHAFFY, J., et al. *Best Practice Guidelines for the use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications – Revision*. 2014. [žiūrėta 2020-03-01]. Prieiga per internetą: https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2014/csni-r2014-12.pdf
22. MENTER, F., et al. *CFD Best Practice Guidelines for CFD Code Validation for Reactor - Safety Applications*. 2002. [žiūrėta 2020-03-01]. Prieiga per internetą: https://epdf.pub/cfd-best-practice-guidelines-for-cfd-code-validation-for-reactor-safety-applicat.html
23. CASEY, M., T. WINTERGERSTE, European Research Community on Flow, Turbulence and Combustion. *ERCOFTAC Special Interest Group on Quality and Trust in Industrial CFD: Best practice guidelines*. London: ERCOFTAC, 2000.

24. ANSYS. *Module 09: Best Practice Guidelines, Introduction to ANSYS Fluent, 17.0 Release*. 12 April 2016. [žiūrėta 2020-03-01]. Prieiga per ANSYS Customer Portal.
25. ANSYS. *Module 07: Turbulence, Introduction to ANSYS Fluent, 17.0 Release*. 12 April 2016. [žiūrėta 2020-03-01]. Prieiga per ANSYS Customer Portal.
26. KIM, S., et al. Experimental investigation on the natural convection flow in pool boiling. *Nuclear Engineering and Design*. 2014, 280, 349-361.
27. KIM, S., et al. Experimental study on the thermal stratification in a pool boiling with a horizontal heat source. *Annals of Nuclear Energy*. 2017, 106, 235-246.
28. KODAMA, S., et al. Thermal stratification and mixing under single- and two-phase flow in rod bundle with axially distributed heat flux in vessel without forced convection. *Nuclear Engineering and Design*. 2014, 268, 164-172.
29. BLUMM, J., and A. LINDEMANN. Characterization of the thermophysical properties of molten polymers and liquids using the flash technique. *High Temperatures – High Pressures*. 2003/2007, 35/36, 627-632.
30. Corning Glass Works. *Pyrex – Glass Code 7740*. [žiūrėta 2020-03-01]. Prieiga per internetą: http://glassfab.com/wp-content/uploads/2015/08/Corning-Pyrex.pdf
31. AK Steel Corporation. *304/304L Stainless Steel*. [žiūrėta 2020-03-01]. Prieiga per internetą: http://www.aksteel.com/sites/default/files/2018-01/304304L201706_1.pdf
32. MatWeb. *Overview of materials for Acrylic, Cast*. [žiūrėta 2020-03-01]. Prieiga per internetą: http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?bassnum=O1303
33. TOULOUKIAN, Y.S., P.E. LILEY, S.C. SAXENA, P. HESTERMANS. *Thermophysical Properties of Matter*. New York: Plenum Publishing Corp., 1970.
34. KEENAN, J.H., J. CHAO, J. KAYE. *Gas Tables*. New York: Joh Wiley & Sons, 1980.
35. SENGERS J.V., and J.T.R. WATSON. Improved International Formulations for the Viscosity and Thermal Conductivity of Water Substance. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 1986, 15(4), 1291-1312.
36. RATHAKRISHNAN, E. *Gas Tables*. Hyderabad: Universities Press (India) Private Limited, 1993.
37. HILSENRATH, J., C.W. BECKETT, W.S. BENEDICT, L. FANO, H. MASI, R.L. NUTTALL, Y.S. TOULOUKIAN, H.W. WOOLLEY.

Tables of Thermal Properties of Gases. Publisher: National Bureau of Standards, 1955.

38. MARANZANA, G., et al. Experimental estimation of the transient free convection heat transfer coefficient on a vertical flat plate in air. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2002, 45, 3413-3427.

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

Straipsniai „Clarivate Analytics“ duomenų bazėje „Web of Science Core Collection“ referuojamuose leidiniuose

1. GRAŽEVIČIUS, A., and A. KALIATKA. Modelling of the spent fuel heat-up in the spent fuel pools using one-dimensional system codes and CFD codes. *Kerntechnik*. 2017, 82(3), 316-333.
2. GRAŽEVIČIUS, A., et al. Numerical investigation of two-phase natural convection and temperature stratification phenomena in a rectangular enclosure with conjugate heat transfer. *Nuclear Engineering and Technology*. 2020, 52, 27-36.

