



kauno
technologijos
universitetas



TADAS KALIATKA

Termohidraulinių procesų, vykstančių branduolių sintezės įrenginiuose šilumnešio praradimo atveju, tyrimas

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija (06 T)

2014, Kaunas

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

LIETUVOS ENERGETIKOS INSTITUTAS

TADAS KALIATKA

**TERMOHIDRAULINIŲ PROCESŲ, VYKSTANČIŲ
BRANDUOLIŲ SINTEZĖS ĮRENGINIUOSE ŠILUMNĖŠIO
PRARADIMO ATVEJU, TYRIMAS**

Daktaro disertacijos santrauka

Technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija (06 T)

Kaunas, 2014

Disertacija rengta 2009–2013 metais Lietuvos energetikos institute, Branduolinių įrenginių saugos laboratorijoje, remiant Valstybiniam studijų fondui 2009–2010 metais ir Lietuvos mokslo tarybai 2011–2012 metais.

Mokslinis vadovas

Prof. habil. dr. **Eugenijus UŠPURAS** (Lietuvos energetikos institutas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – 06 T).

Energetikos ir termoinžinerijos mokslo krypties daktaro disertacijos gynimo taryba

Prof. habil. dr. Stasys ŠINKŪNAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – 06 T) – pirmininkas;

Prof. habil. dr. Juozas AUGUTIS (Vytauto Didžiojo universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – 06 T);

Prof. habil. dr. Rimantas KACIANAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09 T);

Dr. Raimondas PABARČIUS (Lietuvos energetikos institutas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – 06 T);

Dr. Gediminas STANKŪNAS (Lietuvos energetikos institutas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – 06 T).

Oficialieji oponentai

Prof. dr. Gvidonas LABECKAS (Aleksandro Stulginskio universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – 06 T);

Prof. habil. dr. Gintautas MILIAUSKAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – 06 T).

Disertacija bus ginama viešame Energetikos ir termoinžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2014 m. lapkričio 28 d. 11 val. Lietuvos energetikos instituto posėdžių salėje (Breslaujos g. 3, 202 kab., Kaunas).

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2014 m. spalio 28 d.

Su disertacija galima susipažinti Lietuvos energetikos instituto (Breslaujos g. 3, Kaunas) ir Kauno technologijos universiteto (K. Donelaičio g. 20, Kaunas) bibliotekose.

ĮVADAS

Šiuolaikiniame pasaulyje reikia naujų, švaresnių būdų, galinčių patenkinti didėjančią energijos poreikį – tai susiję su didėjančia klimato kaita ir mažėjančiu iškastinio kuro kiekiu. Viena potencialių ateities branduolinės energijos rūšių yra lengvųjų branduolių susijungimo metu išsiskirianti energija – branduolių sintezės energija. Branduolių sintezės metu gaunama energija turi daug privalumų: neišmetamas anglies dvideginis, gausu kuro, efektyvus panaudojimas, nesusidaro ilgalaikių radioaktyviųjų atliekų – taigi, branduolių sintezė būtų patikimas energijos šaltinis. Tačiau norint pasiekti efektyvų branduolių sintezės energijos panaudojimą energetikoje, dar reikia išspręsti nemažai termobranduolinės fizikos ir inžinerijos problemų. Tam, kad vyktų branduolių susijungimo reakcija ir susidarytų plazma, vandenilio, deuterio ir tričio dujos turi būti įkaitinamos iki labai aukštos temperatūros (šimtai milijonų K). Taip įkaitintą plazmą branduolių sintezės įrenginio vakuuminiame inde reikia išlaikyti kiek galima ilgiau. Šios fizinės ir techninės problemos yra labai sudėtingos. Problemoms spręsti visame pasaulyje statoma daug eksperimentinių branduolių sintezės įrenginių, atliekama daug eksperimentinių ir skaitinių tyrimų. Visi eksperimentiniai ir ateityje planuojami statyti pramoniniai branduolių sintezės įrenginiai turi būti saugūs žmogui ir jo aplinkai. Branduolių sintezės įrenginiuose naudojama labai nedaug kuro (susidaro labai nedidelis kiekis radioaktyviųjų medžiagų), todėl didelio masto branduolinė avarija neįmanoma, tačiau šiuo metu nėra atlikta pakankamai tyrimų, įrodančių šių įrenginių saugą. Siekiant įrodyti branduolių sintezės įrenginių saugą, turi būti atliekami įvairūs fiziniai ir skaitiniai eksperimentai. Tik išsprendus inžinerines problemas bei įrodžius branduolių sintezės įrenginių saugą, bus galima šiuos įrenginius panaudoti pramoninėje energetikoje. Viena iš daugelio problemų – vidinių elementų aušinimo sistemų ir vakuuminio indo elgsena avarių atveju.

Darbo tikslas

Ištirti termohidraulinius procesus, vykstančius branduolių sintezės įrenginių vidinių elementų aušinimo sistemose ir vakuuminiuose induose, šilumnešio praradimo atveju. Pateikti rekomendacijas branduolių sintezės įrenginių vidinių elementų aušinimo sistemoms ir vakuuminiams indams modeliuoti.

Darbo aktualumas

Šiuo metu pasaulyje veikia ir konstruojama keletas naujų eksperimentinių branduolinės sintezės įrenginių. Jais siekiama išmokti valdyti lengvųjų branduolių susijungimo procesus. Deja, daugelis procesų,

vykstančių tuose įrenginiuose, dar nėra pakankamai ištirti. Viena tokių procesų grupių – termohidrauliniai procesai, vykstantys branduolių sintezės įrenginių vidinių elementų aušinimo sistemose ir vakuuminuose induose. Sistemingi ir išsamūs eksperimentiniai ir skaitiniai tyrimai yra būtini branduolinės sintezės įrenginių saugai.

Darbo uždaviniai

1. Sudaryti skaitinius modelius, skirtus termohidrauliniam procesams, vykstantiems branduolių sintezės įrenginių vidinių elementų aušinimo sistemose ir vakuuminuose induose, modeliuoti. Sudarytus modelius patikrinti panaudojant esamus eksperimentinius duomenis bei juos patobulinti, taikant jautrumo ir neapibrėžtumo analizę.
2. Pateikti rekomendacijas branduolių sintezės įrenginių vidinių elementų aušinimo sistemoms ir vakuuminiam indams modeliuoti.
3. Pritaikyti įgytą patirtį, įvertinant W7-X eksperimentinio įrenginio saugą.

Ginamieji teiginiai

1. RELAP5 programų paketas tinkamas modeliuojant procesus, vykstančius branduolių sintezės įrenginių vidinių elementų aušinimo sistemose ir vakuuminuose induose šilumnešio praradimo atveju.
2. Modeliuojant vandens ištekėjimą iš aušinimo sistemos į vakuuminį indą reikia naudoti heterogeninį, nepusiausvyrinį modelį bei būtina įvertinti tarpfazinę trintį. Modeliuojant pradinį slėgį vakuuminiam inde reikia įvertinti RELAP5 programų paketo apribojimą minimaliam slėgiui.
3. Sudarant skaitinį modelį, vakuuminio indo modelį sudarančius segmentus reikia aprašyti įvertinant priešpriešinį vandens ir garo judėjimą vertikalia kryptimi.

Rezultatų praktinė reikšmė

Pateiktos rekomendacijos termohidrauliniam procesams, vykstantiems branduolių sintezės įrenginių vidinių elementų aušinimo sistemose ir vakuuminuose induose, modeliuoti, šitaip praplečiant RELAP5 programų paketo taikymo ribas.

Mokslinis darbo naujumas

Nustatyti procesų, turinčių įtakos staigiems slėgio pokyčiams branduolių sintezės įrenginių vakuuminuose induose, skaitinio modeliavimo principai. Sukurti skaitiniai modeliai leidžia kompleksiskai įvertinti termohidraulinius procesus, vykstančius branduolių sintezės įrenginių vidinių elementų aušinimo sistemose, vakuuminuose induose ir slėgio padidėjimo apsaugos sistemose.

Tyrimo objektas

Termohidrauliniai procesai, vykstantys branduolių sintezės įrenginių vidinių elementų aušinimo sistemose, vakuuminuose induose ir slėgio padidėjimo apsaugos sistemose šilumnešio praradimo atveju.

Disertacinio darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijoje pateikti tyrimų rezultatai paskelbti 5 moksliniuose straipsniuose, esančiuose „Thomson Reuters“ duomenų bazėje „Web of Science Core Collection“ referuojamuose leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą. Tyrimo rezultatai pristatyti 2 tarptautinėse konferencijose. Disertacijos autoriaus tyrimų rezultatai taip pat panaudoti 2009–2014 m. vykdant tarptautinius projektus.

1. BRANDUOLIŲ SINTEZĖS ĮRENGINIAI

Žmonija branduolių skilimo reakcijų metu gaunamą energiją sėkmingai naudoja energijai gaminti nuo praėjusio amžiaus vidurio. Pirmasis branduolinis reaktorius (CP-1) paleistas dar 1942 m. Pasaulyje eksploatuojamų branduolinių reaktorių bendra elektrinė galia artėja prie 400 GW. Didelis kiekis susidarancių radioaktyviųjų atliekų bei eksploatacijos sauga – pagrindiniai veiksniai, verčiantys žmoniją ieškoti alternatyvų branduolinei energetikai.

Viena tokių branduolinės energetikos alternatyvų – branduolių sintezės metu išsiskiriančios energijos pritaikymas elektros energijai gaminti. Branduolinė sintezė – tai procesas, suteikiantis galios Saulei ir kitoms žvaigždėms. Mažos masės atomų branduoliai „susijungia“ ir išskiria energiją. Lengvųjų branduolių susijungimo reakcijų metu gaunamas gerokai didesnis energijos kiekis (1 kg vandenilio virstant heliu, išsiskiria ~10 kartų daugiau energijos, negu dalijantis 1 kg urano 235). Branduolinės (skilimo) ir branduolių sintezės (susijungimo) reakcijos atrastos labai panašiu laiku (1938–1940 m.), tačiau šiuo metu dar nėra pramoninių sintezės reakcijomis pagrįstų įrenginių. Taip yra dėl to, kad norint pasiekti efektyvų branduolių sintezės energijos panaudojimą energetikoje, dar reikia išspręsti nemažai branduolių fizikos ir inžinerijos problemų. Problemoms spręsti visame pasaulyje statoma daug eksperimentinių branduolių sintezės įrenginių, atliekama daug eksperimentinių ir skaitinių tyrimų. Šiame skyriuje bus apžvelgti esami ir numatomi eksperimentiniai branduolių sintezės įrenginiai.

1.1. Branduolių sintezės įrenginių tipai ir jų pagrindiniai parametrai

Šiuo metu branduolių sintezės įrenginiai, pagal plazmos izoliavimo metodą, skirstomi į du pagrindinius tipus: 1) įrenginiai, kuriuose taikomas magnetinio izoliavimo metodas ir 2) įrenginiai, kuriuose taikomas inercinio

izoliavimo metodas. Pirmuoju atveju toro formos įrenginyje sukuriamas galingas magnetinis laukas, kuris neleidžia krūvį turinčioms plazmos dalelėms sąveikaujant su įrenginio sienelėmis. Antruoju atveju pasinaudota dalelių inercija. Inerciniam izoliavimui dažniausiai naudojami galingi lazeriai. Lazeriais iš visų pusių apšaudomos mažos kieto kuro tabletės, susidaro link tabletės centro judanti smūginė banga, kuri suslegia tabletę bei pakelia jos temperatūrą, ir įvyksta sintezės reakcija. Magnetinio izoliavimo įrenginiai skirstomi į: išorinės kontrolės (tokamakai, stellaratoriai ir pan.) ir savarankiško orientavimosi (sferomakai, atvirksčio lauko ir pan.) įrenginius. Inercinio izoliavimo įrenginiai skirstomi į: tiesioginio nukreipimo ir netiesioginio nukreipimo įrenginius.

1 lentelė. Pagrindinių Europos branduolių sintezės įrenginių techninių duomenų palyginimas [1-4]

Parametrai	ASDEX Upgrade	JET	ITER	W7-X
Įrenginio aukštis, m	7	12	10,7	5
Didysis plazmos spindulys, m	1,6	2,96	30	5,5
Mažasis plazmos spindulys, m	0,5/0,8	1,25/2,1	6,2	0,53
Magnetinis laukas, T	3,9	3,4	5,3	3
Plazmos srovė, MA	2	3,7	15	
Plazmai įšildyti reikalinga galia, MW	30	50	73	14
Plazmos kiekis, mg	3		500	5-30
Plazmos (dujų) sudėtis	H, ² H	H, ² H, ³ H	H, ² H, ³ H	H, ² H
Plazmos temperatūra, K	10 ⁸	2.5·10 ⁸	10 ⁸	(1-6)·10 ⁷
Vakuuminiai indai				
Slėgis vakuuiniame inde, Pa	10 ⁻²	2·10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻²
Vakuuminio indo paviršiaus plotas, m ²	200		943	706
Vakuuminio indo tūris, m ³	45	200	1400	110
Plazmos tūris, m ³	14	100	837	30
Vidinių elementų, į kuriuos nukreipiama plazma, aušinimo parametrai				
Šiluminė apkrova, MW/m ²	10	6,7	10	10
Eksploatacija	Įtekėjimo temp. K		373	298
	Slėgis, Pa		4,2·10 ⁶	10 ⁶
Įkaitinimas	Įtekėjimo temp. K		513	433
	Slėgis, Pa		4,4·10 ⁶	10 ⁶

Europos Sąjungos šalyse vyrauja branduolių sintezės įrenginiai, kuriuose taikomas magnetinio izoliavimo metodas. Europos Sąjungos šalyse yra 16 ir statomi 2 nauji branduolių sintezės eksperimentiniai įrenginiai. Pagrindiniai jų: tokamakai ASDEX Upgrade, JET, ITER bei stelaratorius W7-X. Šių įrenginių techniniai duomenys pateikti 1 lentelėje.

