

RBMK-1500 šilumą išskiriančiuose elementuose vykstančių procesų modeliavimas

Aušra Jusevičiūtė,

Algirdas Kaliatka,

Egidijus Urbonavičius

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

Reaktoriaus eksploatacijos ir avarijų metu vykstantys procesai keičia šilumą išskiriančių elementų (ŠIEL) šiluminės, cheminės ir kitas savybes. Šiame straipsnyje yra apžvelgiami ŠIELuose vykstantys procesai ir jų modeliavimo priemonės. FEMAXI-V (Japonija) ir TESP-ROD (Vokietija) programų paketais buvo sumodeliuoti ŠIELai, naudojami Ignalinos atominės elektrinės reaktoriuose. Sukurti modeliai pritaikyti didelio trūkio neprojektinės avarijos atveju ŠIELuose vykstantiems procesams analizuoti. Straipsnyje pristatomi sukurti modeliai ir gauti skaičiavimo rezultatai.

Raktažodžiai: ŠIEL, modeliavimas, RBMK-1500

1. ĮVADAS

Branduoliniuose reaktoriuose energija gaminama šilumą išskiriančiuose elementuose (ŠIEL), kurių šiluminės, cheminės ir kitos savybės kinta eksploatacijos metu. Siekiant saugiai ir optimaliai naudoti branduolinį kurą, būtina suprasti jame vykstančius procesus, lemiančius šias savybes. Svarbiausias bet kurios branduolinės jėgainės eksploatacijos klausimas yra – ar įvykus gedimui jėgainės sistemose nebus pažeisti saugos kriterijai ir ar bus išlaikytas barjerų, ribojančių radioaktyviųjų medžiagų patekimą į aplinką, vientisumas? Vienas tokių barjerų yra ŠIELo apvalkalas.

Siekiant įvertinti ŠIELo apvalkalo pažeidimo galimybę Ignalinos AE reaktoriuje naudojami ŠIELai buvo sumodeliuoti FEMAXI-V (Japonija) ir TESP-ROD (Vokietija) programų paketais. Avariniu įvykiu buvo pasirinktas reaktoriaus aušinimo sistemos didžiausio skersmens vamzdžio trūkis, darant prielaidą, kad avarijos metu nepradeda veikti reaktoriaus avarinio aušinimo siurbliai. Šio įvykio metu yra tikėtinas ŠIELo apvalkalo pažeidimas vėlesnėje avarijos fazėje, kai slėgis reaktoriaus aušinimo sistemoje nukritęs iki atmosferinio slėgio ir šilumnešis nėra tiekiamas dėl saugos sistemų gedimo.

Šis atliktas darbas yra pirmasis bandymas sumodeliuoti RBMK tipo reaktoriuose naudojamuose ŠIELuose vykstančius procesus programų paketais. Modeliavimui buvo naudoti FEMAXI-V (Japonija) ir TESP-ROD (Vokietija) programų paketai, sukurti korpusiniuose reaktoriuose naudojamiems ŠIELams modeliuoti. Gautų skaičiavimo rezultatų palyginimas išryškino programų paketų skirtumus ir apibrėžė jų taikymo ribas. Pritaikius FEMAXI-V ir TESP-ROD programų paketus RBMK tipo reaktoriams, bus galima prognozuoti ŠIELų savybių kitimą normalios eksploatacijos ir avarijų sąlygomis, be to, sukauptą patirtį bus galima pritaikyti ir kito tipo ŠIELams modeliuoti.

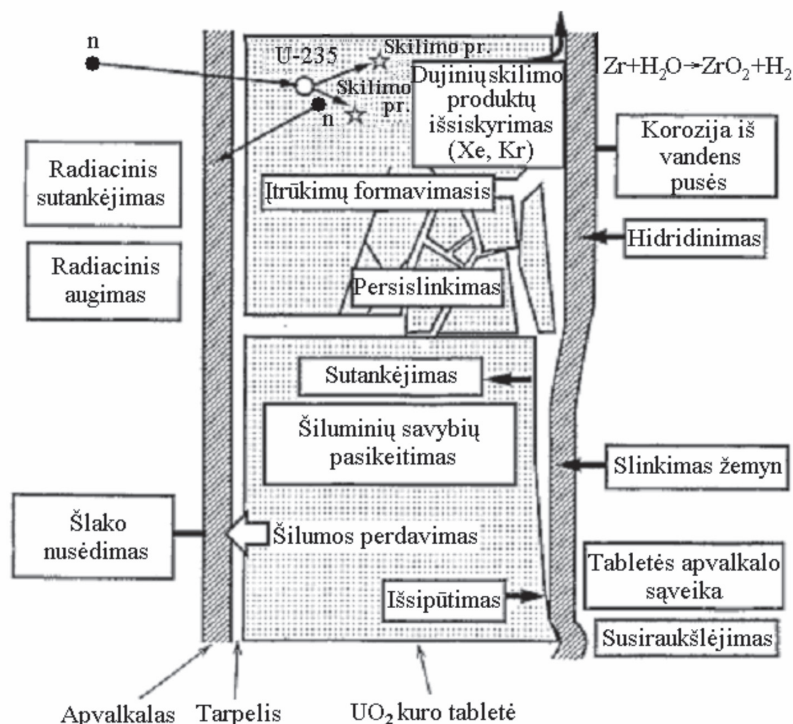
2. RBMK-1500 ŠIELE VYKSTANTYS PROCESAI IR JŲ MODELIAVIMO PRIEMONĖS

2.1. ŠIELE vykstantys procesai

Eksploatacijos metu branduoliniame kure dalijasi urano branduoliai, taigi mažėja urano branduolių koncentracija bei radiacinio neutronų pagavimo metu dalis skilios medžiagos branduolių virsta neskiliais nuklidais. Tai yra vadinama branduolinio kuro išdegimu. Tuo pačiu metu branduoliniame kure, priklausomai nuo išdegimo, vyksta įvairūs procesai: dujinių skilimo produktų susidarymas tabletėje ir kaupimasis tarpelyje tarp branduolinio kuro tabletės ir ŠIELo apvalkalo, tabletės sutankėjimas arba tabletės granuliu persislinkimas, apvalkalo oksidacija, apvalkalo išsipūtimas ir t. t. (1 pav.). Spinduliuojant (apšvitinant neutronais) branduolinio kuro tabletės mikrostruktūra kinta. Mikrostruktūros pokyčiai pasidaro pastebimi tik branduolinio kuro tabletės centrinėje dalyje esant aukštesnei kaip 1300°C temperatūrai [1]. Dėl branduoliniame kure vykstančių reakcijų, veikiant pagreitintai difuzijai dėl apšvitinimo ir dėl skilimo produktų smūginio judėjimo pradingstant burbuliukams, tankėja branduolinis kuras.

Kai branduolinio kuro išdegimas <10000 MWd/tU, branduolinio kuro tabletė gali sutrūkinėti dėl joje susidarančių didelių temperatūros gradientų. Tarpelis, esantis tarp branduolinio kuro tabletės ir apvalkalo, sumažėja, nes atskiri branduolinio kuro tabletės fragmentai pasislenka spindulio kryptimi išorės link. Šis reiškinys vadinamas branduolinio kuro poslinkiu, kuris sukelia žymų tarpelio laidumo padidėjimą ir gali sukelti tabletės mechaninę sąveiką su ŠIELo apvalkalu.

Kai branduolinio kuro išdegimas yra 10000–30000 MWd/tU, tarpelyje tarp kuro tabletės ir ŠIELo apvalkalo pradeda kauptis skilimo produktai (Xe, Kr, I, Cd ir kt.). Skilimo produktų kaupimasis turi įtakos procesams, tokiems kaip branduolinio kuro



1 pav. Pagrindiniai procesai, vykstantys ŠIEle

tabletės brinkimas (kuro tabletės matmenų pasikeitimas, dėl kurio sumažėja kuro tankis), vidinio slėgio padidėjimas ŠIEle ir cheminė sąveika su ŠIElo apvalkalo metalu. Brinkimas sumažina tarpelį tarp kuro tablečių ir apvalkalo.

