

# MISTRA stende vykdytų MASP-n eksperimentų modeliavimas COCOSYS programų paketu

**Mantas Povilaitis,**

**Egidijus Urbonavičius**

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

Aprašomas MASP-n eksperimentų, vykdytų eksperimentiniame stende MISTRA, modeliavimas suvidurkintų parametru programų paketu COCOSYS. MASP-n eksperimentai yra dalis SARNET kompetencijos tinkle vykdomos programos, skirtos lašelių sąveikai su atominų elektrinių apsauginių kiautų atmosfera ištirti. Šiame straipsnyje yra pateiktas sudarytas MISTRA eksperimentų stendo modelis COCOSYS programų paketui ir gauti rezultatai. Atlikti parametriniai skaičiavimai leido nustatyti, kurie veiksniai lemia slėgio kitimą MISTRA eksperimentų stende MASP-n eksperimentų metu.

**Raktažodžiai:** stendas MISTRA, eksperimentų modeliavimas

## 1. ĮVADAS

Įvykus sunkiajai avarijai branduoliniame lengvojo vandens reaktoriuje yra pasiekiamos aukštos temperatūros ir susidaro sąlygos vyksti cheminei reakcijai tarp kuro apvalkalo ir garo. Šios reakcijos metu susidaro vandenilis, kuris su šilumnešiu išteka į apsauginį kiautą (angl. *containment*). Jeigu apsauginiame kiaute vandenilio koncentracija viršytų 4%, tai būtų galimas vandenilio užsidegimas. Degant vandeniliui išsiskiria energija, dėl kurios didėja dujų temperatūra ir slėgis apsauginiame kiaute. Vandenilio koncentracijai pasiekus 14% yra galimas vandenilio sproginimas. Sprogimo metu liepsnos frontas juda greičiau už garsą ir susidaro smūginės bangos, galinčios sukelti apsauginio kiaučio konstrukcijų pažeidimus. Todėl yra labai svarbu užtikrinti, kad net ir mažai tikėtinos sunkiosios avarijos atveju vandenilio koncentracija apsauginiame kiaute neviršytų degimo ribos. Branduolinėse jėgainėse vandenilio problema dažniausiai sprendžiama įrengiant arba degiklius, kurie pradeda veikti dar esant mažai vandenilio koncentracijai ir sukelia nedidelius, kontroliuojamus vandenilio degimus, arba įrengiant pasyvius autokatalitinius „rekombinatorius“. Šiuose rekombinatoriuose yra naudojami katalizatoriai deginti vandeniliui kol jo koncentracija dar maža. Suslėgto vandens reaktoriuose taip pat yra svarstomas dar vienas būdas užtikrinti, kad vandenilio koncentracija apsauginiame kiaute nepasiektų pavojingų ribų. Šis būdas yra apsauginiame kiaute įrengtos purkštuvų sistemos panaudojimas. Tačiau purškiamų lašelių sąveika su atmosfera dar nėra gerai išnagrinėtas reiškinys. Siekiant išnagrinėti šį reiškinį 6-osios bendrosios programos SARNET kompetencijos tinkle buvo inicijuota speciali programa, kurią sudarė ne tik eksperimentų atlikimas, bet ir eksperimentų modeliavimas įvairiais programų paketais. Ši programa leis ne tik eksperimentiškai ištirti lašelių sąveiką su atmosfera, bet ir įvertinti esamų programų paketų gebėjimą modeliuoti šį reiškinį. Eksperimentai buvo vykdomi dviejuose eksperimentų stenduose TOSQAN ir MISTRA. Abu šie stendai yra

įrengti Prancūzijoje. Lietuvos energetikos institutas šioje tyrimų programoje dalyvauja modeliuodamas MASP-n eksperimentus, vykdytus MISTRA stende. Pirmajame darbo etape vykdomi tyrimai buvo susiję tik su termodinamine lašelių sąveika su atmosfera. Buvo nagrinėjama, kaip slėgio kitimo greitis priklauso nuo purškiamų lašelių temperatūros ir ar purkštukų modeliai naudojamuose programų paketuose gerai aprašo šį reiškinį. Kitame darbų etape numatoma nagrinėti, kokią įtaką purškiami lašeliai turi sudarytos atmosferos stratifikacijos suardymui.

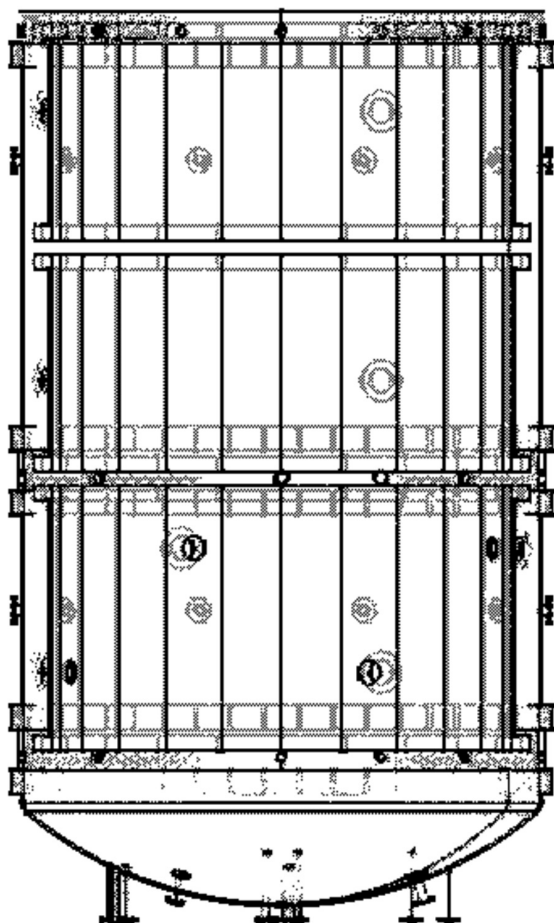
Šiame straipsnyje yra pateikta sukurta MISTRA eksperimentinio stendo nodalizacinė schema COCOSYS programų paketui ir gauti rezultatai. Atlikta analizė parodė, kad norint atlikti sėkmingą eksperimentų modeliavimą yra būtinas išsamus eksperimento pradinių ir kraštinių sąlygų pateikimas. Atlikti parametriniai skaičiavimai atskleidė pagrindinius parametrus, lemiančius eksperimentų rezultatus.