Magnetinio izoliavimo metodu veikiančius branduolių sintezės įrenginius sieja toro formos vakuuminis indas. Šiame inde normalios eksploatacijos metu sukuriama plazma. Vakuuminis indas turi ir vidinius elementus, kurie normalios eksploatacijos metu aušinami. Vakuuminio indo vidiniai elementai būna kelių tipų. Jų paskirtis yra skirtinga bei jiems tenka skirtingas šilumos srautas. Didžiausias šilumos srautas tenka vakuuminio indo vidiniams elementams, į kuriuos magnetinių laukų dėka nukreipiama dalis plazmos. Šilumos srautas gali siekti $\sim 10 \text{ MW/m}^2$. Norint nuvesti šilumos kiekį, tenkantį vidiniams elementams, naudojamos aušinimo sistemos. Atsižvelgiant į tenkančios šilumos srautą, naudojamos atskiros aušinimo sistemos. Šilumnešiu šiose aušinimo sistemose paprastai būna vanduo.

1.2. Procesų branduolių sintezės įrenginių aušinimo sistemose ir vakuuminiuose induose apžvalga

Branduolių sintezės įrenginiuose normalios eksploatacijos ir pereinamųjų procesų metu vyksta daugybė procesų (mechaninių, termohidraulinių, cheminių ir kitų). Šiame disertaciniame darbe nagrinėjami termohidrauliniai procesai, kurie vyksta magnetinio izoliavimo metodu pagrįstų branduolių sintezės įrenginių vakuuminiuose induose ir jų viduje esančių elementų aušinimo sistemose.

Branduolių sintezės įrenginių vakuuminiuose induose sukuriamas gilus vakuumas. Normalios eksploatacijos metu vakuuminio indo viduje sukuriama plazma ir vyksta branduolių sintezės reakcijos. Indo viduje susidaro labai aukštos temperatūros plazma, kuri jame esantiems elementams šilumą perduoda daugiausiai spinduliavimo būdu. Vakuuminio indo vidinių elementų aušinimo sistemoje (aušinimo kontūre) suslėgtas vanduo siurblio dėka cirkuliuoja kontūru. Vanduo teka vakuuminio indo vidiniais elementais ir nuo jų nuvedama šiluma, susidariusi branduolinių sintezės reakcijų metu. Vidiniuose elementuose sušildytas vanduo vėliau aušintuve (šilumokaityje) sukauptą šilumą atiduoda ir atvėsta.

Kai kuriuose branduolių sintezės įrenginiuose (pvz., W7-X, ITER) vakuuminio indo vidinių elementų aušinimo sistema naudojama ne tik aušinti įrenginį, bet ir jį įkaitinti. Vidinių elementų kaitinimas vyksta prieš pradėdant normalią eksploataciją (prieš sukuriant plazmą vakuuminiame inde). Elementai įkaitinami, kad nudegtų ant jų paviršių nusėdusios dulkės, kurios

vakuuminio siurblio dėka ištraukiamos iš vakuuminio indo. Taip išvalomas vidinių elementų paviršius ir įrenginys paruošiamas normaliai eksploatacijai.

Branduolių sintezės įrenginių aušinimo kontūruose normalios eksploatacijos metu vykstantys procesai yra panašūs į branduolinių reaktorių aušinimo kontūruose vykstančius procesus (tai šilumos pernašos procesai). Šie procesai, vykstantys branduoliniuose įrenginiuose, yra plačiai ištirti. Todėl šiame darbe nėra nagrinėjami branduolių sintezės įrenginių aušinimo kontūruose normalios eksploatacijos metu vykstantys procesai.

Branduolių sintezės įrenginių, pereinamųjų procesų metu, aušinimo kontūruose vykstantys termohidrauliniai procesai yra kitokie nei branduoliniuose įrenginiuose. Taip yra dėl skirtingos įrenginių konstrukcijos ir skirtingų eksploatacijos sąlygų. Šioje disertacijoje yra nagrinėjami branduolių sintezės įrenginyje vykstantys pereinamieji procesai, kuriuos sukelia šilumnešio praradimas. Sunkiausias pasekmes branduolių sintezės įrenginiuose sukelia šilumnešio praradimas, kuomet sutrūksta vidinio elemento aušinimo sistemos vamzdis vakuuminio indo viduje. Šio įvykio metu vanduo iš vidinių elementų aušinimo sistemos patenka į vakuuminį indą. Vanduo kontaktuoja su vidinių elementų karštais paviršiais ir staigiai garuoja – tai kelia slėgį vakuuminiame inde. Vakuuminis indas suprojektuotas dirbti vakuomo sąlygomis ir negali atlaikyti didelio vidinio slėgio. Taigi, esant tokiam įvykiui, kai kyla slėgis vakuuminiame inde, norint išvengti vakuuminio indo suardymo, yra įrengta vakuuminio indo apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistema. Šią sistemą sudaro membraniniai vožtuvai ir ventiliacijos sistema. Kada pakyla slėgis vakuuminiame inde, membraniniai vožtuvai atsidaro ir vakuuminiame inde susidaręs garas su radioaktyviomis medžiagomis per ventiliacijos sistemą patenka į aplinką. Norint sustabdyti slėgio kilimą vakuuminiame inde ir neišleisti radioaktyviųjų medžiagų į aplinką, svarbu suprasti termohidraulinius procesus, vykstančius vakuuminiame inde šilumnešio praradimo (šilumnešio išteklėjimo iš aušinimo sistemos į vakuuminį indą) atveju. Būtent vandens įtekėjimas į vakuumą ir termohidrauliniai procesai vakuume – tai pagrindiniai skirtumai tarp procesų, vykstančių branduolinių ir branduolių sintezės įrenginių aušinimo kontūruose.

Atlikta nemažai eksperimentinių tyrimų, nagrinėjančių procesus vakuuminiame inde, kada iš vidinių elementų aušinimo sistemos išteka šilumnešis. Daugelį šių eksperimentinių tyrimų galima suskirstyti į dvi grupes. Pirmojoje grupėje yra eksperimentai, kuriuose vakuuminio indo ir į jį įtekančio vandens temperatūros vienodos [5, 6]. Antrojoje grupėje eksperimentai, kurių metu kaitinamos vakuuminio indo sienelės arba įrengti kaitinami plieniniai vidinių elementų imitatoriai [6–10].

Pirmojoje eksperimentų grupėje į vakuuminį indą įtekėjęs vanduo staigiai išgaruoja („flashing“ efektas) ir slėgis vakuuminiame inde padidėja.

Slėgis kyla iki soties slėgio esant atitinkamai vandens temperatūrai. Vandeniui garuoti reikia energijos, todėl įtekėjusio vandens temperatūra sumažėja.

Antroje eksperimentų grupėje vakuuminis indas turi kaitinamus vidinių elementų imitatorius. Įtekėjęs vanduo sąveikauja su karštais paviršiais, todėl vandens garavimo greitis yra didesnis ir slėgis vakuuiniame inde kyla sparčiau [6–10]. Didelis slėgis, tiek jo staigus padidėjimas pavojingas vakuuminio indo konstrukcijai. Siekiant sumažinti slėgį branduolių sintezės įrenginių vakuuiniuose induose, būtinos papildomos inžinerinės apsaugos sistemos.

Branduolių sintezės įrenginių vidinių elementų aušinimo sistemoje galima situacija, kuomet šilumnešio praradimo atveju gali susidaryti hidraulinis smūgis. Susidaręs hidraulinis smūgis gali pažeisti aušinimo sistemos elementus ir taip pat sąlygoti šilumnešio įtekėjimą į vakuumą ar įrenginio patalpas. Todėl ši reiškinį taip pat reikia įvertinti [11]. Hidraulinis smūgis gali įvykti bet kurioje termohidraulinėje sistemoje. Hidraulinis smūgiu vadinamas staigus slėgio padidėjimas arba sumažėjimas vamzdyje, kai staigiai pasikeičia skysčio tekėjimo greitis. Šis nestabilios būsenos reiškinys susijęs su kinetinės ir slėgio energijos pokyčiais, kurie slėgio pulsacijų atveju gali būti teigiami arba neigiami. Keletas dažniausiai pasitaikančių priežasčių hidrauliniam smūgiui įvykti yra:

- staigus vožtuvų atsidarymas arba užsidarymas vamzdyne;
- staigus cirkuliacijos siurblių paleidimas arba sustabdymas;
- greitas didelio oro kiekio išleidimas iš sistemos;
- eksploatacijos klaidos arba įrengimų klaidingas veikimas (arba neveikimas).

Kaip minėta, slėgis vamzdyne gali staiga padidėti dėl staigaus fluido tekėjimo greičio arba tekėjimo krypties pokyčio. Taigi, galima teigti, kad hidraulinis smūgis yra judanti slėgio banga, kilusi staiga pasikeitus fluido tekėjimo greičiui. Slėgio bangos dydis yra funkcija nuo: fluido tekėjimo greičio pokyčio; laikotarpio, per kurį pakinta fluido tekėjimo greitis; fluido ir vamzdžio medžiagos savybių.

1.3. Disertacijos darbo uždavinių formulavimas ir autoriaus indėlis į nagrinėjamą problematiką

Šiuo metu dar tik kuriami energetinių branduolių sintezės įrenginių prototipai. Atlikta literatūros apžvalga parodė, kad iki šiol branduolių sintezės įrenginių saugai skiriama mažiau dėmesio, palyginti su branduoliniais įrenginiais. Procesai, vykstantys branduolių sintezės įrenginių vidinių elementų aušinimo sistemoje (aušinimo kontūruose) ir vakuuiniame inde (vandens ištekėjimas iš aušinimo sistemos į vakuumą ir procesai vakuume) šilumnešio praradimo atveju, nėra pakankamai ištirti. Nebuvo

spręstas ir kompleksinis uždavinys, kai vienu metu tiriama procesai vidinių elementų aušinimo sistemoje, vakuuiniame inde ir apsaugos nuo slėgio padidėjimo vakuuiniame inde sistemoje.

Pagal Europos branduolių sintezės plėtros susitarimą EFDA sudaryta branduolių sintezės energijos įgyvendinimo planą numatyti įvairūs tyrimai [12]. Tarp jų yra tyrimai, skirti šilumos nuvedimo sistemoms, branduolių sintezės įrenginių saugai įgyvendinti, taip pat tyrimai, skirti stelaratoriaus tipo eksperimentiniams įrenginiams. Tačiau tyrimuose, skirtuose šilumos nuvedimo sistemoms, neplanuojama analizuoti situacijos su šilumnešio praradimu, kai vanduo gali įtekėti į vakuuminį indą. Ši problema taip pat nėra nagrinėjama ir tyrimuose, skirtuose branduolių sintezės įrenginių saugai įgyvendinti, nors nesant pakankamų saugos priemonių, šilumnešio praradimo atveju gali būti suardytas vakuuminis indas ir radioaktyvios medžiagos gali patekti į įrenginio patalpas bei aplinką.

Atlikus programų paketų, skirtų modeliuoti termohidraulinius procesus, apžvalgą nustatyta, kad šie programų paketai gali būti taikomi modeliuoti ir procesams, vykstantiems branduolių sintezės įrenginiuose. Literatūros apžvalgoje apžvelgti programų paketai neblogai modeliuoja eksperimentų metu vykstančius procesus, tačiau dar nėra nagrinėtas kompleksinis uždavinys, kurį sprendžiant būtų išsamiai nagrinėjami tarpusavyje susiję staigaus garavimo, kondensacijos ir šilumos mainų procesai.

Kadangi anksčiau išvardytos problemos yra svarbios, tačiau nepakankamai išspręstos, šiam darbui ir buvo suformuluotas tikslas: ištirti termohidraulinius procesus, vykstančius branduolių sintezės įrenginių vidinių elementų aušinimo sistemose ir vakuuiniuose įrenginiuose šilumnešio praradimo atveju ir pateikti rekomendacijas branduolių sintezės įrenginiams modeliuoti. Šis tikslas buvo pasiektas, darbo rezultatai pateikti disertacijoje.

Disertacijos autorius išplėtė RELAP5 programų paketo taikymo galimybes, modeliuojant termohidraulinius procesus branduolių sintezės įrenginiuose. Autorius, taikydamas geriausio įverčio metodologiją, patikrino RELAP5 programų paketo tinkamumą modeliuoti procesus, vykstančius branduolių sintezės įrenginių aušinimo sistemose, vakuuiniuose induose. Įvertinant programų paketo taikymo apribojimus, pasiūlytos rekomendacijos skaitiniams modeliams kurti. Sudarytas realaus įrenginio (W7-X) modelis ir atliktas kompleksinio uždavinio sprendimas šilumnešio praradimo atveju. Išanalizuoti procesai aušinimo sistemoje, vakuuiniame inde ir apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemoje.

2. SKAITINIŲ TYRIMŲ METODIKA

2.1. Programų paketo, skirto modeliuoti termohidraulinius procesus branduolių sintezės įrenginiuose, parinkimas

Atlikta literatūros apžvalga parodė, kad šiuo metu pasaulyje branduolių sintezės įrenginiuose tirti termohidraulinius procesus dažniausiai taikomi programų paketai: RELAP5, ATHENA, RELAP/SCDAPSIM, RELAP5-3D, CATHARE, SIMMER, MELCOR, ASTEC ir TRAC. Visi šie programų paketai gali būti pritaikyti tirti termohidraulinius procesus vakuuminiam inde ir jo vidinių elementų aušinimo sistemoje. Disertacijoje nagrinėjamas šilumnešio praradimo įvykis, kuris sukelia daug procesų, tačiau pirmiausia nagrinėjami termohidrauliniai ir šilumos pernašos procesai, nuo kurių priklauso kitų procesų eiga. Taikant minėtus programų paketus galima išsamiai iširti termohidraulinius ir šilumos pernašos procesus. MELCOR ir ASTEC programų paketai gali būti taikomi ir kitiems procesams tirti (pvz., procesai kiaušte, korozijos produktuose, tričio pernešimą ir kitus). Tačiau šių paketų termohidraulinė dalis nėra tokia išsami kaip kitų programų paketų. Siekiant išrinkti geriausiai tinkantį programų paketą, reikia įvertinti visų programų paketų: a) turimus modelius, kuriuos galima taikyti branduolių sintezės įrenginiams, b) ankstesnę paketo taikymo patirtį, c) jau atliktas analizes, d) esamą papildomą dokumentaciją, modelius, įvadinius failus, e) atliktas validacijos studijas, f) galimybes keisti programų paketą, g) atliktų skaičiavimų rezultatų neapibrėžtumus. Kiekvienas minėtų termohidraulinių programų paketų buvo įvertintas. Nustatyta, kad termohidrauliniams procesams branduolių sintezės įrenginių vakuuminuose induose ir vidinių elementų aušinimo sistemose modeliuoti geriausiai tinka RELAP5 programų paketas [13].