Tarptautinių konferencijų pranešimų medžiagoje paskelbti straipsniai

1. GRAŽEVIČIUS, A. CFD Simulating the Heat Removal from Fuel Assembly Located in the Spent Fuel Pool. In *Proceedings of the Conference of Young Scientists on Energy Issues 2016*. 2016. pp. 341-348. ISSN 1822-7554.
2. KALIATKA, A., et al. Modeling of heat transfer processes in the spent fuel pool using one and three dimensional computer codes. In *Proceedings of the NUTHOS-11: 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Operation and Safety*. Paper N11P0442. 2016. pp. 1-12.
3. GRAŽEVIČIUS, A. Modelling of pool heat-up experiment using ANSYS Fluent. In *Proceedings of the Conference of Young Scientists on Energy Issues 2017*. 2017. pp. 216-224. ISSN 1822-7554.
4. GRAŽEVIČIUS, A. Numerical investigation of the thermal hydraulic phenomena in a rectangular enclosure. In *Proceedings of the Conference of Young Scientists on Energy Issues 2018*. 2018. pp. 269-276. ISSN 1822-7554.
5. GRAŽEVIČIUS, A. and A. KALIATKA. Numerical investigation of two-phase natural convection and thermal stratification phenomena in rod bundle. In *Proceedings of the Conference of Young Scientists on Energy Issues 2019*. 2019. pp. 259-266. ISSN 1822-7554.

Tarptautinėse konferencijose skaityti pranešimai

1. GRAŽEVIČIUS, A. CFD Simulating the Heat Removal from Fuel Assembly Located in the Spent Fuel Pool. In *Proceedings of the Conference of Young Scientists on Energy Issues 2016*. 2016. pp. 341-348. ISSN 1822-7554.

2. KALIATKA, A., et al. Modeling of heat transfer processes in the spent fuel pool using one and three dimensional computer codes. In *Proceedings of the NUTHOS-11: 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Operation and Safety*. Paper N11P0442. 2016. pp. 1-12.
3. GRAŽEVIČIUS, A. Modelling of pool heat-up experiment using ANSYS Fluent. In *Proceedings of the Conference of Young Scientists on Energy Issues 2017*. 2017. pp. 216-224. ISSN 1822-7554.
4. GRAŽEVIČIUS, A. Numerical investigation of the thermal hydraulic phenomena in a rectangular enclosure. In *Proceedings of the Conference of Young Scientists on Energy Issues 2018*. 2018. pp. 269-276. ISSN 1822-7554.
5. GRAŽEVIČIUS, A. and A. KALIATKA. Numerical investigation of two-phase natural convection and thermal stratification phenomena in rod bundle. In *Proceedings of the Conference of Young Scientists on Energy Issues 2019*. 2019. pp. 259-266. ISSN 1822-7554.

Trumpai apie autorių

Vardas: Audrius

Pavardė: Graževičius

Gimimo data: 1990 rugsėjo 15 d.

Gimimo vieta: Alytus, Lietuva

El. paštas: Audrius.Grazevicius@lei.lt

Išsilavinimas

2009-2013 – Kauno technologijos universiteto termoinžinerijos bakalauras

2013-2015 – Kauno technologijos universiteto branduolinės energetikos magistras su pagyrimu

2015-2019 – Lietuvos energetikos instituto doktorantūros technologinių mokslų krypties studijos, energetika ir termoinžinerija

RESUME

Numerical investigation of two-component two-phase natural convection and thermal stratification phenomena

The importance of passive cooling systems for nuclear reactors heat removal function was highlighted after the Fukushima accident on 11 March 2011. Therefore, advanced nuclear power plants are designed with passive cooling systems, which due to the simple operation principle, without the need for external power supply, contribute to nuclear safety. It is necessary to evaluate the ability of passive cooling systems to effectively cool down the nuclear reactor or atmosphere in the containment in order to implement passive cooling systems in a new generation nuclear power plant under construction or design process, and it is directly related to accident management. In the historical context, accident management or mitigation of its consequences using passive cooling systems is particularly important for the operation of nuclear installations as in the worst-case scenario radioactive releases can occur and potentially damage workers, residents, and/or the environment. However, the use of such passive cooling systems in non-nuclear facilities and installations is also important. Firstly, non-nuclear facilities and installations are more widely operated. Secondly, in the industrial sector, there is a growing number of parks of different companies, which use a single powerful thermal energy generation unit as a heat source for a variety of technological processes (e.g. glass or fertilizer manufacturing). It is understandable, that natural convention and thermal stratification phenomena have the same nature and causal laws/relationships in the secondary site of the above mentioned industrial facilities (non-nuclear and nuclear facilities). Therefore, the interpretation of these phenomena, based on operational experience of nuclear installations or results of related experimental investigations, is correct and applicable to similar or analogous thermal energy facilities.