Temperatūros pasiskirstymas branduolinio kuro tabletėje lemia deformacijas ŠIEle ir skilimo produktų išsiskyrimą iš tabletės, ir atvirkščiai. Todėl tai yra esminis veiksnys, lemiantis branduolinio kuro savybes. Temperatūra kuro tabletės centre priklauso nuo šiluminės galios, galios pasiskirstymo tabletės spindulio kryptimi, tabletės šiluminio laidumo, tarpelio laidumo ir ŠIElo apvalkalo išorinio paviršiaus temperatūros. Temperatūra kuro tabletės centre yra tiesiog proporcinga galiai ir tarpeliui. Didėjant slėgiui ŠIElo viduje mažėja jame esančių dujų vidutinis laisvasis kelias. Dėl to vidinio slėgio padidėjimas pagerina tarpelio laidumą. Taip pat tarpelio šiluminis laidumas pagerėja, nes iš tabletės išsiskiria geresnio šiluminio laidumo dujos.

Didėjant branduolinio kuro išdegimui vis didesnę įtaką kuro temperatūrai turi tarpelio kitimas, atsirandantis dėl tabletės granuliuojamumo, ŠIElo apvalkalo išsipūtimo ir dujinių skilimo produktų ksenono ir kriptono, kurių mažesnis šiluminis laidumas, lyginant su heliu, išsiskyrimas. Sumažėjęs šiluminis laidumas tarpelyje lemia tabletės temperatūros padidėjimą, todėl paspartėja dujinių skilimo produktų išsiskyrimas. Tai yra vadinama šiluminiu grįžtamoju ryšiu. Kita vertus, sumažėjus dujų tarpeliui ar jam visiškai išnykus ir atsiradus kontaktui tarp branduolinio kuro ir apvalkalo, geriau perduodama šiluma ir dėl to sumažėja kuro temperatūra. Normalios eksploatacijos metu tarp šių granuliuojamumo, dujų išsiskyrimo ir tarpelio matmenų kitimo procesų nusistovi pusiausvyra.

Dujinių skilimo produktų išsiskyrimo iš tabletės procesas priklauso nuo galios. Tuojau pat po kuro kasetės patalpavimo į veikiantį reaktorių išsiskiria apie 10% dujinių skilimo produktų [1]. Išsiskyrusių dujinių skilimo produktų daugėja didėjant ga-

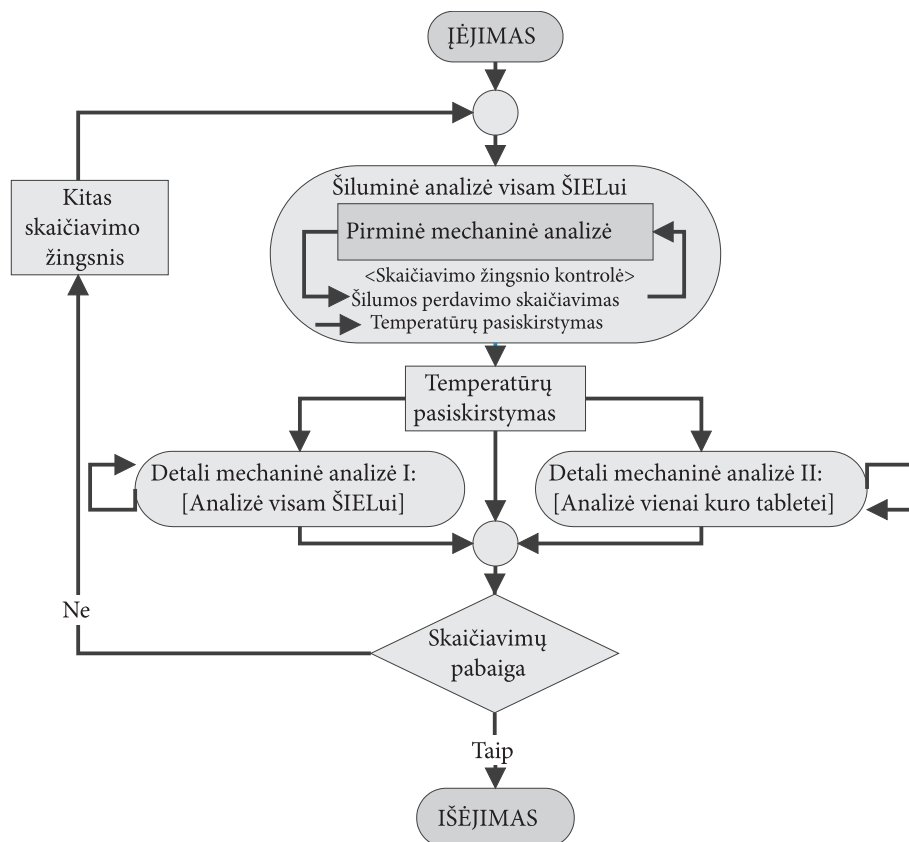
liai. Greitai dujiniai skilimo produktai išsiskiria dėl atsiradusių mikroplyšių, šiluminių įtempių ir didėjančio slėgio dujų burbuluose, kurie kaupiasi tabletėje. Taip pat dujiniai produktai gali išsiskirti ir mažėjant galiai. Dujinių skilimo produktų prasiskverbimas į inertinėmis dujomis užpildytą ŠIElo tarpelį priklauso nuo branduolinio kuro tablečių stulpelio aukščio, tarpelio dydžio bei vidinio slėgio ŠIEle.

Avarijos atveju ŠIElų apvalkalai gali būti pažeisti, tuomet radionuklidai, susikaupę po ŠIElo apvalkalu, patektų į šilumnešį, t. y. būtų pažeistas vienas iš saugos barjerų. Bendroju atveju apvalkalas gali būti pažeistas dėl mechaninės sąveikos (kontakto tarp kuro ir ŠIElo apvalkalo, kai apvalkalas apspaudžia tabletes) arba ŠIElo apvalkalo išsipūtimo. ŠIElo apvalkalo apspaudimas galimas, kai avarinio ar pereinamojo proceso metu kylant apvalkalo temperatūrai kartu didėja slėgis reaktoriaus aušinimo kontūre. ŠIElo apvalkalo išsipūtimas galimas, kai kylant apvalkalo temperatūrai mažėja slėgis aušinimo kontūre. Kartu su šiais procesais, esant aukštai apvalkalo temperatūrai, vyksta ir cirkonio–niobio oksidacijos procesas. ŠIElo apvalkalo medžiagos oksidacija yra pavojinga, nes dėl jos apvalkalas pasidaro trapus. Oksidacija taip pat pablogina šiluminę ir mechaninę ŠIElo apvalkalo savybes.

2.2. RBMK-1500 ŠIElų modeliavimo priemonės

ŠIEluose vykstančius procesus galima modeliuoti įvairiais programų paketais, pavyzdžiui, FEMAXI (Japonija), TESP-ROD (Vokietija), FUELSIM (JAV) ir kt. Šie programų paketai yra plačiai naudojami nagrinėjant ŠIEluose vykstančius šiluminius ir mechaninius procesus eksploatacijos metu ir avarijų atvejais [2, 3].

FEMAXI-V (Japonija) programų paketas [2] skirtas viename ŠIEle eksploatacijos ir avarijų metu vykstantiems procesams modeliuoti. Šiuo programų paketu galima atlikti šiluminę ir mechaninę analizę (2 pav.):



2 pav. FEMAXI-V programų paketo loginė schema

- šiluminės analizės metu atliekami temperatūrų pasiskirstymo skaičiavimai per visą ŠIELo ilgį ir spindulio kryptimi, skaičiuojamas dujinių skilimo produktų išsiskyrimas iš kuro tablečių, slėgio kitimas tarpelyje po apvaskalu, šilumos perdavimas nuo tablečių į ŠIELo apvaskalą, nuo apvaskalo šilumnešiu ir t. t.;

- mechaninės analizės dalyje yra skaičiuojami įtempiai kuro tabletėse dėl jų brinkimo, ŠIELo apvaskalo ir tabletės elastinė deformacija, apvaskalo oksidacija, mechaninė sąveika tarp apvaskalo ir tablečių ir kt.

2 paveiksle matyti, kad FEMAXI-V programų paketas kiekvienu laiko momentu atlieka šiluminę analizę visam ŠIELui. Turimi duomenys ir gauti rezultatai iš šiluminės analizės panaudojami atliekant mechaninę analizę, kuri yra padalyta į dvi dalis: 1) detali mechaninė analizė visam ŠIELui; 2) skaičiuojami mechaniniai parametrai vienai kuro tabletei, pasirinktame segmente.

TESPA-ROD (Vokietija) programų paketas, panašiai kaip ir FEMAXI-V, atskirai skaičiuoja procesus kuro tabletėje, tarpelyje tarp tablečių ir apvaskalo ir ŠIELo apvaskale (3 pav.) [3]. Jis modeliuoja šilumos perdavimo, tablečių išsipūtimo ar sutankėjimo ir kuro granulų persislinkimo procesus, kurie yra susieti su dujinių skilimo produktų išsiskyrimu iš tablečių. Taip pat modeliuojami hidridinimo efektai apvaskale. TESP-ROD programų pakete yra įvesta informacija apie keletą kuro tipų: UO_2 , MOX ir kurą su išdegančių neutronų sugėrikliu gadoliniu. TESP-ROD skaičiuoja apkrovas ir pažeidimus (trūkius) įvairiems ŠIELų apvaskalams, tarp kurių yra ir E110, naudojamas Ignalinos AE. Programų pakete įdėtas modelis, kuris skaičiuoja perėjimą iš α į β fazę cirkonio–niobio apvaskale. Programų paketas apskaičiuoja slėgį tarpelyje tarp apvaskalo ir kuro tablečių. Šis slėgis priklauso nuo dujinių produktų, patenkančių į tarpelį.

3. RBMK-1500 ŠIELO MODELIAVIMAS NEPROJEKTOVINĖS AVARIJOS ATVEJU

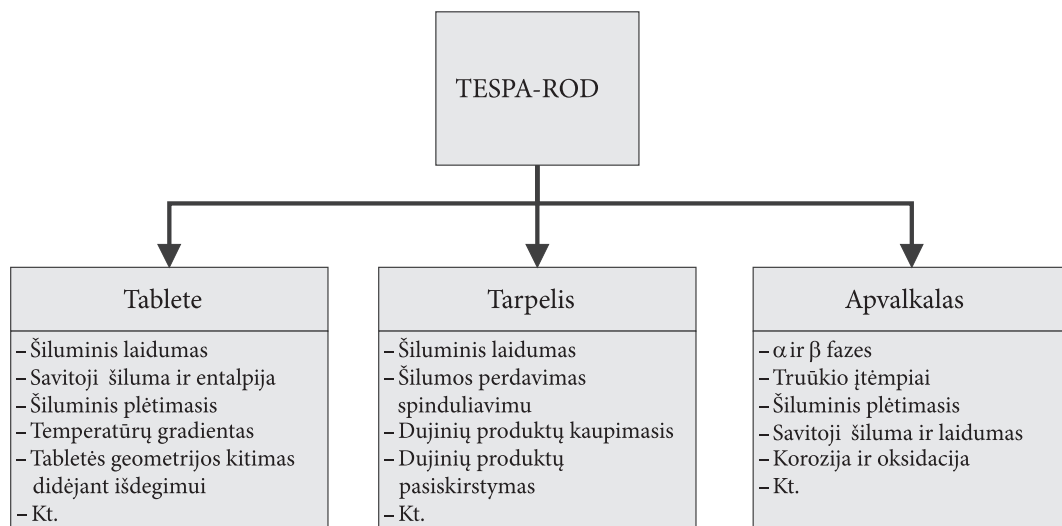
3.1. Ignalinos AE branduolinis kuras

Ignalinos AE yra naudojamas 2,4, 2,6 ir 2,8% išsodinimo UO_2 kuras su išdegančiu neutronų sugėrikliu erbiu. Branduolinio kuro tablečių skersmuo – 11,5 mm, aukštis – 15 mm. Siekiant sumažinti kuro stulpo terminį išsiplėtimą ir termomechaninę sąveiką su ŠIELo apvaskalu, tabletės turi sferinius įdubimus viršuje ir apačioje. Tabletės centrinėje ašyje yra 2 mm kiaurymė, kuri leidžia sumažinti susidarančius įtempimus tabletės centre ir palengvina eksploatacijos metu susidariusių dujų pašalinimą iš tablečių [4].

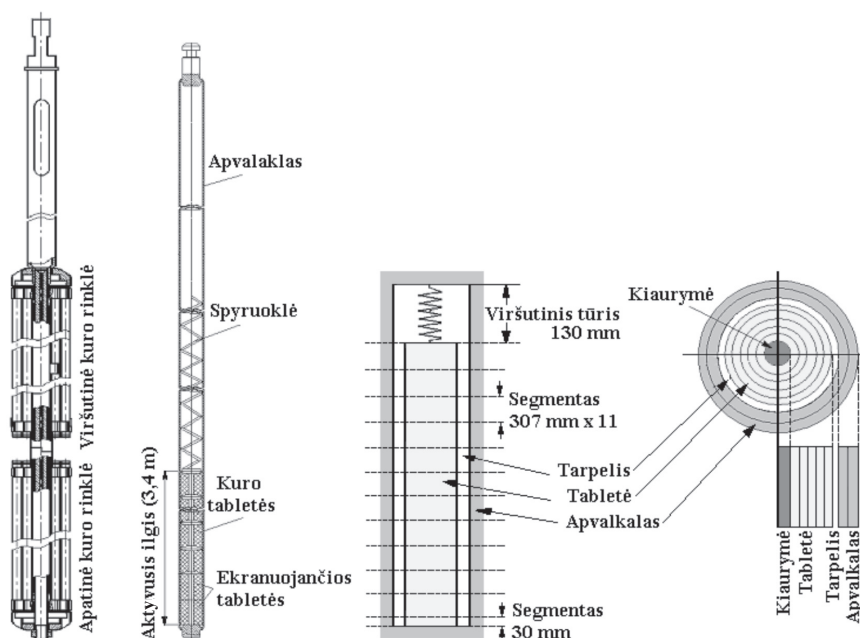
Tabletės talpinamos į cirkonio ir 1% niobio lydinio vamzdelius, kurių išorinis skersmuo 13,6 mm, sienelės storis apie 0,9 mm ir ilgis 3,6 m (aktyvusis ŠIELo ilgis 3,4 m). Tarp kuro tablečių ir apvaskalo yra paliekamas tarpelis, kuris užpildomas helio dujomis. Tarpelis prieš įkraunant branduolinį kurą į reaktorių yra 0,22–0,38 mm [4]. Eksploatacijos metu šis tarpelis kinta dėl ankstesniame skyriuje aprašytų procesų.

Norint sumažinti neutronų nuotėkį ašine kuro kryptimi, ŠIELo gale prie aklės yra dedamos mažesnio (0,7%) išsodinimo U^{235} kuro tabletės. Privirinus aklę iš vieno ir antgalį iš kito ŠIELo apvaskalo galo ŠIELas hermetizuojamas ir užpildomas heliu, kurio slėgis 0,5 MPa [4].

ŠIELai surenkami į rinkles. Rinklėje 18 ŠIELų grupuojami apie centrinį laikantį strypą. Toks ŠIELų išdėstymas skiriasi nuo įprastos kvadratinės gardelės, naudojant PWR ir BWR tipo reaktoriuose ir nuo šešiakampės gardelės, naudojamos VVER tipo reaktoriuose. Aktyviosios zonos aukštis yra 7 m, todėl visa kuro



3 pav. TESPA-ROD programų paketo sprendžiami uždaviniai



4 pav. FEMAXI-V ŠIELO modelis

kasetė yra dviaukštė, t. y. sudaryta iš dviejų viena ant kitos uždėtų šilumą išskiriančių rinklių (4 pav.). Tai yra esminis RBMK kuro rinklės skirtumas nuo kituose reaktoriuose naudojamų kuro rinklių.

3.2. Ignalinos AE kuro modeliai

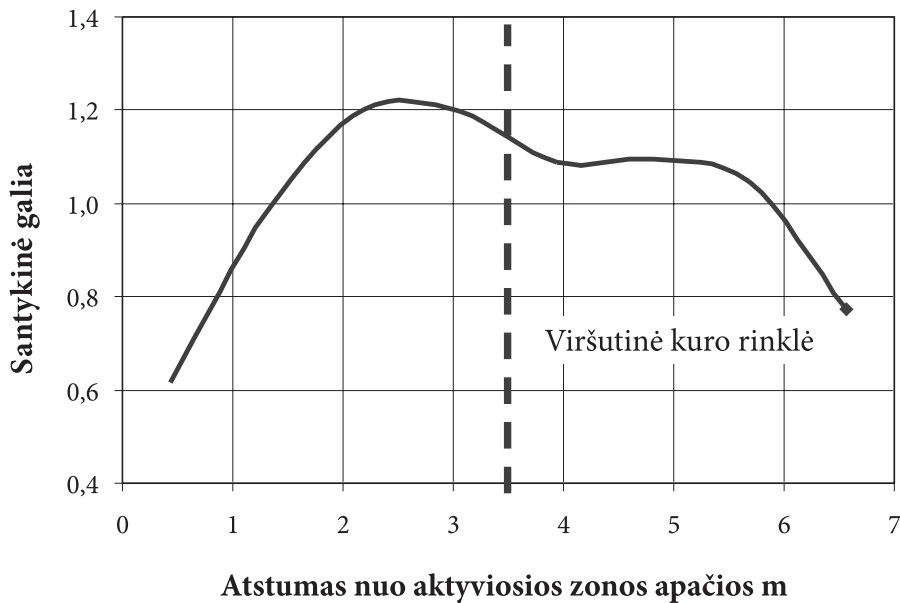
Programų paketais FEMAXI-V ir TESPA-ROD buvo sukurti ŠIELO iš Ignalinos AE viršutinės kuro rinklės modeliai.

FEMAXI-V programų paketu sukurtame modelyje visas aktyvus ŠIELO ilgis buvo padalytas į 12 segmentų, iš kurių vienas aprašo ekranuojančias tabletes (4 pav.). Viršutinis tūris, kuriame sumontuota tablečių stulpą suspaudžianti spyruoklė, aprašytas atskiru elementu. Išsamiai aprašyti kuro tabletės ir ŠIELO apvalkalo geometriniai duomenys. Atliekant skaičiavimus įvertinamas oksido sluoksnio susidarymas ant išorinio apvalkalo paviršiaus, t. y. ant paviršiaus, kurį apiplauna šilumnešis. Skaičiavimai pradedami esant šviežiam kurui ir darant prielaidą, kad iki 1000 MWd/tU išdegimo kuras eksploatuojamas stacionariu režimu, atitinkančiu reaktoriaus galią. TESPA-ROD programų

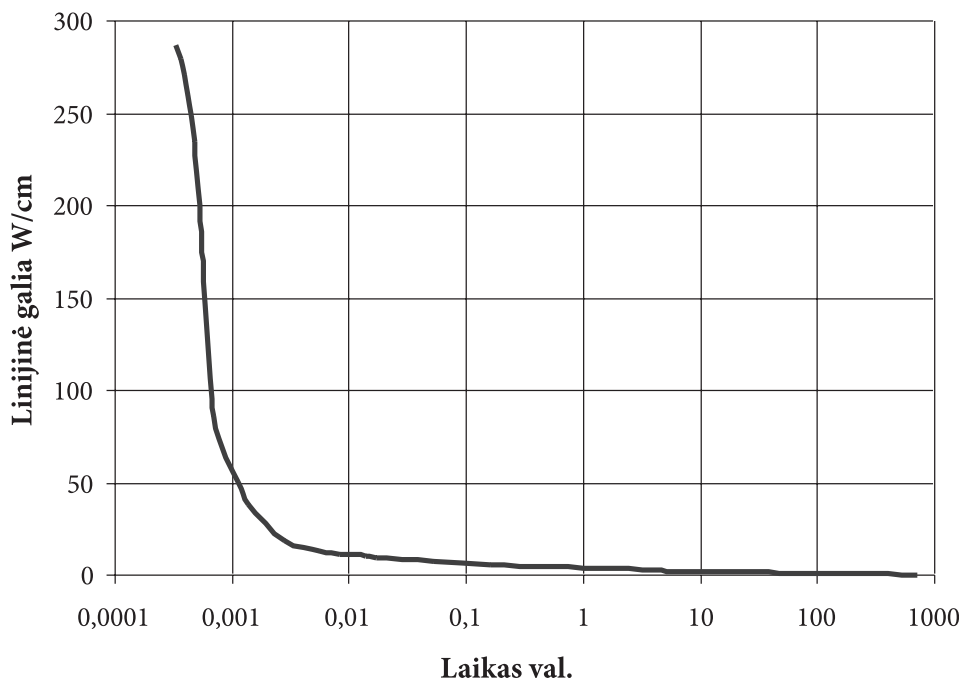
paketu taip pat buvo sukurtas ŠIELO modelis, tik jo galimybės neleidžia aprašyti ekranuojančių tablečių. Abiem atvejais modeliuojamas 2,6% įsodrinimo UO_2 kuras, kurio pradinis išdegimas yra 1000 MWd/tU, ŠIELO linijinė vidutinė galia 305,5 W/cm, dujų slėgis tarpelyje tarp tablečių ir apvalkalo avarijos pradžioje apie 2 MPa.

3.3. Avarijos scenarijus

Sukurtas modelis naudojamas ŠIELOuose vykstančių procesų analizei didelio trukio neprojektinės avarijos atveju. Nagrinėtas didžiausio skersmens (~1 m) vamzdžio reaktoriaus aušinimo sistemos – pagrindinių cirkuliacinių siurblių slėgio kolektoriaus – trūkis. Šios avarijos atveju reaktorių pradedamas stabdyti po 1,2 s pagal slėgio padidėjimo reaktoriaus aušinimo sistemą gaubiančiose patalpose signalą. Kaip papildomas gedimas priimamas visų reaktoriaus avarinio aušinimo sistemos siurblių gedimas, t. y. vanduo į aušinimo kontūrą iš išorinių šaltinių (išskyrus hidrobalionus) netiekiamas ir reaktorių aušinamas tik per reaktoriaus valdymo strypų aušinimo kontūrą.



5 pav. Kuro kanalo galios pasiskirstymas pagal aktyviosios zonos aukštį [5]

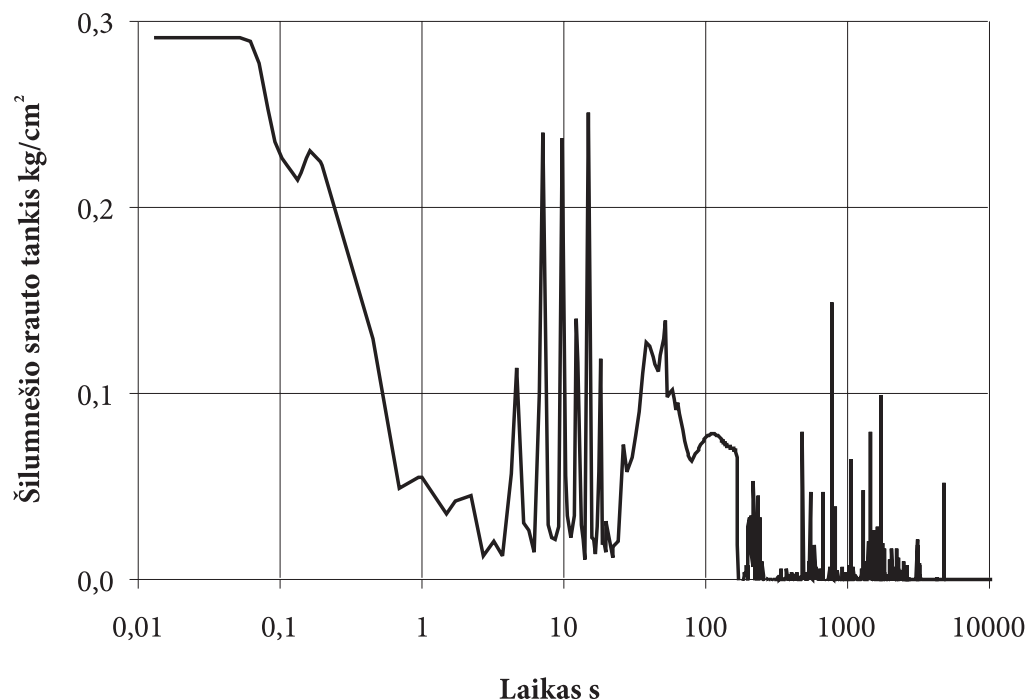


6 pav. Linijinės vidutinės galios mažėjimas vienam ŠIELui, apskaičiuotas RELAP5 programų paketu [6]

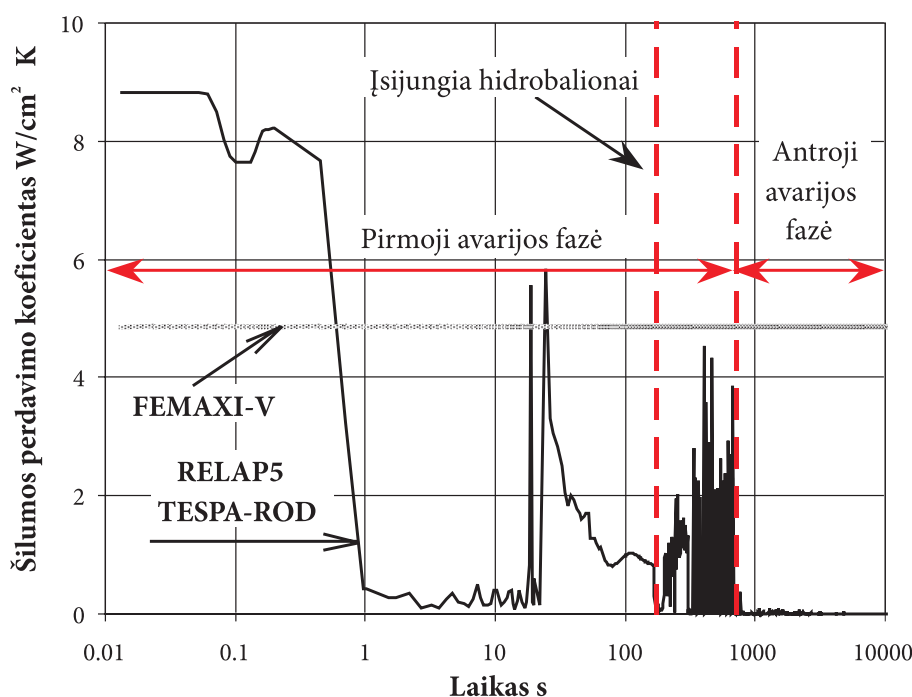
Kuro kanalo energijos išsiskyrimo ašinis profilis, priimtas pagal Ignalinos AE duomenis [5], pavaizduotas 5 pav. Linijinės vieno ŠIELo galios mažėjimas po avarinės apsaugos veikimo parodytas 6 pav. [6].

Šilumnešio būsenos kitimą kuro kanale nusakantys parametrai buvo apskaičiuoti RELAP5 programų paketu ir aprašyti kraštinėmis sąlygomis sudarytuose FEMAXI-V ir TESAP-ROD modeliuose. FEMAXI-V programų paketo modelyje kraštinėmis sąlygomis reikia aprašyti šilumnešio srauto tankio (7 pav.), šilumnešio slėgio, ŠIELo apvalkalo išorinio paviršiaus temperatūros, linijinės galios ŠIELe ir neutronų srauto kitimą. TESAP-ROD programų paketo modelyje kraštinės sąlygos yra šilumnešio slėgis, šilumnešio temperatūra, šilumos perdavimo koeficientas iš ŠIELo apvalkalo į šilumnešį (8 pav.) ir reaktyvumo kitimas reaktoriuje. Pagal reaktyvumo kitimą ir pradinę linijinę ŠIELo galią programa pati apskaičiuoja ŠIELo linijinės galios kitimą.

Normalios eksploatacijos metu šilumos perdavimo koeficientas nuo ŠIELo apvalkalo sienelės į šilumnešį sudaro $\sim 5\text{--}6 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{K}$ (8 pav.). Avarijos pradžioje keičiasi kuro aušinimo sąlygos ir šilumos perdavimo koeficientas sumažėja. Iki $\sim 700 \text{ s}$ nuo avarijos pradžios šilumos perdavimo koeficientas yra $\sim 2 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{K}$. Tokia koeficiento reikšmė atitinka šilumos mainus tarp metalo ir vandens. Vėliau koeficiento vertė sumažėja iki $10^{-4} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{K}$ eilės. Tokia koeficiento vertė atitinka šilumos mainus tarp metalo ir garo. Iš to seka, kad po $\sim 700 \text{ s}$ ŠIELas yra aušinamas tik garu. 8 pav. pateiktas šilumos perdavimo koeficientas buvo apskaičiuotas RELAP5 programų paketu ir priimtas kaip kraštinė sąlyga TESAP-ROD programų pakeitui. FEMAXI-V programų paketas šilumos perdavimo koeficientą apskaičiuoja pats pagal kitas nustatytas kraštines sąlygas – šilumnešio temperatūrą, ŠIELo apvalkalo temperatūrą, kt. Skaičiavimai parodė, kad FEMAXI-V apskaičiuotas šilumos perdavimo koeficientas visos avarijos eigoje yra $4,86 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{K}$.



7 pav. Šilumnešio srauto tankis, apskaičiuotas RELAP5 programų paketu



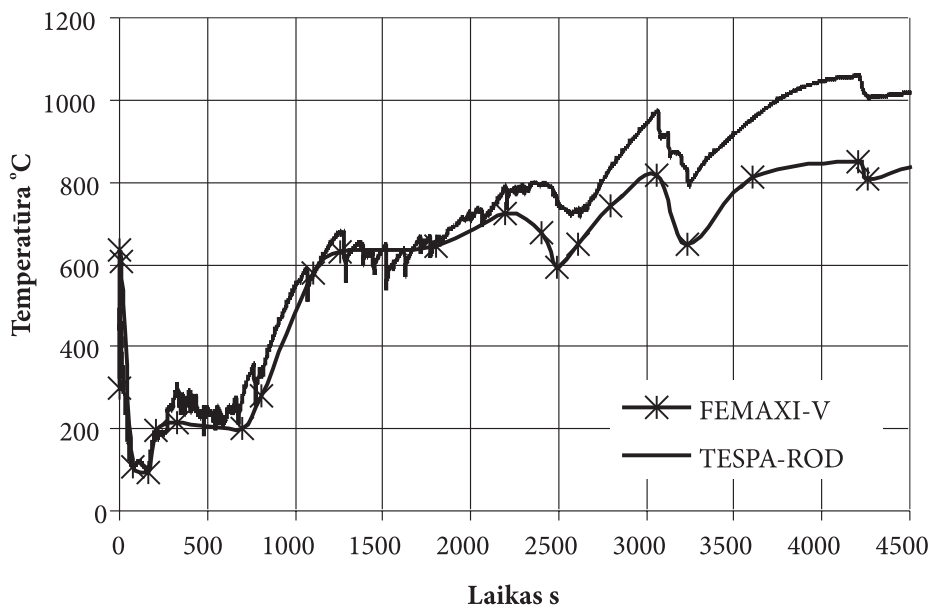
8 pav. Šilumos perdavimo nuo ŠIELO į šilumnešį koeficientas

3.4. Rezultatų aptarimas

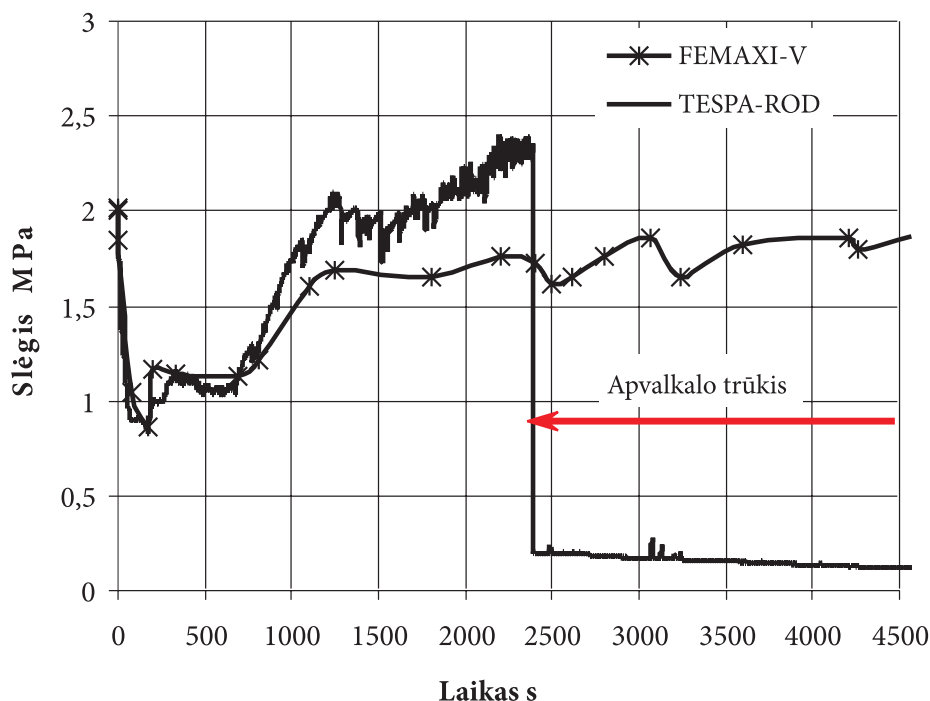
Visą avarijos eigą galima suskirstyti į dvi fazes: 1) kuro rinklės yra aušinamos vandens ar vandens-garo mišiniu; 2) kuro rinklės yra perkaitinto garo aplinkoje. Pirmojoje avarijos fazėje galima išskirti staigų kuro rinklių aušinimo pablogėjimą pirmosiomis 7 s, nes dėl trūkio šilumnešio srautas kanale staigiai sumažėja, tai matyti iš šilumos perdavimo koeficiento staigaus sumažėjimo (8 pav.). Vėliau aušinimo sąlygos pagerėja, nes šaltą vandenį pradeda tiekti reaktoriaus avarinio aušinimo sistemos hidrobalionai ($t = 7-170$ s). Antroji avarijos fazė prasideda, kai dėl šilumnešio praradimo per trūkį kuro rinklės visiškai nusausėja ($t > 700$ s). Šioje fazėje garo srautas, apiplaukantis kuro rin-

kles, sumažėja dėl to, kad slėgis reaktoriaus aušinimo sistemoje sumažėja iki atmosferinio ir slėgio gradientas aktyviojoje zonoje tampa lygus nuliui.

Gautus rezultatus taip pat reikėtų analizuoti kiekvienai avarijos fazei atskirai, kai rinklės yra aušinamos vandeniu ar vandens-garo mišiniu ir kai rinklės yra perkaitinto garo aplinkoje. 9 pav. parodyta, kaip kinta apvalkalo temperatūra, apskaičiuota abiem programų paketais – FEMAXI-V ir TESPА-ROD. Matyti, kad avarijos pradžioje ŠIELO apvalkalo temperatūra staigiai padidėja nuo ~ 300 iki 650°C , tačiau pradėjus veikti reaktoriaus aušinimo sistemos hidrobalionams ji sumažėja iki 100°C . Kai nutrūksta vandens tiekimas iš hidrobalionų apvalkalo, temperatūra pakyla iki 100°C



9 pav. ŠIELO apvalkalo temperatūra

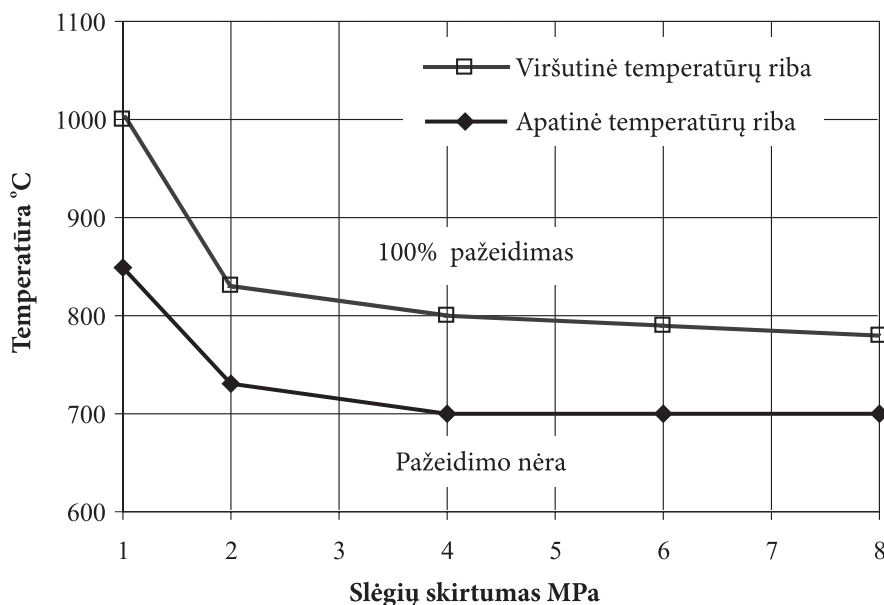


10 pav. Slėgis tarpelyje tarp ŠIELO apvalkalo ir kuro tabletės

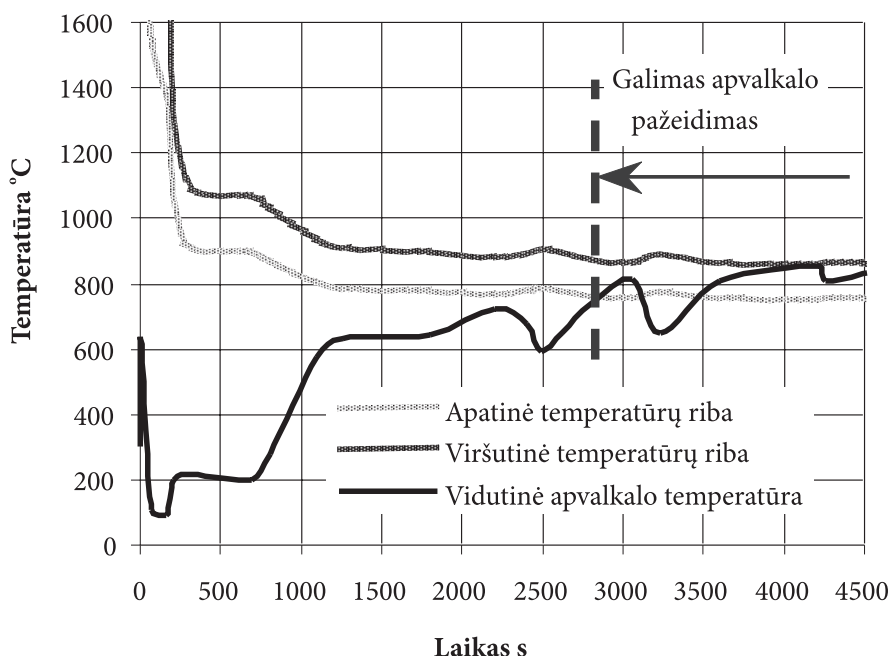
ir išlieka tokia iki $t = 700$ s. Šiame avarijos periode ŠIELas aušinamas išgaruojant šilumnešiu, kuris iki šio laiko buvo užpildęs kuro kanalus ir apsėmęs branduolinį kurą. Po 700 s vanduo išgaruoja ir ŠIELO apvalkalo temperatūra per 400 s padidėja iki 620°C . Vėliau apvalkalo temperatūros didėjimas tampa lėtesnis. Laiko momentu $t = 2000$ s apskaičiuota ŠIELO apvalkalo temperatūra pakyla iki 700°C . Iki šio avarijos momento apvalkalo temperatūra, apskaičiuota abiem programų paketais, gerai sutampa. Vėliau FEMAXI-V programų paketu apskaičiuota ŠIELO apvalkalo temperatūra yra mažesnė, nors bendra apvalkalo temperatūros kitimo tendencija, apskaičiuota abiem programų paketais, yra panaši. Maksimali temperatūra, apskaičiuota TESPA-ROD programų paketu, yra $\sim 1050^{\circ}\text{C}$, o FEMAXI-V – $\sim 850^{\circ}\text{C}$. Kaip minėta, abu programų paketai reikalauja skirtingo kraštinių sąlygų aprašymo. FEMAXI-V programų pakete aprašoma ŠIELO apvalkalo išorės temperatūra, o TESPA-ROD programų paketas šią temperatūrą apskaičiuoja turė-

damas šilumnešio temperatūrą ir šilumos perdavimo koeficientą. TESPA-ROD programų pakete šilumos perdavimo koeficientas iš apvalkalo į šilumnešį yra įvedamas, kaip kraštinės sąlygos (naudojami RELAP5 analizės rezultatai, žiūrėti 8 pav.), o FEMAXI-V programų paketas jį apskaičiuoja iš kitų duomenų (šilumnešio srautas, slėgis, temperatūra). FEMAXI-V programų paketu apskaičiuotas šilumos perdavimo koeficientas yra pastovus dydis. Tuo tarpu RELAP5 analizė parodė, kad šilumos perdavimo koeficiento reikšmė yra kintama ir šilumos mainų su perkaitintu garu atveju jo reikšmė labai sumažėja (8 pav.). Iš to seka, kad FEMAXI-V apskaičiuoja geresnį ŠIELO aušinimo režimą, nei TESPA-ROD, kai naudojamas šilumos perdavimo koeficientas apskaičiuotas RELAP5, todėl po $t = 2000$ s FEMAXI-V apskaičiuotos temperatūros yra žemesnės.