2.2. Modeliavimas taikant RELAP5 programų paketą ir skaitinių tyrimų metodika

RELAP5 yra „geriausio įverčio“ programų paketas. Jis buvo sukurtas normaliai eksploatacijai ir pereinamiesiems procesams (pvz., šilumnešio praradimas) modeliuoti branduoliniuose įrenginiuose. Tačiau jis gali būti taikomas įvairioms termohidraulinėms sistemoms modeliuoti, ne išimtis ir branduolių sintezės įrenginiai.

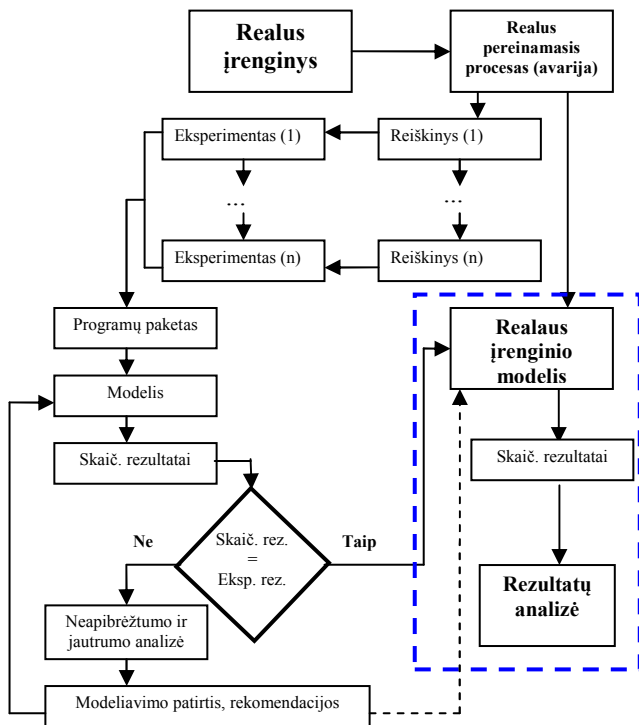
RELAP5 programų paketo termohidraulinis modelis vadovaujasi 8 balanso lygtimis (masės, judesio kiekio, energijos tvermės ir energijos sklaidos (pernašos) lygtys dujinėi ir skystai fazėms), kuriose yra aštuoni priklausomi kintamieji – slėgis (p), skystos ir dujinės fazių savitoji vidinė energija (u_g ir u_f), tūrinis garingumas (α_g), skystos ir dujinės fazių greičiai (v_g ir v_f), nesikondensuojančių dujų masinė dalis mišinyje (X_n) ir boro tankis (ρ_b). Nepriklausomi kintamieji: laikas (t) ir atstumas (x). Antriniais

priklausomi kintamieji – faziniai tankiai (ρ_g ir ρ_f), fazinė temperatūra (T_g ir T_f), sotinimo temperatūra (T_s) ir masės dalis nesikondensuojančių dujų fazėje (X_{ni}).

Geriausio įvėrcio sisteminiuose termohidrauliniuose programų paketuose (taip pat ir RELAP5) naudojamos šios pagrindinės prielaidos:

- šilumnešio tekėjimas aprašomas vienmačiu modeliu, vidurkinant parametrus pagal kanalo skerspjūvį;
- tariama, kad diskretinės šilumnešio fazės (garo burbuliukai ar šilumnešio lašeliai) yra soties būsenos;
- tariama, kad dvejų fazių, tarp kurių vyksta masės mainai, slėgis esant burbuliniam virimo režimui yra vienodas;
- fazių greičiai tarpfazinių mainų sąveikos atveju yra lygūs;
- tarpfazinių masės, energijos, impulso lygtims spręsti naudojami tekėjimo režimų „žemėlapiai“;
- kompiuteriniai programų paketai turi specialius modulius kai kuriems fizikiniam procesams ir elementams (kritinis ištekėjimas, šilumos išsiskyrimas, siurbliai, vožtuvai, hidroakumulatoriai, būgniniai separatoriai, išsišakojimas ir t. t.) modeliuoti.

Šiame darbe skaitinių tyrimų metodika pagrįsta validavimo principu, t. y. norint programų paketo dėka tinkamai išanalizuoti procesus, vykstančius realiuose branduolių sintezės įrenginiuose, pirmiausia pasirinktą programų paketą būtina validuoti naudojant turimus eksperimentinius duomenis. Tuo tikslu pirmiausiai parenkami eksperimentai, kuriuose atkartojami mūsų atveju svarbūs branduolių sintezės įrenginyje vykstantys procesai. Toliau, taikant programų paketą, sudaromas pasirinkto eksperimento skaitinis modelis. Sudarius skaitinį modelį, atliekami skaičiavimai, kurie vėliau lyginami su eksperimento rezultatais. Atliekama neapibrėžtumo ir jautrumo analizė. Šios analizės metu tiriama kaip skaičiavimo rezultatai atkartoja eksperimentinius rezultatus ir kurie iš pradinių įrenginio būsenos ir programų pakete naudojamų modeliavimo parametrų turi didžiausią įtaką skaičiavimo rezultatams. Atlikus neapibrėžtumo ir jautrumo analizę bei tinkamai interpretavus gautus skaičiavimo rezultatus, galima tikslinti anksčiau sudarytą modelį ir vėl atlikti skaičiavimus, kuriuos vėliau lyginti su eksperimentiniais rezultatais. Vadovaujantis šiuo skaitiniu tyrimu, sudaromos rekomendacijos, kaip tiksliau sumodeliuoti realų branduolių sintezės įrenginį. Taigi, įgijus modeliavimo patirties bei turint rekomendacijas, galima sudaryti patikimą realaus branduolių sintezės įrenginio modelį bei atlikti skaičiavimus. Gauti skaičiavimo rezultatai yra analizuojami ir pateikiamos išvados.



1 pav. Skaitinių tyrimų metodikos schema

Atsižvelgiant į 1 pav. pateiktą skaitinių tyrimų metodikos schemą, darbe buvo atliekami skaitiniai tyrimai. Disertacijos 1 skyriuje buvo apibrėžta, kad darbe bus tiriami procesai, vykstantys branduolių sintezės įrenginių vakuuminuose induose ir vidinių elementų aušinimo sistemose. 1.2 poskyryje aptarti procesai, vykstantys vakuuminuose induose ir vidinių elementų aušinimo sistemose šilumnešio praradimo atveju. 2 skyriuje pasirinktas programų paketas (2.1 poskyrius), kurio dėka atliekami visi disertacijoje pateikti skaitiniai tyrimai. Taip pat 2 skyriuje pristatyti procesų modeliavimo ypatumai ir tyrimų metodika (2.2 poskyrius). 3 skyriuje pasirinkti eksperimentai, padedantys ištirti reiškinius vakuuminiam inde vandens įtekėjimo atveju (panaši situacija galima realiuose įrenginiuose šilumnešio praradimo atveju). Sudaryti šių eksperimentų skaitiniai modeliai bei atlikti skaičiavimai. Skaičiavimo rezultatai palyginti su eksperimentiniais duomenimis (3.1 ir 3.2 poskyriai). 3.1.3 poskyryje nustatytas vakuuminio indo modelio optimalus menamų segmentų skaičius. Eksperimentų modeliavimo rezultatų jautrumo ir neapibrėžtumų analizė atlikta 3.1.4

poskyryje. 3.1.5 poskyryje pateiktos rekomendacijos branduolių sintezės įrenginių modeliui sudaryti. Kitame paragrafe, pagal pateiktas rekomendacijas, sudaryti Wendelstein 7-X (W7-X) branduolių sintezės įrenginio, vidinių aušinimo sistemos elementų, į kuriuos nukreipiama plazma, vakuuminio indo ir apsaugos nuo slėgio padidėjimo vakuuminiame inde modeliai (3.2 poskyris). 4 skyriuje atliktas skaitinis šilumnešio praradimo atvejo W7-X įrenginyje tyrimas. Atliktas kompleksinis procesų įrenginio vidinių elementų aušinimo sistemoje, vakuuminiame inde ir apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemoje modeliavimas. Šio skaitinio tyrimo metu nagrinėti staigaus vandens garavimo, šilumos mainų, kondensacijos ir kiti termohidrauliniai procesai, kurie vienas kitam turi įtakos.

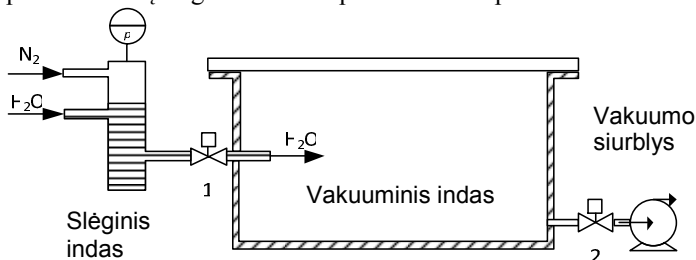
3. SKAITINIAI TYRIMAI

3.1. Vandens ištekėjimo iš aušinimo sistemos į vakuuminį indą modeliavimas naudojant RELAP5 programų paketą

Naudojant RELAP5 programų paketą sumodeliuota po vieną eksperimentą iš kiekvienos eksperimentų grupės. Pasirinkti modeliuoti eksperimentai turi skirtingus eksperimentinius įrenginius, todėl kiekvienam eksperimentui buvo sukurtas atskiras modelis. Atlikus eksperimentų modeliavimą gauti rezultatai palyginti su eksperimentiniais duomenimis.

3.1.1. Eksperimentas, kai įtekančio vandens ir vakuuminio indo temperatūros vienodos

Siekiant ištirti branduolių sintezės įrenginiams aktualų vandens įtekėjimą į vakuuminį indą, Japonijos atominės energetikos tyrimo institute buvo sukurtas „ICE“ (Ingress of Coolant Event) eksperimentinis ruožas [5]. Šio eksperimentinio įrenginio schema pavaizduota 2 pav.



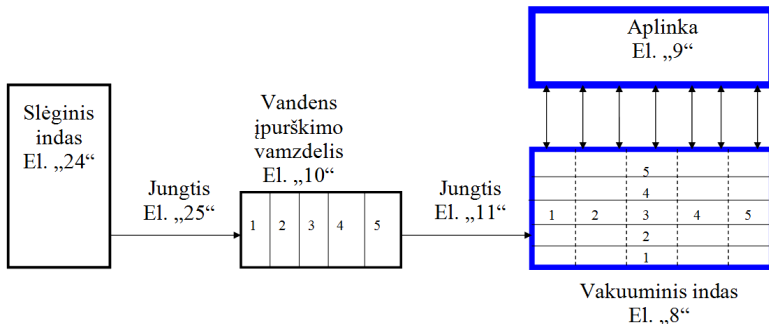
2 pav. Eksperimentinio įrenginio schema: 1, 2 sklendės

Eksperimentinio įrenginio vakuuminiame inde vakuumas sukuriamas panaudojant vakuumo siurblių. Eksperimentų metu į vakuuminį indą tiekiamas

vanduo iš slėginio indo, kuriame vanduo suslegiamas tiekiant aukšto slėgio azoto dujas. Vakuuminio indo aukštis 0,3 m, plotis 0,3 m, ilgis 0,5 m. Vanduo į jį patenka, atvėrus sklendę l . Veikiamas slėgių skirtumo vanduo iš slėginio indo įpurškiamas į vakuuminį indą per horizontalų vamzdelį. Pristatytu eksperimentiniu įrenginiu atlikta daugybė eksperimentų. Šiame skyriuje nagrinėjami eksperimentai, modeliuojantys branduolinių sintezės reaktorių aušinimo sistemos mažo skersmens vamzdžio trūkį. Tirti du eksperimentai [5]:

- vandens įpurškimo vamzdelio skersmuo $5 \cdot 10^{-4}$ m; slėgis vakuuiniame inde 30 Pa; tiekiamo vandens slėgis 10^5 Pa; vakuuminio indo ir įpurškiamo vandens pradinė temperatūra 280,5 K;
- vamzdelio, per kurį išteka vanduo, skersmuo 10^{-3} m; visos kitos sąlygos tokios pačios, kaip ir ankstesniame eksperimente.

Ištekėjusio vandens srautas apskaičiuotas pagal ištekėjusio vandens masę ir ištekėjimo laiką. $D = 5 \cdot 10^{-4}$ m atveju nustatytas ir vėliau modelyje priimtas vandens srautas yra $1,93 \cdot 10^{-3}$ kg/s, $D = 10^{-3}$ m atveju – $6,25 \cdot 10^{-3}$ kg/s srautas.