A large volume cooling pool is one component of a passive cooling system, which is designed to accumulate large amounts of heat incoming from the reactor core or the containment in a case of station blackout. Typically, the heat exchangers are located at the bottom of the cooling pool and are designed to transfer heat from the heat source to the cooling pool water. Air circulates freely above the cooling pool. Due to the heat transfer through the walls of the heat exchangers, the density of the water adjacent to the heat exchangers reduces, therefore, lower density water begins to rise upward via the buoyancy force. The heated water after reaching the free surface, cools and mixes with the colder water below and flows around the heat exchangers again. Natural convection flow is formed above the heat exchangers, meanwhile, there is no flow below the heat exchangers and after a while, thermal stratification is formed. As the amount of heat incoming from the heat source increases, water temperature approaches to saturation temperature and water starts to mix under the heat exchangers – thermal

stratification disappears. These phenomena occur not only in the above-mentioned cooling pool but also in the spent nuclear fuel pool or the nuclear reactor. Natural convection and thermal stratification phenomena are closely interrelated and particularly important to nuclear safety, and they always have been of interest and remain relevant to engineers, inspectors, and researchers. Currently, there is a growing interest in modelling of these phenomena using CFD software. Although CFD programmes are rapidly developed, these phenomena are modelled using a lot of simplifications such as fluid properties are constant, analysing single-phase flow, simulations performed using steady-state conditions, the effects of solid walls are neglected, etc. Investigations with these simplifications lose the ability to perform a comprehensive nuclear safety assessment. Therefore, in the development of today's and creation of future nuclear energy, it is necessary to develop the methodology that would allow performing complex modelling of natural convection and thermal stratification phenomena in cooling pools. The developed methodology would allow evaluating the variable thermodynamic-physical properties of the fluid involved in the heat transfer process, changing two-component two-phase flow regime, dynamics of heat release and heat transfer through the heat exchanger walls, inevitable phase change, and other variable parameters and phenomena.

This dissertation introduces the methodology for modelling of two-component two-phase natural convection and thermal stratification phenomena in a cooling pool using CFD software. The modelling methodology was developed based on the results of the two international experiments. The first experiment is a case where the heat exchangers are placed in a horizontal position in the cooling pool (horizontal heating surface) and this case corresponds to the component of the passive cooling system being installed in advanced new generation nuclear power plants. The second experiment is a case of cooling of a pressurised water reactor that has been shut down, opened, and ready for overload (vertical heating surface).

Relevance of the work

It is important to understand processes, to predict steady or changing situations, and to manage potential or unexpected accidents when a powerful industrial unit is operated. Passive cooling systems that do not require an external power source during critical situations and accidents are being installed or designed in advanced industrial facilities in order to prevent or minimise the potential consequences of such accidents. This issue is particularly relevant in nuclear power plants because the potential consequences of accidents at these facilities can be severe. Natural convection and thermal stratification phenomena, which occur in cooling pools of passive systems are closely interrelated and their behavior affects the safety of the installations, and they always have been of interest and remain relevant to engineers, inspectors, and researchers. Currently,

there is a growing interest in modelling of these phenomena using CFD software, however, these phenomena are modelled using a lot of simplifications. There is no detailed and complex modelling methodology for these phenomena available today or it has not been published.

Object of the research

The two-component two-phase natural convection and thermal stratification phenomena in thermal installations.

Aim of the work

To develop the methodology for modelling of two-component two-phase natural convection and thermal stratification phenomena in thermal installations using CFD software.

Tasks of the work

1. To create numerical models of the experimental facilities with horizontal and vertical heating surfaces.
2. To determine the influence of initial and boundary conditions and numerical model parameters on modelling results during the modelling of natural convection and thermal stratification phenomena in the experimental facilities.
3. To create and describe in the programming language the UDF designed to define the dynamics of heat release on heating surfaces.
4. To prove the appropriateness of the developed methodology by modelling the experiments that represent two-component two-phase natural convection and thermal stratification phenomena in a cooling pool and to analyse the obtained results.

Novelty of the work

- The methodology for modelling of two-component two-phase natural convection and thermal stratification phenomena in thermal installations using CFD software was developed based on modelling of the two experiments. Until now, these phenomena assuming a lot of simplifications are modeled using CFD software.
- The developed methodology allows evaluating not single-phase fluid, but two-phase (two-component) fluid in one analysed system with variable thermodynamic-physical properties of this fluid. As well as allows evaluating the interaction between different fluids, transient and phase transition processes, and heat transfer through solid structures.

