

Stratifikuotos atmosferos susidarymo atominių elektrinių apsauginiuose kiautuose modeliavimas

Mantas Povilaitis,

Egidijus Urbonavičius,

Sigitas Rimkevičius

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

Stratifikuotos atmosferos susidarymas atominių elektrinių apsauginiuose kiautuose yra aukšto prioriteto uždavinys sprendžiant atominių elektrinių saugos klausimus. Šis uždavinys yra sprendžiamas vykdant eksperimentus ir atliekant skaitinius šių eksperimentų tyrimus. Šio uždavinio sprendimas suvidurkintų kintamųjų programų paketais yra komplikotas dėl šiuose programų paketuose esančių apribojimų, į kuriuos būtina atsižvelgti sudarant skaitinius modelius.

M5 eksperimentas, vykdytas eksperimentų stende MISTRA, buvo skirtas stratifikuotos atmosferos sudarymui. Šio eksperimento tyrimas atliktas suvidurkintų kintamųjų programų paketu COCOSYS.

Šiame darbe pristatomi keli skaitinio modelio sudarymo variantai, leidžiantys aprašyti stratifikuotos atmosferos susidarymą suvidurkintų kintamųjų programų paketais. Gauti skaičiavimų rezultatai yra palyginti su matavimų rezultatais. Gauti rezultatai atskleidžia, kad siekiant sumodeliuoti stratifikuotos atmosferos susidarymą apsauginiame kiaute nepakanka paprastai numatyti įtekančio garo srautą ir būtina atsižvelgti į vykstančių procesų ypatumus. Sudarant skaičiavimo modelį rekomenduojama pasirinkti detalesnę vertikalų padalijimą ir apibūdinti specialias zonas, skirtas įtekančio garo čiurkšlės sklidimui aprašyti.

Raktažodžiai: dujų maišymasis, stratifikacija, modeliavimas

1. ĮVADAS

Atominių elektrinių apsauginis kiautas (angl. *containment / confinement*) yra paskutinis barjeras, ribojantis radioaktyviųjų medžiagų patekimą į aplinką potencialios avarijos atveju. Išsamesnės informacijos apie apsauginių kiautų tipus ir juose vykstančius procesus galima rasti [1]. Apsauginio kiaučio vientisumui pavojus gali iškilti dėl jame besikaupiančių nesikondensuojančių dujų (vandenilio, anglies monoksido ir kt.), kurios sunkiosios avarijos atveju susidaro branduoliniame reaktoriuje arba dėl išsilydžiusio kuro sąveikos su betonu. Šiuo metu vienas neatsakytų klausimų – ar vandenilis susikaups tam tikrose apsauginio kiaučio zonose ir ten bus galimas vandenilio degimas, ar vandenilis bus pasiskirstęs tolygiai visame apsauginiame kiaute. Jeigu vandenilis būtų tolygiai pasiskirstęs visame apsauginiame kiaute, tai daugiau vandenilio būtų galima sukaupti be apsauginio kiaučio pažeidimo rizikos.

Tarptautiniame projekte, skirtame dujų maišymosi procesų tyrimams, buvo vykdomi eksperimentai TOSQAN, MIS-

TRA ir THAI eksperimentų stenduose ir kartu buvo atliekami skaičiavimai įvairiais programų paketais [2]. Šiuo projektu buvo siekiama ištirti dujų maišymąsi lemiančius procesus ir įvertinti programų paketų galimybes šiems procesams modeliuoti. Projekto ataskaitoje [2] teigiama, kad suvidurkintų programų paketai išlieka pagrindiniu įrankiu bendrai termodinaminei apsauginių kiaučių analizei atlikti, nes jiems reikia ženkliai mažiau kompiuterinių išteklių, jais galima atlikti parametrinę analizę ir jie yra tinkami 2-ojo lygio tikimybinei analizei. Šių programų paketų taikymas yra ribotas dėl supaprastinto tėkmių modeliavimo. Tačiau pripažįstama, kad patyręs programų paketo vartotojas gali apeiti šiuos ribojimus atsižvelgdamas į laukiamus svarbius reiškinius. Apibendrinant projekto rezultatus yra rekomenduojama parengti bendras modelio sudarymo rekomendacijas, kuriomis būtų galima vadovautis sukuriant eksperimentinių stendų ir atominių elektrinių apsauginių kiaučių skaitinius modelius. Pagrindiniai reiškiniai, į kuriuos būtina atkreipti dėmesį toliau tobulinant programų paketus, yra šie: garo kondensacija, dujų stratifikacija ir čiurkšlės modeliavimas [2]. Dujų stratifikacijos tyrimai

jau ir anksčiau buvo tarp aukšto prioriteto uždavinių sprendžiant atominių elektrinių saugos klausimus [3].

Analizuojant branduolinių jėgainių apsauginiuose kiautuose vykstančius termodinaminius procesus dažniausiai yra naudojami suvidurkintų kintamųjų programų paketai, pavyzdžiui, ASTEC, COCOSYS, MELCOR. Trimačiai programų paketai (CFX, STAR-CD ir kt.) dėl reikalingų didelių kompiuterinių išteklių ir dėl problemų modeliuoti kai kuriuos svarbius procesus yra labai retai naudojami apsauginių kiautų problemoms spręsti. Literatūroje galima rasti GASFLOW programų paketo, turinčio 3D galimybes, taikymo realiems apsauginių kiautų uždaviniams spręsti pavyzdžių [4].

Dujų maišymosi branduolinių jėgainių apsauginiuose kiautuose procesai yra nagrinėti ir tarptautiniame projekte SARNET (*Severe Accident Research network*) vykdant eksperimentus TOSQAN ir MISTRA eksperimentų stenduose bei lygiagrečiai atliekant šių eksperimentų modeliavimą. Sudarant MISTRA stendo skaitinį modelį, skirtą MASPn eksperimentų modeliavimui, buvo susidurta su atmosferos stratifikacijos sąlygų apibrėžimo problema. Todėl buvo nutarta išsamiai sumodeliuoti ir prieš MASPn eksperimentus vykdytą M5 eksperimentą, kurio tikslas – sukurti stratifikuotą atmosferą.

Šiame straipsnyje pristatomų skaičiavimų tikslas – įvertinti suvidurkintų kintamųjų programų paketo COCOSYS galimybes modeliuoti stratifikuotos atmosferos susidarymą ir pateikti skaitinio modelio sukūrimo rekomendacijas. Straipsnyje yra pristatomas COCOSYS programų pakete naudojamas dujų tėkmės modelis, MISTRA eksperimentų stendas ir jo skaitinis modelis, M5 eksperimento sąlygos ir gauti rezultatai.