10 pav. parodytas slėgis tarpelyje tarp apvalkalo ir kuro tabletės, apskaičiuotas abiem programų paketais. Kaip matyti, pir-



11 pav. ŠIELO apvalkalo pažeidimo dėl išsipūtimo kriterijai [7]



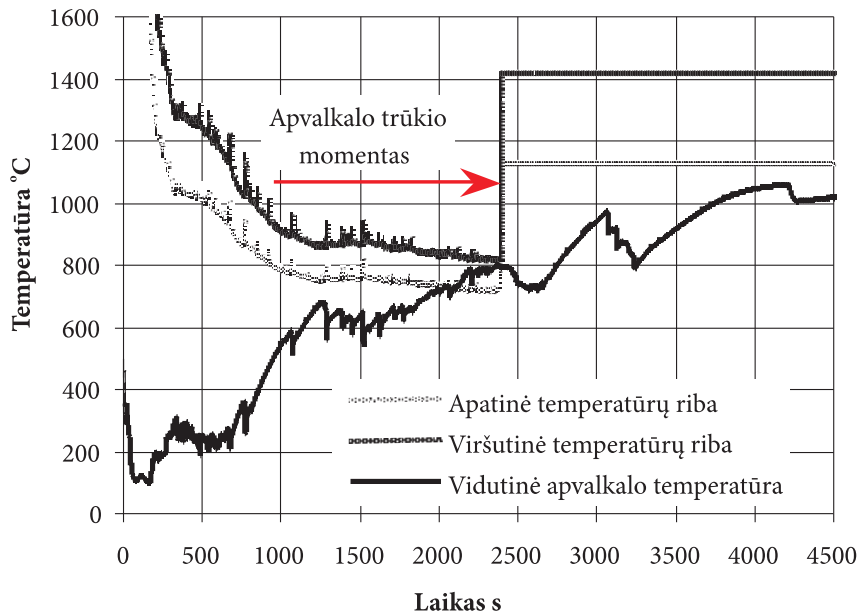
12 pav. ŠIELO apvalkalo pažeidimo galimybė ne-projektinės avarijos atveju, apskaičiuota FEMAXI-V programų paketu

moje avarijos fazėje iki $t = 700$ s, t. y. iki tol, kol aušinama garuojančiu šilumnešiu, skaičiavimų rezultatai gerai sutampa. Vėliau dujų slėgis po ŠIELO apvalkalu, apskaičiuotas TESP-ROD programų paketu, yra aukštesnis ir po 2400 s pasiekia 2,3 MPa. Šiuo metu įvyksta apvalkalo trūkis ir slėgis po apvalkalu staigiai sumažėja iki ~0,2 MPa, t. y. iki slėgio kuro kanale. FEMAXI-V programų paketu apskaičiuotas slėgis po ŠIELO apvalkalu pakyla iki 1,6 MPa ir iki skaičiavimų pabaigos pakyla iki 1,8 MPa. Taip yra dėl skirtingų apskaičiuotų temperatūrų reikšmių. Staiga slėgio kritimo nėra, tai reiškia, kad apvalkalas išlieka nepažeistas.

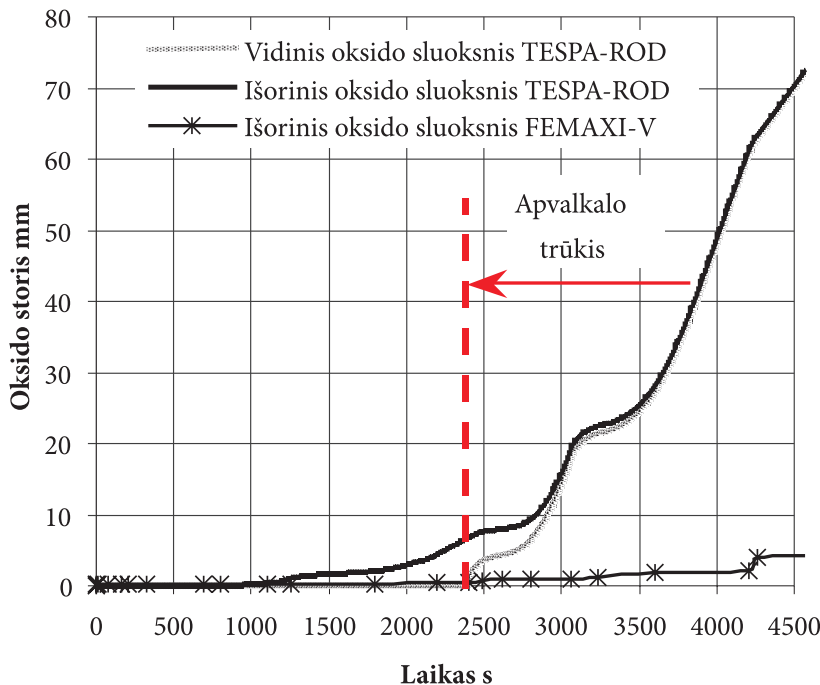
Siekiant įvertinti gautų rezultatų patikimumą, buvo nutarta palyginti, kaip koreliuoja TESP-ROD ir FEMAXI-V programų paketais gauti rezultatai su ŠIELO apvalkalo pažeidimo kriterijais, nustatytais Ignalinos AE naudojamam kurui [7]. Šiais programų paketais apskaičiuota apvalkalo temperatūra ir slėgis tarpelyje tarp ŠIELO apvalkalo ir kuro tabletės buvo panaudoti ŠIELO apvalkalo pažeidimo kriterijams apskaičiuoti. Vėliau šie kriterijai buvo

palyginti su apskaičiuota apvalkalo temperatūra. Kaip minėta, šios avarijos metu ŠIELO apvalkalo pažeidimas yra galimas tik dėl apvalkalo išsipūtimo. Ignalinos AE taikomi kriterijai yra pateikti 11 pav. Iš pateiktų duomenų seka, kad esant aukštesnei ŠIELO apvalkalo temperatūrai užtenka mažesnio slėgių skirtumo, kad ŠIELO apvalkalas būtų pažeistas. Paveiksle pavaizduota apatinė riba rodo, kad esant žemesnei temperatūrai, apvalkalas bus nepažeistas. Tarpas tarp apatinės ir viršutinės ribos rodo, kad apvalkalo pažeidimas yra galimas, tačiau gali ir neįvykti. Jeigu bus viršyta viršutinė riba, tai ŠIELO apvalkalo pažeidimas yra neišvengiamas.

12 pav. pavaizduotas FEMAXI-V rezultatų įvertinimas pagal Ignalinos AE kuro pažeidimo kriterijus. Kaip matyti iš gautų rezultatų, ŠIELO apvalkalo pažeidimas yra galimas laiko intervale 2800–3100 s, tačiau viršutinis kriterijus nėra viršijamas. Vėliau apvalkalo temperatūra sumažėja žemiau apatinės ribos, tačiau ir vėl apatinė riba yra viršijama praėjus 3500 s. Vėliau ŠIELO apvalkalo temperatūra pasiekia ir viršutinę apvalkalo pažeidimo ribą,



13 pav. ŠIeLo apvalkalo pažeidimo galimybė neprojektinės avarijos atveju, apskaičiuota TESPА-ROD programų paketu



14 pav. Oksido sluoksnio didėjimas ant ŠIeLo apvalkalo

tačiau jos neviršija. Tuo metu vidutinė ŠIeLo apvalkalo temperatūra yra apie 850°C. Šis rezultatas patvirtina 11 pav. pavaizduotus rezultatus, kad apvalkalo pažeidimas gali neįvykti.

TESPA-ROD programų paketas pats skaičiuoja, kada įvyks ŠIeLo apvalkalo trūkis (13 pav.). Pagal šio paketo skaičiavimus, apvalkalas trūksta ~2400 s nuo avarijos pradžios. Tuo metu vidutinė ŠIeLo apvalkalo temperatūra yra apie 800°C. Po trūkio ŠIeLo išorėje ir viduje slėgiai susivienodina. Kaip matyti 13 pav., apvalkalas bus pažeistas kaip tik tuo momentu, kai ŠIeLo apvalkalo temperatūra pasieks viršutinę kritinės temperatūros ribą (apie 2400 s po avarijos pradžios). Taigi TESPА-ROD programų paketu gautas trūkio laikas sutampa su apskaičiuotu trūkio laiku pagal apvalkalo pažeidimo kriterijus.

Atlikus rezultatų analizę matyti, kad skirtingais programų paketais gaunami rezultatai skiriasi – TESPА-ROD programų

paketas apskaičiuoja ŠIeLo apvalkalo pažeidimą praėjus 2400 s po avarijos pradžios, o FEMAXI-V rezultatai rodo, kad apvalkalas per visą analizuotą laiką nebus pažeistas. Taigi ŠIeLų apvalkalų pažeidimai galimi vėlesnėje avarijos fazėje, kai kuro kanaluose nelieta šilumnešio. Būtina atkreipti dėmesį į tai, kad abu programų paketai nerodo ŠIeLo apvalkalo pažeidimo avarijos pradžioje. Šios išvados yra svarbios avarijos pasekmių analizei, nes apvalkalų išsihermetinimas (pažeidimas) nesant šilumnešio kuro kanaluose reiškia, kad mažiau radioaktyviųjų medžiagų pateks į aplinką.

Šiuo metu sunku įvertinti tiksliai tokio ženklaus rezultatų skirtumo priežastis, nes jų gali būti labai daug, pavyzdžiui, skirtingos ŠIeLo apvalkalo mechaninės ir šiluminės savybės (TESPA-ROD įvertina apvalkale esantį niobį), skirtingas dujų išsiskyrimo iš kuro modeliavimas ir t. t. Taip pat viena tokio rezul-

tatų skirtumo priežasčių galėtų būti ŠIELO apvalkalo oksidacija, kuri pablogina ne tik šilumos šalinimą nuo kuro, bet ir ŠIELO apvalkalo mechanines savybes. Apskaičiuotas oksido sluoksnio storis, gautas abiem programų paketais, yra pavaizduotas 14 pav. Kaip matyti iš pateiktų rezultatų, TESPА-ROD programų pake-tu apskaičiuojamas didesnis oksido sluoksnio storis. Be to, po ŠIELO apvalkalo trūkio pradeda susidaryti ir oksido sluoksnis ant vidinio apvalkalo paviršiaus. Tai atsitinka dėl to, kad trūkus apvalkalui vandens garas patenka į tarpelį tarp kuro tabletės ir ŠIELO apvalkalo. FEMAXI-V programų paketu apskaičiuotas oksido sluoksnis sudaro tik ~1 μm ir didėja labai lėtai. Tačiau būtina atkreipti dėmesį į tai, kad pagal RELAP5 analizės rezul-tatus, praėjus 1500 s po avarijos kuro kanale nebėra garo, kuris galėtų efektyviai reaguoti su cirkoniu. Toks TESPА-ROD anali-zės rezultatas rodo, kad šiame programų pakete padaryta prie-laida, jog, nepaisant šilumos mainų sąlygų, apvalkalo išorėje yra vanduo arba vandens garas. Tai galioja ir FEMAXI-V programų paketai. Iš to seka, kad šie programų paketai negali būti taikomi tokioms situacijoms modeliuoti, kai kuro kanaluose nėra šilum-nešio, nes skaičiavimo rezultatai tokiu atveju yra nepatikimi. Tačiau šie programų paketai gali būti sėkmingai taikomi norma-lios eksploatacijos sąlygoms bei avariniams įvykiams, kai kuro kanaluose yra šilumnešis, modeliuoti.

4. IŠVADOS

1. Sudaryti Ignalinos AE ŠIELO modeliai programų paketams FEMAXI-V ir TESPА-ROD ir atlikta branduoliniame kure vykstančių procesų analizė didelio trūkio neprojektinės avarijos atveju. Tai yra pirmas bandymas sumodeliuoti RBMK reaktoriuose naudojamus ŠIELO programų paketais, skirtais korpusinių reaktorių kuro analizei.

2. TESPА-ROD programų paketu apskaičiuota, kad ŠIELO apvalkalo pažeidimas įvyksta ~2400 s po avarijos pradžios, kai kuro kanaluose nelieta šilumnešio, o FEMAXI-V rezultatai rodo, kad apvalkalas per visą analizuotą laiką nebus pažeistas. Abiem programų paketais parodyta, kad ŠIELO apvalkalo pažeidimas nagrinėtos avarijos pradžioje neįvyksta.

3. TESPА-ROD ir FEMAXI-V programų paketai negali būti taikomi tokioms situacijoms modeliuoti, kai kuro kanaluose nėra šilumnešio, nes skaičiavimo rezultatai tokiu atveju yra nepatikimi. Tačiau šie programų paketai gali būti sėkmingai taiko-mi normalios eksploatacijos sąlygoms bei avariniams įvykiams, kai kuro kanalai užpildyti šilumnešiu, modeliuoti.

4. Būtina toliau tirti šiuos programų paketus, taikant juos eksploataciniams pereinamiesiems procesams ir reaktyvumo pokyčio inicijuotų avarijų analizei.

Gauta 2007 07 11

Priimta 2007 09 10

Literatūra

1. Nakamura J. E-11 Fuel Behaviour under Normal Operation. 1998.
2. Suzuki M., Uetsuka H., Saitou H. Analysis of Mechanical Load on Cladding Induced by Fuel Swelling during Power Ramp in High Burn-up Rod by Fuel Performance Code FEMAXI-V. 2003.
3. Sonnenburg H. G., Hofer E., Kloos A. Development of methods for the analysis of the fuel rod behavior in the high burn-up regime // Final Report. GRS, 2002 November.
4. Almenas K., Kaliatka A., Užpuras E. Ignalina RBMK-1500. A Source Book (extended and updated version). Lithuanian Energy Institute, 1998.
5. Ignalina NPP ICS database (Ignalina NPP second reactor unit condition on 2006-01-27).
6. Interim Safety Justification for INPP DSS. Section 3. Accident Analysis. Version 3C. Vol. 3. Data Systems & Solutions Report No. XE405-TEC040-1, January 2003.
7. Ignalina NPP Safety Analysis Report. Vol. 3. Task Group 5. VATTENFALL, 1996.

Aušra Jusevičiūtė, Algirdas Kaliatka, Egidijus Urbonavičius

PROCESSES IN THE FUEL ELEMENTS OF NUCLEAR POWER PLANTS AND THEIR MODELING

Summary

Processes occurring during the reactor operation and accidents change the thermal, chemical and other properties in nuclear fuel elements. This paper describes the processes in the nuclear fuel elements and tools for simulation at these processes. Fuel elements used at the Ignalina NPP were simulated with the FEMAXI-V (Japan) and TESPА-ROD (Germany) codes. The developed models were employed to analyse the processes in fuel elements in case of the large LOCA BDBA. The models and the results of the analysis are presented in the paper.

Key words: fuel element, modelling, RBMK-1500

Аушра Юсевичюте, Альгирдас Калятка, Эгидиус Урбонавичюс

ПРОЦЕССЫ В ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ИХ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Резюме

Процессы, происходящие во время эксплуатации и в случае аварий, изменяют тепловые, химические и другие свойства тепло выделяющих элементов (ТВЭЛов). В статье описываются процессы в ТВЭЛх и средства для моделирования этих процессов. С помощью программных пакетов FEMAXI-V (Япония) и TESPА-ROD (Германия) были смоделированы ТВЭЛы, используемые в реакторах Игналинской АЭС. Разработанные модели применялись для анализа процессов в ТВЭЛх в случае запроектной аварии при большой утечке теплоносителя. Представлены разработанные модели и результаты анализа.

Ключевые слова: ТВЭЛ, моделирование, RBMK-1500