

QUENCH-3 eksperimento modeliavimas ASTEC programų paketu

Antanas Šutas,

Algirdas Kaliatka,

Virginijus Vileiniškis

*Lietuvos energetikos institutas,
Branduolinių įrenginių saugos laboratorija,
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas
El. paštas: Antanas.Sutas@lei.lt,
Algirdas.Kaliatka@lei.lt,
Virginijus.Vileiniskis@lei.lt*

Pasaulio mokslininkai jau daugelį metų atlieka eksperimentinių procesų, vykstančių avariniu būdu aušinant branduolinio reaktoriaus aktyviąją zoną, tyrimus bei modeliuoja juos įvairiais programų paketais. Straipsnyje pateikiami QUENCH-3 eksperimento modeliavimo rezultatai, jų palyginimas su žinomais eksperimento duomenimis bei modeliavimo parametrų įtaka modeliavimo rezultatams. Modeliavimas buvo atliktas ASTEC programų paketo ICARE moduliui, varijuojant kaitinimo elementų papildomą kontaktų varžą, cirkonio dioksido savitąją šilumą ir šiluminį laidumą bei patiekiamo aušinančiojo vandens kiekį. Modeliuojant buvo analizuojami eksperimentinio stendo elementų temperatūros kitimas bei bendras eksperimento metu susidarančio vandenilio kiekis.

Nustatyta, jog apskaičiuotos kuro rinklės imitatoriaus temperatūros pakankamai gerai atitinka eksperimentinius rezultatus. Tačiau eksperimento metu susidarančio vandenilio kiekis dvigubai viršija modeliavimo metu apskaičiuotą vandenilio kiekį. Tai rodo, kad turima programų paketo versija nėra pritaikyta modeliuoti cirkonio oksidaciją, kai kuro rinklės yra smarkiai pažeistos. Didžiausią įtaką eksperimento modeliavimo rezultatams turi kaitinimo elementų papildomos kontaktinės varžos keitimas.

Raktažodžiai: QUENCH-3 eksperimentas, ASTEC programų paketas, kuro rinklė, cirkonio oksidacija

ĮVADAS

Avarijos branduolinėje jėgainėje atveju, net ir sustabdžius grandininę reakciją branduoliniame reaktoriuje, labai svarbu užtikrinti pakankamą aktyviosios zonos aušinimą. Aktyviąją zoną sudaro branduolinio kuro rinklės, susidedančios iš kuro strypų. Kuro strypas – tai cirkonio lydinio hermetiškas vamzdelis, kuriame patalpintos branduolinio kuro (urano dioksido) tabletės. Šis užsandarintas vamzdelis (kuro strypo sudedamoji dalis) vadinamas apvalkalu. Dėl liekamosios

šilumos išsiskyrimo branduolinio kuro tabletėse po reaktoriaus sustabdymo pagrindinių avarinio aušinimo sistemų veiklos sutrikimas gali tapti sunkiosios avarijos priežastimi. Jei reaktoriaus aktyvioji zona nepakankamai aušinama, kuro strypų temperatūra pradeda kilti. Kai pasiekiamas ~1100 K temperatūra, kuro strypų apvalkalai tampa plastiški ir pradeda deformuotis. Temperatūrai perkopus 2000 K, šie cirkonio lydinio apvalkalai pradeda lydintis, susidaro urano oksido ir išsilydžiusio cirkonio eutektika. Urano dioksido tablečių lydymosi temperatūra – ~3100 K. Kai

kuro strypų apvalkalai tampa nebehermetiški, lydantis tabletėms išsiskiria radioaktyvieji izotopai. Siekiant išvengti tokių avarijos pasekmių, aktyvioji zona aušinama užtvindant ją vandeniu. Vandeniui ataušinant perkaitusius kuro strypus (kai jų temperatūra viršija 1470 K), paduotas vanduo sukelia intensyvią iš cirkonio lydinio – cirkalojaus pagaminto kuro strypų apvalkalų oksidacijos egzotermišką reakciją. Šios reakcijos metu išsiskiria didelis energijos kiekis, todėl kuro strypų apvalkalų temperatūra gali dar labiau padidėti. Kita vertus, susidaręs cirkonio oksidas yra trapus, todėl apvalkalai gali sutrūkinėti, o kuro strypo viduje susikaupę dalijimosi produktai gali patekti į aplinką. Be to, kaip oksidacijos reakcijos produktas, išsiskiria vandenilio dujos. Šiame straipsnyje nagrinėjamas šis staigus aktyviosios zonos aušinimo reiškinys, užpilant ją vandeniu, angliškai vadinamas *quenching*.

Norint suprasti procesus, kurie vyksta iki 1100 K ir aukštesnės temperatūros įkaitusios aktyviosios zonos staigus aušinimo metu, buvo atliekami įvairūs eksperimentai (CORA [1], LOFT [2], PHEBUS, PBF [3], QUENCH ir kt.). Iš kitų eksperimentų QUENCH išsiskiria tuo, jog daugiausia dėmesio jame sutelkta į vandenilio susidarymo reiškinį staigus aušinimo metu [4]. QUENCH eksperimentų programa, nuo 1996 m. vykdoma FZK Karlsruhe tyrimų centre – Forschungszentrum Karlsruhe (šiuo metu Karlsruhe technologijos institutas). Iki šio laiko iš viso yra atlikta 16 QUENCH eksperimentų su įvairiu skaičiumi modeliuojamų kuro rinklių (nuo 21 iki 31) [5]. Iš QUENCH programų eksperimentinių duomenų yra įvertinami ir validuojami programų paketai, skirti sunkiosioms avarijoms analizuoti (ASTEC, ATHLET-CD, RELAP/SCDAP ir kt.).

QUENCH eksperimentų tyrimo objektai yra įvairūs sunkiųjų avarių, kurias sukelia šilumnešio praradimas, plėtojimosi scenarijai bei lydalo ir nuolaužų aušinimo sunkiųjų avarių metu vykstantys reiškiniai [6]. Šių eksperimentų metu buvo tiriama pirminės kuro strypų apvalkalų oksidacijos iki 1100 K temperatūros, temperatūros staigus aušinimo pradžioje, staigus aušinimo greičio, neutronus sugeriančių medžiagų (B_4C , AgInCd) ir kuro strypo apvalkalo medžiagos parinkimo įtaka. Šešių QUENCH eksperimentų metu perkaitusių strypų aušinimas tiekiant

vandenį sukėlė staigų temperatūros augimą dėl vykusių intensyvios cirkonio oksidacijos reakcijos, kurios metu išsiskyrė reikšmingi vandenilio kiekiai, kurie buvo dviem eilėms didesni už gautus tais atvejais, kai staigus aušinimas įvykdytas „sėkmingai“, t. y. staigus aušinimo metu nebuvo staigus temperatūros šuolio. Eksperimentų su staigiu temperatūros šuoliu metu buvo stebimas lydalo formavimasis, persislinkimas bei lydalo oksidacija. Pagrindiniai eksperimentų metu vykstantys reiškiniai buvo papildomai nagrinėjami atskirų specialių parametrinių eksperimentų metu. Cirkonio oksidacijos reakcijos kinetika buvo nagrinėjama plačiame temperatūrų ruože (873–1773 K) bei skirtingose aplinkose (garų, deguonies, oro ir jų mišinių). Itin kruopščiai buvo tiriamas vandenilio įsiskverbimas į kuro strypų apvalkalų medžiagą skirtingų cheminių sudėčių cirkalojaus apvalkaluose, o panaudojant neutronų radiografiją bei kitus neardančiosios analizės metodus buvo stebimas strypų apvalkalų įhidridinimas. Taip pat stebėtas neutronų sugėriklių strypų pažeidimas ir lydymasis bei dėl to atsirandantis žemos temperatūros lydalo (cirkonio eutektika) oksidacijos reiškinys. Naujausia QUENCH eksperimentų tema yra naujausių kuro strypų apvalkalo medžiagų elgsenos lyginimas su cirkalojaus-4 medžiagos reakcijomis strypo perkaitimo metu.

QUENCH eksperimentiniame stende vykdomi eksperimentai pasižymi šiais pagrindiniais procesų kuro rinklės imitatoriuje etapais: įšildymo fazė, pirminė (prieš) oksidacijos fazė, temperatūros pakėlimo (pereinamojo proceso fazė) ir staigus aušinimo fazė. QUENCH-3 eksperimentas, palyginti su kitais QUENCH eksperimentais, pasižymi aukšta eksperimentinių kuro rinklių temperatūra eksperimentinio stendo staigus aušinimo pradžioje bei pirminės oksidacijos fazės nebuvimu. Šios dvi sąlygos atitinka avariją branduolinio reaktoriaus aktyviojoje zonoje šilumnešio praradimo atveju arba avariją panaudoto branduolinio kuro baseine su ką tik iš reaktoriaus aktyviosios zonos iškrautomis kuro rinklėmis, kai baseine yra prarandamas rinkles aušinantis vanduo. Abiem atvejais kuro strypų apvalkalų temperatūros per sąlyginai trumpą laiką (dėl didelio branduolinio kuro išskiriamo liekamosios šilumos kiekio) pasiekia aukštas reikšmes bei kuro strypų apvalkalai yra tik lengvai oksiduoti (plėvelės storis – maždaug

iki 30 μm , kas atitinka suslėgto vandens reaktoriaus (PWR) būseną normaliomis eksploatacijos sąlygomis). Todėl QUENCH-3 eksperimentas taikomas sunkiausias avarijas vertinančių modelių validacijai bei susidarančio vandenilio funkciniam priklausomumui nuo staigaus aušinimo greičio ir pradinės temperatūros tirti [7]. Nustatyta, jog ASTEC kodas yra tinkamas apibūdinti visas pereinamojo proceso fazes: papildomą šilumos išsiskyrimą dėl cirkalojaus oksidacijos vandens garo aplinkoje, staigų temperatūros šuolį aušinimo pradžioje, vandenilio susidarymą bei medžiagų lydymąsi ir pažeistų eksperimentinių rinklių vėsimą eksperimento pabaigoje. Nagrinėjant cirkonio oksidacijos reakcijos metu vandenilio susidarymo reiškinį nustatyta, kad jei kuro strypų imitatorių apvaskalų temperatūra staigaus aušinimo pradžioje yra žemesnė nei 1800 K, susidarančio vandenilio kiekiai yra nežymūs. Jei aušinimas vandeniui pradedamas, kai kuro strypų imitatorių apvaskalų temperatūra yra 1800–2600 K temperatūrų intervale, siekiant išvengti intensyvios garo – cirkonio reakcijos ir didelio kiekio vandenilio susidarymo, reikalingas aušinimo vandens tiekimo greitis turi būti ne mažesnis nei 25 g/s. Tiriant cirkalojaus oksidacijos vandens garo aplinkoje modeliavimo ypatybes buvo atliekamas modeliavimas su įvairiais ASTEC programų pakete naudojamais oksidacijos vertinimo modeliais [8]. Nustatyta, jog PRATER ir BEST-FIT cirkonio oksidacijos vertinimo modeliai tiksliausiai įvertina staigų imitacinio strypo apvaskalo temperatūros kilimą bei susidarančio vandenilio kiekį. Pademonstruota, kad ASTEC programų paketas įvertina lydalo varvėjimą nuo besilydančio strypo viršaus į apačią.

Vis dėlto kitų autorių atlikti QUENCH-3 eksperimento tyrimai naudojant ASTEC programų paketą išsamiai neatsakė į klausimus apie modeliavimo parametrų įtaką modeliavimo rezultatams. Skirtingi autoriai, norėdami gauti gerą eksperimentinių matavimų ir skaičiavimo rezultatų sutapimą, įvairiai varijavo modeliavimo parametrais. Šio straipsnio tikslas – QUENCH-3 eksperimento modeliavimo rezultatus palyginti su žinomais eksperimento duomenimis bei nustatyti modeliavimo parametrų įtaką modeliavimo rezultatams. Parametrų įtaka yra svarbi sudarant ir derinant skaitinius modelius, nes parodo, kur reikalingas ypatingas tikslumas, o kur

priimami supaprastinimai neturės didelės įtakos modeliavimo rezultatams. Gauta informacija ir sukaupta modeliavimo patirtis bus naudojama ateityje kuriant realių branduolinių įrenginių (branduolinių reaktorių, panaudoto kuro baseinų) skaitinius modelius.

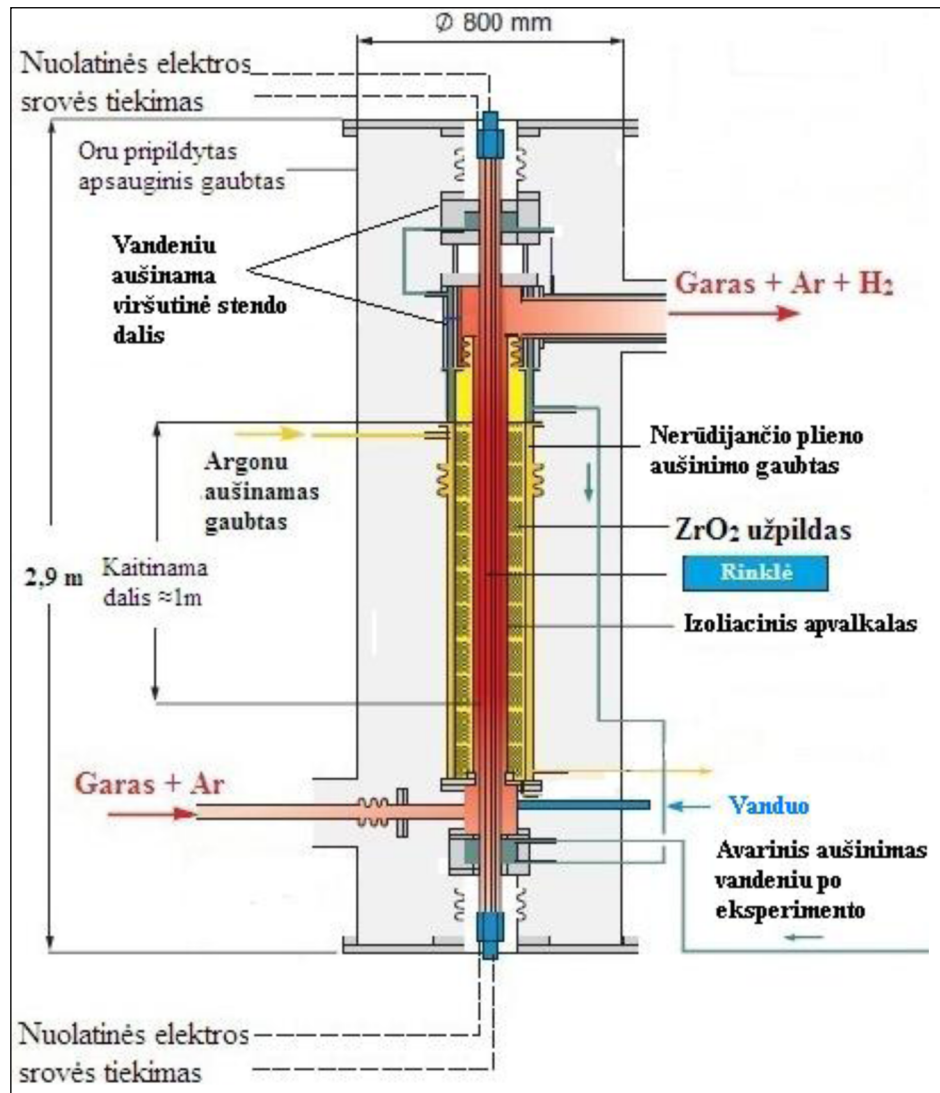
QUENCH-3 EKSPERIMENTO APRAŠYMAS

1 pav. vaizduojama QUENCH-3 eksperimento stendo principinė schema. Svarbiausios šio eksperimentinio įrenginio dalys:

- eksperimento sekcija sudaryta iš 21 strypo rinklės, imituojančios branduolinio kuro rinklę;
- elektros energijos, skirtos eksperimentinei rinklei kaitinti, tiekimo modulis;
- vandens ir garo tiekimo sistemos;
- argono dujų tiekimo sistema;
- vandenilio matavimo įrenginiai;
- eksperimento valdymo sistema;
- rezultatų apdorojimo sistema.

Svarbiausia eksperimentinio stendo dalis yra eksperimentinė rinklė. Į eksperimentinę rinklę iš apačios yra tiekiamas perkaitinto garo ir argono mišinys. Nedidelio argono kiekio reikia, kad eksperimentinio stendo davikliai galėtų užfiksuoti vandenilį. Šiam dujų mišiniui perėjus eksperimentinę rinklę, mišinyje likęs garas, argonas bei eksperimento metu susidaręs vandenilis išleidžiami per iš rinklės viršaus išvestą ir vandeniui aušinamą vamzdį, kuriuo keliauja į kondensatorių. Kondensatoriuje garas atskiriamas nuo nesukondensuojamų dujų – argono ir vandenilio. Eksperimentinės rinklės aušinimo fazės metu vanduo tiekiamas į rinklę atskiru kanalu, o argonas yra įleidžiamas į apatinę rinklės dalį.

QUENCH-3 eksperimento eigą sudaro 3 fazės: įšildymo, pereinamojo proceso ir staigaus aušinimo. Eksperimento eiga išsamiai aprašyta FZK pateiktoje eksperimento ataskaitoje [9]. Eksperimentiniame įrenginyje viso eksperimento metu palaikomas 200 kPa slėgis. Eksperimento įšildymo fazės metu eksperimentinė rinklė aušinama tiekiant 3 g/s vandens garo ir 3 g/s argono. Tiekiamų argono ir vandens garo temperatūros yra 840 K. Šios fazės metu eksperimentinės rinklės kaitinimo galimumas yra pastovus (3,75 kW). Įšildymo fazė trunka 900 s ir jos metu



1 pav. QUENCH-3 eksperimento stendo [9] supaprastinta principinė schema

eksperimentinės rinklės ir izoliacinio apvalkalo vidinio paviršiaus temperatūra yra apytiksliai 800–900 K. Pereinamojo proceso fazės pradžioje eksperimentinė rinklė buvo kaitinama keliant temperatūrą 0,4 K/s greičiu nuo 900 iki 1400 K temperatūros. Toliau kaitinimas vyko temperatūrą didinant 1 K/s greičiu nuo 1400 K iki maksimalios temperatūros, kuri pasiekė 2500 K. Šios fazės metu vandens garo ir argono debitai buvo išlaikomi tokie patys, kaip ir įšildymo fazės atveju.

Aušinimo fazė buvo pradėta išjungiant vandens garų tiekimą bei pildant 90 g/s debitu eksperimentinės rinklės apatinę dalį vandeniu ir leidžiant į rinklės apačią argono dujas 3 g/s debitu. Praėjus 25 s nuo šių veiksmų pradžios, aušinimo

vandens tiekimas buvo sumažintas iki 40–50 g/s debito. Taigi, vandens lygis eksperimentinėje rinklėje kilo 1,3 cm/s greičiu. Po imitacinių kuro strypų staigaus aušinimo elektrinė galia buvo sumažinta iki 4 kW, o tai atitinka liekamosios branduolių dalijimosi šilumos lygį.

Eksperimento metu išsiskyrė 123 g vandenilio. Poeksperimentinių tyrimų laikotarpiu nustatyta, kad kaitintoje rinklėje kuro strypų imitatorių apvalkalai ir kuro tablečių imitatoriai išsilydė, įvyko išsilydžiusių medžiagų persislinkimas, intensyvi kuro strypų imitatorių nuolaužų ir susidariusio lydalo oksidacija. Imitacinių kuro strypų apvalkalai ir eksperimentinės rinklės izoliacinis apvalkalas viršutinėje rinklės dalyje pasidarė trapūs ir taip pat buvo pažeisti.

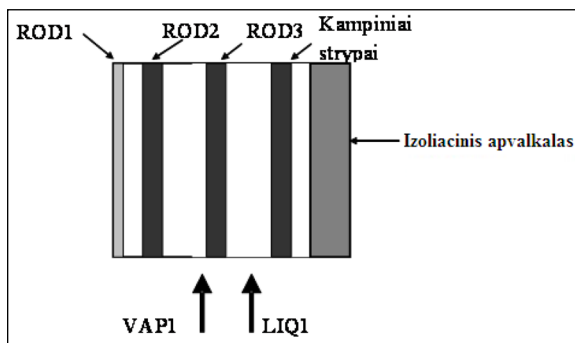
MODELIAVIMO METODIKA

ASTEC (angl. *Accident Source Term Evaluation Code*) [10] programų paketas buvo sukurtas bendradarbiaujant Prancūzijos IRSN (pranc. *Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire*) ir Vokietijos GRS (vok. *Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit mbH*) institutams modeliuojant visus sunkiosios avarijos metu lengvojo vandens reaktoriuose vykstančius reiškinius. ASTEC programų paketas yra modulinės struktūros. QUENCH-3 eksperimentui modeliuoti buvo naudojamas ASTEC V2.0r3 versijos ICARE modulis, skirtas modeliuoti reiškiniams aktyviojoje zonoje sunkiosios avarijos fazėje iki reaktoriaus korpuso pažeidimo. ICARE modulis leidžia modeliuoti ankstyvąją ir vėlyvąją reaktoriaus aktyviosios zonos degradacijos fazes bei nepakitusias ar silpnai pakitusias geometrijos aktyviosios zonos staigų aušinimą. Ankstyvosios fazės metu branduolinio kuro tabletės įkaista, jų apvalkalai išsipučia bei trūksta, vyksta kuro strypų apvalkalų oksidacija, didėja apvalkalo trapumas arba prasideda lydymasis, skystas lydalas persislenka ir teka žemyn. Vėlyvosios fazės metu įvyksta aktyviosios zonos geometrinių matmenų pasikeitimas, skystas lydalas kaupiasi ant kuro rinklės rėtinių, taip blokuodamas šilumnešio cirkuliaciją tarp kuro strypų, lydalas persislenka į reaktoriaus korpuso dugną ir kaista iki reaktoriaus korpuso pažeidimo.

QUENCH-3 eksperimentinė rinklė ICARE modelyje sudaryta iš šių elementų (2 pav.):

- ROD1 – nekaitinamas centrinis strypas;
- ROD2 – vidinis 8 kaitinamų strypų žiedas;
- ROD3 – išorinis 12 kaitinamų strypų žiedas;
- keturi kampiniai strypai;
- rinklę gaubiantis izoliacinis apvalkalas, su modeliuotas aprašant visus apvalkale esančius sluoksnius;
- eksperimentinėje rinklėje esančios viršutinės ir apatinės rėtinės.

Dujų ir vandens cirkuliacija per eksperimentinę rinklę modeliuojama naudojant du tekėjimo kanalus – VAP1 garo ir argono tekėjimui bei LIQ1 vandens tekėjimui. Ašine kryptimi QUENCH eksperimentinės rinklės modelis padalytas į 32 dalis. Toks tekėjimo kanalų padalijimas į smulkesnes modelio dalis (celes) yra pagrįstas siekiu palyginti skaičiavimo rezultatus su eksperimento metu išmatuotomis parametru reikšmėmis. Ka-



2 pav. QUENCH-3 eksperimentinės rinklės nodalizacinė schema ICARE moduliui

dangi ASTEC yra vienmatis programų paketas, kiekvienos modelio celės (dalies) parametrai yra apskaičiuojami tos celės centre. Todėl celių išmatavimai parenkami taip, kad eksperimentinio įrenginio daviklių įrengimo vieta sutaptų su modelio celių centrais.

Naudojantis ICARE moduliu yra svarbu tinkamai pasirinkti cirkonio oksidaciją garo aplinkoje aprašantį modelį. Atsižvelgiant į ankstesnių darbų rezultatus pasirinktas PRATER oksidacijos proceso skaičiavimo modelis [8].

Eksperimentas buvo modeliuojamas dviem etapais:

- visų pirma lyginant skaičiavimo rezultatus su eksperimento metu išmatuotomis temperatūrų ir susidariusio vandenilio kiekio vertėmis bei įvertinant eksperimento specifiką buvo nustatytos geriausiai eksperimentinius rezultatus atitinkančios modelio įvadinių parametru vertės. Šis parametru rinkinys toliau vadinamas „pagrindiniu skaičiavimu“;
- siekiant nustatyti atskirų įvadinių parametru įtaką skaičiavimo rezultatams, antrame etape buvo atrinkti 4 svarbiausi modeliavimo parametrai (kaitinimo elementu papildoma kontaktų varža, izoliacinį apvalkalą sudarančio cirkonio dioksido savitoji šiluma ir šiluminis laidumas bei paduodamo vandens debitas). Šie parametrai atskirai po vieną buvo didinami ar mažinami ir su pakeistais parametru rinkiniais buvo atliekamas eksperimento modeliavimas. Iš viso buvo sudaryti 9 įvadinių parametru rinkiniai ir atlikta tiek pat skaičiavimų.

Atrinkti įvadiniai ASTEC modelio parametrai, jų vertės „pagrindiniame skaičiavime“, sumažintos

ir padidintos vertės bei keitimo dydis procentais nuo pagrindinės vertės pateikti 1 lentelėje. Parametrų kitimo ribos buvo parinktos vadovaujantis anksčiau sukaupta modeliavimo patirtimi [18] bei straipsnių apie QUENCH eksperimentų modeliavimą analize. Kaitinimo elementų varžos (lemiančios rinklės kaitinimo galia) keitimo ribos buvo parinktos peržvelgus kitų autorių straipsniuose pateiktus QUENCH eksperimentų modeliavimo aprašymus. Įvairūs autoriai [11–14], modeliuodami QUENCH eksperimentus RELAP/SCDAPSIM programų paketu, savo skai-

čiavimuose taikė skirtingas kaitinimo elementų varžą aprašančio parametro vertes. Skirtingų autorių darbuose [11–14] šio parametro maksimali ir minimali vertės skyrėsi maždaug 20 %. Pagal šią analogiją, darome prielaidą, kad kaitinimo elementų varža gali varijuoti 10 % intervalu į vieną ir į kitą pusę nuo pagrindiniame skaičiavime priimtose vertės. Cirkonio dioksido šiluminių savybių kitimo riba nustatyta 20 % intervalu. Toks platus intervalas pagrįstas tuo, kad realias šios izoliacinės medžiagos savybes labai sunku nustatyti: QUENCH eksperimentų metu,

1 lentelė. Modeliavime taikytų parametrų pagrindinės ir pakeistos vertės

Parametras	Pagrindinio skaičiavimo vertė	Sumažinta vertė	Padidinta vertė	Keitimo intervalas
Kaitinimo elementų papildoma kontaktų varža	0,3 mΩ	0,27 mΩ	0,33 mΩ	±10 %
ZrO ₂ šiluminis laidumas	Temp., K	Laidumas, W/mK		
	300	0,05	0,04	0,06
	550	0,07	0,056	0,084
	700	0,08	0,064	0,096
	873	0,095	0,076	0,114
	1083	0,11	0,088	0,132
	1173	0,12	0,096	0,144
	1248	0,13	0,104	0,156
	1700	0,195	0,156	0,234
	2100	0,275	0,22	0,33
2500	0,35	0,28	0,42	±20 %
Aušinimo vandens tiekimas	Laikas, s	Masinis debitas, kg/s		
	0	0	0	0
	2599	0	0	0
	2600	0,01	0,0097	0,0103
	2602	0,09	0,0873	0,0927
	2627	0,09	0,0873	0,0927
	2630	0,04	0,0388	0,0412
	3501	0,04	0,0388	0,0412
	3508	0	0	0
ZrO ₂ savitoji šiluma	Temp., K	Sav. šilum, J/kgK		
	300	506	404,8	607,2
	550	560	448	672
	700	596	476,8	715,2
	873	619	495,2	742,8
	1083	638	510,4	765,6
	1173	604	483,2	724,8
	1248	604	483,2	724,8
	1700	608	486,4	729,6
	2100	660	528	792
2500	713	570,4	855,6	±20 %

keičiantis izoliacinio apvaskalo temperatūrai plačiame diapazone, cirkonio dioksido užpildas yra deformuojamas, tarp atskirų sluoksnių gali atsirasti tarpelių. Taip pat reikia įvertinti, kad cirkonio dioksido šiluminės savybės buvo nustatytos oro aplinkoje, kai QUENCH eksperimentuose šis izoliacinis apvaskalas yra argono aplinkoje. Japonų mokslininkai savo QUENCH eksperimento modelyje [15] cirkonio dioksido šiluminės savybes taip pat keitė maždaug 20 %, palyginti su prieš eksperimentą išmatuotomis vertėmis. Aušinimo vandens tiekimo srauto keitimo riba pasirinkta atsižvelgiant į tai, kokios gali būti šio parametro eksperimentinės vertės nustatymo paklaidos.

Vienas iš nežinomų ir didelę įtaką eksperimento rezultatams darančių parametrų yra nerūdijančio plieno aušinimo gaubto temperatūra. Ši temperatūra nėra skaičiuojama sudarytu ASTEC modeliu, nes nerūdijančio plieno aušinimo gaubtas nėra aprašytas šiame modelyje. Straipsnyje nerūdijančio plieno aušinimo gaubto temperatūros vertės buvo naudojamos gavus jas QUENCH-3

eksperimentą modeliuojant RELAP/SCDAPSIM programų paketu [16].

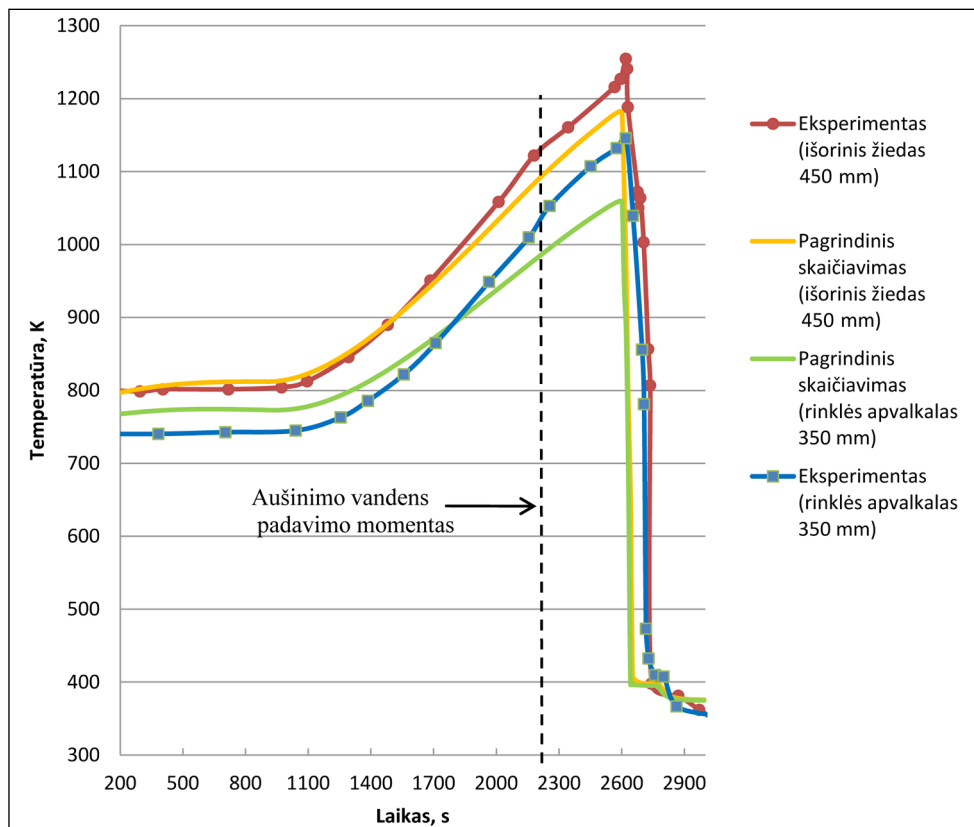
MODELIAVIMO REZULTATAI

Atliekant modeliavimo rezultatų analizę buvo nagrinėjami du parametrai:

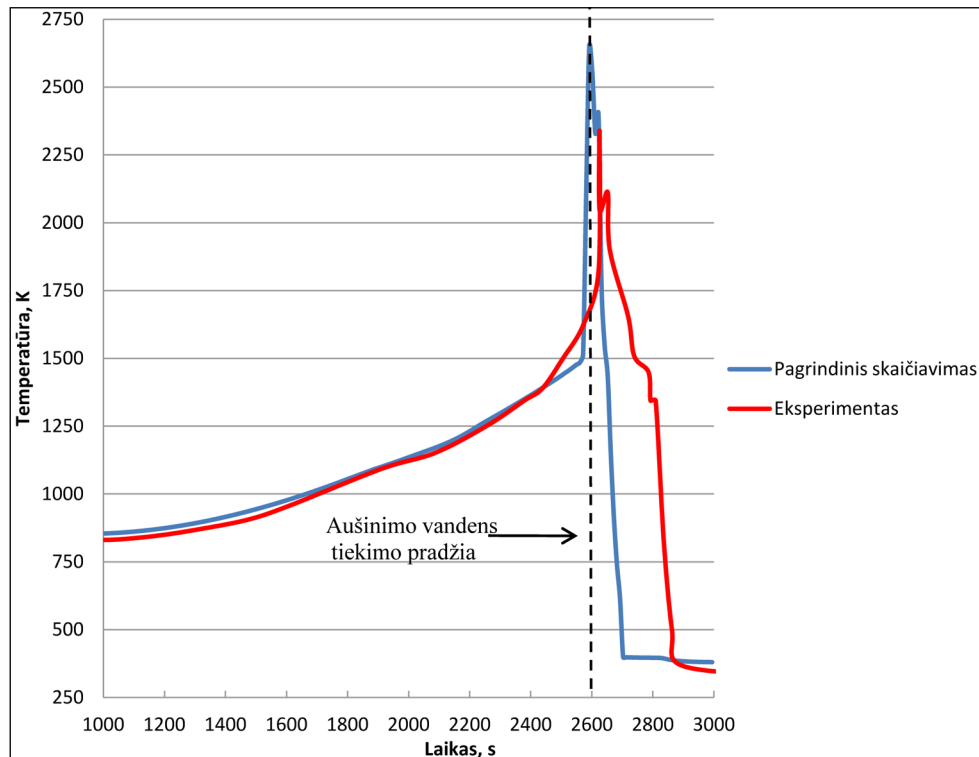
1. Imitacinių kuro strypų rinklės vidiniame ir išoriniame eksperimentinės rinklės žieduose bei eksperimentinės rinklės izoliacinio apvaskalų temperatūros įvairiuose eksperimentinės rinklės kaitinamosios dalies aukščiuose.
2. Per visą eksperimentą susidariusio vandenilio dujų kiekis.

Žinant QUENCH-3 eksperimento rezultatus [9] buvo atliktas eksperimentinių ir modeliavimo rezultatų palyginimas temperatūroms bei susidariusio vandenilio kiekiam.

3–5 pav. pateiktos kuro rinklę imituojančių kaitinamųjų strypų, esančių išoriniame bei vidiniame žieduose apie centrinį strypą ir eksperimentinės rinklės izoliacinio apvaskalo temperatūros. Atlikus variacinius skaičiavimus su 1 lentelėje išvardytais



3 pav. Kuro rinklę imituojančių kaitinamųjų strypų, esančių išoriniame žiede apie centrinį strypą, 450 mm aukštyje apvaskalų ir eksperimentinės rinklės izoliacinio apvaskalo 350 mm aukštyje temperatūros



4 pav. Eksperimentinės rinklės izoliacinio apvalkalo temperatūra 750 mm aukštyje

modeliavimo parametrais, buvo ištirta jų įtaka eksperimentinės rinklės temperatūrų dinamikai bei susidarancio vandenilio kiekiams (žr. 2 lentelę).

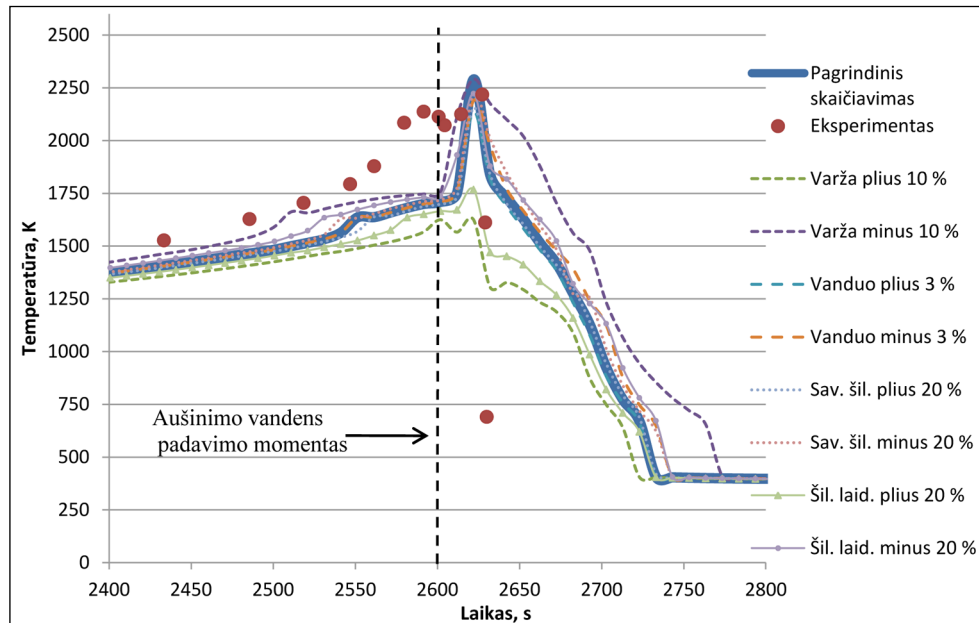
Apžvelgiant eksperimentines ir modeliavimo metu gautas temperatūras bei susidarancio vandenilio kiekius įšildymo ir pereinamojo proceso fazėse (laiko intervalas nuo 0 iki 2500 s), galima teigti, jog eksperimentiniai ir modeliavimo rezultatai skiriasi nežymiai (3–6 pav.). Didesni rezul-

tatų nesutapimai atsiranda po $t = 2500$ s (aušinimo fazės pradžioje) – kai dėl staiga padidėjusio šilumos išsiskyrimo ir padidinto aušinancio vandens tiekimo į eksperimentinę rinklę stipriai suintensyvėja cirkonio oksidacijos reakcijos, kurių metu išskiriamas vandenilis bei generuojama papildoma šiluma.

Apatinėje imitacinės kuro rinklės kaitinamosios dalies dalyje (iki 0,5 m) temperatūrų skirtumas

2 lentelė. Eksperimento ir modeliavimo su įvairiais parametrais rezultatai ir jų palyginimas

	Maksimali temperatūra (K)	Eksperimentinės ir modeliavimo temperatūrų santykis	H ₂ susidarymas (g)	H ₂ masių santykis (eksperimento su modeliavimu)	Zr sumažėjimas (kg)
Eksperimentas	2218	1	123	1	–
Pagrindinis skaičiavimas	2290	1,032	43	0,35	1,68
Varža plus 10 %	1625	0,733	21	0,17	0,77
Varža minus 10 %	2290	1,032	74	0,60	2,68
Vanduo plus 3 %	2139	0,964	42	0,34	1,68
Vanduo minus 3 %	2190	0,987	42	0,34	1,69
Šil. laidumas plus 20 %	1768	0,797	30	0,24	1,21
Šil. laidumas minus 20 %	2223	1,002	62	0,50	2,36
Sav. šiluma plus 20 %	2156	0,972	40	0,33	1,59
Sav. šiluma minus 20 %	2225	1,003	48	0,39	1,86



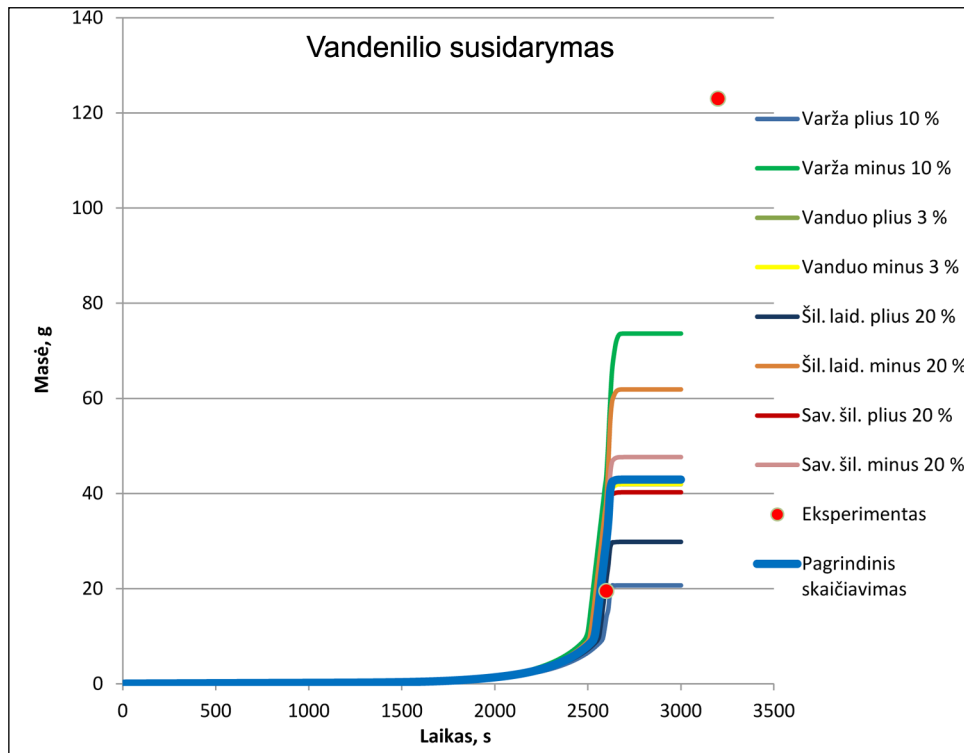
5 pav. Kuro rinklę imituojančių kaitinamųjų strypų, esančių vidiniame žiede apie centrinį strypą, apvalkalų temperatūra 1050 mm aukštyje

įvairiose eksperimentinės rinklės vietose neviršija 10 % (3 pav.). Dar geriau šioje dalyje koreliuoja temperatūros kilimo intervalai ir maksimalių temperatūrų pasirodymo laikai eksperimentiniu ir modeliavimo atvejais. Didesni temperatūrų skirtumai tarp eksperimentinių ir modeliavimo rezultatų atsiranda 750 mm aukštyje po $t = 2500$ s (4 pav.). Šiame paveiksle taip pat matyti, jog pradeda skirtis laiko momentai, kai fiksuojamos maksimalios temperatūros.

Svarbiausia eksperimento dalimi galima laikyti laiko intervalą tarp 2400 ir 2800 s (pereinamojo proceso fazės pabaiga – aušinimo fazės pradžia), kai į įkaitintą eksperimentinę rinklę, pradedant laiko momentu $t = 2600$ s, yra paduodamas pagrindinis vandens kiekis. Šiuo momentu stipriai suintensyvėja egzoterminė cirkonio oksidacijos reakcija vandens garų aplinkoje ir todėl yra pasiekiamos aukščiausios temperatūros. 5 pav. pavaizduotas eksperimentinių duomenų palyginimas su modeliavimo rezultatais, gautais taikant pagrindinius bei pakeistus modeliavimo parametrus (žr. 1 lentelę). Lyginant eksperimentinius ir modeliavimo rezultatus, galima daryti išvadą, jog vidiniame žiede esančių imitacinių kuro strypų apvalkalų didžiausia temperatūra 1050 mm aukštyje yra labai panaši. Kita vertus, sumodeliuotas staigus temperatūrų

šuoilis (intensyvios cirkonio oksidacijos pradžia) vėluoja apytikriai 50 s, palyginti su eksperimento rezultatais. Taip pat modeliavimo rezultatai nepakankamai tiksliai sutampa su eksperimente stebimu temperatūros mažėjimu. Nagrinėjant išoriniame žiede esančių imitacinių kuro strypų apvalkalų temperatūras, kokybiško palyginimo tarp eksperimentinių ir modeliavimo rezultatų nepavyko atlikti dėl eksperimentinių duomenų stokos.

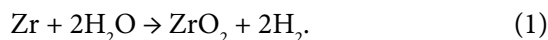
Eksperimentinėje rinklėje susidariusio vandenilio kiekiai eksperimento metu bei modeliavimo su pagrindiniais ir su pakeistais parametrais pavaizduoti 6 pav. Iš turimų eksperimentinių duomenų dviems laiko momentams galima teigti, jog vandenilio susidarymas pakankamai tiksliai modeliuojamas iki temperatūrų šuolio laiko intervale $t = 2600\text{--}2650$ s. Tačiau galutinis susidariusio vandenilio kiekis eksperimento metu yra maždaug dvigubai didesnis už modeliavimo metu gautas vertes. Toks susidariusio vandenilio kiekio skirtumas gali būti paaiškintas pagal 5 pav. pavaizduotą eksperimento ir modeliavimo aukščiausių temperatūrų išsilaikymo trukmę, o ši trukmė parodo cirkonio oksidacijos reakcijos intensyvumą. Eksperimento metu imitacinių kuro strypų apvalkalų temperatūra $T > 2000$ K išsilaikė 50–60 s, kai



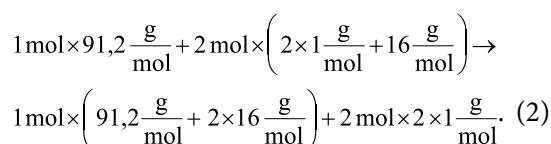
6 pav. Cirkonio oksidacijos metu susidariusio vandenilio kiekiai eksperimento ir modeliųjų skaičiavimų atvejais

modeliavimo atveju $T > 2000 \text{ K}$ – tik 10–15 s. Galima teigti, jog modeliavimo metu cirkonio oksidacijos reakcija vyksta silpniau, negu tai įvyko eksperimente.

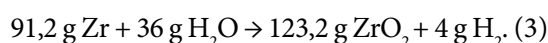
Norėdami įvertinti ASTEC programų paketu skaičiuojamą vandenilio susidarymą, palyginsime skaičiavimo rezultatus su teoriniu cirkonio – vandens garo reakcijos metu galinčio susidaryti vandenilio kiekiu. Šios reakcijos lygtis parodo, kiek grynojo Zr oksidacijos reakcijos metu sureagavo ir kiek tuo pat metu išsiskyrė vandenilio dujų:



Išreiškiant (1) lygtį per molius ir molines mases galima užrašyti:



Sudauginus molius, (2) lygtis išreiškiama gramais:



Iš (3) lygties akivaizdu, jog sureagavus 91,2 g cirkonio susidaro 4 g vandenilio. Gauname, kad su vandeniu sureagavus 1 kg cirkonio, teoriškai turi susidaryti 43,9 g vandenilio.

2 lentelėje išvesta, kiek modeliavimo metu sistemoje (kuro strypų imitatorių apvaskaluose ir eksperimentinės rinklės izoliaciniame apvaskale) sumažėjo cirkonio. Didžiausias Zr sumažėjimas gaunamas, kai priimamas didžiausias kuro strypų imitatorių kaitinimas („Varža minus 10 %“ atvejis). Tuo atveju cirkonio sumažėja 2,68 kg. Jei visas cirkonis sureaguotų su vandeniu, tai teoriškai turėtų susidaryti 118 g vandenilio. Ši vertė yra artima eksperimento metu išmatuotam vandenilio kiekiui. ASTEC skaičiavimo rezultatai rodo, kad šiuo atveju susidarė tik 74 g vandenilio. Taip yra todėl, kad QUENCH-3 eksperimento atveju pereinamojo proceso fazės pabaigoje – aušinimo fazės pradžioje kuro strypų imitatorių apvaskalai ir eksperimentinės rinklės izoliacinis apvaskalas buvo pažeisti, susidarė nuolaužų ir lydalo zonos, o tai labai padidino oksiduojamo paviršiaus plotą, tačiau ASTEC programų paketu šį reiškinį labai sunku sumodeliuoti. Ateityje būtina surasti būdą, kaip tinkamai įvertinti susidariusio lydalo papildomą oksidaciją.

Analizuojant modeliavimo parametrų įtaką galutiniams skaičiavimo rezultatams galima teigti, jog didžiausią įtaką susidariusio vandenilio kiekiui turi kaitinimo elementų papildomos kontaktų varžos (šis parametras yra atvirkščiai proporcingas kaitinimo galios dydžiui) keitimas – didžiausias ir mažiausias vandenilio kiekiai, tarpusavyje besiskiriantys daugiau nei 3 kartus, gaunami su atitinkamai 10 % padidinta ir tiek pat sumažinta varža. Žvelgiant į varžos įtaką imitacinio kuro strypo apvalkalo temperatūroms (5 pav.) matyti, jog su mažesne varža (atitinkamai didesne kaitinimo galia) gaunamos ir aukštesnės temperatūros, analogiškai, su didesne varža temperatūros yra mažiausios ir taip pat staigios cirkonio oksidacijos reiškinys dėl pernelyg žemų temperatūrų šiuo atveju beveik nevyksta.

Palyginti su varža, mažesnę, tačiau vis tiek žymią įtaką modeliavimo rezultatams turi šiluminis cirkonio dioksido, sudarančio izoliacinį apvalkalą, laidumas. Sumažinus šiluminį ZrO_2 laidumą, pablogėja šilumos nuvedimas nuo eksperimentinės rinklės izoliacinio apvalkalo link vandeniui aušinamo nerūdijančio plieno gaubto, todėl padidėja imitacinio kuro strypų apvalkalų temperatūra ir susidaro daugiau vandenilio. Priešingu atveju, 20 % padidinus ZrO_2 šiluminį laidumą, temperatūros ir susidariusio vandenilio kiekiai mažėja (žr. 2 lentelę).

Dar mažesnę įtaką modeliavimo rezultatams turi savitosios šilumos keitimas. Padidinus 20 % ZrO_2 savitąją šilumą, eksperimentinės rinklės izoliacinio apvalkalo ZrO_2 užpildas sugeria daugiau šilumos, todėl yra gaunamos mažesnės kuro strypų imitatorių temperatūros bei susidaro mažiau vandenilio, negu cirkonio dioksido savitąją šilumą tiek pat sumažinus. Šiais dviem atvejais susidarančio vandenilio kiekiai tarpusavyje skiriasi mažiau nei penktadaliu, kai varžos ir šiluminio laidumo keitimo atvejais skirtumai buvo atitinkamai 3,5 ir 2 kartai (žr. 2 lentelę).

Mažiausią įtaką modeliavimo rezultatams daro aušinamo vandens kiekio keitimas. Sumažinus paduodamo vandens kiekį, eksperimentinė rinklė vėsta truputėlį lėčiau negu pagrindinio skaičiavimo atveju. Priešingas reiškinys vyksta tiekiant padidintą vandens kiekį. Vandenilio abiem atvejais susidaro labai panašus kiekis, kuris yra 1 g mažesnis už pagrindinio skaičiavimo

rezultatą. Tokia situacija gali būti paaiškinama tuo, jog tiekiamo vandens kiekis yra keičiamas nežymiai.

PAGRINDINIŲ REZULTATŲ APTARIMAS IR IŠVADOS

QUENCH-3 eksperimento modeliavimas ICARE moduliui iš ASTEC V2.0r3 programų paketo buvo atliktas naudojant pasirinktą modeliavimo parametrų rinkinį bei atliekant kaitinimo elementų papildomos kontaktų varžos, cirkonio dioksido savitosios šilumos ir šiluminio laidumo bei paduodamo vandens kiekio parametrų pakeitimus. Modeliavimo metu suskaičiuoti parametrai (kuro strypų imitatorių apvalkalų temperatūros bei susidarančio vandenilio kiekiai) buvo lyginami su turimais eksperimento rezultatais.

Skaičiavimo rezultatų, gautų naudojant ASTEC programų paketą, atitikimas eksperimentiniams matavimams buvo įvertintas naudojant atitikimo standartą, taikomą kompiuterinėms programoms validuoti. Šis standartas buvo sukurtas JAV Tarpautinio branduolinės saugos centro [17]. Rezultatų atitikimas laikomas puikiu, kai programų paketas tiksliai modeliuoja visus, tiek pagrindinius, tiek ir šalutinius, reiškinius bei tendencijas, ir skaičiavimo rezultatai visiškai sutampa su eksperimente išmatuotais parametrų kitimais. Atitikimas laikomas pakankamu, kai visos pagrindinės tendencijos ir reiškiniai yra teisingai sumodeliuoti (numatyti), tačiau skirtumai tarp skaičiuotų ir matuotų parametrų yra didesni, nei „puikaus atitikimo“ atveju. Pagal standartą, tiek „puikus“, tiek ir „pakankamas“ skaičiavimo rezultatų ir realių matavimų atitikimas laikomas priimtiniu.

Analizuojant modeliavimo temperatūrų dinamiką eksperimentinės rinklės kaitinamosios dalies apačioje (iki 0,5 m) nustatyta, jog modeliavimo temperatūros pakankamai gerai atitinka eksperimentinius rezultatus. Rinklės apačioje puikiai koreliuoja temperatūros kilimo intervalai ir maksimalių temperatūrų pasirodymo laikai eksperimentiniu ir modeliavimo atvejais. Kylant eksperimentine rinkle aukštyn, atsiranda maksimalios temperatūros eksperimento ir modeliavimo nesutapimų, taip pat ima nesutapti ir temperatūrų kitimo bėgant laikui intervalai. Didesniam negu 0,5 m aukštyje maksimali eksperimente išmatuota kuro strypų imitatorių apvalkalų temperatūra

yra 3 % mažesnė už gautą modeliuojant, tačiau susidariusio vandenilio kiekis eksperimento metu dvigubai viršija modeliavimo rezultatus dėl to, jog eksperimente temperatūros, viršijančios 2000 K, išsilaiko 40–50 s ilgiau negu modeliavimo atveju. Kitas momentas, apsunkinantis QUENCH-3 eksperimento modeliavimą, – eksperimento metu pereinamojo proceso fazės pabaigoje – aušinimo fazės pradžioje susidariusios kuro strypų imitatorių nuolaužų ir lydalo zonos. ASTEC ICARE modulis neįvertina tokių zonų susidarymo. Todėl šio reiškinių ir susidariusio lydalo papildomos oksidacijos įvertinimas yra ateities klausimas. Vis dėlto pagrindiniai reiškiniai ir tendencijos (kuro rinklių perkaitinimas dėl padidėjusio galios išsiskyrimo ir nepakankamo šilumnešio tiekimo, vandenilio susidarymas dėl garo reakcijos su cirkoniu, staigus aušinimas), vykstantys eksperimente, yra teisingai sumodeliuoti.

Didžiausią įtaką eksperimento rezultatams turi kaitinimo elementų papildomos kontaktinės varžos keitimas, šiek tiek mažesnę – cirkonio dioksido šiluminio laidumo koregavimas. Keičiant cirkonio dioksido savitąją šilumą įtaka rezultatams yra nedidelė, o mažiausiai modeliavimo rezultatai keičiasi pakeitus tiekiamo aušinimo vandens kiekį. Taigi, norint gauti didesnę eksperimento ir modeliavimo rezultatų sutapimą, šių modeliavimo parametrų keitimas turi būti atliekamas atsižvelgiant į paminėtą kiekvieno parametro įtaką.

Apibendrinant svarbu pažymėti, jog vandens tiekimas į perkaitusią kuro rinklę (arba tiesiog į perkaitusio reaktoriaus aktyviają zoną) dažniausiai turi nevienareikšmiškų pasekmių. Tiekiant daugiau vandens, greičiau sumažinama perkaitusių elementų temperatūra, taip išlaikomas jų integralumas arba stabdomi deformavimosi ar lydymosi reiškiniai. Tačiau įkaitusiems cirkonio apvaskalams reaguojant su didesniu vandens kiekiu susidaro didesni vandenilio kiekiai, o tai kelia sprogimo ir branduolinės jėgainės konstrukcijų pažeidimo pavojų. Kita vertus, tiekiant mažiau aušinamo vandens, susidaro mažiau vandenilio, tačiau sudaromos palankesnės sąlygos išsilaikyti aukštomis temperatūroms ir plėtotis deformacijos ir lydymosi reiškiniams perkaitusiuose elementuose. Tokie kaip QUENCH eksperimentai yra svarbi priemonė aiškinantis perkaitusių kuro rinklių staigus aušinimo vandeniu metu vyk-

tančius reiškinius, o ši skaitinio modeliavimo patirtis yra svarbi kuriant avarinių situacijų branduoliniuose įrenginiuose (pvz., panaudoto branduolinio kuro baseinuose) valdymo strategijas ir konkrečius veiksmų planus.

Gauta 2014 09 10
Priimta 2014 12 29

Literatūra

1. Hofmann P., Hagen P., Noack S., Schanz V., Sepold G. L. Chemical-Physical behaviour of Light Water Reactor core components tested under severe reactor accident conditions in the CORA facility. *Nuclear Technology*. 1997. Vol. 118. P. 200–224.
2. Hobbins P. R., McPherson G. D. *Summary of Results from the LOFT LP-FP-2 Test and Their Relationship to Other Studies at the Power Burst Facility and of the Three Mile Island Unit 2 Accident*. OECD/LOFT Final Event. 1991.
3. Garner R. W., MacDonald P. E. *Power Burst Facility Thermocouple Effects Test Results Report, Test Series TC-1, TC-3, and TC-4*. U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1982.
4. Steinbrück M., Hering W., Stuckert J., Birchley J., Brunet-Thibault E., Drath T., Seiler N., Trambauer K., Veshchunov M. S. Core reflooding: Synthesis of the QUENCH program and its impact on code modelling. *Proceedings of the 1st European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2005), Aix-en-Provence, France, 14–16 November 2005*.
5. *QUENCH Programme at KIT – QUENCH Test matrix*. Karlsruhe Institute of Technology. <http://quenched.forschung.kit.edu/82.php> [žiūrėta 2014 07 17].
6. Steinbrück M., Grosse M., Sepold L., Stuckert J. Synopsis and outcome of the QUENCH experimental program. *Nuclear Engineering and Design*. 2010. Vol. 240. Issue 7. P. 1714–1727.
7. Chikhi N., Nguyen N. G., Fleuret J. Determination of the hydrogen source term during the reflooding of an overheated core: Calculation results of the integral reflood test QUENCH-03 with PWR-type bundle. *Nuclear Engineering and Design*. 2012. Vol. 250. P. 351–363.
8. Kruse P., Koch M. K. Simulation of the Fuel Rod Bundle Test QUENCH-03 Using the Integral

- Code ASTEC V2. *Proceedings of the 8th International Topical Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-8), Shanghai, China, October 10–14, 2010.*
- 9 Hofmann P. et al. *Experimental and Calculational Results of the Experiments QUENCH-02 and QUENCH-03.* Wissenschaftliche Berichte, FZKA 6295, 2000.
 10. Van Dorsselaere J. P., Seropian C., Chatelard P., Jacq F., Fleurot J., Giordano P., Reinke N., Schwinges B., Allelein H. J., Luther W. The ASTEC Integral Code for Severe Accident Simulation. *Nuclear Technology.* 2009. Vol. 165. No. 3. P. 293–307.
 11. Hering W., Homann Ch., Lamy J. S. *Comparison Report on the Blind Phase of the OECD International Standard Problem No. 45 Exercise (QUENCH-06).* Wissenschaftliche Berichte, FZKA-6677, 2002.
 12. Spencer J. H., Novog D., Hohorst J. K., Allison C. M. Assessment of New Modeling in RELAP/SCDAPSIM Using Experimental Results from the QUENCH Program. *Proceedings of ICAPP'11, Nice, France, May 2–5, 2011.* Paper 11081.
 13. Fernandez-Moguel L., Birchley J. Analysis of QUENCH-10 and -16 air ingress experiments with SCDAPSim3.5. *Annals of Nuclear Energy.* 2013. Vol. 53. P. 202–212.
 14. Stuckert J., Große M., Stegmaier U., Steinbrück M. *Results of Severe Fuel Damage Experiment QUENCH-15 with ZIRLOTM cladding tubes, KIT-SR 7576.* Karlsruhe Institute of Technology, 2011.
 15. Madokoro H., Okamoto K., Ishiwatari Y. SCDAP Model Improvement with QUENCH-06 Analysis. *Proceedings of the 2014 22nd International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 21), Prague, Czech Republic, July 7–11, 2014, ASME.* P. 1–8.
 16. Kaliatka T. Modelling of quench experiment using RELAP/SCDAPSIM code. *Proceedings of the 9th International Conference of Young Scientists on Energy Issues CYSENI 2012, Kaunas, Lithuania, 24–25 May, 2012.* Kaunas: LEI, 2012. P. 668–677.
 17. *Guideline for Performing Code Validation within DOE International Nuclear Safety Center (INSC).* International Nuclear Safety Center, 1997.
 18. Vileiniškis V., Kaliatka A. Best estimate analysis of PHEBUS FPT1 experiment bundle phase using ASTEC code ICARE module. *Kerntechnik.* 2012. Vol. 76. No. 4. P. 254–260.

**Antanas Šutas, Algirdas Kaliatka,
Virginijus Vileiniškis**

MODELLING OF QUENCH-3 EXPERIMENT USING ASTEC CODE

Summary

In order to understand the processes taking place in a nuclear reactor core during the emergency cooling, for many years world's scientists have been performing experiments and trying to simulate them using various computer codes. This paper presents the modelling results of the QUENCH-3 experiment, their comparison with the experimental data and the influence of modelling parameters on the calculation results. Modelling has been performed using the ASTEC code ICARE module by varying additional contact resistance of heating elements, specific heat and thermal conductivity of zirconium dioxide and the flow rate of cooling water. Two parameters were analyzed during the modelling: temperature at different points of the experimental facility and the overall amount of hydrogen gas generated during the experiment.

The analysis showed good correspondence between the modelling and experimental temperatures of the fuel assembly imitator. However, the amount of hydrogen generated in the experiment exceeds twice the mass of hydrogen, which was calculated during the modelling. This indicates that the available computer code version is not designed to simulate the oxidation of zirconium when the fuel assembly is severely damaged. A variation of the additional contact resistance has the greatest influence on the modelling results. Comparison of the modelling results with the experimental data enabled us to assess the created model and to prepare for the modelling of other experiments, performed at the same experimental facility.

Key words: QUENCH-3 experiment, ASTEC code, fuel assembly, zirconium oxidation