2. EKSPERIMENTAS

Eksperimentas M5 [5] buvo atliktas eksperimentų stende MISTRA vykdant lašelį sąveikos su atmosfera tyrimų programą. Šio ir kitų minėtos programos eksperimentų modeliavimas buvo vykdomas tarptautinio kompetencijos tinklo SARNET (2005–2008 m.) projekto darbų pakete „Atmosferos maišymasis apsauginiame kiaute“. M5 eksperimento tikslas buvo suformuoti stratifikuotą stendo atmosferą.

MISTRA eksperimentinis stendas yra Prancūzijos Atominės energijos komisariato (CEA) Saclay centre. Tai vertikalus nerūdijančio plieno cilindras su suapvalinta apačia (1 pav.), kurio tūris yra $\sim 97,4 \text{ m}^3$. Stendo vidinis skersmuo yra 4,25 m, aukštis – 7,38 m. Stendas yra padengtas 20 cm storio šilumos izoliacija (akmens vata).

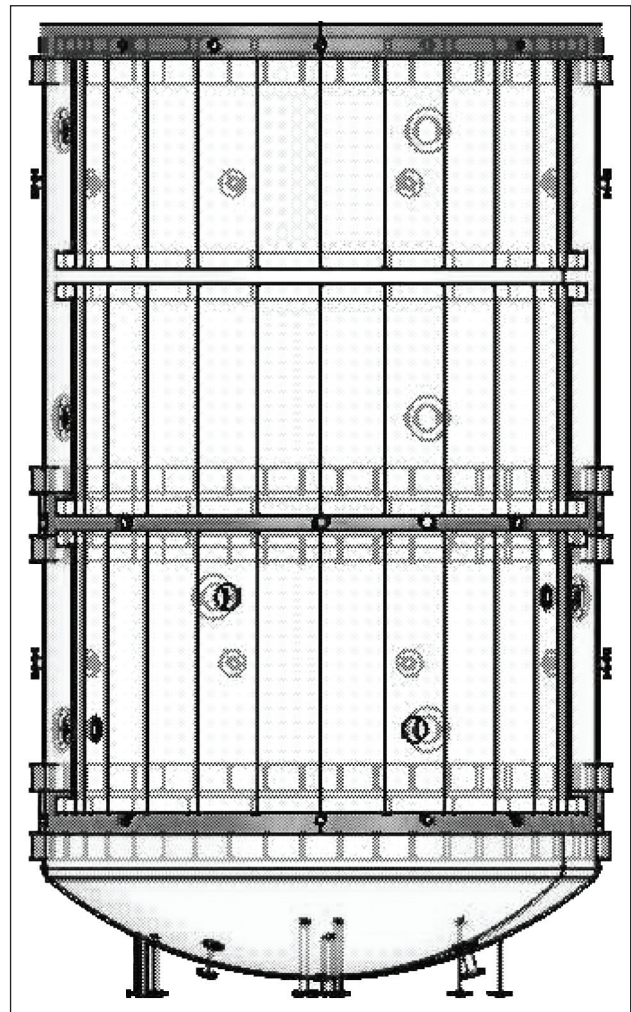
Stendo viduje yra patalpinti trys reguliuojamų temperatūrų cilindrai, vadinami kondensatoriais, nors jie gali būti naudojami ir kaip kaitintuvai. Kondensatoriai yra išdėstyti vienas virš kito, jų centro ašis sutampa su stendo ašimi, o spindulys yra 3,794 m. Kiekvienas kondensatorius turi atskirą temperatūros reguliavimo kontūrą. Kondensatorių sienelės, atsuktos į stendo sienelės, yra padengtos šilumos izoliacija.

Stendas turi du garo įpurškimo kontūrus. Pagrindinis kontūras yra vadinamas „antrąja linija“, jis turi vieną aukštyn nukreiptą galvutę, kuri yra radialiniame stendo centre, jo

apačioje. Papildomas kontūras vadinamas „trečiaja linija“, jis turi keturias galvutes, nukreiptas į erdvę tarp kondensatorių ir stendo sienelių, ir keturias – nukreiptas link stendo dugno. Visos aštuonios galvutės yra tokia pačia aukštyje kaip ir antrosios linijos galvutė ir patalpintos arti stendo sienelių. Papildomas kontūras gali būti naudojamas norint greičiau pašildyti stendo sienelės.

Eksperimentų metu buvo atliekami slėgio, dujų ir sienelių temperatūros, dujų sudėties, kondensato srauto matavimai. Visi jie buvo atliekami nuolat eksperimentų eigoje, išskyrus dujų koncentracijos matavimus. Matavimo instrumentai stende yra išdėstyti ant keturių vertikalių stendo skerspjūvių pusplokštumių – ties 105° , 165° , 225° ir 345° . Matavimų tinklelis 345° plokštumoje yra sudarytas iš 10 vertikalių ir 5 radialinių padalijimų, todėl maksimalus atstumas tarp dviejų matavimo prietaisų yra $< 1 \text{ m}$ ašine kryptimi ir $0,5 \text{ m}$ radialine kryptimi. Kitos matavimo instrumentų plokštumos turi nedaug matavimo įrangos.

M5 eksperimentų metu į stendą išleidžiama garo čiurkšlė, tuo pačiu metu nustačius kondensatorių temperatūrų gradientą vertikalia kryptimi. Apatinis kondensatorius yra šaltas (80°C), o virš jo esantys du kondensatoriai – karšti (140°C).



1 pav. MISTRA eksperimento stendo schema [5]

1 lentelė. Įtekančio garo parametrai M5 eksperimento eigoje

Ekspimento fazė	Garų slėgis bar	Garų temperatūra °C	Garų srautas antrąja linija kg/s	Garų srautas trečiaja linija kg/s	Trukmė s
I	14	235	0,0919	0,0196	10 380
II	12,1	230	0,0798	0	31 440

Ekspimento eigoje nusistovi pusiausvyra tarp į stendą įtekančio ir ant apatinio kondensatoriaus sukondensuojamo garo.

M5 eksperimento pradžioje absoliutinis slėgis stende buvo 1,007 bar, pradinė temperatūra 24 °C. Specifikacijoje nurodyta, kad pradinė santykinė drėgmė buvo apie 50 %, o sauso oro masė stende – 115 kg [6]. Sudarant skaitinį modelį oro masė buvo perskaičiuota atsižvelgiant į santykinę oro drėgmę.