## 2. EKSPERIMENTAI

MASP-n eksperimentų tikslas yra ištirti purškiamo vandens įtaką kiaučio slėgio mažėjimui termiškai stratifikuotoje kiaučio atmosferoje [1]. MISTRA eksperimentiniame stende buvo įvykdyti trys eksperimentai – MASP-0, MASP-1 ir MASP-2. Kiekvienas MASP eksperimentas buvo vykdomas po M5 eksperimento, kurio metu į stendą buvo išleidžiamas garas ir sukuriama stratifikuota atmosfera. MASP-1 ir MASP-2 eksperimentai buvo sudaryti iš dviejų fazių – slėgio mažėjimo dėl šiluminių nuostolių fazės (0 s – 2100 s) ir vandens purškimo fazės (2100 s – 3900 s). MASP-0 eksperimentas buvo sudarytas tik iš vienos fazės – slėgio mažėjimo dėl šilumos nuostolių (0 s – 3900 s). Išsamus eksperimentų aprašymas yra pateiktas [2].

### 2.1. MISTRA eksperimentų stendas

MISTRA eksperimentų stendas yra vertikalus nerūdijančio plieno cilindras su suapvalinta apačia (1 pav.). Laisvas cilindro



1 pav. MISTRA eksperimentų stendo schema [1]

tūris yra  $\sim 99,5 \text{ m}^3$ , vidinis skersmuo – 4,25 m, aukštis – 7,38 m. Šoninės stendo sienelės storis – 1,5 cm, sienelės storis apatinėje dalyje – 2,5 cm, viršutinėje dalyje – 11 cm. Atskiros stendo dalys tarpusavyje yra sujungtos flanšais, kurių storis – 11,9 cm. Bendras išorinių stendo sienelių plotas sudaro  $118 \text{ m}^2$ , iš kurių  $14 \text{ m}^2$  – lubos,  $75 \text{ m}^2$  – šoninės sienelės be flanšų,  $13 \text{ m}^2$  – flanšai ir  $16 \text{ m}^2$  – apatinė stendo dalis. Bendra išorinių stendo konstrukcijų masė sudaro  $\sim 40$  tonų nerūdijančio plieno. Stendas yra termiškai izoliuotas 20 cm storio akmens vatos sluoksniu.

Stendo viduje įrengti trys cilindrai, kurių paviršiaus temperatūrą galima valdyti. Jie yra vadinami kondensatoriais. Kondensatoriai nėra tobuli cilindrai, bet taisyklingieji daugiakampiai su 24 sienomis. Kiekvieno kondensatoriaus vidinis skersmuo (atitinkamo cilindro) yra lygus 3,8 m. Kondensatoriai yra įrengti tarp 1,285 m ir 7,28 m stendo cilindro aukščio. Apatinis kondensatorius yra didesnis už kitus kondensatorius, jo aukštis – 2,187 m. Vidurinio ir viršutinio kondensatorių aukštis yra 1,784 m. Garo kondensacija gali vykti tik ant į MISTRA stendo vidų atsuktų kondensatorių paviršių. Į eksperimentų stendo išorines sienes atsukti kondensatorių paviršiai yra izoliuoti 2 cm storio sintetinės putos sluoksniu.

Tarp kondensatorių ir išorinių stendo sienelių yra  $\sim 19$  cm tarpas, tačiau kondensatorių viršuje ir apačioje dėl kondensatorių konstrukcijos šis tarpas sumažėja iki  $\sim 6$  cm. Šis tūris už kondensatorių sudaro  $\sim 13\%$  bendro MISTRA stendo tūrio.

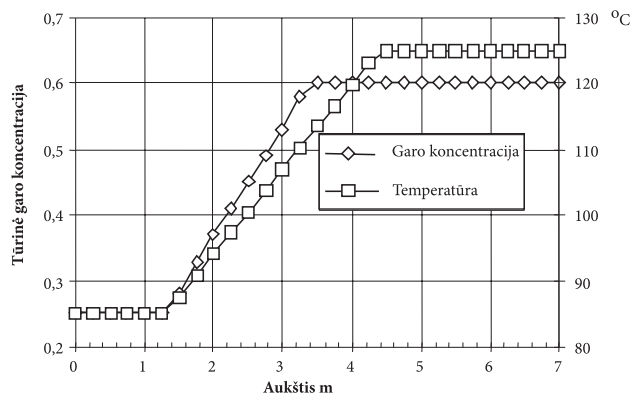
Išsamus MISTRA eksperimentų stendo aprašymas yra pateiktas [1, 2].

## 2.2. Eksperimentų specifikacija

MASP-n eksperimentų modeliavimo programa turėjo du etapus: 1) pirmojo etapo specifikacijoje buvo pateiktos tik vidutinės dujų temperatūros ir garo tūrinės koncentracijos reikšmės (lentelė) ir 2) antrajame etape buvo pateiktos ir garo koncentracijos bei dujų temperatūros stratifikacijos sąlygos (2 pav.).

Lentelė. Pirmojo etapo specifikacija

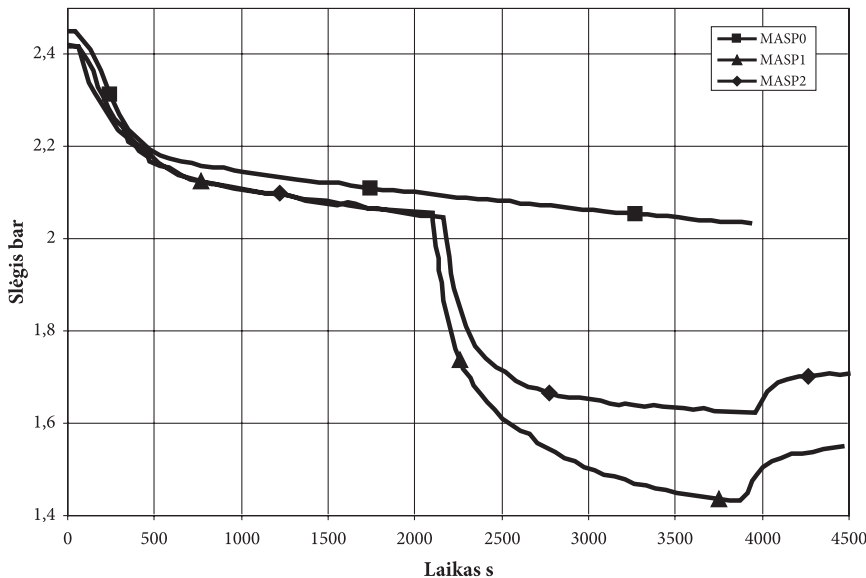
Parametras	MASP-0	MASP-1	MASP-2
Slėgis	2,4 bar	2,4 bar	2,4 bar
Vidutinė dujų temperatūra	124°C	124°C	124°C
Tūrinė garo koncentracija (apskaičiuota iš masių balanso)	0,45	0,45	0,45
Oro masė	$\sim 115 \text{ kg}$	$\sim 115 \text{ kg}$	$\sim 115 \text{ kg}$
Vandens temperatūra purkštumo galvutėje	–	40°C	60°C
Lašelių masės srautas	–	0,87 kg/s	0,87 kg/s
Apatinio kondensatoriaus temperatūra	80°C	80°C	80°C
Vidurinio ir viršutinių kondensatorių temperatūra	140°C	140°C	140°C



2 pav. Temperatūros ir garo tūrinės dalies stratifikacija MASP-n eksperimentuose [4]

MISTRA stende stratifikacija buvo sukuriama M5 eksperimentų, kurie buvo vykdomi prieš kiekvieną MASP-n eksperimentą, metu. 2 pav. matyti, kad M5 eksperimento metu stende yra sukuriamas temperatūros gradientas aukštyje tarp 1,25 m ir 4,5 m. Temperatūrų skirtumas tarp šių aukščių yra 40°C. Tūrinė garo koncentracija pasikeičia nuo 0,25 ties 1,25 m aukščiu iki 0,6 ties 3,5 m aukščiu.

Slėgio mažėjimo dėl šilumos nuostolių fazės metu slėgis sumažėja nuo pradinio 2,4 bar iki  $\sim 2,2$  bar per pirmąsias  $\sim 500$  s ir likusį laiką lėtai mažėja (3 pav.). MASP-0 eksperimento pabaigoje ( $\sim 4000$  s) slėgis būna sumažėjęs iki  $\sim 2,03$  bar. MASP-1 ir MASP-2 eksperimentų metu po 2100 s yra įjungiami purkštuvai. Iki šio laiko visuose trijuose eksperimentuose slėgis kinta labai panašiai, yra tik nedidelis neatitikimas dėl mažų skirtumų, pradinėmis sąlygomis atsiradusių po M5 eksperimentų. Įjungus purkštuvus įvyksta staigus slėgio kritimas. MASP-1 eksperimente slėgis po 4000 s yra  $\sim 1,6$  bar, o MASP2 eksperimente  $\sim 1,45$  bar. Šis slėgių skirtumas tarp MASP-1 ir MASP-2 eksperimentų atsiranda dėl skirtingos purškiamo vandens temperatūros.



3 pav. Išmatuotas slėgio kitimas MASP-n eksperimentų metu [2]

### 3. MISTRA MODELIS COCOSYS PROGRAMŲ PAKETUI

Eksperimentai buvo modeliuojami suvidurkintų parametų programų paketu COCOSYS (versijomis V2.3v9 (MASP-0) ir V2.3v11 (MASP-1 ir MASP-2)). COCOSYS yra suvidurkintų parametų programų paketas, skirtas išsamiam visų svarbių procesų, vykstančių tiek projektinių, tiek neprojektinių avarijų metu lengvojo vandens reaktorių apsauginiuose kiautuose, modeliavimui [3].

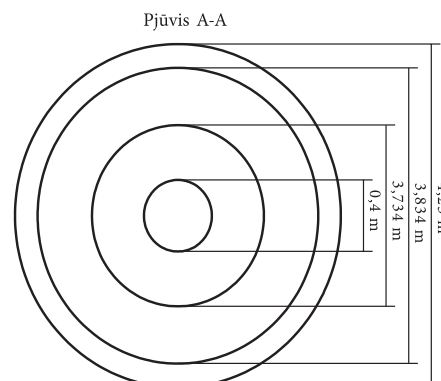
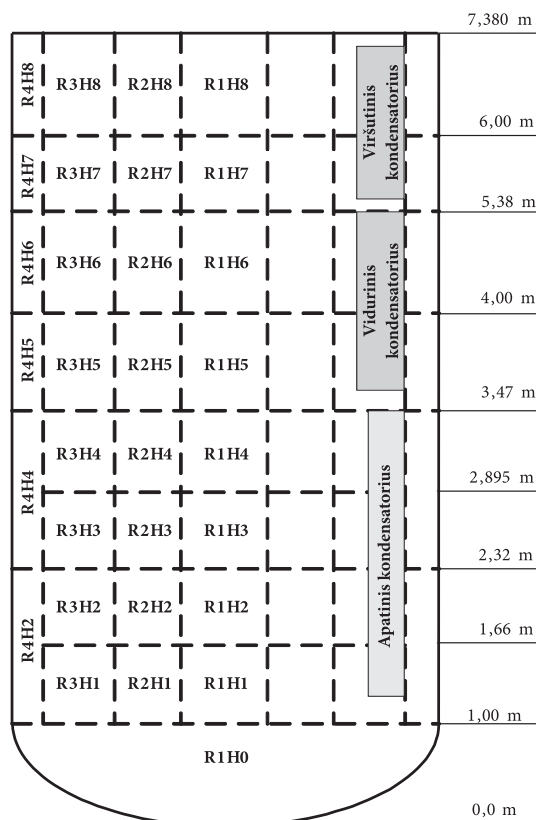
MISTRA eksperimentų stendo modelis, kurio nodalizacijos schema pavaizduota 4 pav., yra sudarytas iš 31 kontrolinio tūrio, kurie sujungti 50 atmosferinių jungčių. Pagal radiusą MISTRA stendas yra padalintas į 4 dalis (cilindrus). Išorinis cilindras ati-

tinka tarpelį tarp kondensatorių ir išorinės stendo sienelės. 5 cm atstumu nuo kondensatorių paviršiaus yra išskirta viena zona, kuria siekiama geriau įvertinti šilumos mainus su kondensatoriais. Centrinės modelio dalies skersmuo sudaro 40 cm. Toks stendo padalijimas modelyje pagal radiusą leidžia modeliuoti dujų maišymąsi stende ir šilumos mainus tarp stendo konstrukcijų ir atmosferos.

Pagal aukštį MISTRA stendas yra padalintas į 9 dalis. Žemiau apatinio kondensatoriaus buvo apibrėžtas vienas kontrolinis tūris. Apatinėje zonoje, kurioje susidaro stratifikacija, yra padarytas išsamnesnis stendo padalijimas pagal aukštį. Toks modeliavimas leidžia tiksliau aprašyti stratifikacijos sąlygas.

Siekiant išsamiai aprašyti garo kondensaciją ant apatinio kondensatoriaus buvo pasinaudota specialiu šilumos mainų modeliu, įtrauktu į COCOSYS programų paketą, leidžiančiu įvertinti ant kondensatoriaus sienelių susidaranti vandens plėvelę. Naudojant šį šilumos mainų modelį galima aprašyti vandens tekėjimą nuo kondensatoriaus viršaus iki apačios. Vandens plėvelės tekėjimas kondensatorių paviršiais buvo modeliuojamas 4 vandens jungtimis. Kondensatoriaus apačioje vanduo yra surenkamas ir nudrenuojamas už stendo ribų.

Kondensatoriams modeliuoti buvo aprašyta 14 struktūrų. Vidurinis ir viršutinis kondensatoriai buvo padalyti pagal aukštį į dvi dalis, o apatinis į keturias. Išsamnesnis apatinio kondensatoriaus dalijimas yra būtinas, nes prie jo susiformuoja tempera-



4 pav. MISTRA stendo nodalizacijos schema COCOSYS programų paketui

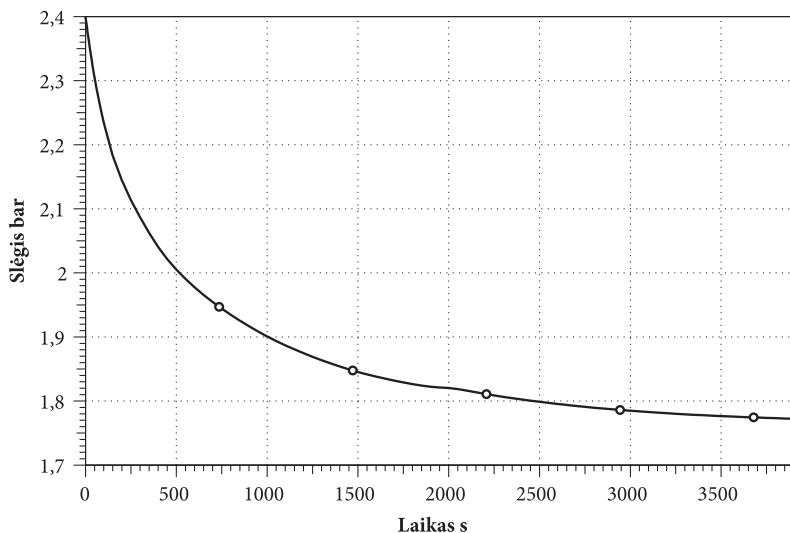
tūros ir garo koncentracijos gradientai. Išorinėms stendo sienelėms modeliuoti buvo aprašyta 11 struktūrų. Tačiau sudarytame modelyje nėra atskirai aprašyti atskirų stendo dalių jungiamosios dalys – flanšai. Modeliuojant stendo konstrukcijas įvertinti šilumos mainai konvekcija, spinduliavimu ir kondensacija.

#### 4. SKAIČIAVIMŲ REZULTATAI

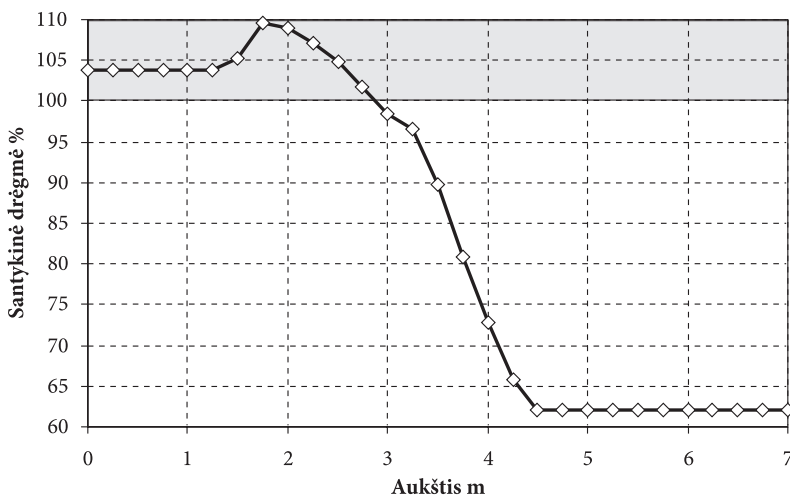
Bazinio modelio pradinės ir kraštinės sąlygos buvo nustatytos pagal 1-ojo etapo specifikaciją. Vidutinę dujų temperatūrą ir vidutinę garų tūrinę koncentraciją naudojant kaip homogenines pradines sąlygas visam stendo tūriui, suskaičiuotas slėgio kritimas MASP-0 atveju (5 pav.) buvo didesnis nei buvo gauta eksperimente (3 pav.). Skaičiavimai parodė, kad po 4000 s slėgis nukrenta iki beveik 1,8 bar, bet eksperimente jis viršija 2 bar. Patikrinus sudarytą COCOSYS programų paketo modelį ir išanalizavus skaičiavimo rezultatus buvo nustatyta, kad norint gauti teisingus skaičiavimo rezultatus nepakanka naudoti homogenines sąlygas visame stende, bet būtina turėti išsamius rezultatus apie temperatūros ir garo stratifikaciją prieš pradėdant eksperimentą. Iš gautų rezultatų taip pat seka, kad siekiant modeliuoti šilumos ir masės mainų procesus apsauginiame kiaučiame esant stratifikacijos sąlygoms nepakanka paprastų modelių, sudarytų iš 1 kontrolinio tūrio. Būtina išskirti ir išsamiai aprašyti tas stendo dalis, kuriose yra galima stratifikacija.

Gavus naujus duomenis apie temperatūros ir garo stratifikaciją MISTRA stende skaičiavimai buvo pakartoti. Sudarytame modelyje buvo numatyti nauji temperatūros ir garo tūrinės koncentracijos gradientai (2 pav.) [4]. Tačiau buvo pastebėta, kad su šiomis sąlygomis pradinio laiko momentu santykinė drėgmė stendo apačioje viršija 100% (6 pav.). Tokiomis sąlygomis neįmanoma vykdyti skaičiavimų, nes jos išeina už ribų, galimų COCOSYS programų pakete. Kadangi nebuvo gauta patikslintų duomenų iš eksperimentų organizatorių ir atsižvelgiant į tai, kad su šiais temperatūros ir garo gradientais oro masė stende yra 115,7 kg, t. y. atitinka eksperimento specifikaciją (žr. 1 pav.), buvo nuspręsta atlikti analizę su šiek tiek pakeistomis pradinėmis sąlygomis, leidžiančiomis vykdyti skaičiavimus. Pagrindinis šių parametrinių skaičiavimų tikslas buvo ištirti pradinį sąlygų įtaką skaičiavimo rezultatams ir nustatyti, kas lemia slėgio sumažėjimo greitį vykdytų MASP-n eksperimentų metu.

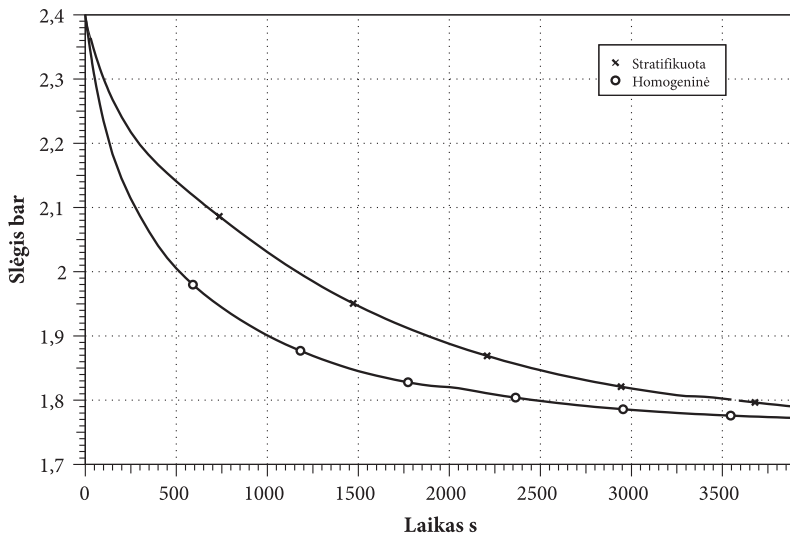
Pirmajame žingsnyje buvo nuspręsta sumažinti garų tūrinę koncentraciją stendo apačioje nuo 25 iki 20%. Būtina pabrėžti, kad kitos skaičiavimo sąlygos nebuvo keičiamos ir buvo išlaikomas tiesinis temperatūros ir garo tūrinės dalies kitimo dėsnis. Apskaičiuotas slėgio kitimas yra pavaizduotas 7 pav., kuriame kartu pateiktas ir palyginimas su variantu, kuriame priimta homogeninė atmosfera MISTRA stende. Kaip matyti, eksperimento pabaigoje suskaičiuotas slėgis skiriasi nedaug. Darant



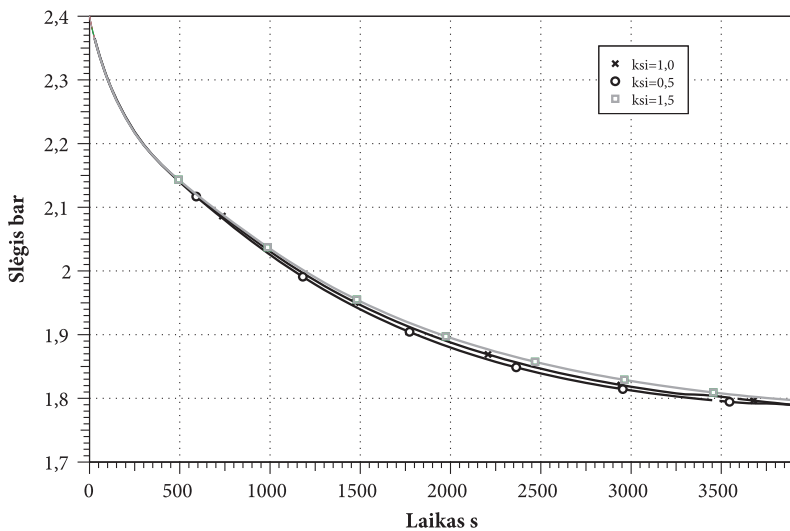
5 pav. Apskaičiuotas slėgio kitimas priimant, kad dujų mišinys stende yra homogeninis



6 pav. Santykinė drėgmė apskaičiuota pagal 2 pav. duomenis



7 pav. Slėgio kitimas, kai atmosfera yra stratifikuota arba homogeniška



8 pav. Slėgio kitimas keičiant pasipriešinimo koeficientą jungtys

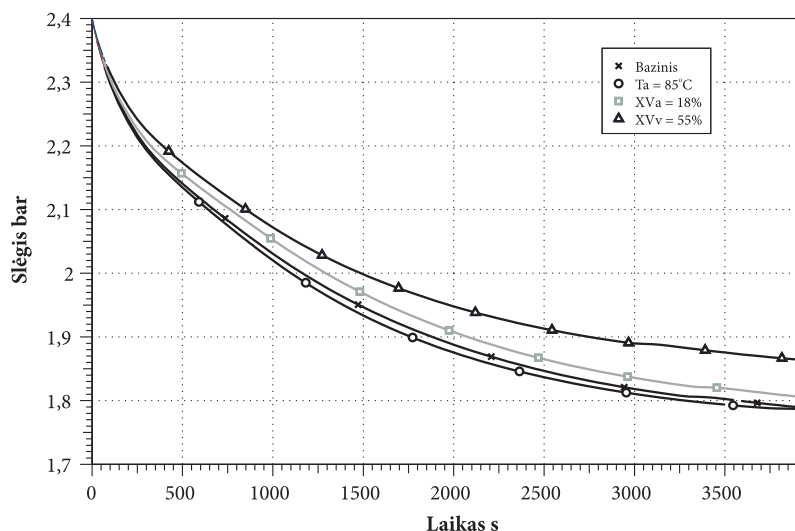
prielaidą, kad atmosfera yra stratifikuota, apskaičiuojamas lėtesnis slėgio mažėjimas ir skaičiavimų pabaigoje slėgis sudaro ~1,8 bar. Tačiau eksperimente išmatuotas slėgio sumažėjimas iki ~2,02 bar.

Iš pateiktų rezultatų seka, kad vien stratifikuotos atmosferos sudarymas neužtikrina gero skaičiavimo rezultatų sutapimo su matavimų, atliktais eksperimento metu, duomenimis. Siekiant išsiaiškinti pagrindinius veiksnius, lemiančius slėgio kitimą MISTRA stende, MASP-n eksperimentų metu buvo atlikti tolesni skaičiavimai keičiant kitus modeliavimo parametrus.

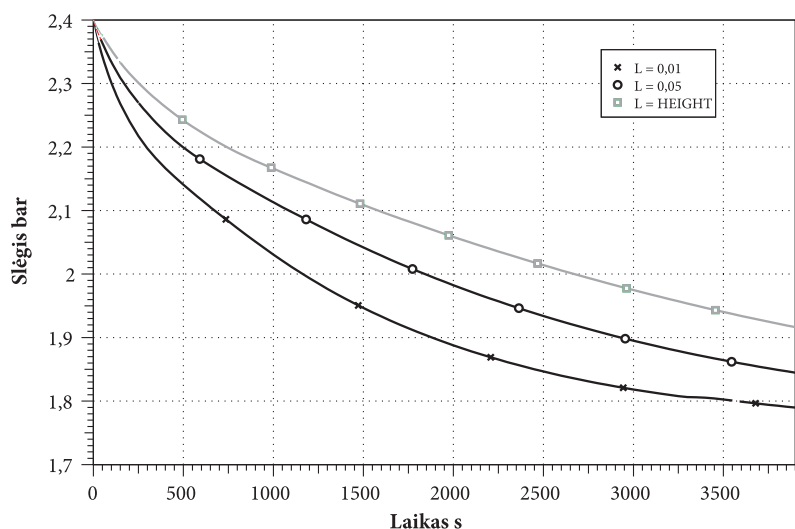
Aprašant atmosferines jungtis sudarytame eksperimentų stendo modelyje COCOSYS programų paketui yra numatomas jungties plotas, hidraulinis ilgis ir pasipriešinimo koeficientas. Jungties plotas yra vienareikšmiškai apibrėžtas dalijant stendą į kontrolinius tūrius. Hidraulinis ilgis įvertinamas kaip atstumas tarp sujungtų kontrolinių tūrių centrų. Pasipriešinimo koeficientas sudarytame modelyje visoms jungtims buvo priimtas vienodas ir lygus 1,0. Pasipriešinimo koeficientas yra vienas labiausiai neapibrėžtų parametrų, nes šiuo atveju nėra jokių kliūčių tekėjimui, ir masės mainai vyksta tarp „virtualiai“ sudalytų tūrių. Siekiant įvertinti šio koeficiento įtaką gautiems rezultatams buvo atlikti papildomi skaičiavimai. Viename variante pasipriešinimo koeficientas numatytas 0,5 visoms jungtims, o kitame 1,5

visoms jungtims. Gauti skaičiavimų rezultatai yra pavaizduoti 8 pav. Šiame paveiksle yra palyginti visi trys variantai su skirtingais pasipriešinimo koeficientais. Matyti, kad šis parametras turi tik nedidelę įtaką skaičiavimo rezultatams. Priimant pasipriešinimo koeficientą 1,5 apskaičiuotas slėgis MISTRA stende padidėja tik neženkliai. Iš to seka, kad ne šis parametras lemia slėgio kitimą MASP-0 eksperimente.

Kiti parametrai, kurie nėra apibrėžti visiškai tiksliai, yra dujų temperatūra apatinėje stendo dalyje, garo tūrinė dalis apatinėje ir viršutinėje stendo dalyse. Keičiant šiuos parametrus buvo atlikti papildomi skaičiavimai, kurių tikslas įvertinti pradinės dujų stratifikacijos įtaką rezultatams. Gauti rezultatai yra pavaizduoti 9 pav. Pirmame variante buvo daroma prielaida, kad pradinė temperatūra apatinėje stendo dalyje yra 85°C (baziniame variante 87°C). 9 pav. šis skaičiavimų variantas pavaizduotas kreive Ta = 85°C. Matyti, kad jeigu apatinėje stendo dalyje temperatūra yra žemesnė, tai slėgio mažėjimas yra mažesnis nei apskaičiuota baziniame variante. Be to, įtaka slėgio kitimui yra labai maža. Kitame variante buvo daryta prielaida, kad apatinėje stendo dalyje tūrinė garo dalis sudaro ne 20%, bet 18%. Gauti rezultatai pavaizduoti kreive XVa = 18% (9 pav.). Matyti, kad šiuo atveju slėgis mažėjimą šiek tiek lėčiau ir skaičiavimo pabaigoje jis sudaro 1,8 bar. Tačiau ši vertė yra toli nuo išmatuotos. Trečias



9 pav. Slėgio kitimas keičiant stratifikacijos sąlygas



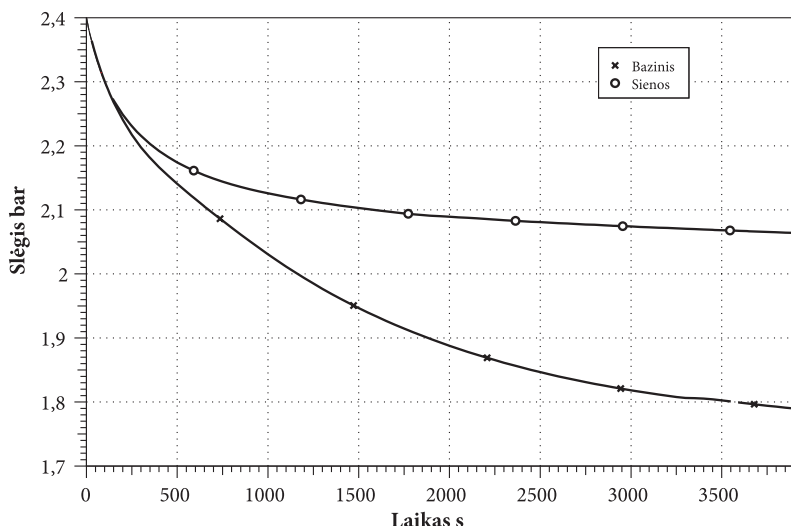
10 pav. Slėgio kitimas dėl konstrukcijų būdingo ilgio

variantas apskaičiuotas darant prielaidą, kad viršutinėje stendo dalyje tūrinė garo dalis sudaro ne 60%, bet 55%. Gauti rezultatai pavaizduoti kreive XVv = 55% (9 pav.). Kaip matyti, šis variantas turi gana ženkliai įtaką apskaičiuotam slėgio kitimui. Gauti rezultatai yra artimesni išmatuotam slėgio kitimui, tačiau skirtumas išlieka didelis. Be to, būtina atkreipti dėmesį į tai, kad darant šią prielaidą ženkliai padidėjo oro masė MISTRA stende. Šiame variante ji sudaro beveik 123 kg ir skiriasi nuo oro masės, numatytos eksperimento specifikacijoje (115 kg). Iš pateiktų rezultatų galima daryti išvadą, kad tiek temperatūros, tiek garo pasiskirstymas MISTRA stende šio eksperimento metu neturi lemiamos įtakos apskaičiuotam slėgio kitimui.

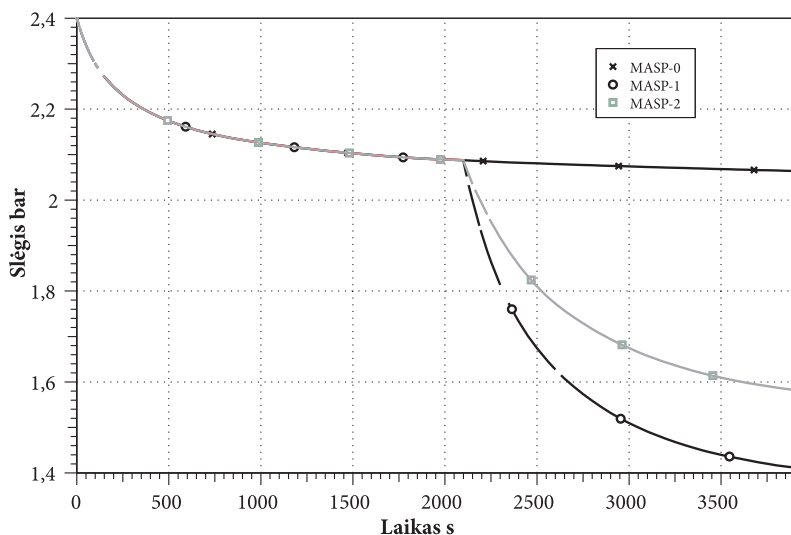
Aprašant eksperimentų stendo konstrukcijas sudarytame modelyje COCOSYS programų paketui yra nurodomas plotas, šilumos mainų modeliai (konvekcija, kondensacija ir spinduliavimas), konstrukcijos sudėtis ir būdingi matmenys – aukštis ir ilgis. COCOSYS programų paketo vartotojo vadove [3] yra nurodoma, kad charakteringas ilgis turi būti numatomas  $l = A/U$ ; čia  $A$  – konstrukcijos plotas,  $U$  – perimetras. Vertikalioms sienelėms būdingas ilgis yra lygus sienelės aukščiui. Šiame vartotojo vadove taip pat teigiama, kad realių jėginių modeliavimui pakanka būdingą ilgį numatyti  $l = 0,01$  m [3]. Atliekant aerozolių nusėdimo skaičiavimus KAEVER eksperimentų stende buvo

nustatyta, kad modeliuojant aerozolių nusėdimą geriausia yra naudoti būdingą ilgį 0,05 m [5]. Kaip matyti, šio modeliavimo parametro reikšmės nėra labai aiškiai apibrėžtos, todėl buvo nuspręsta įvertinti šio parametro įtaką skaičiavimo rezultatams. Baziniame skaičiavimų variante buvo daroma prielaida, kad būdingas konstrukcijos ilgis yra 0,01 m. Gauti rezultatai yra pavaizduoti 10 pav. Kaip matyti, šis parametras turi ženkliai įtaką skaičiavimų rezultatams. Darant prielaidą, kad būdingas ilgis yra lygus struktūros aukščiui, skaičiavimų pabaigoje slėgis yra ~1,92 bar, t. y. ~0,1 bar didesnis nei baziniame variante, kur šis parametras yra 0,01 m. Tačiau net ir šis aukštesnis slėgis yra gana ženkliai žemesnis už eksperimento metu išmatuotą slėgį 2,02 bar. Iš to seka išvada, kad nors šis parametras yra svarbus, tačiau vien jo nepakanka norint teisingai sumodeliuoti slėgio kitimą MASP-0 eksperimento metu.

Paskutiniame žingsnyje buvo nutarta įvertinti, kokią įtaką slėgio kitimui MISTRA stende turi išorinių stendo sienelių modeliavimas. Buvo atlikti skaičiavimai darant prielaidą, kad šilumos mainai su išorinėmis stendo sienelėmis nevyksta ir slėgio mažėjimas priklauso tik nuo garo kondensacijos ant apatinio kondensatoriaus. Gauti rezultatai parodė, kad apskaičiuotas slėgis labai gerai sutampa su išmatuotu (11 pav.). Siekta nustatyti, kuri išorinių sienelių dalis turi didžiausią įtaką. Nustatyta, kad lemiamą įtaką turi išorinė



11 pav. Slėgio kitimas įvertinant šilumos perdavimą per išorinę sienelę už apatinio kondensatoriaus ir jo neįvertinant



12 pav. Slėgio kitimas įvertinant lašelių sąveiką su atmosfera

MISTRA stendo sienelė, esanti už apatinio kondensatoriaus. Jeigu sudarytame modelyje aprašomos visos, išskyrus šią sienelę, skaičiavimo rezultatai gerai sutampa su atliktais matavimais (žr. 3 pav.). Iš čia seka, kad COCOSYS programų paketu yra apskaičiuojami per daug intensyvūs šilumos mainai su šia sienele, t. y. per daug garo atiteka į tarpą tarp kondensatoriaus ir išorinės stendo sienelės. Deja, tikslesnių duomenų apie dujų temperatūrą ir tūrinę garo dalį tarpe tarp apatinio kondensatoriaus ir išorinės stendo sienelės arba apie dujų tekėjimą per šį tarpą nėra, nes tokie matavimai šioje dalyje nevykdomi. Be to, pažymėtina, kad sudarytame modelyje nėra vertinami flanšai, jungiantys atskiras MISTRA stendo dalis. Kaip tik už apatinio kondensatoriaus yra 2 flanšai, kurių storis (11,9 cm) yra didesnis už šoninės stendo sienelės storį (1,5 cm šoninė sienelė ir 2,5 cm apatinė stendo sienelė). Flanšų įvertinimas galėtų turėti įtakos skaičiavimo rezultatams, ir ateityje numatoma atlikti skaičiavimus, siekiant įvertinti flanšų įtaką gaunamiems rezultatams.

Turint slėgio kitimo matavimo rezultatus COCOSYS programų paketu galima pasiekti labai gerą sutapimą tarp išmatuoto ir suskaičiuoto slėgio kitimo. Tai galima padaryti modeliuojant išorines MISTRA stendo sieneles, tačiau ribojant jungties, aprašomos dujų tekėjimą už apatinio kondensatoriaus, plotą.

Galvus pakankamai gerą apskaičiuoto ir išmatuoto slėgio kitimą buvo atlikti MASP-1 ir MASP-2 eksperimentų skaičiavimai. Šiuose

eksperimentuose yra aktyvuojamas vandens purkštukas, kuris įrengtas stendo viršuje, centrinėje dalyje. MASP-1 eksperimento metu yra tiekiamas 40°C temperatūros vanduo, o MASP-2 – 60°C temperatūros vanduo. Tai yra vienintelis skirtumas tarp šių eksperimentų. Atliktų skaičiavimų rezultatai yra pavaizduoti 12 pav. MASP-0 eksperimento atveju slėgis per 2000 s sumažėja iki ~2,15 bar ir šitoks išlieka iki skaičiavimų pabaigos. Toks slėgis yra šiek tiek aukštesnis už eksperimento metu išmatuotąjį (3 pav.), tačiau šiuo atveju dėl eksperimento rezultatų trūkumo buvo nutarta modelio nebekeisti. MASP-1 ir MASP-2 eksperimentuose vanduo pradamas purkšti praėjus 2100 s. Kaip matyti, kai vandens temperatūra yra žemesnė (MASP-1 eksperimentas), slėgio mažėjimas yra greitesnis, nes sukondensuojama daugiau garo. Skaičiavimų pabaigoje slėgis MASP-1 eksperimento atveju sudaro ~1,42 bar (išmatuotas ~1,42 bar). MASP-2 atveju apskaičiuotas galutinis slėgis sudaro 1,58 bar (išmatuotas ~1,62 bar). Kaip matyti, nevertinant šilumos mainų su išorine stendo sienele už apatinio kondensatoriaus gaunamas pakankamai geras slėgio mažėjimas tiek be purkštukų, tiek naudojant purkštukus. Iš to seka, kad COCOSYS programų pakete įdiegtas purkštukų modelis gerai aprašo šilumos mainus tarp atmosferos ir purškiamų vandens lašelių.

Siekiant toliau nagrinėti MISTRA eksperimentų rezultatus, numatoma atlikti skaičiavimus modeliuojant visą eksperimen-

to eigą, pradedant eksperimentu M5, kurio metu yra sukuriama stratifikuota atmosfera, ir užbaigiant MASP-n eksperimentais, kuriuose yra aktyvuojami vandens purkštukai.

## 5. IŠVADOS

1. Dalyvaujant 6-osios bendrosios programos projekte SARNET buvo atliktas MISTRA stende vykdytų MASP-n eksperimentų modeliavimas COCOSYS programų paketu. Gauti skaičiavimo rezultatai buvo palyginti su išmatuotais parametrais. Šiame darbo etape buvo nagrinėjama, kaip slėgio kitimo greitis priklauso nuo purškiamų lašelių temperatūros ir ar purkštukų modeliai naudojamuose programų paketuose gerai aprašo šį reiškinį.

2. Atlikus skaičiavimus gauta, kad siekiant modeliuoti šilumos ir masės mainų procesus apsauginiame kiauze esant stratifikacijos sąlygoms nepakanka paprastų modelių, sudarytų iš 1 kontrolinio tūrio, todėl būtina išskirti ir išsamiai aprašyti tas stendo dalis, kuriose yra galima stratifikacija.

3. Aprašant jungtis pasipriešinimo koeficientas neturi didelės įtakos apskaičiuotam slėgio kitimui MISTRA eksperimentų stende.

4. Sudarant eksperimentinių stendų modelius būtina užtikrinti, kad atliekant skaičiavimus būtų išlaikomos eksperimento aprašyme nurodytos kraštinės sąlygos, nes keičiant modeliuojamos stratifikacijos sąlygas gali pakisti dujų mišinio sudėtis ir tai turėtų įtakos skaičiavimo rezultatams.

5. Būdingas konstrukcijos ilgis yra neapibrėžtas parametras, turintis ženklų įtaką apskaičiuotam slėgio kitimui MASP-0 eksperimento metu. Šio parametro reikšmę galima įvertinti tik tiksliai žinant kitus modeliavimo parametrus.

6. Šilumos perdavimas per išorinę stendo sienelę už apatinio kondensatoriaus yra lemiantis veiksnys, apskaičiuojant slėgio kritimo greitį MASP-n eksperimentuose. Tačiau šioje stendo dalyje nėra pakankamai matavimo duomenų, pagal kuriuos būtų galima tiksliau įvertinti gaunamus skaičiavimo rezultatus. Be to, už apatinio kondensatoriaus yra 2 flanšai, kurie nemodeliuojami sudarytame modelyje ir kurių storis yra didesnis už šoninės stendo sienelės storį. Flanšų įvertinimas galėtų turėti įtakos skaičiavimo rezultatams, todėl ateityje numatoma atlikti skaičiavimus, siekiant įvertinti flanšų įtaką gaunamiems rezultatams.

7. COCOSYS programų pakete įdiegtas purkštukų modelis gerai aprašo šilumos mainus tarp atmosferos ir purškiamų vandens lašelių.

8. Ateityje numatoma atlikti skaičiavimus modeliuojant visą eksperimento eigą, pradedant eksperimentu M5, kurio metu yra sukuriama stratifikuota atmosfera, ir užbaigiant MASP-n eksperimentais, kuriuose yra aktyvuojami vandens purkštukai.

Gauta 2007 07 10

Priimta 2007 11 15

## Literatūra

1. Malet J., Porcheron E., Vendel J., Blumenfeld L., Tkatschenko I. SARNET Spray Benchmark. TOSQAN and MISTRA specification report. 2006.
2. Abdo D., Tomassian R., Brinster J., Roumier D., Tkatschenko I., Wid-Loeher J. L. M5-MASP MISTRA Experimental Results, 2006.
3. Klein-Heßling W. COCOSYS v1.2 Manuals GRS-P-3. In: Preparation Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. 2000. 469 p.
4. Blumenfeld L., Tkatschenko I. Benchmarking of CFD and LP Codes for Spray Systems in Containment Applications. MASP tests PART\_HYDRO\_B: Complementary information, 2006.
5. Schwarz S. Impact of the Heat Transfer on the Aerosol Results. COCOSYS Tips & Tricks, Tip 2003-001, Revision 1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. September 2003.

Mantas Povilaitis, Egidijus Urbonavičius

### SIMULATION OF MASP-n EXPERIMENTS PERFORMED IN MISTRA TEST FACILITY USING CODE COCOSYS

#### Summary

The paper describes the simulation of MASP-n experiments were performed in the MISTRA test facility using the COCOSYS lumped-parameter code. The work is performed within the program for investigation of spray interaction with the atmosphere of containments of nuclear power plants, which is organized in the network of the SARNET competence. The paper presents the developed model of a MISTRA test facility for the COCOSYS code and the results of the analysis. The parametric calculations helped to determine the most important parameters influencing the calculated depressurization rate in the MISTRA test facility during MASP-n experiments.

**Key words:** MISTRA test facility, modelling of experiments

Мантас Повилайтис, Эгидиус Урбонавичюс

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ MASP-n, ПРОВЕДЕННЫХ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ СТЕНДЕ MISTRA С ПОМОЩЬЮ КОДА COCOSYS

#### Резюме

Описывается моделирование экспериментов MASP-n, проведенных на экспериментальном стенде MISTRA с помощью кода COCOSYS. Эксперименты MASP-n являются частью программы, организованной в рамках международной программы SARNET, для исследования взаимодействия между разбрызгиваемыми каплями воды и атмосферой защитных оболочек АЭС. В статье представлены описание разработанной модели экспериментального стенда MISTRA для кода COCOSYS, а также полученные результаты расчетов. Произведенные расчеты позволили определить основные параметры, влияющие на скорость снижения давления на экспериментальном стенде MISTRA во время экспериментов MASP-n.

**Ключевые слова:** стенд MISTRA, моделирование экспериментов