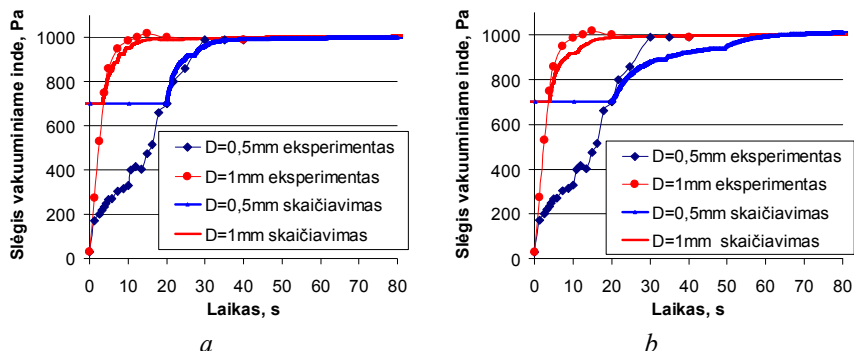


3 pav. Eksperimentinio įrenginio skaitinis modelis

Pagal [5] pateiktas eksperimentinio įrenginio ir atliktų eksperimentų sąlygas sudarytas RELAP5 skaitinis modelis. Modelyje pavaizduoti esminiai eksperimento elementai (3 pav.). Slėginis indas (El. „24“) modeliuojamas kaip tūris, kuriame aprašomas parametrų kitimas laike. Šis tūris sujungtas su mažu (tūris $1,96 \cdot 10^{-5}$ m³) horizontaliu vamzdiniu elementu (El. „10“), kuris atitinka eksperimente naudojamą vandens įpurškimo vamzdelį. Elementas „24“ su „10“ elementu modelyje sujungtas jungtimi (El. „25“), kurioje aprašytas vandens srautas iš slėginio į vakuuminį indą. Vandens srautas nurodytas toks, kuris buvo nustatytas eksperimentų metu. Elementas „10“ jungtimi (El. „11“) sujungtas su vakuumiiniu indu (El. „8“), kuris modeliuojamas kaip horizontalus ar vertikalus vamzdinis elementas.

Elementai „10“ ir „8“ sudalyti į 5 segmentus. Modelyje panaudotas dar vienas horizontalus vamzdinis elementas (didelis tūris), kuriuo modeliuojama aplinka (El. „9“), supanti eksperimentinį įrenginį. Vakuuminio indo plieninės sienelės sumodeliuotos kaip šiluminės struktūros. Modeliuojami šilumos mainai tarp vakuuminio indo ir aplinkos.

Modeliuojant abu eksperimentinius atvejus, skaitiniame modelyje pradinės sąlygos pasirinktos tokios pačios kaip ir realiame eksperimente, išskyrus tai, kad vakuuiniame inde slėgis priimtas 700 Pa (minimalus RELAP5 numatytas slėgis), taip pat daroma prielaida, kad vakuuminis indas užpildytas perkaitintu vandens garu.



4 pav. Skaičiavimo rezultatų palyginimas su eksperimentiniais matavimais: *a*-vakuuminis indas sumodeliuotas kaip vertikalus vamzdis; *b*-vakuuminis indas sumodeliuotas kaip horizontalus vamzdis

Modelyje vakuuminis indas (El. „8“) buvo aprašytas horizontaliu, o vėliau ir vertikaliu vamzdinio elementais, sudalytais į 5 menamus segmentus. Taip buvo siekiama įvertinti vakuuminio indo modeliavimo RELAP5 ypatumus, nes tai turi įtakos modeliuojant fluido tekėjimo kryptį.

Dėl RELAP5 ypatybės - minimalaus slėgio apribojimo teko skaičiavimo duomenis pakoreguoti, atsižvelgiant į eksperimento rezultatus [5]. T. y. skaičiavimo duomenyse vandens įpurškimo pradžia buvo „perstumiamą“ įvertinant laiką, per kurį konkretaus eksperimento atveju vakuuiniame inde pasiekiamas 700 Pa slėgis. Tuo laiko momentu eksperimento metu naudojamame vakuuiniame inde yra vandens garas, taigi tokios pradinės sąlygos buvo aprašytos modelyje.

$D = 5 \cdot 10^{-4}$ ir 10^{-3} m atveju skaičiavimo rezultatai geriau sutampa su eksperimentiniais, kuomet vakuuminis indas aprašytas kaip vertikalus, o ne kaip horizontalus vamzdis (4 pav.).

Rezultatai aiškinami tuo, kad garo ir vandens stratifikacija vakuuiniame inde vyksta vertikalia kryptimi. Modeliuojant vakuuminį indą

kaip horizontalų vamzdį, jame atsiradęs garas ar vanduo negali judėti vertikalia kryptimi, todėl vandens garavimo procesas šiek tiek lėtesnis, palyginus su modeliu, kuriame vakuuminis indas modeliuojamas kaip vertikalus vamzdis. Norint RELAP5 modelyje tiksliau įvertinti procesų pobūdį ir gauti tikslesnius skaičiavimo rezultatus, būtina pasirinkti modeliavimo funkcijas, kurios kuo geriau aprašytų vykstančius procesus. Taigi, modeliuojant vandens įtekėjimą į vakuuminį indą, rekomenduojama modelyje jį aprašyti taip, kad būtų įvertinta galima vandens lašelių ir susidariusio garo judėjimo kryptis.

3.1.2. Eksperimentas, kai vakuuminis indas turi karštus paviršius

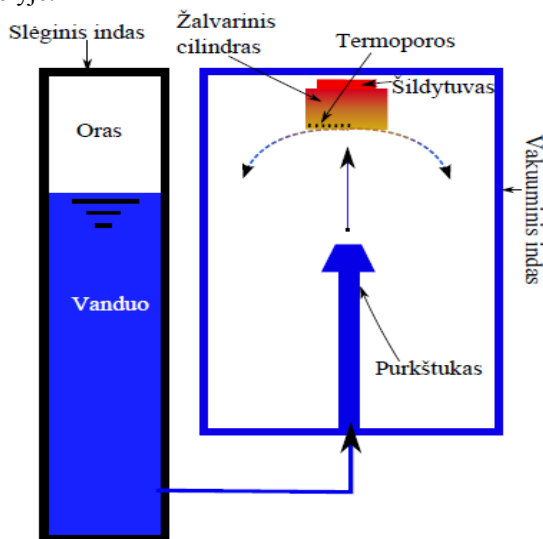
Šiame skyriuje nagrinėjami procesai, vykstantys vakuuiniame inde šilumnešio praradimo atveju, kada į vakuuminį indą patekęs vanduo sąveikauja su vakuuiniame inde esančiais kaitinamais paviršiais. Branduolių sintezės įrenginiuose ši situacija galima, kai įrenginys iki šilumnešio praradimo atvejo dirba normalios eksploatacijos režimu. Normalios eksploatacijos metu vakuuiniame inde yra generuojama plazma. Plazma perduoda (daugiausia radiaciniu būdu) šilumą vakuuminio indo viduje esantiems vidiniams aušinamiems elementams. Šių elementų paviršiai gali įkaisti iki labai aukštos temperatūros, pvz., W7-X eksperimentiniame įrenginyje vidinių elementų paviršiaus temperatūra gali būti nuo 470 K iki 1700 K. Situacijai, kai į vakuuminį indą įtekantis vanduo sąveikauja su karštais paviršiais, tirti buvo atliktas eksperimentas, aprašytas literatūroje [10].

Eksperimentinio įrenginio schema pavaizduota 5 pav. Įrenginys susideda iš dviejų pagrindinių dalių: a) slėginio indo ir b) vertikalaus cilindrinio vakuuminio indo. Slėginio indo aukštis 1,41 m, skersmuo 0,202 m. Vanduo slėginiame inde šildomas šildytuvu. Slėgis slėginiame inde reguliuojamas oro kompresoriumi. Vakuuminio indo viršuje yra elektriniu šildytuvu kaitinamas žalvarinis cilindras, apačioje purkštukas, pro kurį iš slėginio indo tiekiamas vanduo į vakuuminį indą (5 pav.). Vakuuminio indo skersmuo 0,202 m, aukštis 0,69 m. Purkštuko atstumą tarp kaitinamo žalvarinio cilindro galima keisti. Vakuuminio indo sienelių temperatūra palaikoma tokia pati kaip ir slėginiame inde esančio vandens.

Vakuuminio indo viduje kaitinamo žalvarinio cilindro šildytuvo galia 1000 W. Užtrunka apie 600 s kaitinamą cilindrą nuo kambario temperatūros sušildyti iki 573 K temperatūros, reikalingos eksperimentui. Eksperimento metu šildytuvo galia sumažinama iki 870 W, norint palaikyti pastovią paviršiaus temperatūrą. Kaitinamo žalvarinio cilindro skersmuo ir ilgis yra 0,084 m. Kaitinamo cilindro viršutinis galas sujungtas su šildytuvu.

Kaitinamo cilindro apatiniame paviršiuje (priešais purkštuką) spindulio kryptimi įstatytos termoporos (5 pav.).

Prieš eksperimentą visi eksperimentinio įrenginio parametrai turi būti pastovūs. Slėginiame inde esančio vandens ir vakuuminio indo sienos temperatūra 353 K. Kaitinamo cilindro paviršiaus temperatūra 573 K. Vandens slėgis slėginiame inde $3 \cdot 10^5$ Pa. Slėgis vakuuminiame inde 8000 Pa. Purkštukas 0,16 m atstumu nuo kaitinamo paviršiaus. Purkštuko skersmuo yra 0,001 m. Vandens srautas per purkštuką $1,34 \cdot 10^{-2}$ kg/s. Vanduo iš slėginio indo purškiamas į vakuuminį indą visą eksperimento laiką – 100 s. Šios reikšmės buvo naudojamos kaip pradinės reikšmės RELAP5 skaičiavimo modelyje.



5 pav. Eksperimentinio įrenginio schema

Eksperimento metu vanduo iš slėginio indo pro purkštuką išpurškiamas į vakuuminį indą. Išpurkšto vandens čiurkšlė atsitrenkia į kaitinamą paviršių ir jį drėkina, dalis vandens lašelių nukrenta į vakuuminio indo apačią. Slėgis vakuuminiame inde kyla, o kaitinamo cilindro paviršiaus temperatūra mažėja.

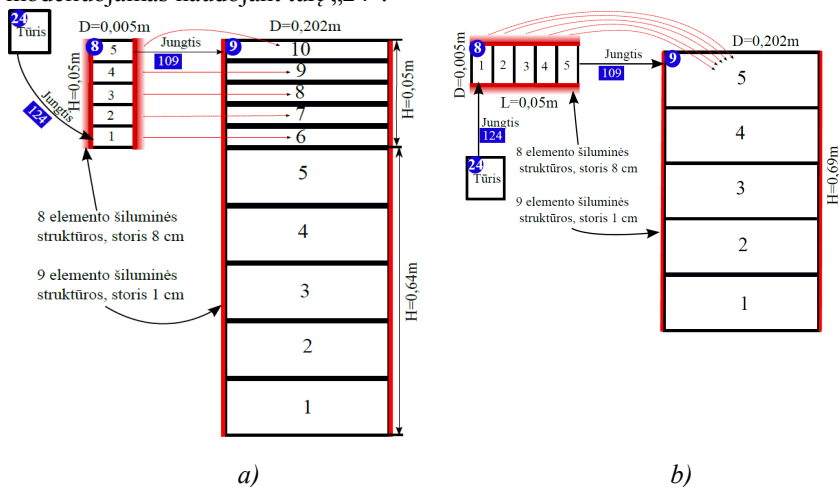
Anksčiau aprašytam eksperimentui buvo sudaryti du RELAP5 modeliai (6 pav.). Šiame modelyje vamzdinis elementas „8“ skirtas sumodeliuoti vandens čiurkšlės sąveikai su kaitinamu cilindru. Pirmajame modelyje vandens čiurkšlės sąveika su kaitinamu cilindru modeliuojama naudojant mažą vertikalaus vamzdžio tipo elementą (6 pav. a). Antrajame modelyje vandens sąveika su kaitinamu cilindru modeliuojama naudojant mažą horizontalų vamzdinį elementą (6 pav. b). Šis „8“ vamzdinis elementas labai mažas: skersmuo 0,005 m, aukštis arba ilgis 0,05 m. „8“ elemento

skersmuo ir aukštis pasirinktas įvertinant eksperimento metu galimą susidaryti vandens čiurkšlę. Šis elementas turi ir šiluminės struktūros, kurių paviršiaus plotas toks pat, kaip ir eksperimente naudojamo kaitinamo cilindro. Šiluminėms struktūroms modeliuose taip pat modeliuojamas elektrinis 870 W kaitinimas (toks kaip eksperimente). Vidinis šiluminių struktūrų paviršius susietas su „8“ elementu, išorinis su „9“ elementu (smulkios brūkšninės linijos 6 pav.). Taip modeliuojamas šilumos perdavimas tarp elementų „8“ ir „9“ (šilumos mainai tarp kaitinamo cilindro, purškiamo vandens ir vakuuminio indo).

Antrasis vamzdinis elementas „9“ naudojamas modeliuoti vakuuminį indą. Šio vamzdžio matmenys tokie patys, kaip eksperimente naudojamo vakuuminio indo (skersmuo = 0,202 m, aukštis = 0,64 m). Šis elementas turi šiluminės struktūras (šilumos mainams per indo sienelės modeliuoti), kurių storis 0,001 m, o išorinis paviršius izoterminis.

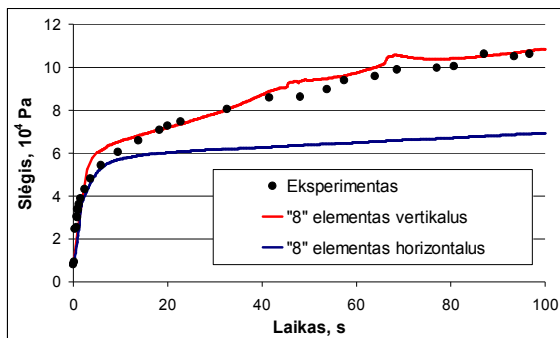
Elementai „8“ ir „9“ sujungti jungtimi „109“. Elementai „8“ ir „9“ sudalyti į vidinius segmentus. Elementas „8“ turi 5 vidinius segmentus. Jei elementas „8“ vertikalus – elementas „9“ turi 10 vidinių segmentų, jei elementas „8“ horizontalus - elementas „9“ turi 5 vidinius segmentus.

Vandens įpurškimas į vakuuminį indą modeliuojamas naudojant jungtį „124“. Naudojant šią jungtį tiekiamas vandens srautas (išmatuotas eksperimento metu) iš slėginio indo į vakuuminį indą. Įpurškiamo vandens parametrai nurodomi tokie, kaip buvo naudoti eksperimente. Slėginis indas modeliuojamas naudojant tūrį „24“.

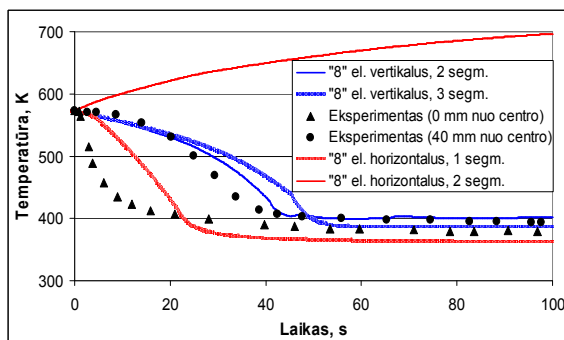


6 pav. RELAP5 nodalizacinė schema. Vandens čiurkšlės sąveika su kaitinamu paviršiumi modeliuojama: a-vertikaliu vamzdinio elementu, b-horizontaliu vamzdinio elementu

Naudojant RELAP5 programų paketą atlikti skaičiavimai su abiem modeliais (elementas „8“ vertikalus arba horizontalus). Tai buvo padaryta siekiant ištirti procesus, vykstančius vakuuiniame inde, ir išsiaiškinti, kuriuo modeliu skaičiavimo rezultatai geriau atitinka eksperimentinius. Skaičiavimo rezultatai palyginti su eksperimentiniais duomenimis. Slėgio kilimas vakuuiniame inde pavaizduotas 7 pav. Skaičiavimo rezultatai, kai buvo naudojamas modelis su vertikaliu „8“ elementu, geriau sutampa su eksperimentiniais duomenimis.



7 pav. Eksperimentinių duomenų ir apskaičiuoto slėgio vakuuiniame inde palyginimas



8 pav. Kaitinamo žalvarinio cilindro ir apskaičiuotos paviršiaus temperatūros „8“ vamzdiniame elemente palyginimas

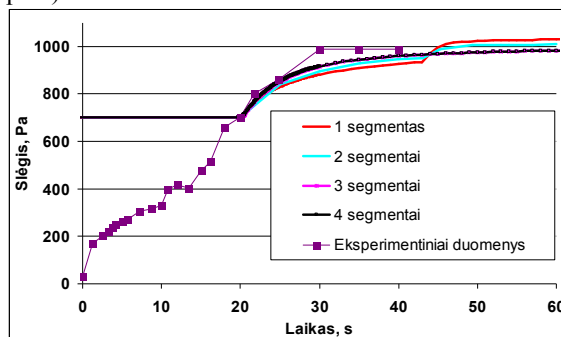
„8“ elemente apskaičiuota sienelės paviršiaus temperatūra palyginta su eksperimento metu kaitinamo cilindro paviršiuje išmatuotomis reikšmėmis (8 pav.). Eksperimento duomenys ir skaičiavimo rezultatai vėlgi geriau sutampa, kai „8“ elementas modeliuojamas kaip vertikalus vamzdis. Temperatūra, apskaičiuota pirmame horizontalaus „8“ elemento segmente, yra panaši į eksperimentinius duomenis, tačiau šio elemento antrame segmente apskaičiuotos temperatūros gaunamos gerokai didesnės nei

eksperimentiniai duomenys. Taip yra todėl, kad pratekėdamas per horizontalų elementą „8“, vanduo labai trumpai sąveikauja su karštu paviršiumi. Todėl įkaitintas paviršius nespėja atiduoti šilumos vandeniui.

3.1.3. Vidinių segmentų kiekio įtaka skaitinio tyrimo rezultatams

Skaičiavimo rezultatams įtakos gali turėti modeliuojamo tūrio skaidymas į menamus modelio segmentus. Paprastai kuo į mažiau segmentų sudalijami modeliavimo elementai, tuo programų paketas greičiau suskaičiuoja jam numatytą uždavinį. Tačiau skaičiavimo rezultatai, gauti panaudojant nedidelį menamų modelio segmentų skaičių, gali būti netikslūs. Taip yra dėl to, kad programų paketai naudoja suvidurkintas parametrų reikšmes visam segmento tūriui. Pasirinkus daugiau segmentų, modelis bus sudalytas į mažesnes dalis, kur kiekviena turės suvidurkintą reikšmę – taip galima gauti tikslesnius skaičiavimo rezultatus. Kita vertus, pasirinkus tankų sudalijimą, programų paketas ilgai atlieka skaičiavimus, o išskirtiniais atvejais galimi net ir didesni netikslumai dėl programų pakete taikomų matematinų modelių. Atsižvelgiant į šias modeliavimo ypatybes, reikia pasirinkti optimalų segmentų skaičių, kad nenukentėtų skaičiavimo rezultatų kokybė ir skaičiavimo našumas.

3.1.1. skyrelyje pristatytas eksperimentas, skirtas analizuoti slėgio kitimą vakuuminiame inde šilumnešio praradimo atveju. 3 pav. pavaizduoto modelio segmentų skaičius buvo keičiamas, norint nustatyti segmentų kiekio įtaką skaičiavimo rezultatams. Atlikti vandens ištekėjimo pro 0,0005 m skersmens vamzdį į vakuuminį indą skaičiavimai. Šiuose skaičiavimuose vakuuminis indas buvo modeliuojamas kaip 1 ($0,045 \text{ m}^3$), 2 ($2 \cdot 0,0225 \text{ m}^3$), 3 ($3 \cdot 0,015 \text{ m}^3$) ir 4 ($4 \cdot 0,01125 \text{ m}^3$) vertikalius vidinius segmentus turintis vamzdis. Gauti skaičiavimo rezultatai taip pat palyginti su eksperimentiniais duomenimis (9 pav.).



9 pav. Slėgio vakuuminiame inde kitimo laike priklausomumas nuo vakuuminio indo skaitinio modelio segmentų skaičiaus

9 pav. matyti, kad vakuuminiam indui, sudalytam į 3 ir 4 vertikalius menamus segmentus, skaičiavimo rezultatai nesikeičia. Tačiau modeliuojant vakuuminį indą, sudarytą tik iš vieno ar dviejų segmentų, gaunami skirtingi skaičiavimo rezultatai. Todėl, norint išvengti papildomų netikslumų, patartina modeliuojant vakuuminį indą sudalyti į segmentus, kurių kiekvieno tūris neviršytų trečdalis viso modeliuojamo vakuuminio indo tūrio.

3.1.4. Skaičiavimo rezultatų jautrumo ir neapibrėžtumo analizė

Bet kurio įrenginio ar jo elementų modeliavimo ir skaičiavimų eigoje kyla naudojamų ribinių sąlygų, termofizinių savybių ir parametrų nustatymo tikslumo ir jų poveikio rezultatams problema. Todėl bet kurio skaičiavimo rezultatai neišvengiamai yra sąlygojami neapibrėžtumų. Procesams branduolinėse jėgainėse analizuoti paprastai buvo taikomi konservatyvūs analizės metodai, kai galimus modeliavimo neapibrėžtumus stengtasi įvertinti priimant konservatyvias pradines ir ribines sąlygas. Tačiau tokiu metodu gauti rezultatai dažnai būdavo perdėtai pesimistiniai, todėl pastaruoju metu pereinama prie geriausio įverčio metodikos, kurioje jautrumo ir neapibrėžtumų analizės dėka tiksliau nusakoma atsarga iki priimtimumo kriterijų, griežčiau apibrėžiamos parametrų kitimo ribos.

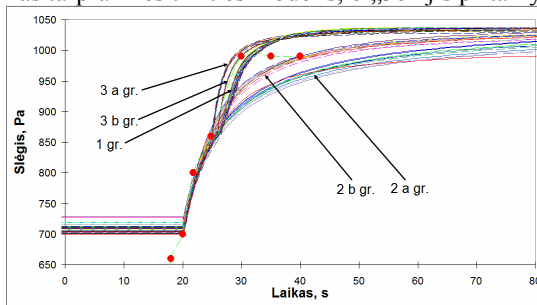
Eksperimento skaičiavimo rezultatų neapibrėžtumams įvertinti taikytas statistinis (įvesties duomenų neapibrėžtumų įvertinimo) metodas, paremtas GRS metodika [14] ir statistinių metodų programų paketu SUSA 3.5 [15]. Šis metodas taip pat taikomas nustatyti įvesties parametrų įtaką galutiniam rezultatui. Pirmiausia turi būti sudarytas neapibrėžtų parametrų sąrašas bei nurodytos parametrų kitimo ribos ir kitimų skirstinio dėsnis.

Neapibrėžtumo ir jautrumo analizė atlikta eksperimento, kada įtekančio vandens temperatūra tokia kaip vakuuminio indo, RELAP5 skaičiavimo rezultatams. RELAP5 programų paketui sukurto eksperimento modelyje termofiziniai ir modelio parametrai buvo keičiami nustatytose ribose. Analizei naudojami neapibrėžti: a) pradiniai, termofiziniai parametrai (vandens ir vakuuminio indo sienelių temperatūra, slėgis vakuuiniame inde, hidrauliniai nuostoliai, įpurškiamo vandens srautas), b) vamzdžio tūrio modeliavimo modeliai (šilumos pernešimo srauto nustatymo modelis, vandens kiekio kitimo mišinyje nustatymo modelis, vandens suspaudimo modelis, vertikali stratifikacijos modelis, tarpfazinė trintis, paviršiaus šiurkštumo modelis, pusiausvyriniai ar nepusiausvyriniai skaičiavimai) ir c) vamzdžio jungčių modeliavimo modeliai (modifikuotos sąlygos energijos lygtyje, priešpriešinio srauto apribojimai, kritinio srauto modelis, skerspjūvio ploto pasikeitimo sąlygos, homogeninis ar heterogeninis skaičiavimas, momentinio srauto pasirinkimas). Pradinių termofizinių parametrų nustatytos kitimo ribos $\pm 3\%$ ir pritaikytas normalinis pasiskirstymo dėsnis. Vamzdžio

tūrio ir jungčių modelius modeliuojant galima pasirinkti arba jų atsisakyti, jiems pritaikytas diskretus pasiskirstymas – reikšmės gali būti 0 arba 1. Daroma prielaida, kad visi neapibrėžti parametrai yra vienas nuo kito nepriklausomi.

Įvesties parametrų rinkinių skaičiaus ir norimo tikimybinio patikimumo lygio ryšys nusakomas Wilkso [16] formule. Šiuo atveju neapibrėžtumo analizė atlikta naudojant dvipusę tolerancijos ribą su 0,95 tikimybe ir 0,95 pasikliautinumo riba. Tokiu atveju pagal Wilkso formulę būtų užtekę 93 įvesties parametrų rinkinių, tačiau naudojant SUSIA programų paketą sudaryta 100 įvesties parametrų rinkinių. Kiekvienam rinkiniui sudarytas RELAP5 programų paketo įvadinis failas ir atlikti skaičiavimai.

10 pav. pateikta slėgio kilimo vakuuiniame inde 100 skaičiavimų, atliktų RELAP5 programų paketu, rezultatų neapibrėžtumo analizė. Šiame paveiksle taškais pavaizduoti eksperimentų duomenys. Iš atliktos neapibrėžtumo analizės matyti, kad atsižvelgiant į kreivių pobūdį, galima išskirti 3 grupes. Pirmojoje grupėje visi skaičiavimai atlikti taikant homogeninį modelį. Antrojoje grupėje skaičiavimams naudojamas heterogeninis modelis. Antrąją grupę galima suskirstyti į du pogrupius: „2a“ atliekami pusiausvyriniai skaičiavimai ir „2b“ nepusiausvyriniai skaičiavimai. Trečiojoje grupėje skaičiavimai atlikti taikant heterogeninį modelį, atsisakius vandens kiekio kitimo mišinyje nustatymo modelio. „3a“ nebuvo taikomas tarpfazinės trinties modelis, o „3b“ jis pritaikytas.



10 pav. Slėgio kitimas vakuuiniame inde, 100 skaičiavimų rezultatai palyginti su eksperimentiniais duomenimis

Vertinant įvesties parametrų neapibrėžtumų įtaką skaičiavimo rezultatams (slėgio kitimui vakuuiniame inde), buvo pasirinktas Spirmeno reitingų koreliacijos metodas. Šiam metodui labai svarbus determinacijos koeficientas (R^2). Kuo šis koeficientas didesnis, tuo daugiau variacijų gali būti paaiškintos tiesiniu sąryšiu. Praktikoje, jei R^2 mažesnis nei 0,6, atlikta rezultatų jautrumo analizė bus netiksli (per didelis procentas netiesinių sąryšių). Determinacijos koeficientas skaičiavimuose prieš tiekiant vandenį į vakuuminį indą yra ~0,95 (prieš eksperimentą) ir ~ 0,9, eksperimento metu,

kai slėgis vakuuiniame inde nustoja didėti (praėjus ~50 s nuo vandens tiekimo į vakuuminį indą pradžios). Taigi, šiems skaičiavimo etapams jautrumo analizė gali būti atlikta. Tačiau pirmame skaičiavimo etape, prieš tiekiant vandeniui į vakuuminį indą, nebūtina atlikti jautrumo analizės. Šiame etape slėgis vakuuiniame inde nustatomas įvadinųjų parametų pagalba ir išlieka pastovus iki pat eksperimento pradžios. Todėl detaliau analizuojama parametų įtaka skaičiavimo rezultatams, kai eksperimento pabaigoje slėgis vakuuiniame inde nustoja didėti. Pagal Spirmeno reitingų koreliacijos koeficientus didžiausią poveikį skaičiavimo rezultatams turi: homogeninio ar heterogeninio skaičiavimo modelio pasirinkimas, pradinė vandens temperatūra ir hidraulinis pasipriešinimas vamzdyje kuriuo modeliuojamas vakuuminis indas. Parametų įtaka teigiama - padidinus pradinę vandens temperatūrą ir hidraulinį pasipriešinimą didėja slėgio vakuuiniame inde reikšmė.