Ekspimentą sudarė dvi fazės – pirmoje fazėje garui į stendą išleisti buvo naudojami abu kontūrai, siekiant greičiau pakelti stendo temperatūrą, o antroje fazėje tik vienas, išleidžiantis garą centrinėje stendo dalyje. Pirmosios fazės tikslas – pašildyti stendo sienes, antrosios – sudaryti stratifikuotą atmosferą išlaikant į stendą įtekančio ir sukondensuojamo garo pusiausvyrą. Eksperimento metu naudoti įtekančio garo parametrai yra pateikti 1 lentelėje.

3. MODELIAVIMAS

Siekiant sumažinti reikalingų kompiuterinių išteklių programų paketuose naudojami modeliai yra supaprastinami. Vienas supaprastinimo būdų yra suvidurkintų kintamųjų naudojimas, kai kintamieji, kurie yra erdvėje pasiskirstę laukai, pakeičiami skaliariniais dydžiais, pavyzdžiui, temperatūrų lauką galima padalyti zonomis ir kiekvieną jų aprašyti viena vidutine temperatūra, slėgiu, dujų sudėtimi ir t. t. Programų paketas, kurio fizikiniame modelyje yra naudojami suvidurkinti kintamieji, dažnai vadinamas suvidurkintų kintamųjų programų paketu (angl. *lumped-parameter code*). Pagrindinė šių programų paketų savybė yra tai, kad naudojant suvidurkintus kintamuosius masės pernešimui aprašyti yra nenaudojamas judesio kiekio tvermės dėsnis. Todėl suvidurkintų kintamųjų naudojimas turi įtakos skaičiavimo tikslumui, ypač tokiais atvejais, kai aprašoma sistema yra nehomogeniška ir / arba vyksta greiti masės pernešimo procesai. Sudarant nagrinėjamos sistemos skaitinį modelį šiems programų paketams yra būtina atsižvelgti į tai, kokie procesai yra tikėtini, ir galbūt, tam tikras sistemos zonas aprašyti išsamiau arba kitaip apeiti matematinio ir fizikinio modelio apribojimus.

Dujų tėkmių modelis COCOSYS programų pakete

COCOSYS yra suvidurkintų kintamųjų programų paketas, skirtas išsamiam visų svarbių procesų, vykstančių tiek projektinių, tiek neprojektinių avarijų metu lengvojo vandens reaktorių apsauginiuose kiautuose, modeliavimui [7]. Modeliuojama sistema jame aprašoma vartotojo nurodytais kontroliniais tūriais („zonomis“), kurie yra laikomi homogeniškais. Vartotojas taip pat aprašo šiuos kontrolinius tūrius jungiančias jungtis dujoms (vadinamas „atmosferinėmis“) ir

skysčiams tekėti, konstrukcijas (sienas), kitus branduolinei jėgainei aprašyti reikalingus objektus, pvz., siurblius, purkštuvus, vožtuvus ir kt., bei procesus, pvz., garo išleidimą į kuria nors zoną.

Mus dominantis procesas yra išleisto į pasirinktas zonas garo tolesnis tekėjimas tarp aprašytų zonų. COCOSYS programų pakete [8] dujų tekėjimas per pastovaus ploto A ir ilgio l jungtį j aprašomas kaip vienmatis nespūdaus skysčio tekėjimas neįvertinant kinetinės energijos ((1) lygtis). Indeksai s ir t žymi jungties pradžios ir pabaigos zonas.

$$\dot{G}_j = \frac{A_j}{l_j} \left[(p_s - p_t) + g \rho_j (h_s - h_t) - K_j G_j |G_j| \right]; \quad (1)$$

čia $\rho_j = 0,5(\rho_{js} + \rho_{jt})$ – tankių vidurkis jungiamose zonose.

Paskutinis lygties narys dešinėje lygybės pusėje yra

hidraulinis pasipriešinimas $K_j = \zeta_j \frac{1}{2\rho_j A_j^2}$. Pasipriešinimo

koeficientas ζ_j yra sudarytas iš dviejų dedamųjų $\zeta_j = \zeta_{j0} + \zeta_{ja}$. Pirmasis narys dešinėje lygybės pusėje – koeficientas, įvertinantis įtekėjimo, ištekėjimo ir vietinį pasipriešinimus jungtyje. Šis parametras numatomas sudarant pradinių duomenų failą ir randamas žinyuose įvairių tipų jungtims (pvz., [9]). Antrasis narys – trinties nuostoliai, apskaičiuojami pagal Darsi-Weisbacho formulę l ilgio cilindriniam vamzdžiui [10]:

$$\zeta_{ja} = \frac{64}{\text{Re}} \frac{l_j}{d_{hj}};$$

čia d_{hj} – hidraulinis jungties skersmuo. ζ_{ja} yra tik laminarinė pasipriešinimo dalis, todėl Re apribotas iki 2 300.

$$\text{Re} = \min \left(2\,300, \frac{|G| d_j}{A_j \eta} + \varepsilon \right). \quad \varepsilon - \text{mažas dydis } (10^{-6}),$$

užtikrinantis, kad mažų srautų atveju laminarinis pasipriešinimas nebūtų begalinis. Dinaminės klampos koeficientas η apskaičiuojamas pagal Saterlendo formulę [10].

Šiose dujų tekėjimo lygtyse spūdimas neįvertinamas ir nėra apribojimo tekėjimo greičiui, t. y. esant tam tikroms sąlygoms dujų tekėjimo greitis gali viršyti garso greitį, o tai yra nerealu, todėl įvedamas papildomas apribojimas – $G_{\max} = \rho_j c A_j$; čia c – garso greitis sustabdytose dujose.

Kaip matyti modelyje, srautą per jungtis lemia tik slėgio ir aukščio skirtumai jungties galuose, visiškai nėra atsižvelgiama į tai, koku pradiniu greičiu į zoną patenka jungtimi tekėjusios dujos. Dėl to yra prarandama dalis informacijos, ir garo čiurkšlės sklidimo modeliavimas yra komplikuoatas bei gali būti gaunami netikslūs rezultatai. Sudarant skaitinį modelį būtina atsižvelgti į šią suvidurkintų kintamųjų programų paketų ypatybę.