Practical significance of the research

The developed methodology allows performing complex numerical investigations of two-component two-phase natural convection and thermal stratification phenomena using CFD software. The methodology can be applied for modelling of these phenomena, which occurs in power or industrial installations (in the cooling pool of the passive system, in the spent nuclear fuel pool, in the nuclear or chemical reactor, etc.), facility or installation safety assessment, development of accident management methodology, etc. The second application of this methodology is its use in the process of creating and developing CFD programmes.

Statement presented for defense

1. The $k-\varepsilon$ realizable turbulence model with enhanced wall treatment more accurately simulates the thermal stratification phenomenon than the $k-\omega$ SST turbulence model.
2. The implementation of solid structures in the numerical model has a significant influence on modelling results of two-component two-phase natural convection and thermal stratification phenomena.
3. A special UDF described in programming language and implemented in the numerical model is a suitable numerical tool in order to define the dynamics of heat release on heating surfaces.
4. The developed methodology allows performing complex modelling of two-component two-phase natural convection and thermal stratification phenomena in complex configuration geometries.

Approbation of dissertation

Two scientific articles on the theme of the dissertation have been published in journals with a citation index at the “Clarivate Analytics” database “Web of Science Code Collection” and five scientific articles have been published in proceedings of international conferences. The results of the research were presented at five international conferences.

CONCLUSIONS

Numerical investigation of two-component two-phase natural convection and thermal stratification phenomena in the cooling pool of the passive system was performed. The appropriateness of the developed CFD modelling methodology was proved based on this numerical investigation. The two experiments, which represent the cooling pool of the passive system and the nuclear reactor cooling during the shutdown, were chosen in order to prove the appropriateness of developed methodology. After the modelling of two-component two-phase natural convection and thermal stratification phenomena, which were investigated in these two experiments, can be concluded:

1. In modelling the thermal stratification phenomenon:
   1.1. When the heating surface is placed in the horizontal position:
      a) the maximum temperature deviation is 5 % using the $k-\varepsilon$ realizable turbulence model with enhanced wall treatment;
      b) the maximum temperature deviation is 89 % using the $k-\omega$ SST turbulence model.
   1.2. The maximum temperature deviation is 6.5 %, when the heating surfaces are placed in the vertical position, using the $k-\varepsilon$ realizable turbulence model with enhanced wall treatment and the $k-\omega$ SST turbulence model.
2. Heat transfer between fluid and solid structures has a significant influence on modelling results in case of the buoyant flow. The maximum temperature deviation when the heating surfaces are placed in the vertical position and the solid structures are not included or included in the numerical model (at the same thermal power) is 9 %. The description of the solid structures in the numerical model significantly influences the fluid mixing and heat transfer in the boundary layer and the whole volume.
3. In order to define the dynamics of the heat release on heating surfaces, a special UDF was created and described in the programming language and implemented in a numerical model. In this way, the modelling capabilities are expanded using this UDF.
4. Good agreement between numerical and experimental results proves the appropriateness of the developed methodology:
   4.1. The maximum temperature deviation (when the heating surface is placed in horizontal position), above the heating surface, is 12.5 %.
   4.2. The maximum temperature deviation (when the heating surfaces are placed in vertical position) in the upper unheated region is 9 %, in the heated region – 5 %, in the thermal stratification region – 2.6 %, and in the pipe region – 14 %.

PADĖKA

Disertacijos darbo autorius dėkoja moksliniam vadovui doc. habil. dr. Algirdui Kaliatkai už naudingus patarimus ir suteiktas mokslines žinias bei paramą. Taip pat dėkoja organizacijos *Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH* (GRS, Vokietija) vyresniajam mokslo darbuotojui dr. Angel Papukchiev ir organizacijos *Nuclear Research and consultancy Group* (NRG, Nyderlandų Karalystė) vyresniesiems mokslo darbuotojams dr. N.B. Siccama ir dr. D.C. Visser už suteiktas mokslines žinias ir paramą stažuočių metu. Dėkoja visiems Lietuvos energetikos instituto, ypač Branduolinių įrenginių saugos laboratorijos, kolegoms, kurie tiesiogiai ar netiesiogiai prisidėjo prie mokslinių tyrimų.

UDK 532.529+519.6](043.3)

SL344. 2020-07-15, 3,5 leidyb. apsk. 1. Tiražas 50 egz.
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas