

Skaičiavimo modelio ir modeliavimo parametru įtaka aerozolių nusėdimo skaičiavimams PHEBUS eksperimentų stende

Aurimas Kontautas,

Egidijus Urbonavičius,

Sigitas Rimkevičius

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

Šis darbas atliktas dalyvaujant tarptautinio mokslinių tyrimų programoje PHEBUS. PHEBUS projekto pagrindinis tikslas yra skilimo produktų išsiskyrimo, pernešimo ir nusėdimo procesų analizė sudarant sąlygas, panašias į sunkiųjų avarių sąlygas lengvojo vandens reaktoriuose. Šiame darbe analizuojami PHEBUS projekte atlikto FPT-1 eksperimento metu apsauginiame kiaušte vykstantys šilumos ir masės mainų procesai ir aerozolių nusėdimas. Analizei atlikti buvo sudaryti du apsauginio kiaušto modeliai COCOSYS programų paketui. Bazinis modelis leidžia gerai apskaičiuoti termodinaminių parametru kitimą eksperimento metu, tačiau aerozolių nusėdimo pasiskirstymas apskaičiuojamas nepakankamai. Taikant patikslintą PHEBUS apsauginio kiaušto modelį gautas geresnis dujų srautų pasiskirstymas, kuris turėjo įtakos aerozolių nusėdimo pasiskirstymo rezultatams. Galima teigti, kad nors termodinaminių procesų analizei pakanka paprastesnių modelių, tačiau norint teisingai apskaičiuoti aerozolių pasiskirstymą būtina sudaryti išsamesnius apsauginio kiaušto modelius.

Raktažodžiai: nodalizacija, modeliavimas, aerozolių nusėdimas

1. ĮVADAS

Siekiant iširti ir suprasti branduolinėse jėgainėse avarių metu vykstančius reiškinius yra vykdomos įvairios eksperimentinių ir analitinių tyrimų programos. Viena svarbiausių tyrimų programų yra PHEBUS [1]. Bendroji PHEBUS eksperimentų stendo schema yra pavaizduota 1 pav. Schemoje pavaizduota, kad eksperimentinis stendas yra sudarytas iš trijų pagrindinių dalių: aktyviosios dalies, reaktoriaus aušinimo sistemos kontūro ir apsauginio kiaušto. Šiame eksperimentų stende yra tiriamas branduolinio kuro pažeidimas, pradedant kuro apvalkalo oksidacija ir vandenilio susidarymu, pasiekiant kuro išsilydimą ir lydalo susikaupimą apatinėje reaktoriaus dalyje. Taip pat yra tiriamas radioaktyviųjų dalijimosi produktų ir struktūrinių medžiagų ištekėjimas atsižvelgiant į jų fizinę ir cheminę sąveiką, pernešimą per reaktoriaus aušinimo sistemos vamzdynus ir nusėdimą apsauginiame kiaušte. Svarbus yra lakiųjų radioaktyviojo jodo formų susidarymo ir pernešimo tyrimas. Iki šiol dar nėra gerai suprasta cheminė jodo sąveika su įvairiomis medžiagomis, ypač dažais. Jau per pirmuosius FPT-0 ir FPT-1 eksperimentus, įvykdytus 1993 m. gruodį ir 1996 m. liepą, pasiektos tokios reaktoriaus aktyviosios zonos degradacijos stadijos, kurios stebėtos įvykus avarijai Three-Mile-Island branduolinėje jėgainėje. Atlikti eksperimentai leido geriau suprasti radionuklidų pernešimo procesus reaktoriaus aušinimo kontūre ir radionuklidų nusėdimo procesus apsauginiame kiaušte.

PHEBUS tyrimų programa neapsiriboja vien eksperimentų vykdymu. Kartu yra vykdoma plati analitinių tyrimų progra-

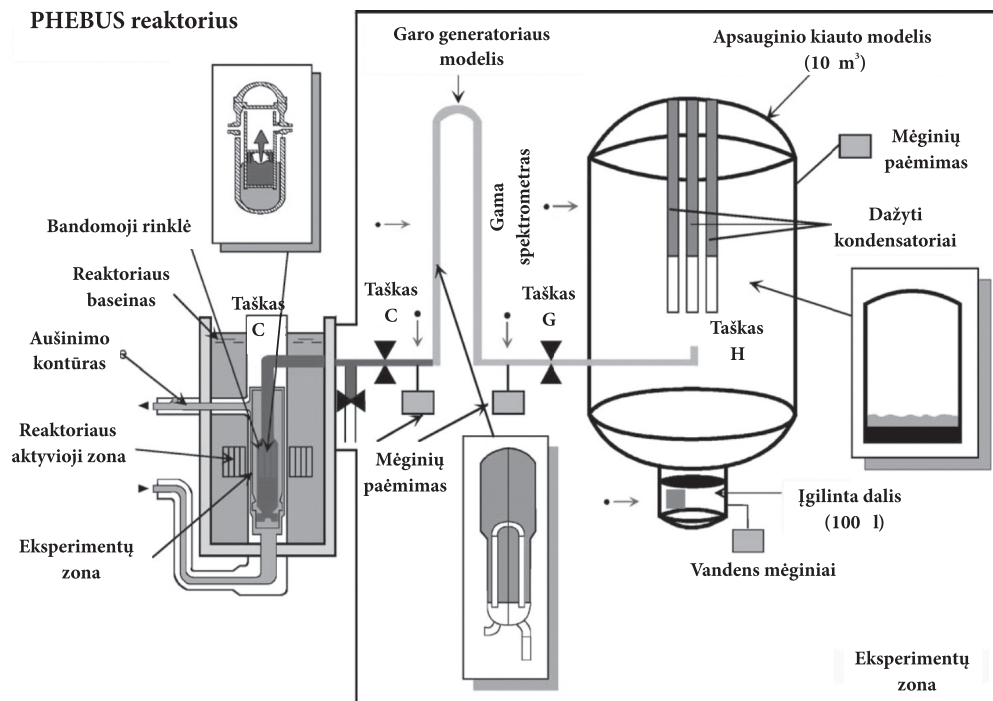
ma, kurioje dalyvauja daug organizacijų iš įvairių pasaulio šalių. Lietuvos energetikos institutas (LEI) į šią programą įsitraukė 2005 metais. Viena tyrimo sričių, kurioje LEI atlieka skaičiavimus, yra PHEBUS apsauginiame kiaušte vykstantys procesai.

Šiame straipsnyje yra pristatomi PHEBUS FPT-1 eksperimento metu apsauginiame kiaušte vykstančių procesų modeliavimo rezultatai. Skaičiavimams atlikti buvo sudarytas PHEBUS apsauginio kiaušto modelis programų paketui COCOSYS. Ypač daug dėmesio buvo skirta termodinaminių parametru, tokių kaip slėgis, temperatūra ir santykinė drėgmė, skaičiavimui, nes kol nėra gerų termodinaminių rezultatų, sunku tikėtis gerų rezultatų modeliuojant aerozolių pernešimo procesus. Atliekant skaičiavimus buvo sukurti skirtingi PHEBUS apsauginio kiaušto modeliai, kurie leido įvertinti nodalizacijos, t. y. padalijimo į kontrolinius tūrius, įtaką rezultatams. Pasirinkus tinkamą nodalizaciją buvo įvertinta, kokią įtaką aerozolių nusėdimui turi garo kondensacija ant aerozolių.

2. EKSPERIMENTO METODIKA

2.1. PHEBUS stendo apsauginis kiauštas

PHEBUS eksperimentų stendo apsauginio kiaušto (angl. containment) aukštis yra 5 m, skersmuo – 1,8 m. Bendras apsauginio kiaušto tūris sudaro 10 m³. Apsauginis kiauštas yra cilindro formos su užapvalinta viršutine ir apatine dalimis. Stendo apačioje yra įgilinta dalis garo kondensatui, susidaranti eksperimento eigoje, surinkti. Įgilintos dalies tūris yra 0,1 m³. Šios dalies aukštis yra 0,6 m, skersmuo – 0,584 m. Viršutinėje apsauginio kiaušto



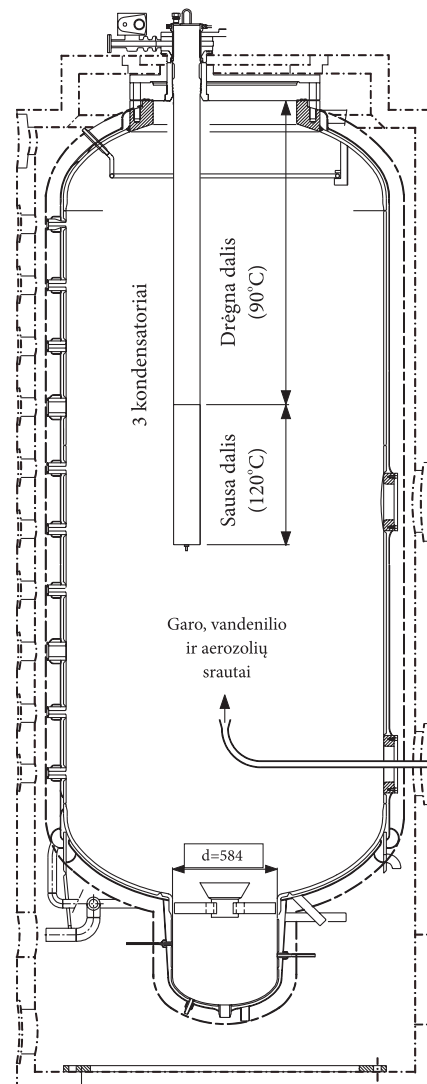
1 pav. PHEBUS eksperimentų stendo bendroji schema

dalyje yra 3 kondensatoriai, kurių bendras plotas yra $3,333 \text{ m}^2$, vieno kondensatoriaus skersmuo yra $0,15 \text{ m}$. Kondensatoriai susideda iš dviejų zonų su skirtingomis temperatūromis, t. y. „drėgna“ viršutinė ir „sausas“ apatinė dalis. Vieno kondensatoriaus „drėgnos“ dalies, ant kurios vyksta garo kondensacija, plotas yra $0,775 \text{ m}^2$. Vieno kondensatoriaus „sausos“ dalies plotas yra $0,336 \text{ m}^2$. Apsauginio kiauto sienelės pagamintos iš nerūdijančio AISI 316L markės plieno. FPT-1 eksperimento metu išorinės apsauginio kiauto sienelės yra kaitinamos siekiant išvengti garo kondensacijos ir dėl to atsirandančio aerozolių nusėdimo ant vertikalų sienelių ir viršutinio skliauto. Į PHEBUS eksperimentų stendą įtekančio garo, vandenilio ir aerozolių srauto įtekėjimo vamzdžio antgalis yra $-2,86 \text{ m}$ aukštyje. Vamzdžio antgalis, esantis centre, yra kūgio formos ir nukreiptas į kondensatorius (žr. 2 pav.) [2].

2.2. Pradinės ir kraštinės sąlygos

Prieš eksperimentą apsauginiame kiaute yra oras. Vėliau tiekiant azotą slėgis apsauginiame kiaute yra pakeliamas iki $2,1 \text{ bar}$. Pradedant eksperimentą apsauginiame kiaute deguonies koncentracija yra 5% , likusią dalį sudaro azotas. Sudarius tokias sąlygas siekiama išvengti galimo vandenilio, susidarancio reaktoriuje dėl garo sąveikos su cirkoniu, degimo. Pradedant eksperimentą apsauginiame kiaute vidutinė oro temperatūra yra 108°C , vidutinis santykinis drėgnumas yra $57,62\%$. PHEBUS stende esančių kondensatorių temperatūra viso eksperimento metu yra laikoma pastovi. „Drėgnos“ dalies temperatūra sudaro 90°C , o „sausos“ – 120°C . Ant „drėgnų“ kondensatorių susidaręs kondensatas yra nukreipiamas į apatinę stendo dalį.

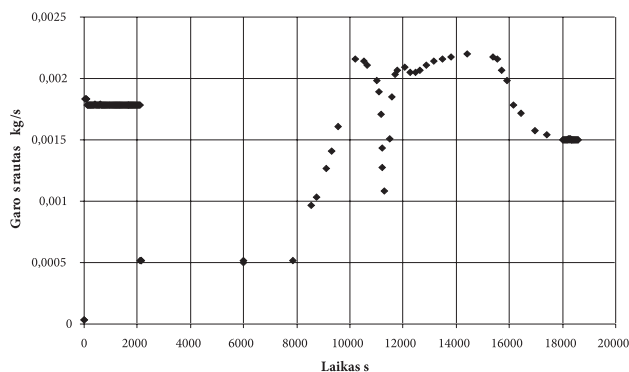
Kondensatoriai ir visas stendo vidinis paviršius yra padengtas epoksidiniais dažais. Išorinių stendo sienelių temperatūra viso eksperimento metu yra pastovi ir sudaro 110°C . Ilgilintos stendo dalies sienelių temperatūra yra 90°C . Pradedant eksperimentą šioje dalyje yra 125 l vandens.



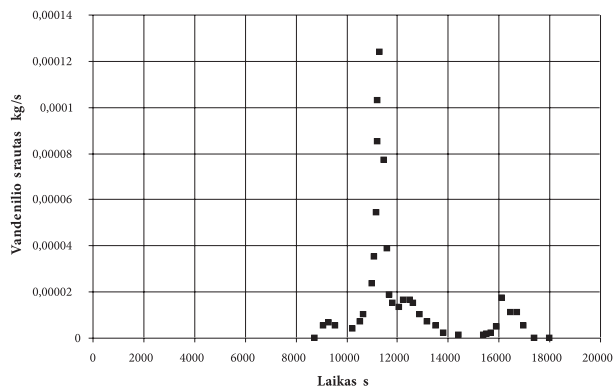
2 pav. PHEBUS eksperimentų stendo apsauginis kiautas

Eksperto eigoje iš stendo buvo imami dujų mėginiai. Imant mėginius dujų srautas sudarė $5,16 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$. Dujų mėginiai pradami imti po 6300 s ir imami periodiškai [2]. Šis dujų paėmimas iš apsauginio kiauto yra įvertinamas ir sudarytame COCOSYS modelyje.

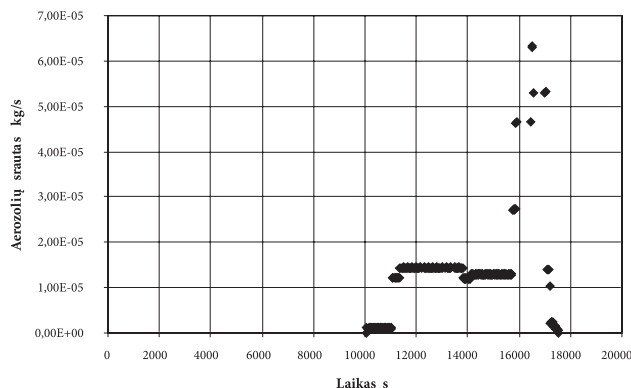
Ekspertas pradamas į reaktorių tiekiant 1,8 g/s garo srautą (žr. 3 pav.). Šis srautas patenka ir į apsauginį kiautą. Praėjus 2000 s garo srautas yra sumažinamas iki 0,5 g/s ir atliekamas matavimo įrangos kalibravimas. Po įrangos kalibravimo fazės yra padidinama reaktoriaus galia ir įtekančio garo srautas padidinamas iki 2,2 g/s. Šioje eksperimento fazėje vyksta egzoterminė garo reakcija su cirkoniu, kurios metu susidaro vandenilis. Įtekančio vandenilio srautas yra pavaizduotas 4 pav. Kaip matyti, praėjus ~11300 s nuo eksperimento pradžios yra stebimas gerokas garo srauto sumažėjimas (žr. 3 pav.), o van-



3 pav. | PHEBUS apsauginį kiautą įtekančio garo srautas



4 pav. | PHEBUS apsauginį kiautą įtekančio vandenilio srautas



5 pav. | PHEBUS apsauginį kiautą įtekančių aerosolių srautas

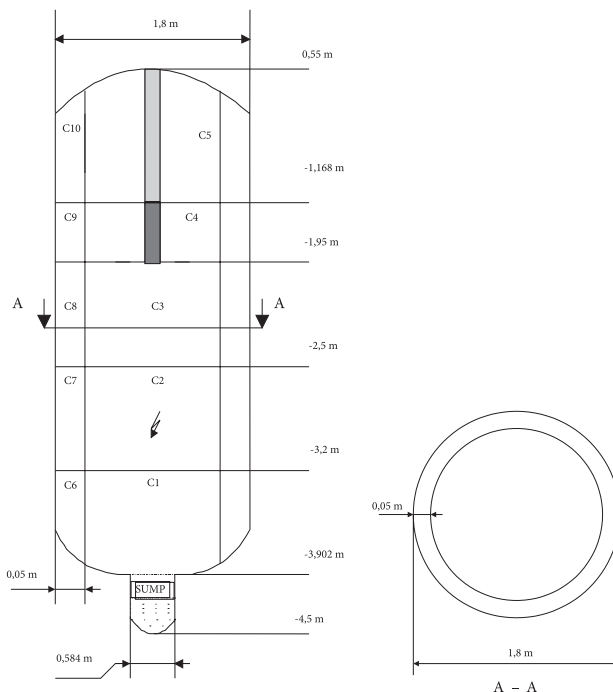
denilio srautas tuo pačiu metu padidėja iki ~1,2 g/s (žr. 4 pav.). Eksperto pabaigoje reaktorių yra sustabdomas ir garo srautas sumažinamas iki 1,5 g/s. Vandenilio susidarymas reaktoriuje ir ištekėjimas į apsauginį kiautą nutrūksta praėjus ~17400 s nuo eksperimento pradžios. Praėjus ~18800 s po eksperimento pradžios PHEBUS apsauginis kiautas yra izoliuojamas nuo reaktoriaus aušinimo kontūro ir nuo šio momento jokios medžiagos į apsauginį kiautą nebetenka. Viso eksperimento metu į apsauginį kiautą įtekėjo ~27,22 kg garo ir ~96 g vandenilio.

5 pav. pavaizduotas į apsauginį kiautą įtekančių aerosolių srautas. Aerosoliai į apsauginį kiautą pradeda tekėti po ~10000 s, kai reaktoriuje yra pažeidžiami kuro apvalkalai. Praėjus ~16500 s pasiekiamas didžiausias įtekančių aerosolių srautas $6,28 \cdot 10^{-5} \text{ kg/s}$. Tuo metu branduolinis kuras lydosi reaktoriuje. Iš viso eksperimento metu į apsauginį kiautą įteka ~130,8 g aerosolių. Po eksperimento buvo nustatyta, kad vidutinis į stendą įtekančių aerosolių skersmuo buvo $2,79 \cdot 10^{-6} \text{ m}$, o aerosolių skersmens dispersija sudarė 1,9.

Visi šie pateikti duomenys apie garo, vandenilio ir aerosolių srautus yra naudojami sudarytame COCOSYS modelyje.

3. PHEBUS STENDO BAZINIS MODELIS COCOSYS PROGRAMŲ PAKETUI

Siekiant sumodeliuoti aerosolių ir radionuklidų nusėdimo pasiskirstymą eksperimentų stende buvo naudotas COCOSYS programų paketas. COCOSYS yra suvidurkintų parametrų programų paketas, skirtas išsamiam visų svarbių procesų, vykstančių tiek projektinių, tiek neprojektinių avarijų metu lengvojo vandens reaktorių apsauginiuose kiautuose, modeliavimui [3]. PHEBUS eksperimento skaičiavimams atlikti buvo naudojama COCOSYS versija V2.3v9. Skaičiavimams atlikti buvo sudarytas apsauginio kiauto modelis, susidedantis iš 11 kontrolinių tūrių, 14 jungčių dujų ir 1 jungties vandens tekėjimo modeliavimui (žr. 6 pav.). Šis modelis yra vadinamas baziniu.



6 pav. PHEBUS apsauginio kiauto modelis COCOSYS programų paketui

Apsauginio kiauto modelis buvo sudarytas siekiant įvertinti konvecinius dujų srautus, susidarančius eksperimentų stende. Šie srautai gali turėti įtakos aerozolių nusėdimo modeliavimo rezultatams. Šilumos mainams su apsauginio kiauto sienelėmis modeliuoti yra aprašytos 8 struktūros. Dar 2 struktūros yra aprašytos kondensatoriams, esantiems apsauginiame kiaute, modeliuoti. Aprašytų struktūrų temperatūra yra palaikoma pagal eksperimento kraštines sąlygas.

Siekiant įvertinti stendo viduje susidarančius dujų srautus prie išorinių sienelių paviršių 5 cm atstumu yra padalijimo pagal radiusą riba. Taip siekiama ne tik įvertinti vidinius srautus, bet ir geriau įvertinti šilumos srautus su sienelėmis, kurie yra intensyvesni prie konstrukcijų paviršiaus.

Pagal aukštį stendas yra padalytas atskiriant įgilintą dalį. Stendo viršuje yra atskiriamos „sausa“ ir „drėgna“ kondensatorių dalys. Stendo dalis tarp kondensatorių apačios ir įgilintos dalies padalyta į tris beveik lygias dalis, kurių aukštis ~0,7 m.

Siekiant sumodeliuoti dujų srautus, susidarančius PHEBUS eksperimentų stendo apsauginiame kiaute, atliktų skaičiavimų metu yra aprašyta 14 atmosferinių jungčių. Šių jungčių plotas atitinka geometrinį plotą, susidarantį tarp jungiamųjų kontrolinių tūrių. Taip pat yra sumodeliuota vandens jungtis tarp kontrolinių tūrių C5 ir SUMP, kuri aprašo garo kondensato nukreipimą nuo kondensatorių į apatinę stendo dalį.

Šilumos mainams per apsauginio kiauto sienelės su aplinka yra aprašytos 8 konstrukcijos. Apsauginio kiauto viduje šilumos mainams tarp kondensatorių ir atmosferos yra aprašytos dar dvi konstrukcijos. Visos apsauginio kiauto sienelės ir kondensatoriai yra sudaryti iš nerūdijančio plieno ir padengti epoksidiniais dažais.

Įtekančio garo, vandenilio ir aerozolių srautai yra nustatyti remiantis eksperimento metu išmatuotais rezultatais (žr. 3–5 pav.). Įtekančios srautai patenka į apsauginį kiautą –2,86 m aukštyje, t. y. kontroliniame tūryje C2 zonos viduryje (žr. 6 pav.).

Sudarytame modelyje eksperimento kraštinės ir pradinės sąlygos yra numatytos pagal eksperimento aprašymą:

- Pradinis slėgis – 2,1 bar;
- Pradinė vidutinė atmosferos temperatūra – 108°C;
- Pradinis vidutinis santykinis drėgnis – 57,62%.

Modeliuojant aerozolių nusėdimą PHEBUS stende yra įvertinamas aerozolių nusėdimas dėl gravitacijos, difuzioforezės ir

termoforezės. Įvertinama tai, kad aerozoliai gali būti nuplauti nuo stendo sienelių su tekančiu kondensato srautu. Sudarytame modelyje daroma prielaida, kad garo kondensacija ant aerozolių nevyksta, tačiau aerozoliai yra tirpūs vandenyje.

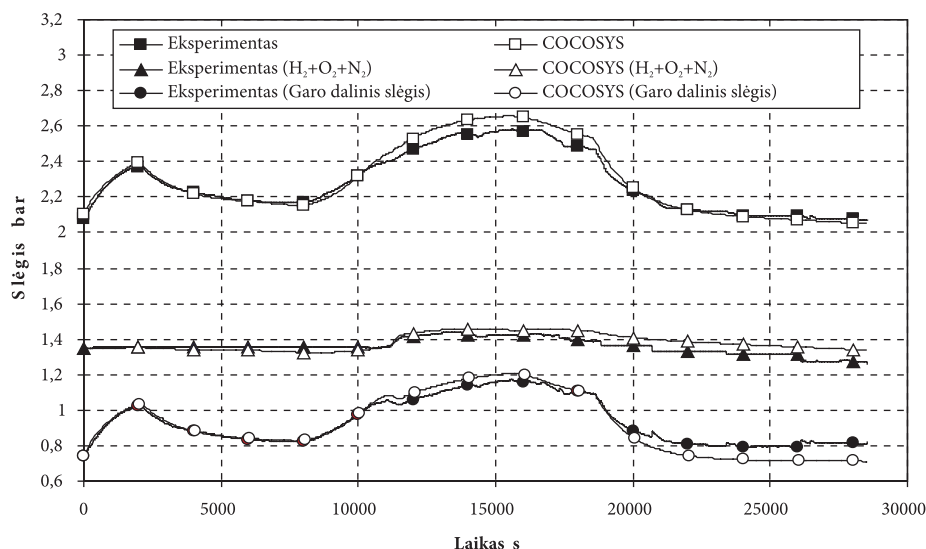
Siekiant aprašyti aerozolių skersmens spektrą daroma prielaida, kad visų eksperimentų stende esančių aerozolių skersmuo kinta nuo $5 \cdot 10^{-10}$ m iki $1 \cdot 10^{-3}$ m. Šiose ribose aerozoliai suskirstyti į 20 klasių pagal skersmenį. Toks aprašymas leidžia įvertinti tai, kad skirtingų matmenų aerozolių nusėdimo greitis bus skirtingas.

4. GAUTI REZULTATAI

4.1. Bazinio modelio rezultatai

7 pav. pavaizduotas palyginimas tarp FPT–1 eksperimento metu išmatuoto slėgio ir apskaičiuoto COCOSYS programų paketu. Paveiksle ne tik parodytas bendras slėgis apsauginiame kiaute, bet ir atskirai palyginami garo ir nesikondensuojančių dujų slėgiai. Eksperimento pradžioje, kai garas yra tiekiamas 1,8 g/s srautu (žr. 3 pav.), slėgis kyla kol po 2200 s pasiekia 2,37 bar. Vėliau slėgis sumažėja dėl sumažėjusio garo srauto. Po 8000 s garo srautas vėl yra padidinamas ir slėgis apsauginiame kiaute išauga iki ~2,58 bar. Garo ir nesikondensuojančių dujų srautai į apsauginį kiautą nutraukiami po 18860 s. Po to slėgis sumažėja ir stabilizuojasi apie 2,1 bar, t. y. slėgis sumažėja iki reikšmės, buvusios iki eksperimento pradžios. COCOSYS programų paketu yra apskaičiuota, kad maksimalus slėgis apsauginiame kiaute siekia ~2,67 bar, t. y. apskaičiuotas slėgis yra didesnis už išmatuotą. Skirtingas slėgio kitimas yra apskaičiuotas laiko intervale 10000–20000 s, t. y. kai garas į apsauginį kiautą tiekiamas didesniu srautu (2,2 g/s). Kitais laiko momentais apskaičiuotas bendrojo slėgio kitimas beveik sutampa su išmatuotu. Lyginant garo dalinį slėgį ir nesikondensuojančių dujų dalinį slėgį matyti, kad apskaičiuotas ir išmatuotas slėgiai gerai sutampa. Didžiausias skirtumas tarp išmatuoto ir apskaičiuoto dalinio garo slėgių susidaro skaičiavimų pabaigoje ir neviršija 0,1 bar. Nesikondensuojančių dujų dalinio slėgio „šuoliukas“ po 11000 s atsiranda dėl padidėjusio vandenilio srauto (žr. 4 pav.).

Didžiausia išmatuota ir sumodeliuota vidutinė temperatūra PHEBUS eksperimentiniame stende siekia 110°C (8 pav.).



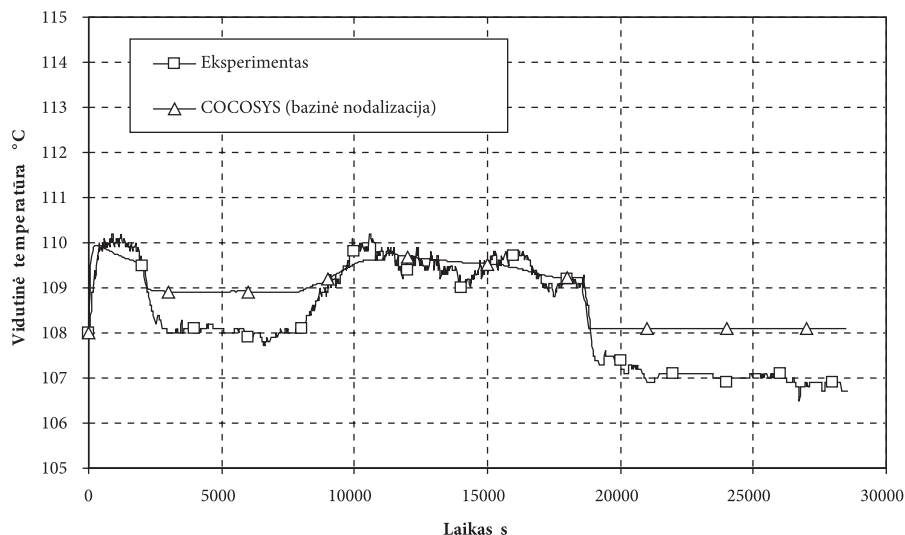
7 pav. Slėgio kitimas nagrinėjame PHEBUS apsauginiame kiaute

Vidutinė temperatūra yra skaičiuojama tik dujų fazėje, t. y. tik virš įgilintos dalies. Pirmojo garo maksimumo metu vidutinė atmosferos temperatūra pakyla nuo 108 iki 110°C ir tai atitinka išmatuotus duomenis. Sumažėjus garo srautui po 2000 s išmatuota temperatūra sumažėjo iki pradinės vertės 108°C, tuo tarpu apskaičiuota sumažėjo iki 109°C. Antrojo garo įtekėjimo maksimumo metu išmatuota temperatūra vėl padidėja iki 110°C ir iki 18860 kinta nuo 109 iki 110°C. Izolavus PHEBUS apsauginį kiautą nuo reaktoriaus po 18860 s, išmatuota temperatūra sumažėja iki 107°C. Apskaičiuota temperatūra sumažėja iki 108°C, t. y. atitinka temperatūrą pradedant eksperimentą. Viso analizuoto eksperimento metu apskaičiuota temperatūra gerai atkartoja išmatuotus rezultatus, skirtumas tarp išmatuotos ir apskaičiuotos temperatūrų neviršija 1°C. Skirtumai tarp apskaičiuotos ir išmatuotos temperatūrų atsiranda sumažinto garo įtekėjimo fazėje (2000–8000 s) ir po apsauginio kiauto izoliavimo (po 18600 s).

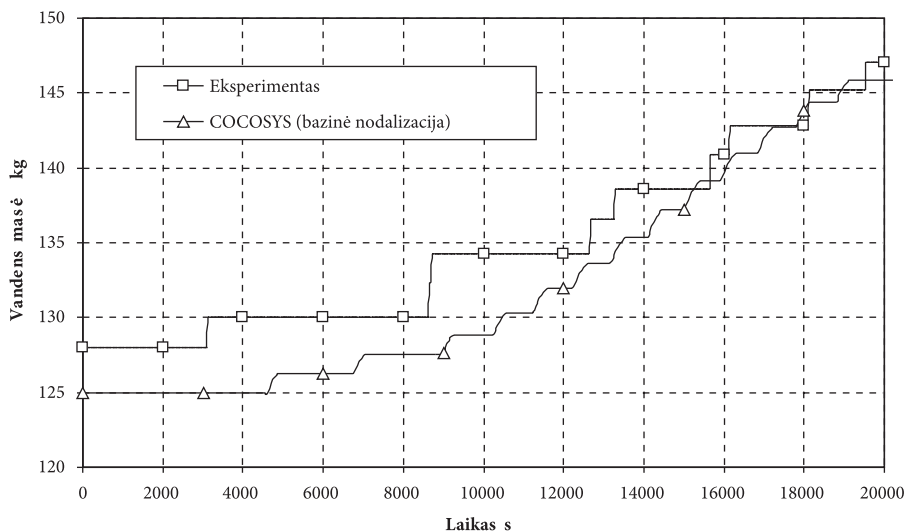
Pagal eksperimento aprašymą pradinė vandens masė įgilintoje apsauginio kiauto dalyje yra 125 kg [4]. Tačiau eksperimento metu išmatuota pradinė vandens masė yra ~128 kg. Sudarytame COCOSYS modelyje pradinė vandens masė apsauginiame kiaute yra numatyta pagal eksperimento specifikaciją, todėl iš pradžių matyti skirtumas tarp apskaičiuotos ir išmatuotos vandens masių (žr. 9 pav.). Kondensatas, susidaręs

ant „drėgnų“ kondensatorių, nuteka į įgilintą apsauginio kiauto dalį. Kondensatas nuteka tik susikaupus tam tikram kondensato kiekiui ant kondensatorių sienelių, todėl gaunamas laiptuotas grafikas. Skaičiavimuose jungtis tarp kondensatorių ir įgilintos apsauginio kiauto dalies „atsidaro“ kiekvieną kartą pasiekus nustatytą liekamąją masę. Liekamoji vandens masė vandens tekėjimui atsirasti yra nustatyta darant prielaidą, kad ant viso sienelės ploto susidaro 1 mm storio vandens plėvelė. Išmatuota, kad iki eksperimento pabaigos įgilintoje apsauginio kiauto dalyje susikaupia ~148 kg. Tuo tarpu apskaičiuota vandens masė sudaro ~146 kg (žr. 9 pav.).

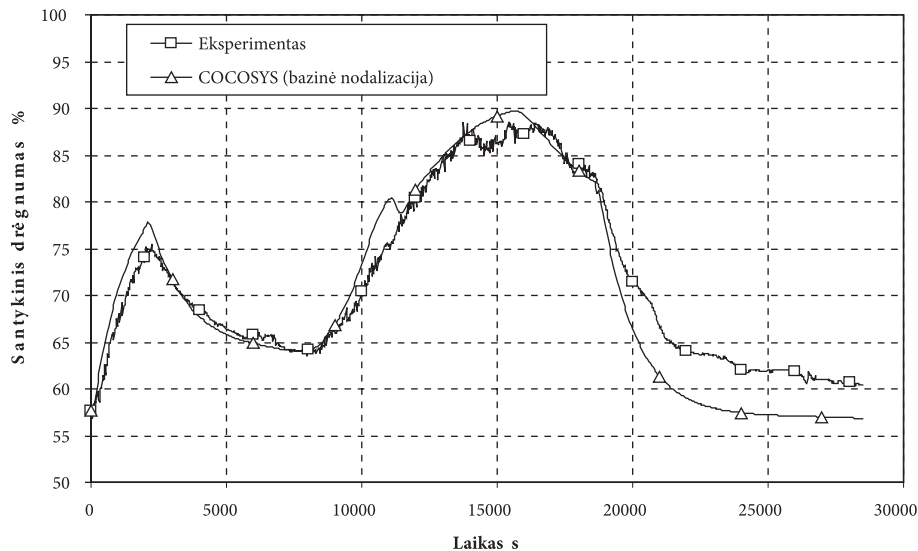
Kitas svarbus termodinaminis parametras yra santykinis atmosferos drėgnis, kurio kitimas yra pavaizduotas 10 pav. Pirmojo garo srauto maksimumo metu apskaičiuota santykinė drėgmė padidėja iki ~77% (išmatuota ~75%). Sumažėjus garo srautui ir santykinė drėgmė sumažėja iki ~64%, tai atitinka išmatuotus rezultatus. Po 8000 s padidėjus garo srautui santykinė drėgmė pasiekia maksimalią reikšmę ~90%. Skaičiavimuose matomas santykinio drėgnio šuolis po ~11000 s yra dėl vandens srauto įtekėjimo. Eksperimento metu išmatuotas šuolis yra labai nežymus. Po 18860 s nutraukus garo srauto įtekėjimą santykinė drėgmė sumažėja ir skaičiavimų pabaigoje siekia ~57% (išmatuota reikšmė ~60%). Iš pateiktų rezultatų galima teigti,



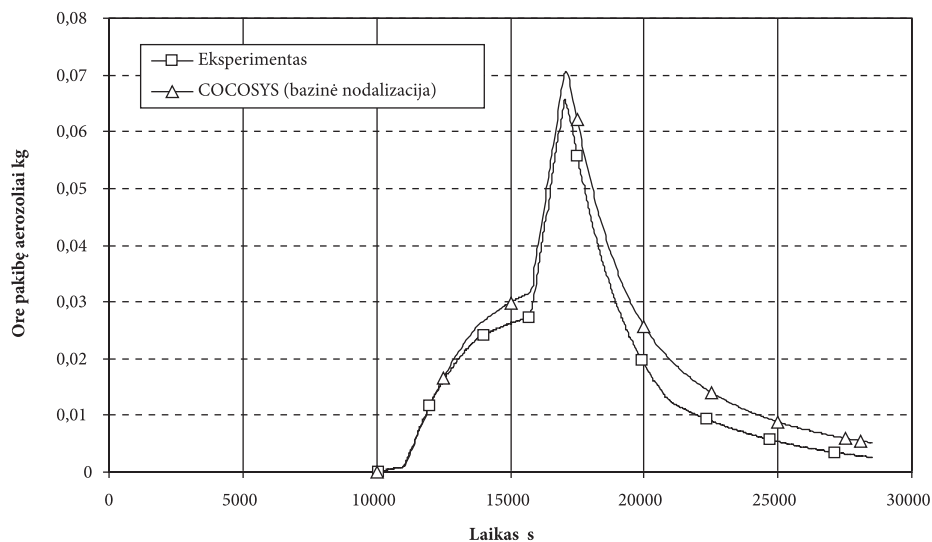
8 pav. Vidutinės temperatūros kitimas



9 pav. Vandens kiekis įgilintoje dalyje



10 pav. Santykinio drėgnumo kitimas PHEBUS apsauginiame kiaute



11 pav. Ore pakibę aerozoliai PHEBUS apsauginiame kiaute

kad atlikti skaičiavimai gerai atkartoja išmatuotus termodinaminius parametrus.

11 pav. yra pavaizduota, kaip eksperimento metu kinta apsauginio kiauto atmosferoje pakibusi aerozolių masė. Aerozolių įtekėjimas į apsauginį kiautą prasideda po 10000 s (žr. 5 pav.). Iki 13000 s aerozolių masė apsauginio kiauto atmosferoje padidėja iki 0,02 kg, tai atitinka eksperimentinius rezultatus. Po ~16000 s įtekančių aerozolių srautas labai padidėja ir pasiekia maksimumą. Apskaičiuota aerozolių masė atmosferoje po 16900 s sudaro ~0,07 kg (išmatuota ~0,065 kg), t. y. apskaičiuota ~7% didesnė atmosferoje pakibusių aerozolių masė. Po šio maksimumo įtekančių aerozolių srautai sumažėja, o po 18860 s apsauginis kiautas yra izoliuojamas ir vyksta tik aerozolių nusėdimo procesai. Lyginant 11 pav. pateiktus rezultatus matyti, kad apskaičiuotas ir išmatuotas aerozolių nusėdimo greičiai yra panašūs. Eksperimento pabaigoje apskaičiuota atmosferoje pakibusi aerozolių masė yra didesnė už išmatuotą.

12 pav. pavaizduota, kaip kinta nusėdusių aerozolių masė. Matyti, kad praėjus ~13500 s nuo eksperimento pradžios apskaičiuota ir išmatuota nusėdusių aerozolių masės skiriasi ~3 g. Šis skirtumas didėja ir po 28540 s apskaičiuota nusėdusių aerozolių masė yra ~123 g (išmatuota ~128 g). Analizuojant 11 ir 12 pav. pateiktus rezultatus matyti, kad COCOSYS programų paketu

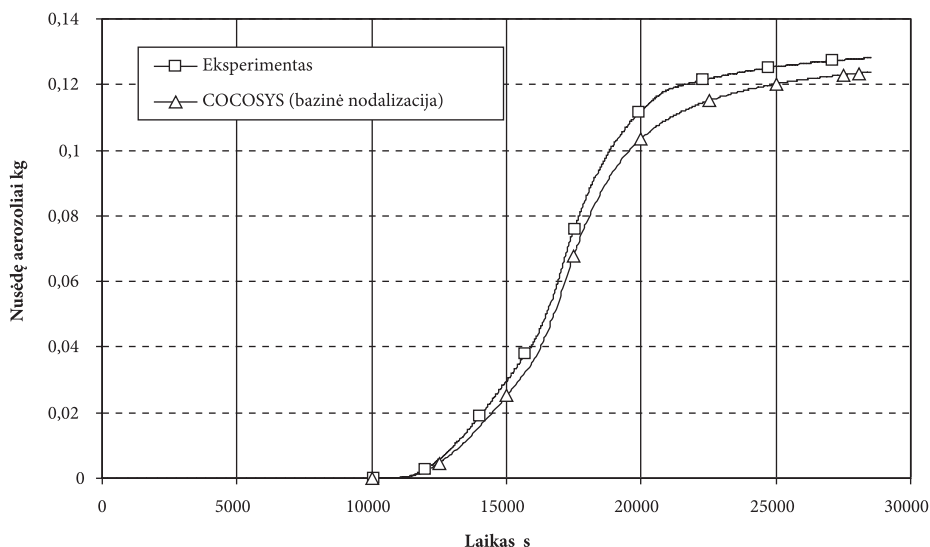
yra apskaičiuojamas lėtesnis aerozolių nusėdimas nei išmatuota eksperimento metu.

1 lentelėje pateiktas nusėdusių aerozolių pasiskirstymas atskirose apsauginio kiauto dalyse. Kaip matyti dauguma aerozolių yra nusėdę apatinėje stendo dalyje aplink įgilintą stendo dalį. Įgilintoje dalyje kartu ir ant kondensatorių sienelių yra nusėdę ~25–28% aerozolių, o ant šoninių stendo sienelių tik 2–10% aerozolių. COCOSYS programų paketu apskaičiuotas nusėdusių aerozolių pasiskirstymas rodo, kad apatinėje stendo dalyje nusėda 80,17%, įgilintoje dalyje ir ant kondensatorių 19,7%, o ant šoninių sienelių tik 0,13% aerozolių.

Kaip matyti iš pateikto palyginimo, tarp apskaičiuotų ir išmatuotų rezultatų sudarytas PHEBUS apsauginio kiauto modelis COCOSYS programų paketui leidžia gana tiksliai apskaičiuoti termodinaminių parametų kitimą eksperimento metu, tačiau šio modelio nepakanka aerozolių nusėdimui ir nusėdimo pasiskirstymui apskaičiuoti.

4.2. Nodalizacijos įtaka

Siekiant gauti tikslesnius aerozolių nusėdimo rezultatus buvo sudarytas naujas PHEBUS apsauginio kiauto modelis, kuris susideda iš daugiau kontrolinių tūrių (žr. 13 pav.). Šiame modelyje yra du papildomi apsauginio kiauto padalijimai pagal spindulį.



12 pav. Nusėdę aerosoliai PHEBUS apsauginiame kiaute

1 lentelė. Bazinis variantas. Nusėdusių aerosolių pasiskirstymas

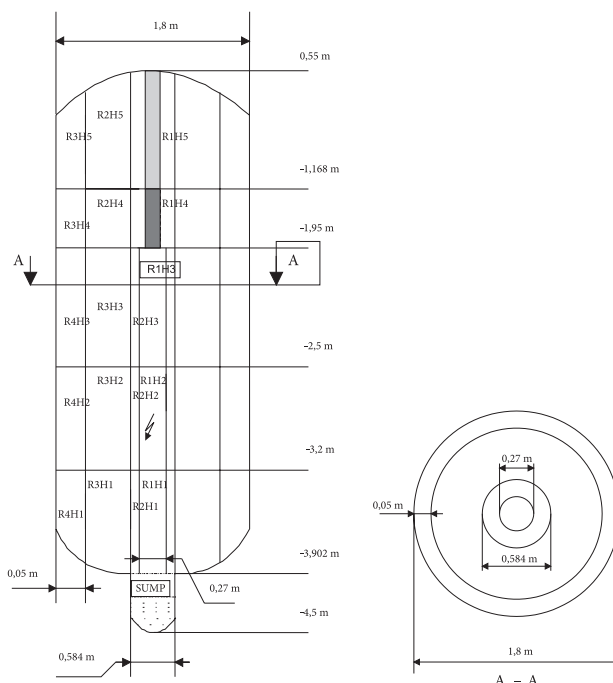
	Apatinė apsauginio kiauto dalis	SUMP kontrolinis tūris ir kondensatorių paviršius	Ant sienelių likę aerosoliai
Eksperimentas	65–70%	25–28%	2–10%
COCOSYS	80,17%	19,70%	0,13%

Žinant, kad dujos ir aerosoliai į stendą įteka –2,86 m aukštyje ir kad riba tarp kontrolinių tūrių R1H2 ir R1H3 yra –2,5 m aukštyje, bei darant prielaidą, kad ištekantis dujų srautas prasiskleidžia 40° kampu, buvo apskaičiuotas centrinės dalies skersmuo, kuris sudaro 0,27 m. Centrinė dalis yra išskirta nuo SUMP viršaus iki kondensatorių apačios. Aplink šią centrinę dalį yra išskirtas dar vienas cilindras, kurio skersmuo atitinka SUMP dalies skersmenį 0,584 m. Šis cilindras yra išskirtas per visą apsauginio kiauto aukštį. Garo, vandenilio ir aerosolių srautai patenka į R1H2 kontrolinį tūrį. Toks apsauginio kiauto padalijimas į kontrolinius tūrius, išskiriant centrinę dalį, leidžia gauti tikslesnį radialinį dujų pasiskirstymą apsauginiame kiaute. Visos kitos modeliavimo sąlygos naujajame modelyje yra tokios pačios kaip ir baziniame variante. Naujasis modelis sąlyginai yra pavadintas MOD1.

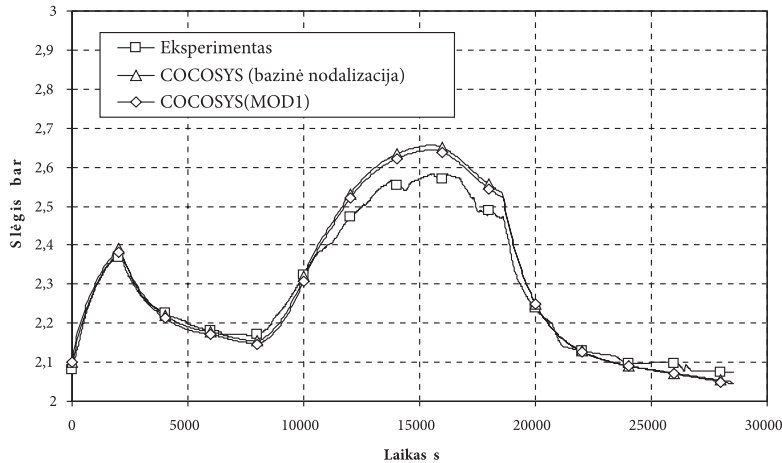
14 pav. yra pavaizduotas išmatuoto ir apskaičiuoto slėgių palyginimas taikant bazinį ir MOD1 modelius. MOD1 modeliu apskaičiuotas slėgis yra ~0,02 bar žemesnis, t. y. truputį artimesnis išmatuotam. Tai yra šiek tiek netikėtas rezultatas, nes kai patalpa yra padalijama į daugiau kontrolinių tūrių ir atsiranda daugiau virtualių jungčių tarp šių tūrių, bendras pasipriešinimas tekėjimui padidėja ir tai turėtų lemti slėgio padidėjimą. Siekiant paaiškinti gautus rezultatus, būtina nagrinėti kitus parametrus.