2 lentelė. Skirtingų nodalizacinių schemų parametų palyginimas

Parametras		Skaitinio modelio varianto numeris						
		1	2	3	4	5	6	7
Kiekis	Zonų	31 + 2	36 + 2	31 + 2	39 + 2	44 + 2	72 + 2	75 + 2
	Vertikalių padalijimų	9	9	9	9	9	19	19
	Radialinių padalijimų	4	4	4	5	5	4	4
	Atmosferinių jungčių	52	60	50	68	76	114	118
	Vandens jungčių	14	14	14	15	13	36	26
	Išorinių konstrukcijų	14	14	14	15	15	27	28
	Kondensatorių konstrukcijų	14	14	14	14	14	22	22
Stendo tūris m ³	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	
Oro masė stende kg	113,4	113,4	113,4	113,4	113,4	113,4	113,4	

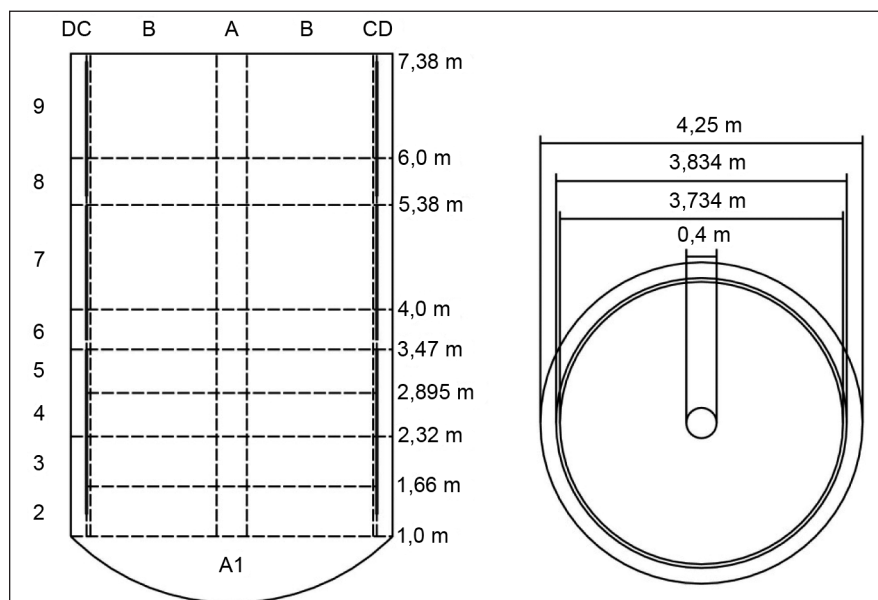
MISTRA eksperimentų stendo skaitinis modelis

M5 eksperimento metu garas į stendą įteka vertikalia čiuurkšle per į viršų nukreiptą purkštuką. Rekomendacijos kaip CO-SOSYS programų paketu sumodeliuoti čiuurkšlės sklaidimą yra pateiktos [11]. Jose vietoj paprasto garo ištekėjimo į atitinkamą skaitinio modelio zoną siūloma naudoti specialias zonas garo čiuurkšlės tekėjimui modeliuoti arba čiuurkšlės sklaidimą sumodeliuoti dirbtinai numatant srautus, apskaičiuotus pasitelkiant empirinę formulę.

Eksperimentui modeliuoti COCOSYS programų paketu buvo sukurti keli MISTRA stendo skaitiniai modeliai. Pats paprasčiausias, pirmasis, skaitinis modelis buvo toks pats, koks anksčiau buvo naudotas MASP eksperimentų (juose garo įtekėjimas į stendą yra nutrauktas) modeliavimui [12]. Jis yra gautas stendo tūrį padalijus į devynis vertikalius (ilustracijose žymimus skaičiais 1–9) ir keturis radialinius (ilustracijose žymimus raidėmis A–D) padalijimus (2 pav.). Iš viso stendo vidinis tūris buvo aprašytas 31 zona, taip pat buvo aprašytos kondensatorių vidaus zona (skirta palaikyti jų sienelių temperatūrai) ir aplinkos zona, supanti stendą. Daugiau informacijos pateikta 2 lentelėje. Šiame skaitiniame modelyje garo čiuurkšlė išteka į tą modelio zoną, kurioje pagal geometrinis duomenis būtų atitinkama garo išleidimo gal-

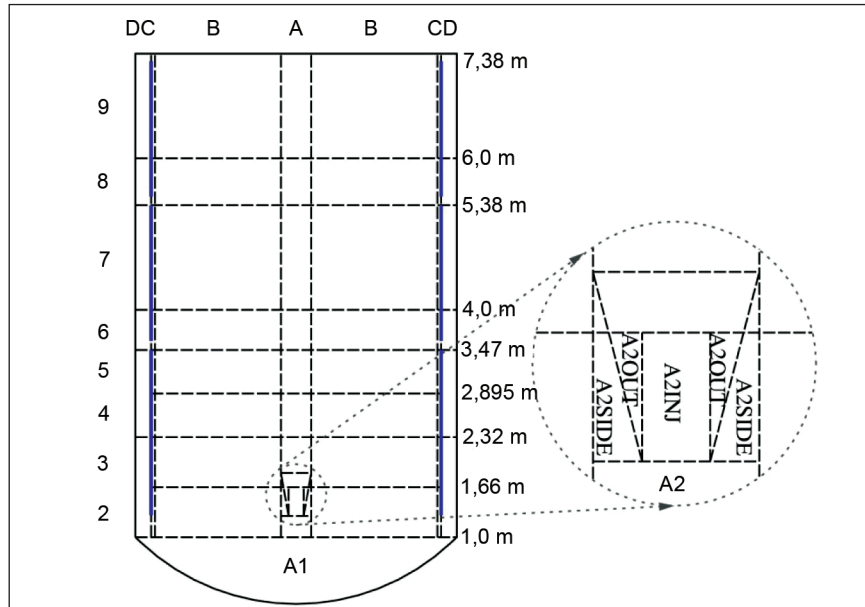
utė. Abiejų garo išleidimo linijų galvutės yra stendo apačioje, todėl karštas garas nuo jų kyla į stendo viršų. Modelyje garo masės pernaša jungtimis šiuo atveju priklausys tik nuo slėgio ir tankio skirtumų tarp jungtimi sujungtų zonų, o, kaip minėta anksčiau, į (šiuo atveju aukštyrą nukreiptą) judesio kiekį atsižvelgta nebus, todėl galima prognozuoti, kad skaičiavimai rodytų lėtesnį garo koncentracijos didėjimą stendo viršuje nei išmatuota eksperimento metu.

Antrasis skaičiavimuose naudotas skaitinis modelis buvo gautas iš pirmojo, jį papildžius specialiomis zonomis ištekancio garo čiuurkšlės tekėjimui modeliuoti (3 pav.). Šios zonos sudaro nupjautinį kūgį, kuris suformuoja 20° kampą su vertikalia garo tekėjimo kryptimi. Virš geometrinės garo išleidimo vietos yra apibrėžiama zona INJ, kuri turi tik vieną jungtį, su virš jos esančia zona. Šios zonos geometrinė forma yra ritinys. Ji yra apsupama kita garo išleidimo zona – OUT, kurios geometrinė forma yra apverstas nupjautinis kūgis, iš kurio centro yra išpjautas INJ zonos cilindras. Ši zona turi dvi jungtis – be jungties su virš jos esančia zona, ji taip pat turi jungtį, atitinkančią jos šoninį paviršių. Išleidžiamas garas yra padalijamas per pusę į šias dvi zonas. Tai turėtų atitikti garo masės radialinį paskirstymą tikrame sraute [13]. Šiomis zonomis modeliuojant garo čiuurkšlės tekėjimą, turėtų būti gau-



2 pav. MISTRA stendo skaitinio modelio 1 schema, vertikalus ir radialinis sudalinimai (bazinis variantas)

3 pav. MISTRA stendo skaitinio modelio 2 schema (specialios zonos čiurkšlės sklidimui)

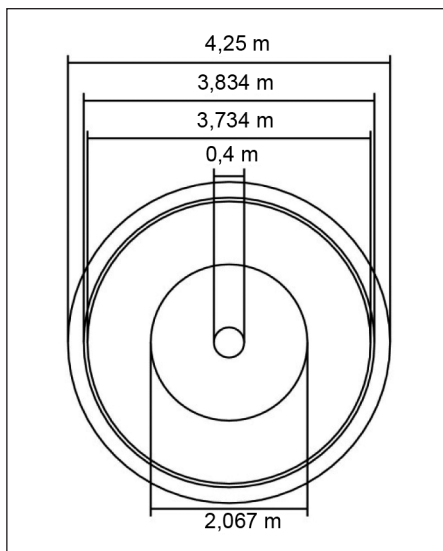


namas iš jų aukštyn kylantis garas, o gretimose zonose masės srautai turėtų būti nukreipti žemyn ir horizontaliai į zoną OUT – išleidžiamas garo srautas įtraukia dujas ir iš aplinkos.

Trečiasis skaičiavimuose naudotas skaitinis modelis buvo kaip ir pirmasis (2 pav.), tačiau garai jame buvo išleidžiami tiesiai į viršutinę centrinę zoną (A9). Tačiau šiuo atveju prarandami masės srautai, kuriuos stendo atmosferoje sukeltų aukštyn kylanti garo srovė. Šią problemą galima išspręsti apskaičiuojant garo srautų parametrus. Aprašomiems skaičiavimams buvo pasitelktos empirinės formulės [13]:

$$w_m = w_0 \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_1} \frac{d_0}{0,018x}}; \quad (16)$$

čia w_m – čiurkšlės srauto greitis atstumu x nuo išleidimo taško, w_0 – išleidimo greitis, ρ_0 – išleidžiamų dujų tankis, ρ_1 – aplinkos tankis, d_0 – išleidimo galvutės skersmuo.



4 pav. MISTRA stendo skaitinio modelio 4 ir 5 schemas (radialinis padalijimas)

Atstumams, daugiau nei 9 kartus didesniems už d_0 , čiurkšlės tūrinio srauto santykis su pradiniu tūrinio srautu V_0 apskaičiuojamas pagal

$$\frac{v(x)}{v_0} = 2 \frac{w_0}{w_m - 1} \frac{\rho_0}{\rho_1}. \quad (17)$$

Pagal šią formulę apskaičiavus tūrinius dujų srautus, jie yra dirbtinai numatomi skaitiniame modelyje, pasitelkiant specialias, programų pakete esančias funkcijas. Taip garo išleidimas buvo modeliuojamas dviem atskirais skaitiniame modelyje aprašytais procesais: garo išleidimu stendo viršuje ir nurodytais srautais tarp zonų, per kurias tekėtų garas, jeigu jis būtų išleidžiamas į zoną, kurioje yra išleidimo galvutė.

Ketvirtasis ir penktasis skaičiavimuose naudoti skaitiniai MISTRA stendo modeliai buvo tokie patys, kaip pirmasis ir antrasis (atitinkamai), tačiau su detalesne radialine nodalizacija (4 pav.).

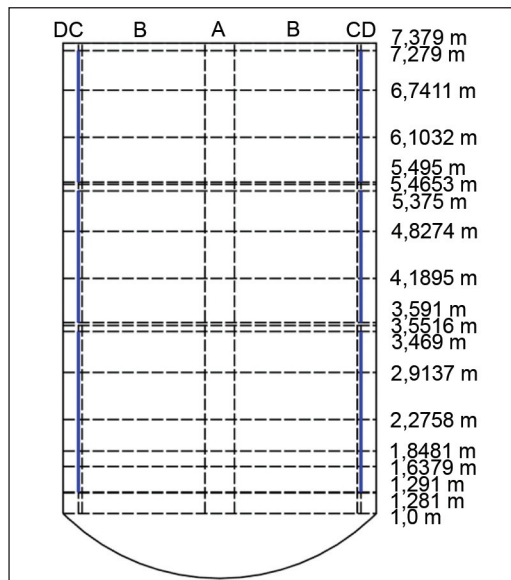
Šeštasis ir septintasis skaitiniai modeliai taip pat buvo gauti detalizuojant pirmojo ir antrojo (atitinkamai) skaitinių modelių padalijimą, tačiau ne radialinį, o vertikalų, vietoj 9 vertikalių suskirstymų buvo 19 (5 pav.).

4. REZULTATAI

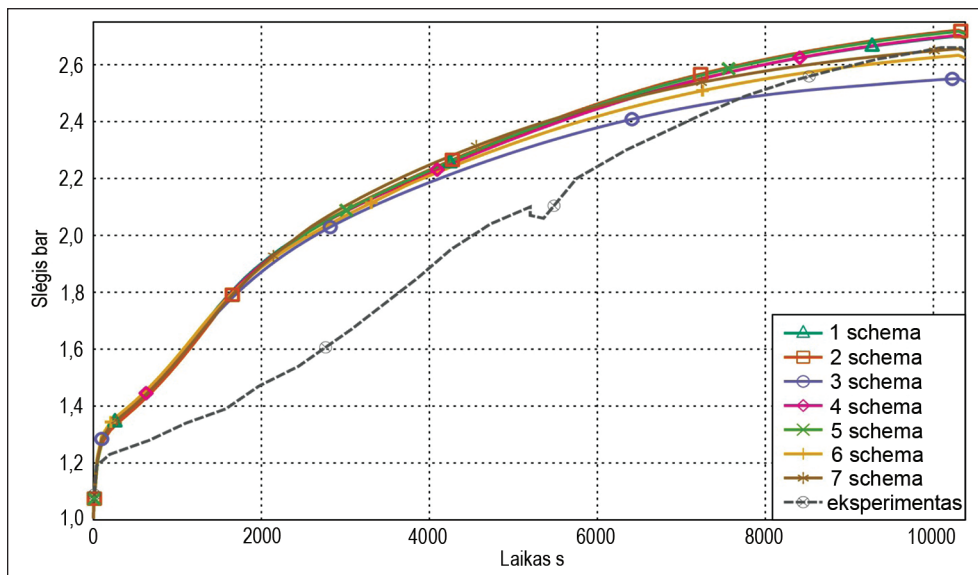
M5 eksperimento pirmojoje fazėje su visais skaitinio modelio variantais apskaičiuotas slėgio kitimas stende (stendo viduje žymesnių slėgio skirtumų nestebima) ženkliai skiriasi nuo išmatuoto [4], išskyrus pačią dalies pabaigą ($> \sim 9000$ s) (6 pav.). Būtina atkreipti dėmesį, kad slėgio kitimo sparta šioje eksperimento fazėje nėra pagrindinis rezultatas. Svarbiausia šio eksperimento modeliavimo užduotis buvo gauti atmosferos stratifikaciją ir galutinį slėgį stende, kurie atitiktų išmatuotus parametrus. Galutinis slėgis apskaičiuotas su 6 ir 7 skaitinio modelio variantu (detalus vertikalus padali-

jimas) yra artimas eksperimento metu išmatuotam slėgiui. Naudojant 3 skaitinio modelio variantą slėgis yra gaunamas žemesnis nei išmatuota eksperimento metu. Naudojant visus kitus skaičiavimo variantus yra gaunamas aukštesnis slėgis. Analogiški rezultatai yra gauti ir analizuojant slėgio kitimą eksperimento antrosios fazės metu (7 pav.), t. y. 6 ir 7 skaitinio modelio variantai (detalus vertikalus padalijimas) yra arčiausiai eksperimento metu išmatuotų rezultatų. Rezultatai, gauti su kitais skaitinio modelio variantais, ženkliai skiriasi nuo išmatuotų.

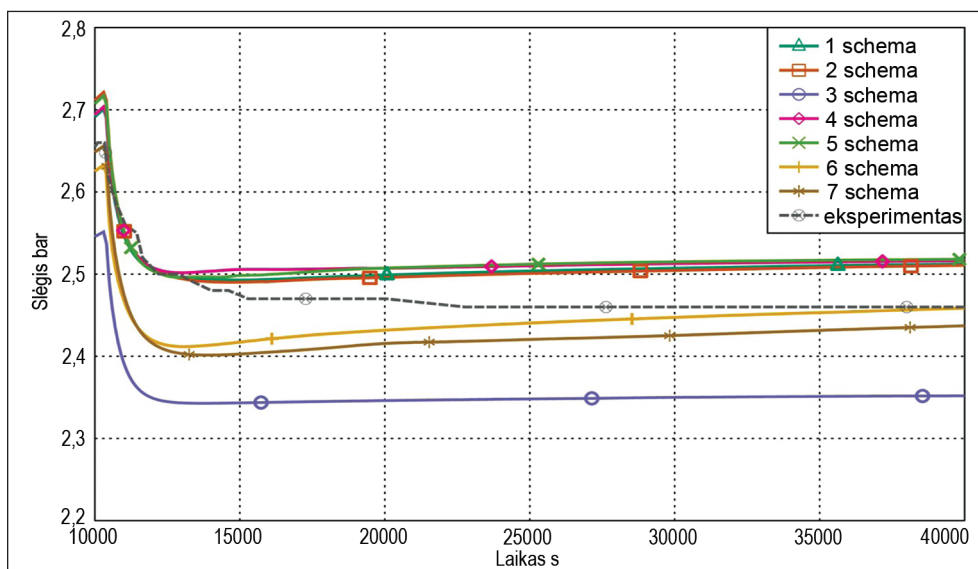
Skaičiavimo rezultatai (8 pav.) palyginti su išmatuotu vertikaliu tūrinės garo koncentracijos pasiskirstymu eksperimento pabaigoje, t. y. kai jau nusistovėjusi atmosferos stratifikacija. Eksperimento ataskaitoje [6] pateiktas pasiskirstymas yra suvidurkinta keturių vykdytų M5 eksperimentų (modeliuotas buvo tik pirmasis iš jų) eksperimentinių rezultatų aproksimacija. Suvidurkinta buvo tiek per eksperimentus, tiek per skirtingas skerspjūvių pusplėštures. 8 paveiksle matyti, kad tūrinės garo koncentracijos



5 pav. MISTRA stendo skaitinio modelio 6 ir 7 schemas (vertikalus padalijimas)

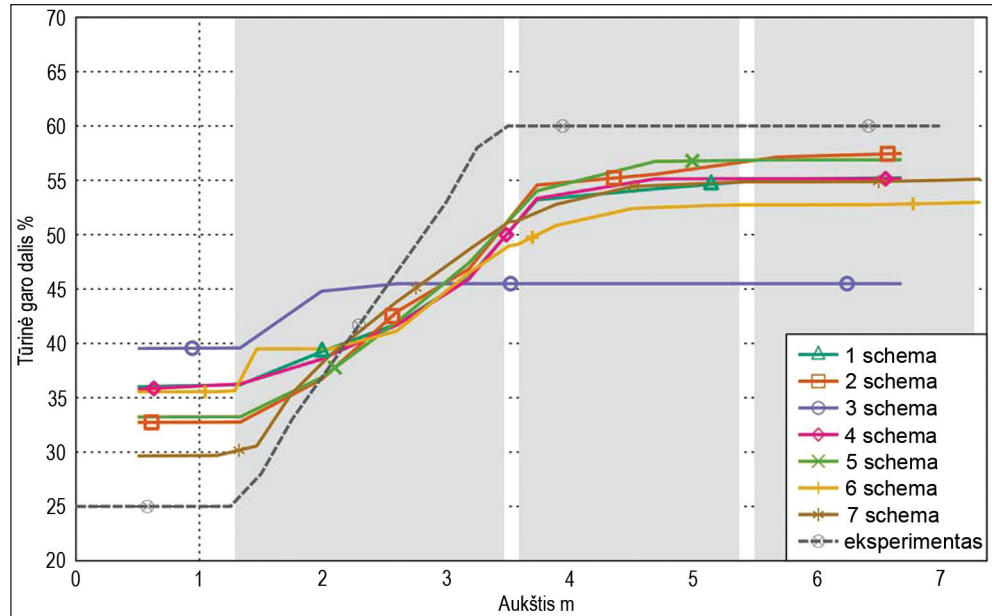


6 pav. Apskaičiuotas ir išmatuotas [5] slėgio kitimas pirmoje eksperimento fazėje



7 pav. Apskaičiuotas ir išmatuotas [5] slėgio kitimas antroje eksperimento fazėje

8 pav. Apskaičiuotas ir specifika-
cijoje pateiktas [6] vertikalus tū-
rinės garo dalies pasiskirstymas
eksperimento pabaigoje. Pilkos
juostos žymi kondensatorius

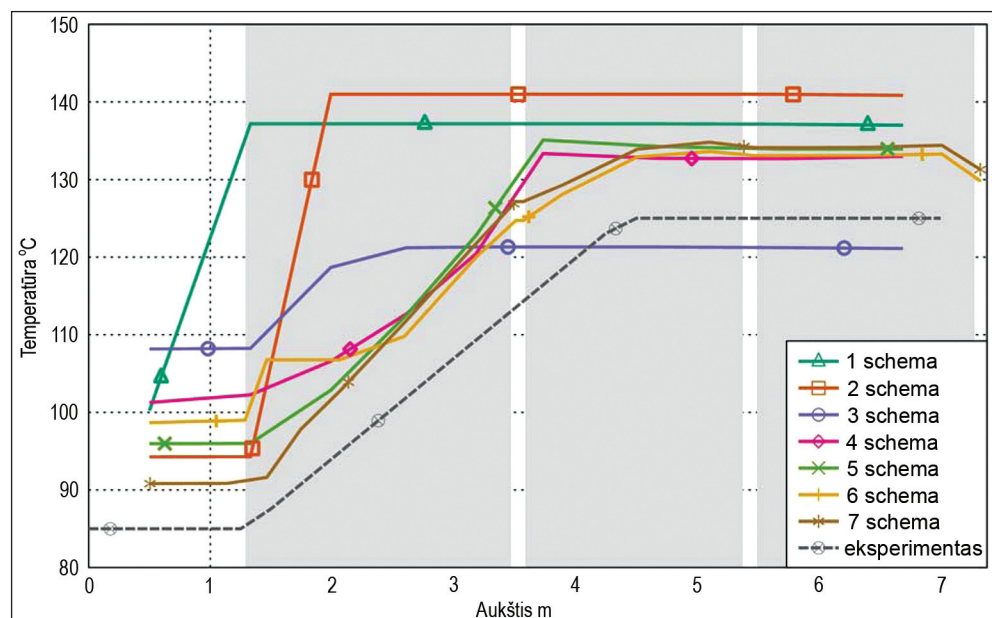


stratifikacija stendo atmosferoje buvo gauta visais skaitinio modelio variantais. Tačiau, palyginus su eksperimento rezultatais, matyti, kad apskaičiuota atmosferos sudėtis yra mažiau stratifikuota – garo dalis stendo apačioje yra didesnė nei išmatuota, o stendo viršuje – mažesnė. Rezultatai, gauti su 3 skaitinio modelio variantu, ženkliai išsiskiria iš kitų variantų, nes gauta, kad tūrinės garo koncentracijos skirtumas tarp stendo viršaus ir apačios yra tik ~5 %, o eksperimente ~35 %. Arčiausiai išmatuoto koncentracijų skirtumo yra rezultatai, gauti skaitiniais modeliais, kuriuose naudojamos specialios zonos garų išleidimui – 2 ir 5 modelio rezultatai yra beveik identiški, juose gautas skirtumas buvo ~24 %. Naudojant 7 modelį gautas skirtumas buvo ~25 % ir tiek stendo viršuj, tiek apačioj apskaičiuotos koncentracijos buvo 2–3 % mažesnės, palyginti su 2 ir 5 modeliais gautosiomis. Kiti skaitiniai modeliai rodė šiek tiek prastesnius rezultatus,

1 ir 4 modelių rezultatai buvo labai panašūs, o 6 modelio rezultatai stendo apačioje sutapo su 1 ir 4, tačiau viršuje rodė mažesnę koncentraciją. Iš šių rezultatų galima daryti išvadą, kad tikslesniam tūrinės garo dalies stratifikacijos sumodeliavimui yra būtinos specialios garo čiurkšlės tekėjimą aprašančios zonos, o naudotas detalesnis radialinis suskirstymas didesnės įtakos šio parametro pasiskirstymui neturėjo. Galima manyti, kad trečiajame skaitiniame modelyje naudoti pagal empirinę formulę apskaičiuoti oro srautai buvo gauti per dideli ir didelė dalis stendo atmosferos buvo per daug išmaišoma.

Didesnį skirtingų skaitinių modelių rezultatų skirtumą galima matyti lyginant apskaičiuotą vertikalų dujų temperatūros pasiskirstymą eksperimento pabaigoje (9 pav.). Temperatūrų stratifikacija buvo gauta naudojant visus modelius, išskyrus pirmąjį (be specialių zonų čiurkšlės skli-

9 pav. Apskaičiuotas ir specifika-
cijoje pateiktas [6] vertikalus tem-
peratūros pasiskirstymas eks-
perimento pabaigoje. Pilkos juos-
tos žymi kondensatorius



dimui). Matyti, kad garo čiurkšlės sklidimo modeliavimas specialiomis zonomis šiuo atveju ženkliai pakeitė rezultatus (apatinio kondensatoriaus apačioje 1 ir 2 skaitiniais modeliais apskaičiuotos temperatūros skiriasi daugiau nei 40 °C). Tiksliausia temperatūrė stratifikacija buvo apskaičiuota 6 ir 7 modeliais. 4 ir 5 modeliai didesnės temperatūros zoną davė nuo vidurinio kondensatoriaus apačios, o 2 ir 3 – ties ~2 m aukščiu. 3 modelio rezultatai ir šiuo atveju rodė homogeniškesnę atmosferą, nei eksperimentas, ir nors stendo viršuje temperatūra šiuo modeliu buvo apskaičiuota gana tiksliai (skirtumas ~5 °C), apačioje temperatūra buvo per aukšta beveik 25 °C. Trečiasis modelis buvo vienintelis, kuriuo stendo viršuje buvo apskaičiuota žemesnė temperatūra nei pateikta specifikacijoje. Visais kitais modeliais gauta temperatūra buvo didesnė visame stendo aukštyje. Apatinėje stendo dalyje geriausias atitikimas specifikacijoje pateiktiems rezultatams buvo gautas naudojant 7 modelį, skirtumas sudaro ~6 °C. Nuo apatinio kondensatoriaus vidurio 4–7 modelių rezultatai tampa panašūs (skiriasi tik jau minėtas perėjimo pastovioje temperatūroje aukštis). Iš šių rezultatų galima daryti išvadą, kad siekiant tiksliau apskaičiuoti vertikalų temperatūros gradientą yra reikalingas tiek detalus vertikalus padalijimas, tiek specialios zonos čiurkšlės sklidimui aprašyti.