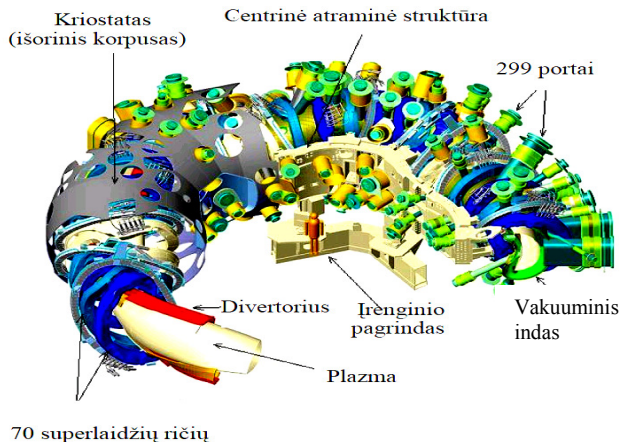
3.1.5. Rekomendacijos branduolių sintezės įrenginių modeliui sudaryti

- Modeliuojant slėgio kilimą vakuuiniame inde reikia įvertinti jame esančių nesikondensuojančių dujų kiekį.
- Sudarant branduolių sintezės įrenginio modelį vakuuminio indo segmentus reikia parinkti, kad būtų įvertinama priešpriešinis vandens ir vandens garo judėjimas bei garo stratifikacija.
- Tiriant vakuuinius indus, kuriuose yra kaitinami paviršiai, būtina atsižvelgti į šių paviršių plotą. Kaitinamo paviršiaus plotas turi didžiausią įtaką modeliuojant slėgio kilimą vakuuiniame inde.
- Eksperimentų skaičiavimo rezultatų jautrumo ir neapibrėžtumo analizė.
- Neapibrėžtumo analizė parodė, kad skaičiavimo rezultatai „apgobia“ eksperimentinius duomenis. Jautrumo analizė parodė, kad slėgio kilimo vakuuiniame inde skaičiavimo rezultatams didžiausią įtaką turi homogeninio ar heterogeninio skaičiavimo modelių pasirinkimas.
- Skaičiavimo rezultatai geriausiai atitinka eksperimentinius, kai modelyje skaičiavimams taikomi heterogeniniai modeliai, nėra taikomas vandens kiekio kitimo mišinyje nustatymo modelis ir taikomas tarpfazinės trinties modelis.
- Vakuuminio indo tūrį sudalyti į segmentus, kad bet kurio segmento tūris neviršytų trečdaliao viso modeliuojamo vakuuminio indo tūrio.

3.2. Wendelstein 7-X eksperimentinio įrenginio modelių sudarymas

Wendelstein 7-X (W7-X) – tai stelaratoriaus tipo branduolių sintezės įrenginys, šiuo metu statomas Greifswalde, Vokietijoje. W7-X projektu

siekiami ištirti ir parodyti stelaratoriaus panaudojimo branduolių sintezei perspektyvas. Pagrindinė W7-X eksperimento dalis yra sudėtinga ričių sistema, sudaryta iš 50 nepolinių, superlaidžių magnetinio lauko ričių. Šių ričių sistema W7-X įrenginyje turi išlaikyti stabilią plazmą apie 30 min. [17]. Šis eksperimentinis įrenginys yra labai sudėtingos geometrinės konstrukcijos (11 pav.).



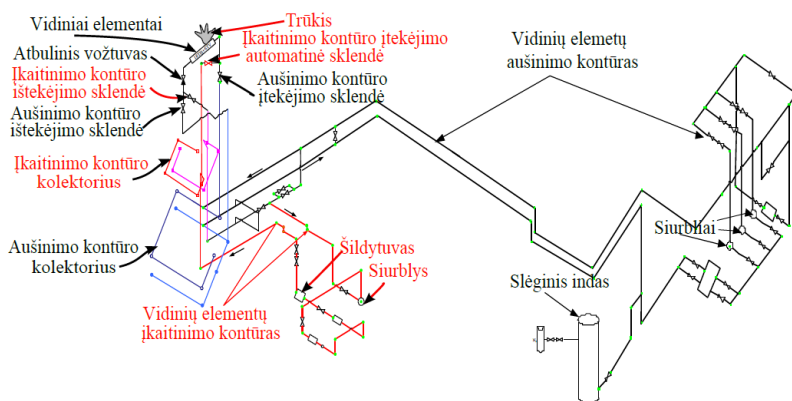
11 pav. W7-X įrenginio toro trimatė schema ir pagrindiniai elementai [17]

W7-X įrenginio vakuuminis indas, jame esantys vidiniai elementai ir jų aušinimo sistemos bei kiti elementai yra taip pat labai sudėtingos konfigūracijos. Siekiant RELAP5 programų paketu ištirti W7-X įrenginio vakuuiniame inde, vidinių elementų aušinimo sistemos ir apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemoje vykstančius tarpusavyje susijusius procesus, buvo sudaryti modeliai, kurie aprašyti šiame skyriuje.

3.2.1. W7-X vidinių elementų aušinimo sistemos modelis

W7-X įrenginio atskiri vidiniai elementai turi atskiras aušinimo sistemas. Disertacijoje nagrinėjami W7-X įrenginio vidiniai elementai, į kuriuos nukreipiama plazma. Šiems elementams tenka didžiausias šilumos srautas (iki 10 MW/m^2), todėl jų aušinimo sistema našesnė, palyginti su kitų W7-X vidinių elementų aušinimo sistemomis. Vidinių elementų aušinimo sistema susideda iš dviejų aušinimo kontūrų: aušinimo kontūro ir įkaitinimo kontūro. Aušinimo kontūras naudojamas aušinti elementus, kai įrenginys dirba normaliu eksploatacijos režimu (generuojama plazma vakuuminio indo viduje). Tačiau prieš užkuriant plazmą vakuuiniame inde, visi vidiniai elementai turi būti įkaitinami siekiant „išvalyti“ jų paviršius. Vidinių elementų paviršiuje esančios dulkės sudega ir vakuuminiu siurbliu

ištraukiamos iš vakuuminio indo. Būtent šiam plazmos paruošimo etapui naudojamas įkaitinimo kontūras. Įkaitinimo kontūre naudojamas elektrinis šildytuvas, siekiant įkaitinti jame esantį vandenį, kuris cirkuliaciniu siurbliu paskirstomas po visus vidinius elementus. Aušinimo kontūro paskirtis aušinti, todėl jame yra šilumokaičiai, aušinantys kontūre esantį vandenį, kuriam paskirstyti naudojami 3 cirkuliaciniai siurbliai. $0,9 \cdot 10^6 - 1,1 \cdot 10^6$ Pa slėgis aušinimo sistemoje palaikomas slėginiu indu, kurio tūris yra $2,5 \text{ m}^3$, aukštis $2,85 \text{ m}$ ir skersmuo $1,25 \text{ m}$. Slėgis šiame inde reguliuojamas naudojant azoto dujas. Pagal įrenginio kūrėjų pateiktus brėžinius ir kitus duomenis, vandens tūris visuose elementuose, į kuriuos nukrepiama plazma, yra $2,28 \text{ m}^3$. Vamzdžių, nuo šių elementų iki aušinimo sistemos kontūrų išsišakojimo, tūris $1,66 \text{ m}^3$. Aušinimo kontūro tūris $63,1 \text{ m}^3$, įkaitinimo – $1,06 \text{ m}^3$. Aušinimo sistemos schema pavaizduota 12 pav.



12 pav. W7-X įrenginio vidinių elementų, į kuriuos nukrepiama plazma, aušinimo sistemos schema

Visą W7-X įrenginio torą galima suskaidyti į 5 segmentus, kurie vienas nuo kito nesiskiria. Vienas toro segmentas turi 24 vidinius elementus, į kuriuos nukrepiama plazma. Iš jų 9 elementai yra toro segmento viršuje, 9 apačioje ir 6 per vidurį. Kuriant RELAP5 modelį, skirtą modeliuoti šių elementų aušinimo sistemą, 4 toro segmentai buvo modeliuojami supaprastintai, o vienas išsamiau – apatiniai, viršutiniai ir viduriniai elementai buvo modeliuojami atskirai.

Kiekvienas toro segmentas prijungtas prie aušinimo kontūro ir įkaitinimo kontūro naudojant vožtuvus, kurie yra kiekvieno segmento įėjime ir ištekėjime. Kiekvieno toro segmento įėjime, sujungtame su įkaitinimo kontūru, yra automatiniai vožtuvai. Jei vakuuminiame inde pakyla slėgis, automatiniai vožtuvai užsidaro, taip sumažindami vandens praradimą

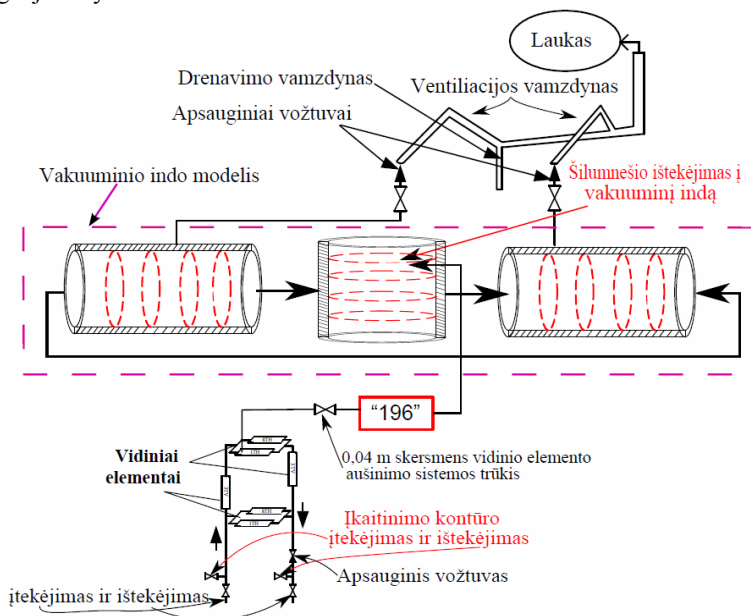
aušinimo sistemoje trūkio atveju. Tuo pačiu tai sumažina vandens išmetimą į vakuuminį indą avarijos atveju.

3.2.2. W7-X vakuuminio indo ir apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemos modelis

Skaičiavimo modelyje sudėtinga trimatė vakuuminio indo geometrija buvo supaprastinta (13 pav.). Vakuuminis indas sumodeliuotas trimis vamzdiniais elementais: du horizontalūs ir vienas vertikalus. Kiekvienas vamzdinis elementas sudalytas į 5 menamus modelio segmentus. Pagal 3.1.5 poskyryje pateiktas rekomendacijas, vertikaliame vamzdimiame elemente modeliuojamas vamzdžio trūkis. Horizontalaus vamzdinio elemento galas sujungtas su vertikalaus vamzdinio elemento viduriu, šio vidurys taip pat sujungtas su kitu horizontaliu vamzdimi elementu. Horizontalių vamzdžių galai tarpusavyje sujungti (13 pav.), kad imituoti uždara toro geometriją. Visų trijų vamzdynių elementų tūriai, aukščiai ir bendras ilgis atitinka W7-X įrenginio vakuuminio indo 108 m^3 tūrį, 2,016 m aukštį ir 34 m ilgį. W7-X įrenginio vakuuminio indo vidinio paviršiaus plotas $708,1 \text{ m}^2$, o sienelės storis atitinka 0,017 m [18]. Modeliuojant vakuuminį indą šie parametrai buvo įvertinti. Prie modeliuojamo vakuuminio indo prijungtas mažas ($0,026 \text{ m}^3$) vamzdelis, modeliuojantis vandens čiurkšlės sąveiką su karštais paviršiais. Slėgis abiejuose vamzdyniuose nustatytas mažiausias galimas, dėl RELAP5 programų paketo apribojimo – (10^3 Pa). Mažas horizontalus vamzdelis sujungtas su vidinių elementų aušinimo sistema, kurios modelis pateiktas 3.2.1 paragrafe. Šilumnešio praradimo atveju modelyje vanduo iš vidinių elementų aušinimo sistemos pirmiausia patenka į mažą vamzdį, vėliau iš jo į vertikalų vamzdį. Mažas vamzdis reikalingas, kad būtų tiksliau atspindėtos realios sąlygos vakuuminiame inde. Trūkus vidinių elementų aušinimo sistemos vamzdyniui, vanduo išpurškiamas į vakuuminio indo dalį, kurioje erdvė apribota aplinkui esančių vidinių paviršių.

Vakuuminio indo viršus prijungtas prie apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemos. Šią sistemą sudaro du apsauginiai membraniniai vožtuvai, ventiliacijos vamzdynas ir kondensato drenavimo vamzdynas. Apsauginiai vožtuvai įrengti siekiant apsaugoti vakuuminį indą nuo per didelio slėgio. Pirmasis apsauginis vožtuvas atsidaro esant $1 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ slėgio skirtumui tarp slėgio vakuuminio indo viduje ir ventiliacijos vamzdyne, antrasis – $2 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ slėgio skirtumui, susidariusiam vakuuminio indo viduje ir ventiliacijos vamzdyne. Abu vožtuvai sumontuoti 0,3 m vidinio skersmens ventiliacijos atšakose, kurios vėliau susijungia į vieną 0,5 m skersmens vamzdyną. Šis vamzdynas pro pastato stogą išvedamas į lauką. Ventiliacijos vamzdynas pagamintas iš 0,002 m storio nerūdijančio plieno skardos. Modelyje priimta, kad ventiliacijos vamzdyno sienelių pradinė temperatūra

293 K, o lauko temperatūra 303 K. Vamzdynas sujungtas su atmosfera, todėl slėgis jame yra atmosferinis.



13 pav. W7-X įrenginio vakuuminio indo ir apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemos schema

Šilumnešio praradimo atveju, kai W7-X įrenginys dirba įkaitinimo režimu, iš vidinių elementų aušinimo sistemos ištekėjęs vanduo patenka į vakuuminį indą. Vakuuiniame inde vanduo garuoja dėl staigaus garavimo efekto ir sąlyčio su karštais paviršiais. Slėgis vakuuiniame inde pakyla, ir plyšta apsauginis membraninis vožtuvas, pro kurį karštas garas patenka į ventiliacijos vamzdyną. Dalis garo šiame vamzdyne susikondensuoja sąveikaudamas su šaltesniais paviršiais ir nuteka į drenavimo vamzdyną.