Kaip matyti 15 pav., skaičiavimuose su modifikuota nodalizacija MOD1 vandens masės didėjimas įgilintoje apsauginio kiauto dalyje yra greitesnis nei skaičiavimuose su bazine nodalizacija. Šis skirtumas atsiranda dėl to, kad išsamiau sumodeliavus centrinę apsauginio kiauto dalį didesni garo srautai pasiekia „drėgnus“ kondensatorius, ant kurių vyksta kondensacija. Po 20000 s vandens masė skaičiavimuose su MOD1 nodalizacija yra ~148 kg, tai atitinka eksperimento rezultatus, tuo tarpu su bazine nodalizacija yra ~146 kg.

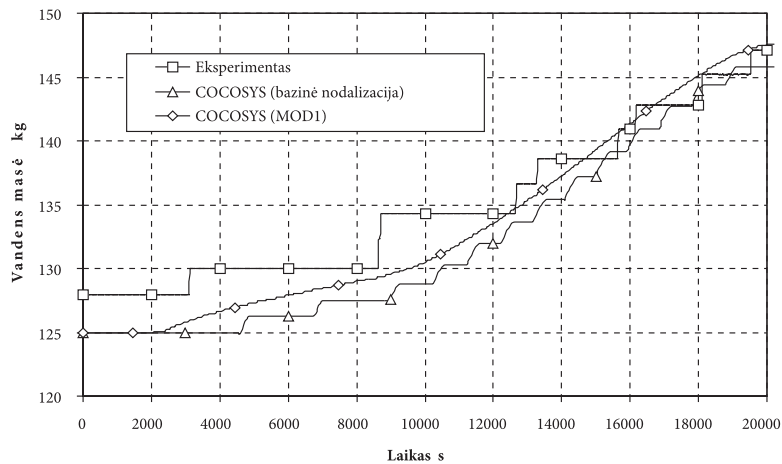
Didžiausia vidutinė temperatūra, apskaičiuota su MOD1 nodalizacija, yra 109,9°C (16 pav.). Pirmojo garo srauto maksimumo metu vidutinė atmosferos temperatūra pakyla nuo 108 iki 110°C, skaičiavimuose su MOD1 temperatūra pakyla iki 109,4°C. Sumažėjus garo srautui po 2000 s išmatuota temperatūra sumažėjo iki pradinės (108°C), ir tai atitinka skaičiavimų rezultatus su MOD1. Antrojo garo įtekėjimo maksimumo metu išmatuota temperatūra vėl padidėjo iki 110°C ir iki 18860 s iki 109–110°C. Apskaičiuota temperatūra gerai pakartoja išmatuotus rezultatus. Izolavus PHEBUS apsauginį kiautą nuo reaktoriaus po 18860 s, išmatuota temperatūra sumažėja iki 107°C. Apskaičiuota temperatūra su MOD1 sumažėja iki 108°C, t. y. atitinka temperatūrą pradedant eksperimentą. Vidutinė temperatūra, sumodeliuota su MOD1, yra artimesnė eksperimento rezultatams, ypač laiko intervale 2000–8000 s. PHEBUS apsauginiame kiaute temperatūros kitimui didelę įtaką turi kondensatoriai. Vadinasi, su MOD1 nodalizacija srautai pasiskirstę taip, kad daugiau garo pasiekia konden-



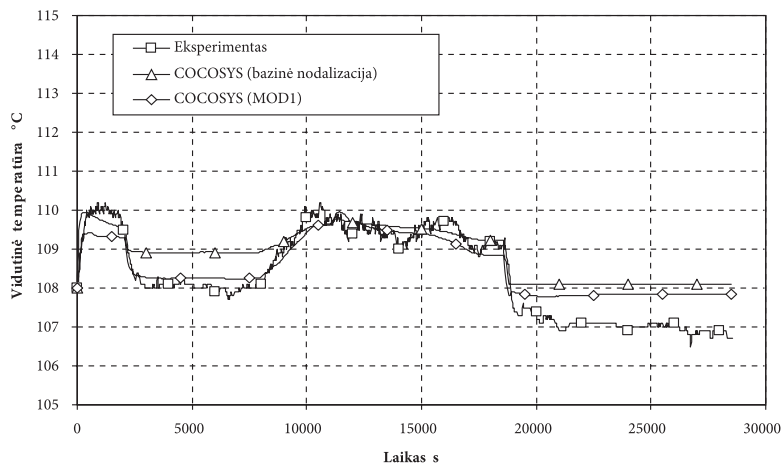
13 pav. PHEBUS apsauginio kiauto modelis su MOD1 nodalizacija



14 pav. Slėgis nagrinėjame PHEBUS stende



15 pav. Vandens kiekis įgilintoje dalyje



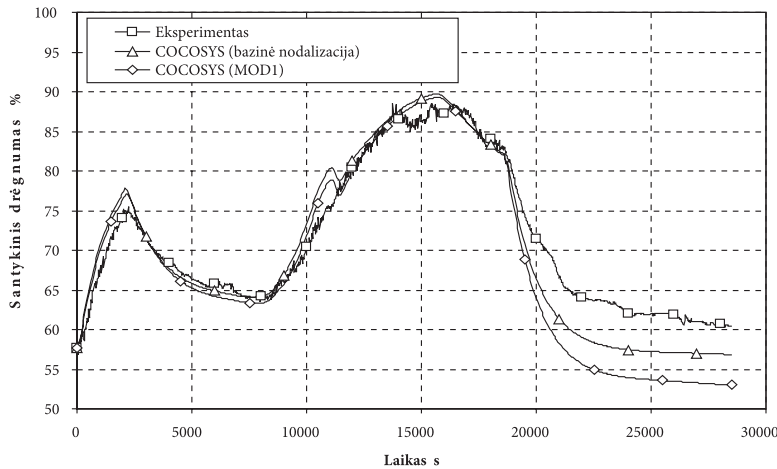
16 pav. Vidutinės temperatūros kitimas

satorius, tai daugiau garo yra sukondensuojama ir nukreipiama į SUMP kontrolinį tūrį (15 pav.). Dėl apskaičiuotos didesnės garo kondensacijos sumažėja apskaičiuota vidutinė atmosferos temperatūra apsauginiame kiaute.

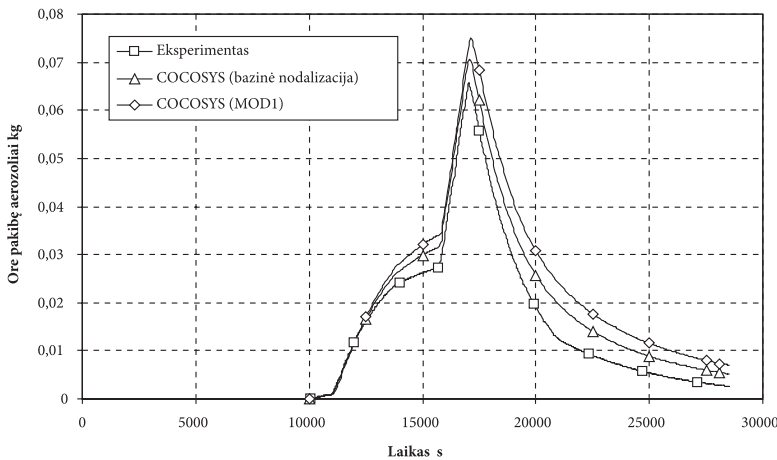
17 pav. yra palyginti santykinės drėgmės skaičiavimo rezultatai. Kaip matyti, didelio skirtumo tarp santykinės drėgmės, apskaičiuotos taikant abu sudarytus modelius (bazinį ir MOD1), nėra. Ženklesnis skirtumas atsiranda tik po to, kai apsauginis kiautas yra izoliuojamas nuo reaktoriaus aušinimo kontūro. Naudojant MOD1 modelį skaičiavimų pabaigoje skirtumas tarp apskaičiuotos ir išmatuotos santykinės drėgmės yra didesnis, nei taikant bazinį modelį.

Skaiciavimuose su MOD1 nodalizacija didesnė aerozoliu masė išlieka atmosferoje nei skaičiavimuose su bazine nodalizacija (18 pav.), dėl to ir nusėdusi aerozoliu masė yra mažesnė (19 pav.). Taikant MOD1 modelį apskaičiuotas aerozoliu masės atmosferoje maksimumas yra didesnis nei taikant bazinį modelį, t. y. skirtumas tarp apskaičiuotos ir išmatuotos reikšmių yra didesnis. Izolius apsauginį kiautą aerozoliu nusėdimo greitis yra panašus abiem atvejais.

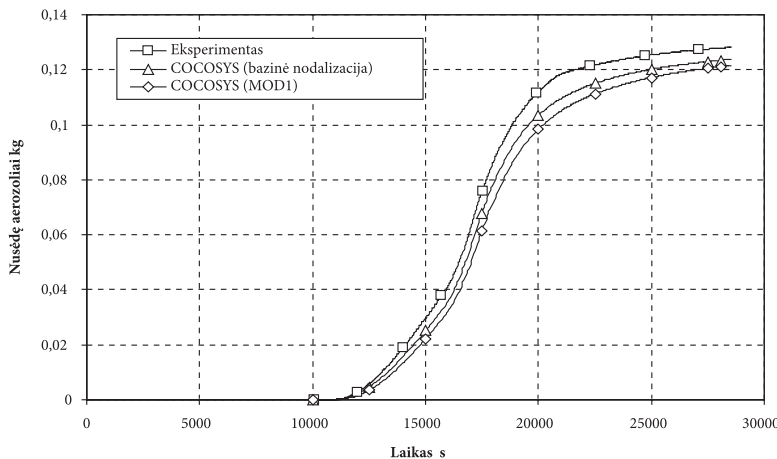
2 lentelėje pateiktas nusėdusių aerozoliu pasiskirstymas atskirose apsauginio kiauto dalyse. Kaip matyti, skaičiavimuose su MOD1 nodalizacija rezultatai yra artimesni eksperimentiniams nei skaičiavimuose su bazine nodalizacija. Dauguma aerozoliu



17 pav. Santykinis drėgnumas nagrinėjame PHEBUS stende



18 pav. Ore pakibę aerosoliai PHEBUS stende



19 pav. Nusėdę aerosoliai PHEBUS stende

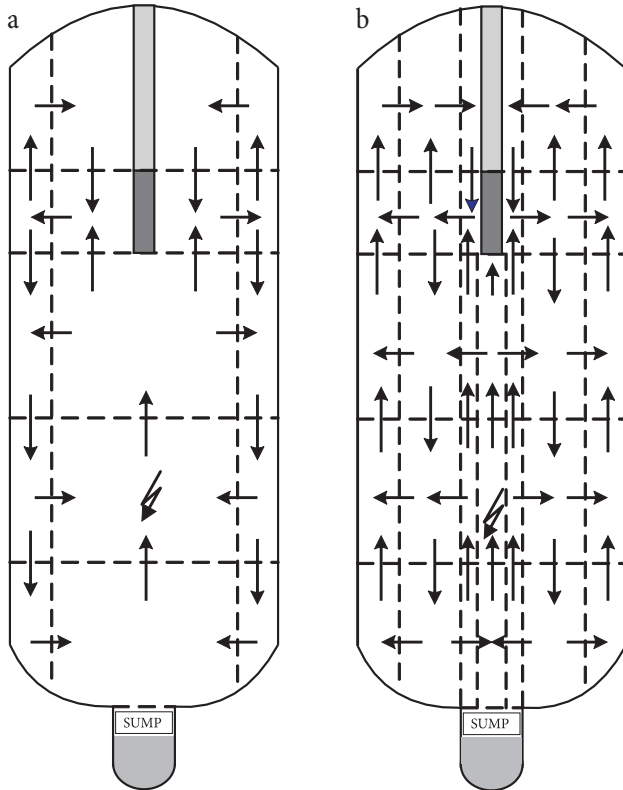
yra nusėdusi apatinėje stendo dalyje aplink įgilintą stendo dalį. Įgilintoje dalyje kartu su kondensatoriais yra nusėdę ~25–28% aerozolių masės, o ant šoninių stendo sienelių – tik 2–10% aerozolių. Su COCOSYS apskaičiuotas nusėdusių aerozolių pasiskirstymas rodo, kad apatinėje stendo dalyje nusėda 75,19%, įgilintoje dalyje ir ant kondensatorių 24,68%, o ant šoninių sienelių tik 0,13% aerozolių. Kaip matyti iš gautų rezultatų, dėl naujos nodalizacijos aerozolių nusėdimas ant apsauginio kiauto apatinės dalies sumažėjo, o įgilintoje dalyje ir ant kondensatorių padidėjo, dėl to rezultatai priartėjo prie eksperimento duomenų. Tačiau apskaičiuotas nusėdimas ant apsauginio kiauto sienelių nepasikeitė.

20 pav. pavaizduotos apskaičiuotos dujų srautų kryptys apsauginiame kiaute. Naudojant bazinę nodalizaciją gauta, kad į stendą įtekančios dujos centrinėje dalyje kyla į viršų, o pa-

kraščiais leidžiasi žemyn. Apsauginio kiauto viršuje garas kondensuojasi ant „drėgnų“ kondensatorių ir leidžiasi žemyn, kur

2 lentelė. Nodalizacijos įtaka. Nusėdusių aerozolių pasiskirstymas

	Apatinė apsauginio kiauto dalis	SUMP kontrolinis tūris ir kondensatorių paviršius	Ant sienelių likę aerosoliai
Eksperimentas	65–70%	25–28%	2–10%
COCOSYS (bazinė nodalizacija)	80,17%	19,70%	0,13%
COCOSYS (MOD1 nodalizacija)	75,19%	24,68%	0,13%



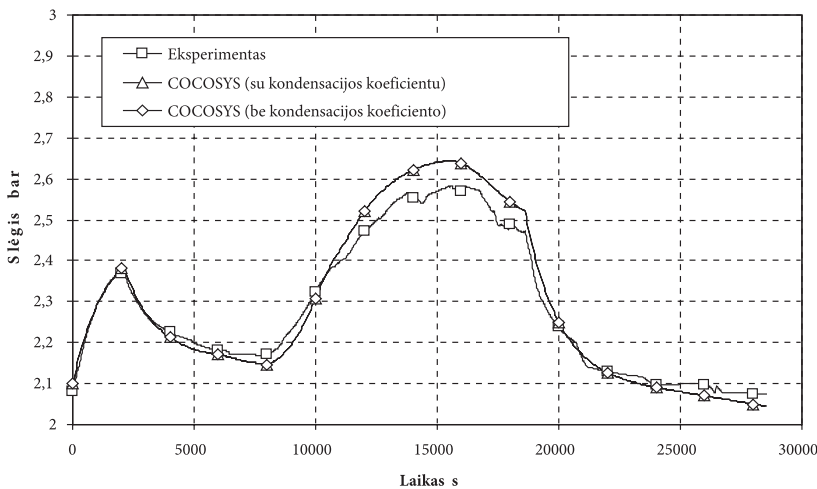
20 pav. Dujų srautai PHEBUS stende

susiduria su srautu, kylančiu prie „sausų“ kondensatorių. Prie „sausų“ kondensatorių susidaro dvi srautų kilpos: viena – kur srautas palei išorines apsauginio kiauto sienes kyla į viršų ir leidžiasi palei „drėgnus“ kondensatorius, o kita – kur srautas palei išorines apsauginio kiauto sienes leidžiasi žemyn ir kyla į viršų kartu su įtekančiais garo ir aerozolių srautais. Nagrinėjant rezultatus, gautus taikant MOD1 nodalizaciją, matyti, kad pagrindiniai srautai yra panašūs kaip ir bazinio modelio atveju, tačiau yra esminis skirtumas. Taikant MOD1 nodalizaciją gauta, kad šalia išorinių apsauginio kiauto sienelių srautai kyla į viršų. Dėl tokio tekėjimo daugiau garo pasiekia „drėgnus“ kondensatorius ir pagerina garo kondensaciją.

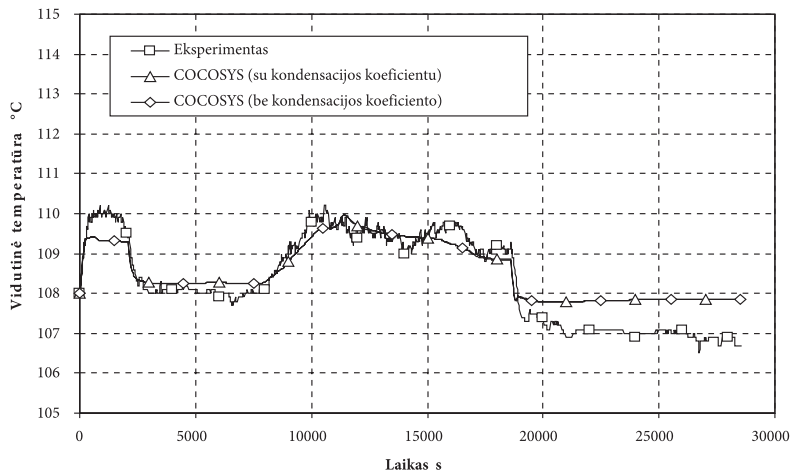
Skaiciavimai, atlikti taikant MOD1 apsauginio kiauto modelį, parodė, kad nodalizacijos įtaka apskaičiuotiems termodinaminiais parametrams nėra didelė, tačiau yra esminė įtaka apskaičiuotiems dujų srautams apsauginio kiauto viduje. Dėl pasikeitusių dujų srautų pakito ir aerozolių nusėdimo pasiskirstymas, kuris taikant išsamesnę nodalizaciją yra artimesnis gautiems matavimo rezultatams. Todėl norint teisingai apskaičiuoti aerozolių pasiskirstymą, būtina sudaryti išsamesnius apsauginio kiauto modelius.

4.3. Kondensacijos koeficiento įtaka

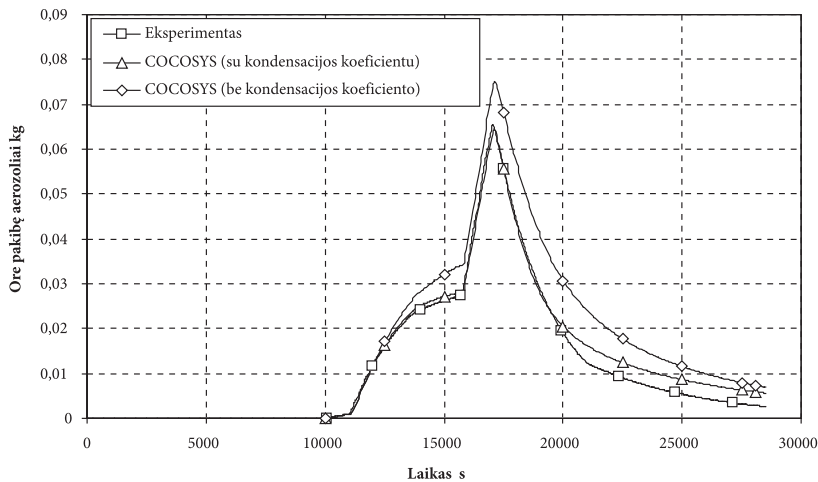
19 pav. parodyta, kad apskaičiuota nusėdusi aerozolių masė yra mažesnė už išmatuotą eksperimento metu. Garo kondensacija ant aerozolių gali turėti itin didelę įtaką aerozolių nusėdimo greičiui, todėl norint įvertinti šio reiškinio įtaką skaičiavimo



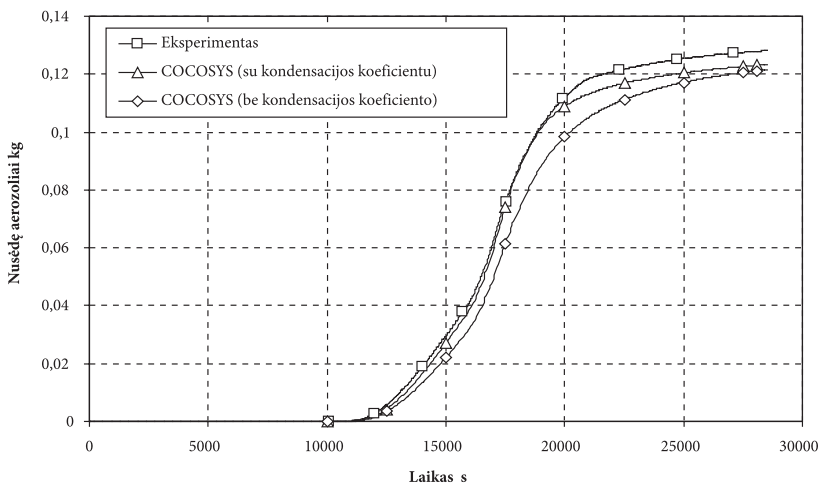
21 pav. Slėgis nagrinėjamame PHEBUS stende



22 pav. Vidutinės temperatūros kitimas



23 pav. Ore pakibę aerosoliai PHEBUS stende



24 pav. Nusėdę aerosoliai PHEBUS stende

3 lentelė. Garo kondensacijos ant aerosolių įtaka. Nusėdusių aerosolių pasiskirstymas

	Apatinė apsauginio kiauto dalis	SUMP kontrolinis tūris ir kondensatorių paviršius	Ant sienelių likę aerosoliai
Eksperimentas	65–70%	25–28%	2–10%
COCOSYS (nevertinant kondensacijos)	75,19%	24,68%	0,13%
COCOSYS (su kondensacija)	79,38%	19,96%	0,13%

rezultatams buvo atliktas papildomas skaičiavimas. Skaičiavimai buvo atlikti naudojant MOD1 nodalizaciją, kuri leidžia tiksliau apskaičiuoti apsauginiame kiaute susidarantį dujų srautą.

Kaip matyti iš 21 ir 22 pav., garo kondensacija ant aerosolių neturi įtakos apskaičiuotiems termodinaminiais parametrams. Sukondensuoto garo kiekis yra per mažas, kad pasireikštų šio proceso įtaka.

23 ir 24 pav. pavaizduota aerosolių masė atmosferoje ir nusėdusi aerosolių masė apsauginiame kiaute. Kaip matyti, skaičiavimai, įvertinant garo kondensaciją ant aerosolių, tiksliau atitinka išmatuotus rezultatus. Dėl garo kondensacijos ant aerosolių aerosoliai tampa sunkesni ir greičiau nusėda ant apatinės apsauginio kiauto dalies. Skaičiavimai beveik tiksliai atitinka iš-

matuotus parametrus iki 20000 s. Skaičiavimų pabaigoje atmosferoje likusių aerosolių yra ~5,5 g (išmatuota ~2,6 g), nusėdusių aerosolių ~123,4 g (išmatuota ~128,15 g).

Lyginant nusėdusių aerosolių pasiskirstymą (3 lentelė) matyti, kad įvertinant garo kondensaciją ant aerosolių daugiau aerosolių nusėda ant apatinės apsauginio kiauto dalies – iki 79,38% (išmatuota 65–70%). Aerosolių nusėdimas įgilintoje dalyje ir ant kondensatorių sumažėjo ir siekia 19,96% (išmatuota 25–28%). Nusėdimas ant sienelių skaičiavimuose išliko toks pat – 0,13%.

Būtina atkreipti dėmesį į tai, kad įvertinant garo kondensacijos įtaką aerosolių nusėdimui skaičiavimo rezultatams buvo padaryta prielaida, jog aerosoliai yra tirpūs vandenyje. Ši prielaida nevisiškai tiksliai, nes dauguma FPT-1 eksperimento metu ištekantį aerosolių yra netirpios dalelės. Ateityje numatoma atlikti skaičiavimus įvertinant aerosolių tirpumo įtaką gautiems skaičiavimo rezultatams.

5. IŠVADOS

FPT-1 eksperimento metu PHEBUS apsauginiame kiaute vykstantys procesai buvo sumodeliuoti COCOSYS programų paketu.

Atlikti skaičiavimai parodė, kad nodalizacijos įtaka apskaičiuotiems termodinaminiais parametrams (slėgis, temperatūra) nėra didelė, tačiau dėl pakitusių atmosferos srautų pakinta aerosolių nusėdimui pasiskirstymas. Todėl norint teisingai apskaičiuoti aerosolių pasiskirstymą, būtina sudaryti ir taikyti išsamesnius apsauginio kiauto modelius.

Dėl garo kondensacijos aerozoliai tampa sunkesni ir greičiau nusėda ant apatinės apsauginio kiauto dalies. Gauti aerozolių nusėdimo greičio skaičiavimo rezultatai įvertinant garo kondensaciją ant aerozolių gana tiksliai pakartoja eksperimento rezultatus.

Aerozolių nusėdimo pasiskirstymas geriau yra apskaičiuojamas taikant išsamią apsauginio kiauto nodalizaciją ir įvertinant garo kondensaciją ant aerozolių. Tačiau kadangi dauguma aerozolių, įtekančių į apsauginį kiautą FPT-1 eksperimento metu, yra netirpūs, ateityje numatoma atlikti skaičiavimus įvertinant aerozolių tirpumo įtaką gautiems skaičiavimo rezultatams.

Gauta 2007 01 02
Priimta 2007 09 24

Literatūra

1. Schwarz M., Hache G., von der Hardt P. PHEBUS FP: a severe accident research programme for current and advanced light water reactors // Nuclear Engineering and Design. 1999. Vol. 187. P. 47–69.
2. Jones A. V., Mueller K., Clement B. Severe Accident Aerosols in the LWR Containment: Findings from the PHEBUS FP Programme. 2003.
3. Klein-Heßling W. COCOSYS v1.2 Manuals GRS-P-3. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 2000. 469 p.
4. Haste T. Specification of International Standard Problem ISP-46 (PHEBUS FPT1). Revision 1, 2002.

Aurimas Kontautas, Egidijus Urbonavičius, Sigitas Rimkevičius

INFLUENCE OF NODALISATION AND MODELLING PARAMETERS ON THE RESULTS OF CALCULATION OF AEROSOL DEPOSITION IN THE PHEBUS EXPERIMENTAL FACILITY

Summary

The work has been performed in the framework of the international PHEBUS scientific research programme. The main objective of the PHEBUS programme is to study the release, transport and deposition of fission products under conditions representative of a severe accident in

a Light Water Reactor. The paper presents the results of analysis of heat and mass transfer processes as well as aerosol deposition processes in the PHEBUS containment during the FPT-1 experiment. Two nodalizations of the PHEBUS containment were developed for analysis using the COCOSYS code. The base case model gives a rather good agreement of calculated thermodynamic parameters with the measurements during the experiment. However, the distribution of aerosol deposition is not well predicted. A more detailed nodalisation provides a better distribution of gas flows inside the containment, which influences the distribution of aerosol deposition. Therefore, even though simple nodalizations are enough to receive accurate thermodynamic results, more detailed nodalizations are required for a proper simulation of aerosol deposition.

Key words: nodalisation, modelling, aerosol deposition

Аримас Контаутас, Эгидиус Урбонавичюс,
Сигитас Римкявичюс

ВЛИЯНИЕ НОДАЛИЗАЦИИ И ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ОСАЖДЕНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ СТЕНДЕ PHEBUS

Резюме

Эта работа выполнена в рамках международной научной программы PHEBUS. Основной целью программы PHEBUS является анализ выхода, переноса и осаждения продуктов деления в условиях, близких к условиям тяжелых аварий в реакторах, охлаждаемых легкой водой. В настоящей статье представлены результаты анализа процессов тепло- и массообмена, а также процессов осаждения аэрозолей в защитной оболочке PHEBUS во время эксперимента FPT-1. Разработаны две модели для кода COCOSYS. Базовый вариант расчетов позволяет получить хорошее соответствие между рассчитанными и измеренными термодинамическими параметрами, однако осаждение аэрозолей рассчитано хуже. Более детальная модель защитной оболочки позволяет получить лучшее распределение газовых потоков внутри защитной оболочки, что имеет влияние на распределение осажденных аэрозолей. Из этого следует, что хотя для расчета термодинамических параметров достаточно иметь простые модели защитной оболочки, для анализа осаждения аэрозолей требуются более детальные модели.

Ключевые слова: нодализация, моделирование, осаждение аэрозолей