5. IŠVADOS

Stratifikuotos atmosferos susidarymas MISTRA eksperimentų stende M5 eksperimento metu buvo sumodeliuotas suvidurkintų kintamųjų programų paketu COCOSYS taikant įvairius skaitinio modelio variantus. Atlikus rezultatų analizę gautos šios išvados:

1. Siekiant sumodeliuoti stratifikuotos atmosferos susidarymą suvidurkintų kintamųjų programų paketais neužtenka įprastinio garo įtekėjimo aprašymo. Ši išvada galioja visiems suvidurkintų programų paketams.

2. Rezultatai, gauti naudojant dirbtinį dujų srautų sukūrimą remiantis empirinės formulės rezultatais (3 skaitinio modelio variantas), ženkliai išsiskiria iš kitų variantų ir labai skiriasi nuo išmatuotų. Tikslėsius rezultatus būtų galima gauti keičiant šiuos srautus, tačiau jie turėtų būti žinomi sudarant skaitinį modelį.

3. Detalesnis radialinis eksperimentų stendo padalijimas skaitiniame modelyje neturėjo esminės įtakos skaičiavimo rezultatams.

4. Detalesnis vertikalus eksperimentų stendo padalijimas skaitiniame modelyje leidžia gauti tikslesnę garo koncentracijos ir dujų temperatūros stratifikaciją.

5. Tiksliausi rezultatai yra gaunami skaitiniame modelyje kartu naudojant detalų vertikalų padalijimą ir specialias zonas įtekančio garo čiurkšlės sklidimui modeliuoti.

Literatūra

1. Povilaitis M., Urbonavičius E., Rimkevičius S. Branduolinių jėgainių apsauginiai kiaurai ir juose vykstantys procesai. *Energetika*. 2005. Nr. 4. P. 18–27.
2. *International Standard Problem ISP47 on Containment T/H*. Final report. Nuclear Energy Agency, NEA/CSNI/R(2007). 2007.
3. Yadigaroglu G., Andreani M., Dreier J., Coddington P. Trends and needs in experimentation and numerical simulation for LWR safety. *Nuclear Engineering and Design*. 2003. Vol. 221. P. 205–223.
4. Royle P., Rochholza H., Breitunga W., Travis J. R., Necker G. Analysis of steam and hydrogen distributions with PAR mitigation in NPP containments. *Nuclear Engineering and Design*. 2000. Vol. 202. P. 231–248.
5. Malet J., Porcheron E., Vendel J., Blumenfeld L., Tkatschenko I. *SARNET Spray Benchmark*. TOSQAN and MISTRA specification report. 2006.
6. Blumenfeld L., Tkatschenko I. *Benchmarking of CFD and LP Codes for Spray Systems in Containment Applications: MASP tests PART HYDRO B*. Complementary information. 2006.
7. Allelein H.-J., Arndt S., Klein-Heßling W., Schwarz S., Spengler C., Weber G. COCOSYS: status of development and validation of the German containment code system. *Nuclear Engineering and Design*. 2008. Vol. 238. No. 4. P. 872–889.
8. Klein-Heßling W., Arndt S., Weber G. *COCOSYS V 1.2, Programme Reference Manual*. July 2000.
9. Idel'chik I. E. *Handbook of Hydraulic Resistance*. 1966.
10. Liutikas N., Gudzinškas J. *Termohidromechanika*. KTU, Kaunas: Technologija, 2001.
11. Schwarz S. Simulation of free jets and buoyant plumes, COCOSYS Tips and tricks, GRS.
12. Povilaitis M., Urbonavičius E. MISTRA stende vykdytų MASP-n eksperimentų modeliavimas COCOSYS programų paketu. *Energetika*. 2008. T. 54. Nr. 1. P. 22–29.
13. Autorenkollektiv. *Verfahrenstechnische Berechnungsmethoden. Teil 4: Stoffvereinigen in fluiden Phasen*. VCH-Verlag, 1988.

Mantas Povilaitis, Egidijus Urbonavičius, Sigitas Rimkevičius

MODELING OF ATMOSPHERE STRATIFICATION IN CONTAINMENTS OF NUCLEAR POWER PLANTS

Summary

Stratification of the atmosphere in the containments is a high priority task in solving safety issues of nuclear power plants. This task is investigated experimentally and by numerical modelling of the experiments. The solution of this task by lumped-parameter codes is complicated due to the inherent limitations that have to be taken into account while developing model nodalisation.

The objective of the M5 experiment performed in the MISTRA test facility was creation of a stratified atmosphere. This experiment was carried out using the COCOSYS lumped-parameter code.

The paper describes several variants of model nodalisation allowing the modelling of atmosphere stratification employing lumped-parameter codes. The obtained results are compared with the measured results. The results show that for modelling atmosphere stratification it is not enough to use simple gas injection into the node; the peculiarities of the occurring processes have to be taken into account. It is recommended to use a more detailed vertical subdivision of the model and to define special nodes for the description of the steam plume.

Key words: gas mixing, stratification, modelling

Мантас Повилайтис, Эгидиус Урбонавичюс,
Сигитас Римкявичюс

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ АТМОСФЕРЫ В ЗАЩИТНЫХ ОБОЛОЧКАХ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Резюме

Образование стратифицированной атмосферы в защитных оболочках является задачей высокого приоритета при решении задач безопасности атомных электростанций. Эта задача решается проведением экспериментов и анализом этих экспериментов путем моделирования. Решение этой задачи с помощью кодов усредненных параметров затруднено из-за ограничений, которые должны учитываться при разработке моделей, в этих кодах.

Целью эксперимента M5, проведенного на экспериментальном стенде MISTRA, явилось создание стратифицированной атмосферы. Анализ этого эксперимента был проведен с помощью кода усредненных параметров COCOSYS.

В настоящей работе представлено несколько вариантов разработки модели, позволяющие получить образование стратифицированной атмосферы с помощью кодов усредненных параметров. Полученные результаты сравнены с результатами измерений. Полученные результаты показывают, что для моделирования стратификации атмосферы в защитной оболочке недостаточно задавать просто подачу пара в объем и необходимо учитывать особенности происходящих процессов. При разработке модели рекомендуется применять более детальное вертикальное разрешение и использовать специальные зоны для распространения вытекающей струи.

Ключевые слова: перемешивание газов, стратификация, моделирование