4. W7-X ĮRENGINIO SKAITINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI

Šiame disertacijos skyriuje pristatyti W7-X eksperimentinio įrenginio kompleksinio (vidinių elementų aušinimo sistemoje, vakuuiniame inde ir apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemoje) tyrimo rezultatai šilumnešio praradimo atveju. Šilumnešio praradimo atvejis, kai W7-X įrenginys dirba „įkaitinimo“ režimu, yra vienas pavojingiausių. Į vakuuminį indą įtekėjęs vanduo staigiai garuoja dėl staigaus garavimo efekto ir sąveikos su karštais

paviršiais, slėgis vakuuiniame inde staigiai kyla. Didelis slėgis kelia grėsmę vakuuminio indo vientisumui.

Vakuuminio indo vidiniai elementai, į kuriuos nukreipiama plazma, normalios eksploatacijos metu kaitinami plazmos. Jiems aušinti skirta pajėgesnė aušinimo sistema, turinti didesnio skersmens vamzdžius, esančius vakuuiniame inde. Tie patys vamzdžiai naudojami ir „įkaitinimo“ režimo metu. Slėgio vakuuiniame inde kilimo greitis daugiausia priklauso nuo per trūkį ištekėjusio vandens kiekio ir apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemos efektyvumo. Todėl tirti šilumos praradimo atvejį buvo pasirinktas vidinio elemento aušinimo sistemos 0,04 m skersmens vamzdžio trūkis bei atliktas kompleksinis modeliavimas. Vakuuminio indo vidinių elementų aušinimo sistemos, vakuuminio indo ir apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemos modeliai buvo tarpusavyje sujungti ir sumodeliuoti pasirinktu RELAP5 programų paketu.

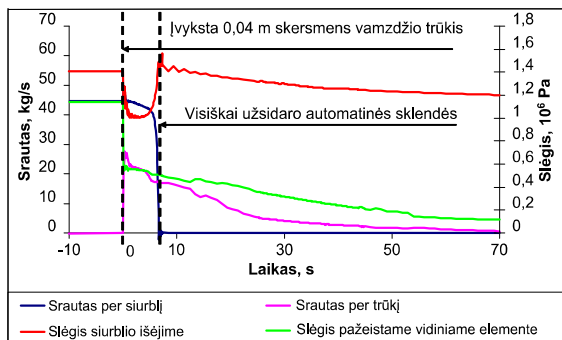
4.1. Termohidraulinių procesų vidinių elementų aušinimo sistemoje skaitinis tyrimas

Modeliuojant priimta, kad įrenginio paruošimo eksploatacijai – „įkaitinimo“ – metu įvyksta giljotininis vidinių elementų aušinimo sistemos vamzdžio trūkis. Giljotininio trūkio atveju vanduo laisvai išteka pro abu vamzdžio galus. Trūkis įvyksta laiko momentu $t = 0$ s. Imituojamas trūkis įvyksta per 0,01 s. Slėgis vakuuiniame inde kyla. Slėgiui pakilus iki 2000 Pa, duodamas signalas užverti automatines sklendes, esančias vidinių elementų aušinimo sistemos įtekėjime ir sustabdyti „įkaitinimo“ kontūro cirkuliacinį siurblių. Signalo užvėlinimo laikas 1,5 s. Automatinės sklendės užsiveria per 5 s. Taigi, slėgiui vakuuiniame inde pasiekus 2000 Pa, po 1,51 s išjungiamas cirkuliacinis siurblys, o po 7,5 s automatinės sklendės visiškai užsiveria.

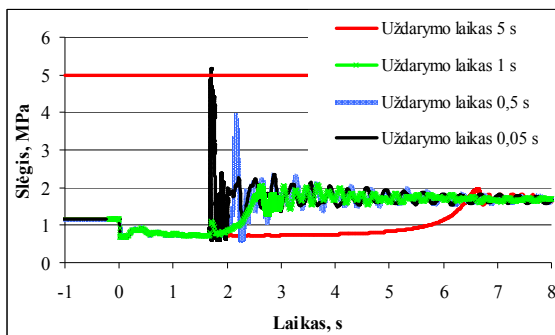
Srautas per trūkį ir „įkaitinimo“ kontūro cirkuliacinį siurblių pavaizduotas 14 pav. Tik pradėjus užverti automatines sklendes, srautas „įkaitinimo“ kontūre mažėja, o visiškai užsivėrus sklendėms, vanduo kontūre sustoja ir daugiau vandens netiekama į vidinius elementus. Užsivėrus automatinėms sklendėms srautas per trūkį šiek tiek sumažėja, bet vanduo išteka iš gretimų elementų, esančių tame pačiame toro segmente. Tai vyksta tol, kol slėgis trūkusiame vamzdyne sumažėja iki slėgio, esančio vakuuiniame inde.

Trūkus vidinių elementų aušinimo sistemos vamzdžiui, slėgis šioje sistemoje mažėja. Praėjus 1,14 s po trūkio, cirkuliacinis siurblys išjungiamas, tačiau dėl rotoriaus inercijos jis dar kurį laiką dirba. $t = 2$ s po trūkio, užveriamos automatinės sklendės. Užveriant sklendes ir iš inercijos dirbant siurbliui slėgis aušinimo sistemoje pradeda didėti (15 pav.). Visiškai užsivėrus sklendėms, siurblio išėjime gaunamas slėgio maksimumas, kuris

palaiptiesiems mažėja (kontūre esantis slėginis indas iš dalies kompensuoja vandens praradimą ir stabdo slėgio mažėjimą). Pažeistame vidiniame elemente slėgis nuolat krenta (15 pav.). Užvėrus automatinės sklendės, visi vidiniai elementai izoliuojami, todėl vanduo išteka tik iš pažeisto elemento viename toro segmente ir slėgis krenta iki slėgio, esančio vakuuminiame inde.



14 pav. Srautas per trūkį ir „įkaitinimo“ kontūro cirkuliacinį siurbį. Slėgis vidinių elementų aušinimo kontūre



15 pav. Slėgio kitimas laike tūryje, esančiame prie pat automatinės sklendės

W7-X įrenginio vidinių elementų aušinimo sistemoje šilumnešio praradimo atveju gali susidaryti hidraulinis smūgis. Susidaręs hidraulinis smūgis gali pažeisti aušinimo sistemos elementus ir sąlygoti šilumnešio įtekėjimą į vakuuminį indą ar W7-X įrenginio patalpas. Aušinimo sistemos vamzdyne staiga pasikeitus vandens tekėjimo greičiui arba tekėjimo kryptiai, slėgis sistemos atskirose vietose gali staiga padidėti.

Hidraulinis smūgis priklauso nuo kelių parametų (sklendžių užvėrimo laiko, sklendžių charakteristikų, vamzdžio sienelių šiurkštumo, srauto energijos nuostolių koeficiento ir t. t.) [19]. Taikant sukurtą vidinių elementų

aušinimo sistemos modelį, RELAP5 programų paketu atlikta hidraulinio smūgio analizė. Tirta skaičiavimo žingsnio, kontrolinio tūrio ilgio ir sklendžių užvėrimo laiko įtaka slėgio kontroliniame tūryje skaičiavimo rezultatams. Kiti parametrai (vamzdžių šurkštumas ir srauto energijos nuostolių koeficientas) pastovūs.

Atlikus išsamią skaičiavimo žingsnio ir nagrinėjamo segmento (modelio menamo sudalijimo į segmentus) ilgio analizę (pateiktą disertacijoje) nustatyta, kad norint gauti tikslius slėgio padidėjimo skaičiavimo rezultatus, skaičiavimo laiko žingsnio ir Kuranto laiko žingsnio santykis turi būti mažesnis nei 0,2 ir nagrinėjamo segmento (menamo sudalijimo) ilgis neviršyti 1 m.

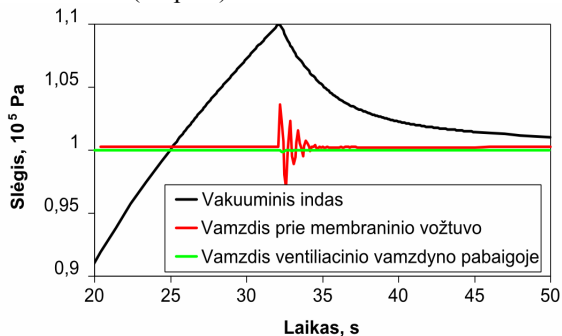
Ištirta sklendžių užvėrimo laiko įtaka slėgio skaičiavimo rezultatams. W7-X įrenginio projektuotojai automatinės „įkaitinimo“ kontūro sklendes planuoja užverti per 5 s. Kuo greičiau bus užveriamos šios sklendės, tuo, šilumnešio praradimo atveju, mažiau vandens pateks į vakuuminį indą. Tačiau kita vertus, kuo staigiau užverinama automatinė sklendė, tuo susidaro didesnis slėgis tūryje prieš pat šią sklendę. Buvo tiriamas 5 s, 1 s, 0,5 s ir 0,05 s automatinių sklendžių užvėrimo laikas. Tyrimų rezultatai parodyti 15 pav. Aušinimo sistemos vamzdynas gali atlaikyti iki $5 \cdot 10^6$ Pa slėgį, o užvėrus sklendę per 0,05 s, gaunami didesni slėgio pikai. Automatinis vožtuvas rekomenduojama uždaryti per 1 s, nes tuo atveju nesusidaro didelių slėgio pikų, o ištekančio iš aušinimo sistemos vandens kiekis panašus, palyginus su skaičiavimais, kai sklendės užveriamos per 0,5 s.

4.2. Procesų, vykstančių vakuuminiame inde ir apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemoje, tyrimas

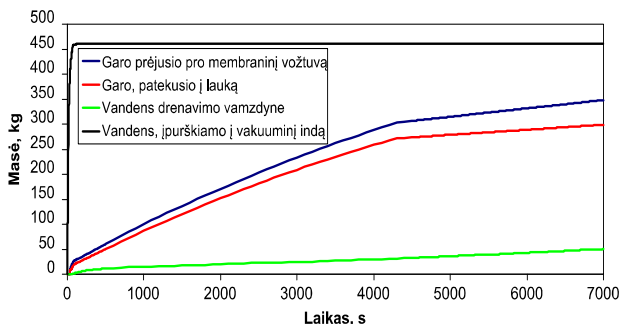
Nagrinėjant ankstesniuose skyriuose pateiktą šilumnešio praradimo atvejį, kai W7-X įrenginys dirba „įkaitinimo“ režimu, vakuuminiame inde ir apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemoje susiduriame su staigaus vandens išgaravimo, garavimo (dėl sąlyčio su karštais paviršiais) ir kondensacijos procesais. Įvykus vidinių elementų aušinimo sistemos vamzdžio trūkiui, $1 \cdot 10^6$ Pa slėgio ir 433 K temperatūros vanduo patenka į vakuuminį indą ir staigiai garuoja. Staigaus garavimo metu sunaudojama energija, kuri paimama iš vakuuminio indo aplinkos. Todėl vakuuminio indo aplinkos temperatūra pirmąją trūkio sekundę sumažėja iki 290 K (soties temperatūra prie ~ 1700 Pa). Tačiau vėliau temperatūra vėl didėja atitinkama sotinio temperatūra, kuri kinta dėl slėgio didėjimo vakuuminiame inde.

Neišgaravęs vanduo krenta ant įkaitusio vakuuminio indo paviršiaus ir garuoja. Slėgis vakuuminiame inde kyla ir viršijus $1,1 \cdot 10^5$ Pa ribą (32 s po giljotininio vidinių elementų aušinimo sistemos trūkio). Tuomet staigiai atsirado pirmasis apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemos vožtuvas ir vakuuminiame inde susidaręs garas išleidžiamas į lauką. Slėgis

vakuuminiame inde daugiau nebedidėja, o sumažėja iki atmosferinio slėgio (16 pav.). Šis rezultatas rodo, ar teisingai suprojektuoti membraninis apsauginis vožtuvas ir ventiliacinis vamzdynas, kurie laiku sustabdo slėgio kilimą vakuuminiame inde. Tik atsidarius apsaugos vožtuvui, slėgis ventiliacijos vamzdyne šiek tiek pakyla (maksimali reikšmė $1,04 \cdot 10^5$ Pa) ir gaunami slėgio svyravimai, bet praėjus 3 s slėgis susilygina su jo reikšme prieš vožtuvui atsidarant (16 pav.).



16 pav. Slėgio vakuuminiame inde ir apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemoje priklausomumas nuo laiko



17 pav. Vandens, esančio vakuuminiame inde, masės balansas

Atsidarius apsauginiam vožtuvui iš vakuuminio indo į ventiliacijos vamzdyną iškėjęs garas kontaktuoja su šaltesnėmis ventiliacijos vamzdyno sienelėmis. Ventiliacijos vamzdyno sienelės staigiai įkaista iki į jį patekusio garo temperatūros. Ventiliacijos vamzdyne taip pat vyksta kondensacija. Garo kondensatas nuteka ventiliacijos vamzdyne ir patenka į drenavimo vamzdį.

17 pav. pateiktas vandens ištekėjusio iš aušinimo sistemos į vakuuminį indą, o iš jo į drenavimo vamzdyną ir į lauką, masės balansas. Vandens ištekėjimas iš pažeisto vidinio elemento viename toro segmente į vakuuminį

indą trunka ~100 s. Per šį laiką į vakuuminį indą patenka ~460 kg vandens ir garo mišinio. Atsidarius apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemos vožtuvui, garas pro šį vožtuvą teka į ventiliacijos vamzdyną, iš jo į lauką. Dalis pratekėjusio garo susikondensuoja ir nuteka į drenavimo vamzdyną. Kadangi vakuuminio indo sienelės yra įkaitusios, į vakuuminį indą patekęs vanduo nuolat garuoja. Garo, praėjusio per apsauginį vožtuvą ir patekusio į lauką, masė nuolat didėja. Nuolat didėja masė ir vandens, susikondensavusio drenavimo vamzdyne. Šiame masės balanse yra nedidelis įtekėjusios ir ištekėjusios masės neatitikimas. Šis neatitikimas egzistuoja, nes nedidelė rūko pavidalo vandens dalis lieka vakuuminiame inde.

IŠVADOS

Termohidrauliniams procesams, vykstantiems branduolių sintezės įrenginių vidinių elementų aušinimo sistemose ir vakuuminiuose induose šilumnešio praradimo atveju, modeliuoti pasirinktas RELAP5 programų paketas ir sukurti skaitiniai modeliai. Skaitinių modelių, atkuriančių vykstančius procesus vakuuminiame inde, validacijai panaudoti vandens įtekėjimo į vakuuminį indą eksperimentų duomenys. Atlikta skaičiavimo rezultatų jautrumo ir neapibrėžtumo analizė. Taikant vandens įtekėjimo į vakuuminį indą eksperimentų modeliavimuose įgytą patirtį, sukurtas W7-X eksperimentinio įrenginio skaitinis modelis. Sprendžiant kompleksinį uždavinį, parodyta: slėgio didėjimo sparta vakuuminiame inde priklauso nuo ištekancio iš aušinimo sistemos vandens kiekio, procesų (garavimo dėl slėgio skirtumų ir sąveikos su karštais paviršiais) vykstančių vakuuminiame inde ir apsaugos nuo slėgio padidėjimo sistemoje vykstančios garo kondensacijos. Šie atlikti tyrimai leido padaryti šias išvadas:

1. RELAP5 programų paketu modeliuojant slėgio kitimą vakuuminiame inde reikia atsižvelgti į vakuuminio indo realias pradines sąlygas. Jei vakuuminiame inde pradinis slėgis mažesnis nei 700 Pa, tai modeliuojant reikia priimti, kad vakuuminiame inde yra garas. Jei vakuuminiame inde pradinis slėgis didesnis nei 700 Pa – modelyje priimamos nesikondensuojančios dujos.
2. Modeliuojant branduolių sintezės įrenginio vakuuminį indą reikia vertinti galimą priešpriešinį vandens ir garo judėjimą vertikalia kryptimi bei garo stratifikaciją šilumnešio praradimo atveju. Modeliuojamą vakuuminį indą rekomenduojama sudalyti į atskirus segmentus. Vieno segmento ir viso vakuuminio indo tūrio santykis turi neviršyti 1/3.
3. Kai į vakuuminį indą įtekančio šilumnešio temperatūra yra lygi indo struktūrų temperatūrai, pagrindinis veiksnys, įtakojantis slėgio

kitimą inde, yra vandens staigus garavimas. Slėgis didėja kol pasiekiamas soties temperatūra inde.

4. Tiriant vakuuminius indus, kuriuose yra aukštesnės temperatūros kaitinami paviršiai, pagrindinis veiksnys, įtakojantis slėgio kitimą inde, yra vandens garavimas dėl sąveikos su karštais paviršiais, vandens staigus garavimas aktualus tik pirmąją sekundę šilumnešiuviui įtekėjus į vakuuminį indą. Todėl, sudarant modelį, būtina atsižvelgti į vandens sąlyčio su karštais paviršiais sąlygas ir šių paviršių plotą.
5. Dėl įvairių termohidraulinių procesų įvairialypiškumo ir glaudžių jų sąryšių, vandens srauto, patenkančio į vakuuminį indą, modeliavimo rezultatai, taikant heterogeninį modelį, vertinant tarpfazinę trintį bei atsisakant vandens kiekio kitimo mišinyje nustatymo modelio, tiksliau atitinka eksperimentinius duomenis.
6. Hidraulinio smūgio branduolių sintezės įrenginių vidinių komponentų aušinimo sistemose dinamika ir skaičiavimo laiko žingsnio ir Kuranto laiko žingsnio santykis mažesnis nei 0,2 ir modeliuojamos vamzdyno menamo segmento ilgis nedidesnis kaip 1 m. Tuo remiantis nustatyta, kad siekiant išvengti hidraulinio smūgio, dėl staigaus vožtuvo užsidarymo W7-X aušinimo sistemoje, šio vožtuvo uždarymo laikas turi būti 1 s.

LITERATŪRA

1. Mertens, V.; Haas, G.; Rohde, V. ASDEX Upgrade Team, Hydrogen Gas Balance in ASDEX Upgrade WITH DIV IIB. *30th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Physics*, St. Petersburg, 7-11 July 2003, ECA vol. 27A, p. 1-4.
2. Arnoux, G.; Bazylev, B.; Lehnen, M.; et al. Heat load measurements on the JET first wall during disruptions. *Journal of Nuclear Materials*, 2011, p. 817–820.
3. Ioki, K.; Daenner, W.; Koizumi, K.; Krylov, V.; Cardella, A.; Elio, F. ITER-FEAT Vacuum Vessel and Blanket Design Features and Implications for the R&D Programme. IAEA, 2001.
4. Bosch, H. S.; behalf of the W7-X team, WENDELSTEIN 7-X Overview and Status of Construction. *Presentation at PPPL*, Princeton, New Jersey, September 23 2005.
5. Ogawa, M.; Kunugi, T. Thermohydraulic experiments on a water jet into vacuum during ingress of coolant event in a fusion experiment reactor. *Fusion Engineering and Design*, 1995, vol. 29, p. 233-237.
6. Takase, K.; et al. A fundamental study of a water jet injected into a vacuum vessel of fusion reactor under the ingress of coolant event. *Fusion Technology*, 1996, vol. 30, p. 1453–1458.
7. Kunugi, T.; et al. Thermofluid experiments on ingress of coolant event. *Fusion Engineering and Design*, 1998, vol. 42, p. 67-72.
8. Takase, K.; et al. Three-dimensional analysis of water-vapor void fraction in a fusion experimental reactor under water ingress. *Fusion Engineering and Design*, 2002, vol. 63, p. 429-436.
9. Kurihara, R.; et al. Analysis and experimental results on ingress of coolant event in vacuum vessel. *Fusion Engineering and Design*, 1998, vol. 42, p. 61-66.
10. Hasan, M. Z.; et al. An experimental study of ingress-of-coolant accident in fusion reactors. *Fusion Engineering and Design*, 1998, vol. 42, p. 73-81.
11. Kaliatka, A.; Uspuras, E.; Vaisnoras, M. Benchmarking analysis of water hammer effects using RELAP5 code and development of RBMK-1500 reactor main circulation circuit model. *Annals of Nuclear Energy*, ISSN 0306-4549, 2007, vol. 34, p. 1-12.
12. EFDA. A roadmap to the realisation of fusion energy. *Fusion electricity*, November, 2012.

13. Porfiri, M. T.; Caruso, G.; Urbonavičius, E. Review of modelling codes and identifications of development needs. Report for Task Agreement WP13-SYS-04-T05, 2013.
14. Glaeser, H. G. Uncertainty Evaluation of Thermal-Hydraulic Code Results. *Int. Meeting on "Best-Estimate" Methods in Nuclear Installation Safety Analysis (BE-2000)*, Washington DC, USA, 2000.
15. Kloos, M.; Hofer, E. SUSA Version 3.2. User's Guide and Tutorial, GRS, Garching, 1999.
16. Wilks, S. S. Statistical prediction with special reference to the problem of tolerance limits. *Ann. Math. Statist.*, 1942, vol. 13, p. 400-409.
17. Bosch, H.-S.; Dinklage, A.; Klinger, T.; Wolf, R.; the W7-X Team. Contributions to Plasma Physics, 2010.
18. Topilski, L. Consequences of the W7-X in-vessel coolant pipe break at baking conditions, 1-NBF-T0015, Max-Planck-Institut für Plasma Physik.
19. Kaliatka, A.; Uspuras, E.; Vaisnoras, M. Benchmarking analysis of water hammer effects using RELAP5 code and development of RBMK-1500 reactor main circulation circuit model. *Annals of Nuclear Energy*, ISSN 0306-4549, 2007, vol. 34, p. 1-12.

DISERTACIJOS TEMA PASKELBTŲ DARBŲ SĄRAŠAS

Moksliniai straipsniai, esantys „Thomson Reuters“ duomenų bazėje „Web of Science Core Collection“ referuojamuose leidiniuose

1. Kaliatka, T.; Kaliatka, A.; Kačegavičius, T.; Naujoks, D. Analysis of the processes in the target cooling system of the W7-X fusion experiment. *Kerntechnik*, ISSN 0932-3902, 2010, vol. 75, No. 5, p. 255-262.
2. Kaliatka, A.; Uspuras, E.; Kaliatka, T. Pressure surge in Wendelstein 7-X experimental stellarator facility. *Kerntechnik*, ISSN 0932-3902, 2012, vol. 77, no. 2, p. 134-140.
3. Kaliatka, T.; Povilaitis, M.; Kaliatka, A.; Urbonavičius, E. Simulation of targets feeding pipe rupture in Wendelstein 7-X facility using RELAP5 and COCOSYS codes. *Journal of Fusion Energy*, ISSN 0164-0313, 2012, vol. 31, no. 5, p. 506-517.
4. Uspuras, E.; Kaliatka, A.; Kaliatka, T. Analysis of the accident with the coolant discharge into the plasma vessel of the W7-X fusion experimental facility. *Fusion Engineering and Design*, ISSN 0920-3796, 2013, vol. 88, no. 5, p. 304-310

5. Bosch, H. S.; Wolf, R. C.; Andreeva, T.; et al. including Kaliatka, T. Technical challenges in the construction of steady-state stellarator Wendelstein 7-X. *Nuclear Fusion*, ISSN 0029-5515, 2013, vol. 53, no. 12, p. 1-16.

Pranešimai, paskelbti tarptautinių konferencijų medžiagoje

1. Kaliatka, A.; Ušpuras, E.; Kaliatka, T. Analysis of thermal hydraulic processes in Wendelstein 7-X experimental nuclear fusion facility. *Proceedings of International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 2011)*, Nice, France, May 2-5, 2011. France, 2011, p. 1996-2004.
2. Kaliatka, T.; Ušpuras, E.; Kaliatka, A. Analysis of processes in vacuum vessel during ingress of coolant event. *The 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-15)*, Pisa, Italy, May 12-17, 2013, p.1-8.

Padėka

Disertacinio darbo autorius dėkoja moksliniam vadovui prof. habil. dr. Eugenijui Ušpurui, visiems asmenims, padėjusiems rengti šį darbą, visiems Lietuvos energetikos instituto, Branduolinių įrenginių saugos laboratorijos kolegoms už naudingus patarimus ir paramą, disertacijos rengimo metu publikuotų straipsnių bendraautoriams, šeimai, supratusiems ir palaikiusiems rengiant disertaciją.

INFORMACIJA APIE AUTORIŲ

Tadas Kaliatka gimė 1985 m. balandžio 29 d. Kaune, Lietuvoje. 2003 m. baigė Kauno Mato Šalčiaus vidurinę mokyklą. 2003–2007 m. studijavo Kauno technologijos universitete, Informatikos fakultete, ir įgijo informacinių technologijų bakalauro diplomą. 2007–2009 m. studijavo Kauno technologijos universitete, Mechanikos ir mechatronikos fakultete, ir įgijo termoinžinerijos magistro diplomą. 2009–2013 m. mokėsi technologijos mokslų krypties, energetikos ir termoinžinerijos doktorantūroje, Lietuvos energetikos institute. T. Kaliatka dirba Lietuvos energetikos institute, Branduolinių įrenginių saugos laboratorijoje, nuo 2006 m.

Telefono nr. +370 37 401911; El. paštas Tadas.Kaliatka@lei.lt

SUMMARY

Energy received from the nuclear fusion reaction is one of the most promising options for generating large amounts of carbon-free energy in the future. However, in order to achieve efficient use of energy from the fusion

reaction, a number of fusion physics and engineering issues should be solved. The key issue is how to maintain a stable high temperature ($T > 10^8$ K) plasma in the vacuum vessel for a long time. In addition to all these physical and engineering issues, fusion devices should be safe for humans and the surrounding environment.

Several experimental fusion devices around the world are already constructed or under construction. These experimental devices are designed to study the processes in fusion. The processes in cooling system of in-vessel components and vacuum vessel of fusion devices are not widely studied. Therefore, systematic and detailed experimental and numerical studies are important and relevant.

In nuclear fusion devices, the ingress of water into the vacuum vessel represents one of the critical failure events, since primary and secondary steam production leads to a rapid increase of the inner pressure in the vacuum vessel. If the vacuum vessel could not withstand high pressurization, the steam containing activated dust will be transferred from the vacuum vessel to the environment. Therefore, it is important to understand thermo hydraulic processes in the vacuum vessel and cooling system of in-vessel components during the loss of cooling accident.

In order to study thermo hydraulic processes in the cooling systems of in-vessel components and vacuum vessels of fusion devices the RELAP5 code was selected and numerical models were developed. In order to validate the selected code, the processes in the vacuum vessels of the “Ingress of Coolant Event” experimental facilities were modelled and calculation results were compared with the experimental data. The uncertainty and sensitivity analysis for these calculation results were also provided. All these studies reveal that with some limitations RELAP5 code could be used for modelling the processes in vacuum vessels of fusion devices. The recommendations for modelling fusion devices were presented.

Using the experience gained from the modelling of “Ingress of Coolant Event” experiments, a numerical model of W7-X experimental device was developed. The complex analysis of the processes (in the cooling system of in-vessel components, vacuum vessel and pressure increase protection system) was performed in the case of loss of coolant. Theoretically, loss of coolant event could lead to a situation when a water hammer can occur. Thus, in this work, the recommendations for the water hammer analysis were given and the occurrence of water hammer in W7-X facility was analyzed.

UDK 621.039.6(043.3)

SL344. 2014-10-20, 2,50 leidyb. apsk. 1. Tiražas 60 egz. Užsakymas 504.
Išleido leidykla „Technologija“, studentų g. 54, 51424 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas