

Ocena vpliva vhodnih parametrov v analizi toplotnega prehodnega pojava pod tlakom v reaktorski posodi Nuklearne elektrarne Krško v primeru majhne izlivne nezgode

The Estimated Influence of the Input Parameters in the analysis of the PTS in the Core of the PWR Krško NPP in the Case of the SB LOCA

Ivica Bašić¹ - Peter Crnjac²

(¹Nuklearna elektrarna Krško, Krško; ²II. gimnazija Maribor, Maribor)

V prispevku smo se osredotočili na deterministično metodo izbire mejnih primerov ohladike reaktorske posode Nuklearne elektrarne Krško pri posredovanju sistema za zasilno hlajenje sredice med malo izlivno nezgodo. Za osnovni izračun smo izbrali malo izlivno nezgodo z zlomom velikosti ustreznega premera 50,8 mm v hladni veji in termohidravlični računalniški program RELAP5/MOD3.3. V nadaljnji študiji smo s spreminjanjem parametrov sistema za zasilno hlajenje sredice za zlom na istem mestu simulirali še tri scenarije male izlivne nezgode. Namen študije je bil oceniti, koliko so mejni izbrani vhodni parametri nevarni za toplotni prehodni pojav pod tlakom v reaktorski tlačni posodi.

© 2006 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: reaktorji jedrski, posode reaktorske, pojavi prehodni, nezgode izlivne male)

This paper focuses on the deterministic method of limiting cases of the Krško Nuclear Power Plant (NPP) reactor pressure-vessel cooling by mediating the emergency core-cooling system (ECCS) during a small-break loss-of-coolant accident (SB LOCA). The SB LOCA accident with the equivalent diameter break of 50.8 mm in the cold leg and the RELAP5/MOD3.3 computer code were selected for the basic calculation. In further study, by modifying the ECCS's parameters for the same break, three accidents of the SB LOCA were simulated. The purpose of our study was to estimate the potential risk of the extreme conservative input parameters for the pressurized thermal shock (PTS) in the reactor's pressure vessel.

© 2006 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: nuclear reactors, pressure vessels, pressurized thermal shock, SB LOCA accident)

0 UVOD

Po nezgodi v jedrski elektrarni na Otoku treh milj so strokovnjaki s področja varnostnih analiz spoznali pomembnost male izlivne nezgode in poskušali z matematičnimi modeli, računalniškimi simulacijami in preizkusi na pomanjšanih modelih primarnih sistemov jedrskih elektrarn pojasniti pojave med nezgodo. Analize male izlivne nezgode morajo med drugim tudi dokazati zadostno zmogljivost sistema za zasilno hlajenje sredice, ki mora učinkovito ohladiti sredico in po izlivni nezgodi vzdrževati reaktor v varnem stanju hladne ugasnitve. V to področje posega tudi predstavljena študija, v kateri smo z deterministično varnostno analizo proučevali vpliv vhodnih parametrov sistema za varnostno vbrizgavanje na nastanek toplotnega prehodnega

pojava pod tlakom v reaktorski posodi lahkovodnega reaktorja pri mali izlivni nezgodi.

1 MALA IZLIVNA NEZGODA V TLAČNOVODNI JEDRSKI ELEKTRARNI

Med mogočimi dogodki, ki lahko povzročijo poškodbo sredice, je tudi nezgoda z izgubo primarnega hladiva ali izlivna nezgoda. Izlivna nezgoda je definirana tako, da je puščanje tako veliko, da normalno polnjenje ne zadošča za vzdrževanje vsebine hladiva v primarnem sistemu. Za omilitev posledic izlivne nezgode se uporabljajo sistemi za zasilno hlajenje sredice. Projektirani so tako, da obvladajo celoten spekter izlivnih nezgod, od najmanjše (to je nezgoda, ki presega puščanje) do največje (zlom glavne obtočne cevi hladilnega

sistema reaktorja). Več podsistemov je potrebnih za obvladovanje različnih vrst izlivnih nezdod in posameznih faz teh nezdod: visokotlačno varnostno vbrizgavanje, nizkotlačno varnostno vbrizgavanje in zbiralnik varnostnega vbrizgavanja. Pomen sistema za zasilno hlajenje sredice in njegovih podsistemov za območja nezdodnih scenarijev je podrobno obravnavan v literaturi ([1] do [3]).

Glede na velikost zloma in količino iztečenega hladiva, hitrost padanja primarnega tlaka in sproženje posameznih komponent sistema za zasilno hlajenje sredice delimo izlivne nezdode v tlačnovodni jedrski elektrarni na velike in male [4]. Po razvrstitvi Ameriškega združenja jedrskih strokovnjakov ANS (American Nuclear Society) so projektna stanja elektrarne razdeljena na štiri skupine v skladu s pričakovano pogostostjo dogodkov in njihovimi mogočimi radiološkimi posledicami za prebivalstvo [5]. Po tem standardu spada mala izlivna nezdoda v tretjo kategorijo mogočih nezdod z verjetnostjo nastopa 10^{-4} - 10^{-2} /reaktor-leto.

Scenariji male izlivne nezdode se od elektrarne do elektrarne lahko zelo razlikujejo glede na tip reaktorske posode ali uparjalnik in njune termohidravlične značilnosti. Pri mnogih tlačnovodnih elektrarnah navajajo pretočni prerez zloma $0,04645 \text{ m}^2$ (72 palcev^2), kar ustreza premeru cevnega priključka 240 mm ($9,5 \text{ palca}$) kot zgornji meji za malo izlivno nezdodo. V to področje spadajo cevni priključki na tlačno mejo primarnega sistema, kakor so razbremenilni ventili na tlačniku, polnilna in praznilna linija, drenažne cevi ter različni instrumentacijski priključki. Skoraj v vseh hipotetičnih primerih se predpostavi zlom v hladni veji med reaktorsko posodo in reaktorsko črpalko, ker se to mesto zloma šteje kot najneugodnejše za omilitev posledic izlivne nezdode.

Dogodki med malo izlivno nezdodo običajno potekajo dovolj počasi, da lahko operaterji sledijo posameznim fazam [6] ter z dovolj zgodnjim in učinkovitim ukrepanjem preprečijo oz. zmanjšajo njene posledice. Posledice posameznih nezdodnih scenarijev pa so odvisne predvsem od projektnih osnov, razpoložljivosti opreme za njeno zmanjševanje in seveda od velikosti prereza izlivnega mesta. Kriteriji za oceno sprejemljivosti sistema za blažitev posledic male izlivne nezdode so za NEK (Nuklearna elektrarna Krško) vzeti po merilih Ameriškega upravnega organa za jedrsko varnost NRC (Nuclear Regulatory Commission), ki so zbrani v zakonu 10 CFR 50.46 [7].

2 TOPLOTNI PREHODNI POJAV POD TLAKOM

Sredica jedrskega reaktorja je močan vir nevtronov ter beta in gama sevanja, ki so mu izpostavljene komponente reaktorske sredice in reaktorska tlačna posoda. Najbolj ogroženi del tlačne posode je jekleni valjasti plašč posode okrog sredice, ki se mu po dolgotrajnem obsevanju poveča natezna trdnost, žal pa tudi njegova krhkost. Zvišanje primerjalne temperature prehoda iz krhkega v žilavi zlom zaradi nevtronske izpostavitve je znatno in lahko vpliva tudi na dovoljena temperaturno-tlačna stanja reaktorske posode, ki jih moramo upoštevati ob prehodnih pojavih [8].

V gradivu reaktorske tlačne posode so lahko neodkriti razpoke, ki so nastale med predelavo jekla ali izdelavo posode. Mogoča je tudi nezdoda, pri kateri bi sistem za zasilno hlajenje sredice vbrizgal hladno vodo pod visokim tlakom v normalno ogreto tlačno posodo. Dotok hladne vode sprva zniža temperaturo in tlak v primarnem sistemu, nato pa se tlak spet zviša, ker dotok zasilnega vbrizgavanja preseže prostorninsko krčenje hladila zaradi ohlajanja. Če jeklo tlačne posode ne bi bilo dovolj žilavo, bi lahko nastal varnostni problem, ki ga imenujemo toplotni prehodni pojav pod tlakom.

Za presojo nevarnosti toplotnega prehodnega pojava pod tlakom so torej odločilni prehodni pojavi in nezdode, ki povzročijo hitro ohlajanje primarnega sistema in reaktorske tlačne posode. Študija ameriškega upravnega organa za jedrsko varnost [9] je malo izlivno nezdodo označila kot glavni vzrok tveganja za pojav toplotnega prehodnega pojava pod tlakom, ker pride do zmanjšanja pretoka v primarnem sistemu pri razmeroma visokem tlaku. Ko pretok miruje, postane povratni kanal povsem odrezan od virov toplote (zaostala toplota, sekundarna stran uparjalnika). Zato se povratni kanal, ko vbrizgavamo kapljevino z visokotlačnim varnostnim sistemom, hladi veliko hitreje kakor bi se ob nominalnem pretoku.

Pri malih izlivnih nezdodah z razmeroma velikim zlomom (do prereza razbremenilnega ventila tlačnika) pogosto pride do mirovanja toka, vendar pa se tlak zniža razmeroma hitro, zato te nezdode niso zanimive z vidika toplotnega prehodnega pojava pod tlakom. Nasprotno pa lahko male izlivne nezdode pri manjših zlomih resno ogrozijo celovitost reaktorske posode, ker je tlačna razbremenitev počasna in so v steni posode napetosti zaradi tlaka še povečane s toplotnimi napetostmi ([10] in [11]). S

tem so podani pogoji, ko je toplotni prehodni pojav pod tlakom mogoč: tlak je visok, reaktorska posoda pa se hitro ohlaja.

3 PROGRAMSKO ORODJE RELAP5/MOD3.3

Termohidravlične varnostne analize se praviloma izvajajo z računalniškimi programi. Postopki v jedrski elektrarni so tako zahtevni in zapleteni, da lahko z analitičnimi metodami samo grobo ocenimo obnašanje med prehodnimi pojavi. Osnova vsakega dinamičnega simuliranja obnašanja sistema, v katerem se pretaka voda in prenaša toplota, je matematični model toka tekočine. V predstavljeni študiji so bile raziskave in analize termohidrodinamičnih postopkov med malo izlivno nezgodo opravljene z računalniškim programom RELAP5/MOD3.3, ki je bil razvit za čimbolj resnične simulacije prehodnih pojavov v lahkovodnih jedrskih elektrarnah. Program vsebuje modele, ki so po dosedanjih dognanjih najboljši približek dogajanja v dvofaznem toku in je podrobneje obravnavan v [12] in [13].

Termohidrodinamični model v programu RELAP5/MOD3.3 je nehomogen in neravnovesen ter rešuje 6 parcialnih diferencialnih enačb za ohranitev mase, gibalne količine in specifične notranje energije za parno in kapljevinsko fazo. V programu so dodane še ohranitvene enačbe za morebitne neukapljive pline in trdne delce, raztopljene v hladivu, kot sklepne enačbe pa še povezave za prenos toplote med fazama, med hladivom in toplotnimi telesi in za medfazno trenje ter trenje ob steni. Skupaj z robnimi in začetnimi pogoji pomenijo te enačbe dosledno definiran matematični problem. Program vsebuje tudi enačbe točkovne reaktorske kinetike. Modeliranje nadzornih in krmilnih sistemov elektrarne, turbine, kondenzatorja ter sistemov napajalne vode uparjalnikov omogočajo vključene nadzorne spremenljivke in prožitvena logika.

4 OBLIKOVANJE BAZE PODATKOV IN VOZLIŠČENJE SISTEMA

Za preračun izlivnih nezgod in drugih prehodnih pojavov zahteva uporaba programa RELAP5 razčlenitev obravnavanega fizikalnega sistema na diskretna vozlišča, ki so med seboj povezana s spoji. Za vsako vozlišče je treba podati celotne geometrijske podatke ter poskrbeti za

pravilna začetna stanja [14]. Z izbranimi toplotnimi telesi popišemo vire, ponore ter menjalnike toplote. Načeloma velja, da vsakemu vozlišču pripada eno toplotno telo in obratno, čeprav dostikrat zaradi oblike sistema to ni mogoče, še večkrat pa moramo zaradi omejenih računalniških zmogljivosti toplotna telesa modelirati bolj grobo kakor vozlišča [15].

Termohidravlični postopek je v vsakem vozlišču in spoju popisan z vsemi šestimi ohranitvenimi enačbami, temperaturno polje v toplotnem telesu pa določa enačba prevajanja toplote ob poljubnih robnih pogojih. Masna in energijska ohranitvena enačba se rešujeta po metodi končnih razlik za vsako vozlišče modeliranega sistema. Ohranitvena enačba za gibalno količino se prav tako rešuje po metodi končnih razlik, vendar med dvema spojema.

Za prehodna stanja kvalificiramo vozliščenje tako, da se merjeni podatki in robni pogoji čim bolj ujemajo z izračunanimi [16]. Vozliščenje je primerno, če lahko z njim simuliramo vse pomembne pojave in zajamemo značilnosti zgradbe elektrarne. Če vozliščenje ni primerno, ga je treba iterativno popravljati toliko časa, da izpolni merila sprejemljivosti, to je dobro ujemanje med izmerjenimi in izračunanimi rezultati [15].

5 PRERAČUNI MALE IZLIVNE NEZGODE

5.1 Vhodni model NEK

Analize male izlivne nezgode smo opravili z vhodnim modelom NEK, ki je prirejen za 2000 MW toplotne moči in nova zamenjana uparjalnika. Vhodni model je dokumentiran, preverjen, usposobljen za ustaljeno stanje in simulacijo vseh vrst nezgod ([14] in [16]). Osnovni geometrijski model je tudi neodvisno pregledan ([17] in [18]). Sistem je popisan z natančno geometrijsko obliko tokovnih poti v vseh glavnih komponentah, ki jih simuliramo: primarni hladilni sistem (modelirani sta obe primarni zanki: sredica, vroči, vmesni in hladni veji, sifon, reaktorski črpalki, tlačnik in uparjalnika) s sistemom za varnostno vbrizgavanje, na sekundarni strani pa so modelirane vse poti od uparjalnika prek glavnih parovodov do zbiralnika pare.

V model so vključeni vsi varovalni in varnostni sistemi reaktorja, ki lahko vplivajo na potek prehodnega pojava. Modelirani so tudi glavni krmilni sistemi, npr. krmiljenje moči reaktorja s krmilnimi palicami, krmiljenje ravni in tlaka v tlačniku, krmiljenje

Preglednica 1. Značilnosti modela NEK za RELAP5/MOD3.3

PARAMETER	ŠTEVILO
1. Število spojev	
- primarni krog	320*
- sekundarni krog	149
- skupno	469**
2. Število vozlišč	
- primarni krog	284
- sekundarni krog	213
- skupno	497
3. Število toplotnih teles	
- primarni krog	250
- sekundarni krog	126
- skupno	376**
4. Skupno število vozlišč v toplotnih telesih	2101
5. Število aktivnih toplotnih teles (reaktor)	12
6. Površine prenosa toplote (m²)	
- sredica	3103,9
- U-cevi uparjalnika	7343,0
7. Število nadzornih spremenljivk	575
8. Število prožitvev	
- spremenljivk	197
- logičnih	204
- skupno	401
11. Skupna prostornina primarnega kroga (m³)	195,3

* skupaj z modelom sistema za zasilno hlajenje sredice

** skupaj z modelom zadrževalnega hrama

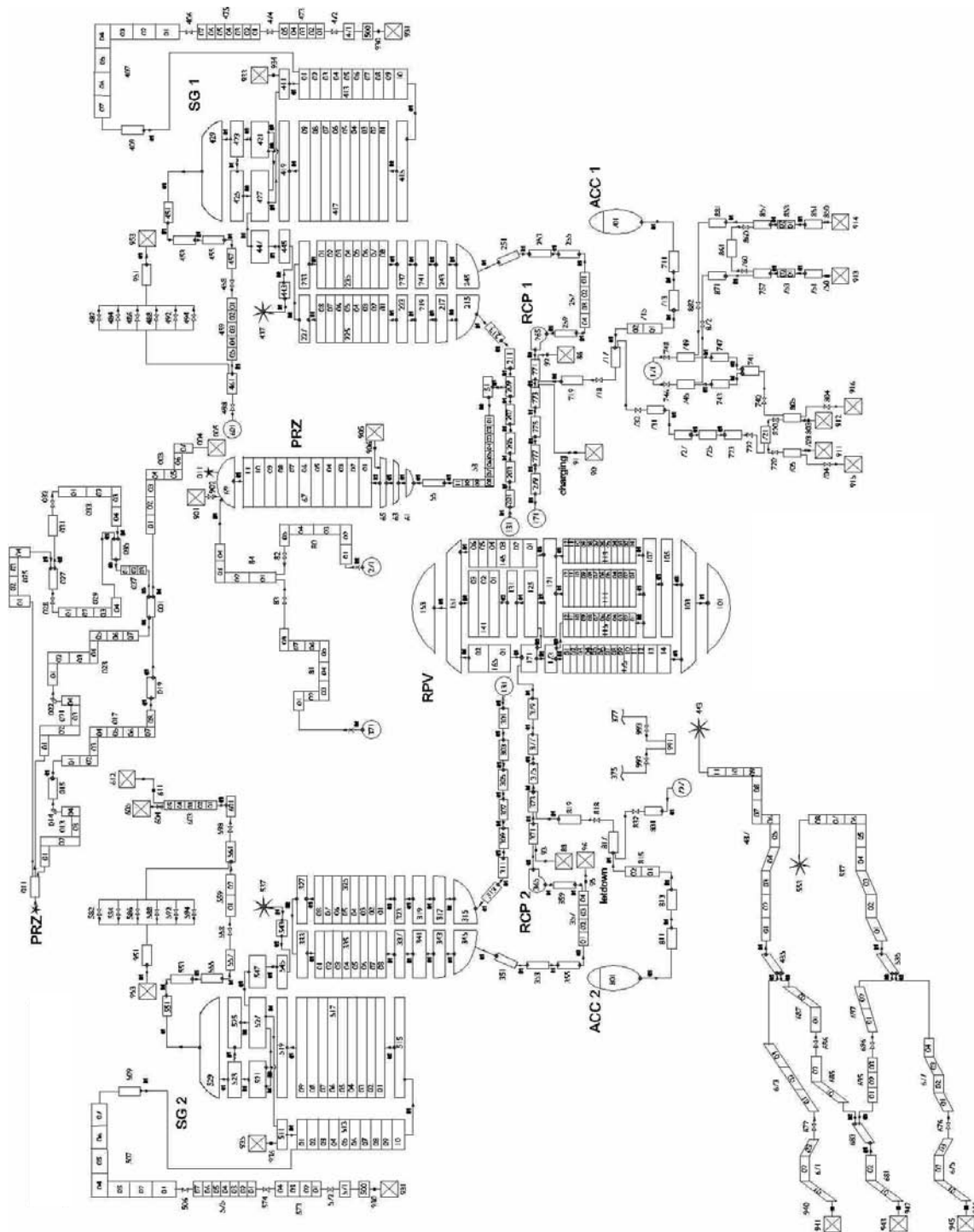
napajanja uparjalnikov, krmiljenje dušilnega obkroga pare itn. Večina pomožnih sistemov je zajeta le prek robnih pogojev. Standardni vhodni model NEK za program RELAP5/MOD3.3 za simulacijo male izlivne nezgode je sestavljen iz 497 vozlišč, povezanih s 469 spoji. Povečini so vozlišča dolga med 0,5 m in 2,5 m, z daljšimi so modelirani predvsem dolgi odseki, kot je npr. cev sistema za varnostno vbrizgavanje, prelivni vod, cevovod za prhe tlačnika, glavni parovod in cevovod sistemov glavne ter pomožne napajalne vode uparjalnikov. Strukture elektrarne so v stiku s primarnim in sekundarnim hladivom, zadrževalnim hramom in okolico preko 376 toplotnih teles. Merilna oprema, krmilni in varnostni sistemi so predstavljeni s 401 logičnim pogojem, tako imenovanimi prožitvami in 575 nadzornimi spremenljivkami. Osnovne značilnosti modela NEK za RELAP5/MOD3.3 so prikazane v preglednici 1.

Nodalizacijska shema NEK za preračun male izlivne nezgode s programom RELAP5/MOD3.3 je prikazana na sliki 1.

5.2 Izbira scenarija

V računalniškem modelu NEK je bila mala izlivna nezgoda simulirana z zlomom velikosti 50,8 mm (2 palca) ustreznega premera v hladni veji na mestu med reaktorsko posodo in reaktorsko črpalko. Poleg velikosti zloma je treba pri scenariju določiti tudi število delujočih varnostnih sistemov in posege operaterjev. Pri naših izračunih smo povzeli vse potrebne avtomatske posege krmilja in varnostnih sistemov po obratovalnih navodilih za nezgodne dogodke NEK [20].

V predpostavljenem scenariju sta bili razpoložljivi obe progi sistema za varnostno



Sl 1. Vozliščenje NEK za preračun male izlivne nezgode z RELAP5/MOD3.3

vbrizgavanje in ohlajanje sredice; računali smo torej z nekonservativno predpostavko, da delujeta obe visokotlačni črpalčki, oba akumulatorja in obe črpalčki za nizkotlačno varnostno vbrizgavanje. Kot ponor

toplote smo imeli na sekundarni strani na voljo sistem pomožne napajalne vode, ki je modeliran za vzdrževanje ravni uparjalnikov med 60 % in 70 %. Zaostalo toploto smo računali po standardu ANS-

79 [19], ki dejansko računa zaostalo toploto. V obravnavanem primeru je potek scenarija počasen, zato je poseg operaterjev en sam, in sicer ustavitev obeh reaktorskih črpalk, ko pade tlak pod 9,9 MPa, kakor to zahtevajo neizpolnena obratovalna navodila.

Začetne razmere, predpostavke in glavne nastavitvene vrednosti varovalnega sistema ter krmilnih in varnostnih sistemov smo v analizi predvideli kakor se uporabljajo pri projektnih izračunih [21] in jih prikazujeta preglednica 2 in preglednica 3. Začetne vrednosti in nastavitve v RELAP5/MOD3.3 ustrezajo stanju elektrarne po posodobitvi uparjalnikov leta 2000 in jih določajo tehnične specifikacije NEK. Za vrednost pretoka hladiva skozi primarni sistem je vzeta majhna konservativna vrednost. Velja namreč ocena, da manjše razmerje pretoka skozi primarni sistem in pretoka visokotlačnega varnostnega vbrizgavanja v povratni kanal povzroči hitrejše ohlajanje gradiva reaktorske posode in nižjo temperaturo v povratnem kanalu. Moč reaktorja je 100 odstotna, prav tako tudi tlaki in nivoji ustrezajo vrednostim pri normalnem obratovanju pri 100 odstotni moči.

5.3 Izbira robnih pogojev analize

Po zamenjavi uparjalnikov in hkratnem povečanju moči je NEK začela postopoma delovati s polno močjo v okviru niza temperaturnih in tlačnih pogojev (delovno okno), medtem ko je smela prej elektrarna delovati s polno močjo le v eni točki tlak - temperatura. Varnostne analize za posodobljeno elektrarno morajo potrditi, da med prehodnimi pojavi in nezgodami ostanejo vsi pogoji znotraj meja in meril sprejemljivosti za delovno okno. V sedaj veljavnem, posodobljenem varnostnem poročilu NEK USAR (Updated Safety Analysis Report) [22], so zbrane informacije o zgradbi, predstavljene so projektne osnove in delovne omejitve ter analize struktur, sistemov in komponent ter analize obnašanja elektrarne med predpostavljenimi prehodnimi pojavi ali nezgodami.

V predstavljeni študiji smo se osredotočili na nekaj domnevnih kritičnih primerov med malo izlivno nezgodo, ki smo jih izbrali na podlagi delovnega okna in mejnih primerov, opisanih v varnostnem poročilu.

Preglednica 2. Začetni pogoji modela za preračun male izlivne nezgode [16]

PARAMETER	PODATKI PO MODELU BE*	RELAP5/MOD3.3
1. Tlak (MPa)		
tlačnik	15,51	15,51
uparjalnik	5,6	5,7
zbiralnika	5,27	5,27
2. Temperatura (K)		
hladna veja	560,3	560,3
vroča veja	597,8	597,7
napajalna voda uparjalnikov	494,3	494,3
zbiralec vode za menjavo goriva	310,0	310,0
3. Masni pretok (kg/s)		
sredica	8499,5	8428,5
hladna veja	4450,0	4408,8
glavni parovod	512,0	510,6
zgornji obvod v povratnem kanalu	44,5	43,3
spodnji obvod	356,0	345,9
vodilo krmilnega svežnja	170,0	171,6
4. Raven kapljevine (%)		
tlačnik	62,3	62,3
uparjalnik (ozko mer. obm.)	60,0	60,0
5. Moč (MW)		
sredica	1994,0	1994,0
uparjalnik	941,0	938,8

* ravnovesni model elektrarne

Preglednica 3. Začetne predpostavke za preračun male izlivne nezgode

ZAČETNE PREDPOSTAVKE	
čas nastanka zloma	0 s
mesto zloma	hladna veja med črpalko in reaktorsko posodo
Razpoložljivost varnostnih sistemov	
visokotlačno varnostno vbrizgavanje	2/2
zbiralnika	2/2
nizkotlačno varnostno vbrizgavanje	2/2
pomožna napajalna voda uparjalnikov	2/2 (0/0)
glavni osamitveni ventil parovoda	avtomatsko
razbremenilni ventil tlačnika	avtomatsko
razbremenilni ventil uparjalnika	avtomatsko
ustavitev črpalke	ročno, 9,9 MPa
sproščanje zaostale toplote	ANS-79 U ²³⁵ standard
porazdelitev moči	kosinusna, 17. krog, EOL
reaktorski varovalni sistem	dejanske zakasnitve
začepljenost	0 %

Varnostno poročilo in tehnične specifikacije NEK predpisujejo za vsa obratovalna stanja jedrske elektrarne dovoljena območja parametrov varnostnih sistemov, ki zagotavljajo njihovo varno posredovanje v primeru okvar ali nezgodnih stanj. Tako npr. tehnične specifikacije predpisujejo, da mora biti temperatura vode v zbiralniku vode za zamenjavo goriva, ki jo med izlivno nezgodo črpa visokotlačni sistem in vbrizgava v hladno vejo primarnega sistema, med 28 °C in 37 °C.

Pri danih začetnih predpostavkah in imenskih začetnih pogojih modela, ki jih določajo tehnične specifikacije NEK, smo najprej za izbrani scenarij z velikostjo ustreznega premera zloma 50,8 mm napravili osnovni preračun SBLO1. V nadaljnji študiji smo s spreminjanjem parametrov sistema za zasilno hlajenje sredice za zlom na istem mestu simulirali še dva scenarija male izlivne nezgode. Namen študije je bil oceniti najbolj kritične pogoje, ki se lahko pojavijo v povratnem kanalu reaktorske tlačne posode med varnostnim vbrizgavanjem pri simuliranih scenarijih. V drugem scenariju SBLO2 smo za preračune z RELAP5/MOD3.3 v tlačnih zbiralnikih sistema za zasilno hlajenje sredice izbrali najvišji dovoljeni tlak in najnižjo dovoljeno temperaturo. Sistem za visokotlačno varnostno vbrizgavanje je črpal iz zbiralnika vode za menjavo goriva vodo najnižje dovoljene temperature in jo z največjim dovoljenim pretokom vbrizgaval v hladno vejo. Kritični iztok skozi zlom smo popisali z največjim enofaznim oz. dvofaznim iztočnim koeficientom.

Velikost kritičnega iztoka je odvisna od koeficienta iztoka. Ker se tok spremeni iz enofaznega v dvofaznega, moramo upoštevati koeficient iztoka za obe fazi. Večji enofazni koeficient iztoka povzroči, da se skozi zlom izgublja več kapljevine, zato se sredica prej odkrije. Večji dvofazni koeficient iztoka pa ima dvojni vpliv: poleg večjega izgubljanja kapljevine se skozi zlom izgublja tudi več pare. Zaradi hitrejšega zniževanja primarnega tlaka sistem za zasilno hlajenje sredice dovaja več vode, zato se sredica bolj hladi.

Predvidevali smo, da utegne biti z vidika toplotnega prehodnega pojava pod tlakom zanimiv tudi scenarij SBLO3, v katerem smo največje dovoljene vrednosti vhodnih parametrov nadomestili z najmanjšimi in obratno. Rezultati simulacije SBLO2 in SBLO3 naj bi predvsem odgovorili na vprašanje, koliko so mejni izbrani vhodni parametri nevarni za nastanek toplotnega prehodnega pojava pod tlakom v reaktorski tlačni posodi. Robni pogoji za SBLO1, SBLO2 in SBLO3 so prikazani v preglednici 4, preostali začetni pogoji modela in predpostavke pa se v scenarijih niso spreminjali. Na voljo sta bili dve črpalki za visokotlačno varnostno vbrizgavanje in dva zbiralnika, vendar se je v vseh scenarijih sprožila le visokotlačna črpalka v veji št. 1, kjer je bil simuliran zlom. Kot ponor toplote je bila na voljo pomožna napajalna voda in dušenje pare v obeh uparjalnikih.

Preglednica 4. Robni pogoji za analizo SBLO1, SBLO2 in SBLO3

Robni pogoji		Imenski	Verjetnejši pojav topl. prehod. pojava	Negotovi pojav topl. prehod. pojava
Spremenljivka		SBLO1	SBLO2	SBLO3
tlak v zbiralniku		5,10 MPa	5,28 MPa	4,93 MPa
temperatura vode v zbiralniku		312 K	302 K	322 K
temperatura vode v zbir. za zamenjavo goriva		305 K	301 K	310 K
pretok sist. za visokotlač. vbrizg. (primerjalno)		1,0	1,05	0,95
iztočni koeficient	podhlajeni	0,89	1,11	0,66
	dvofazni	1,10	1,26	0,93

5.4 Analiza rezultatov

V nadaljevanju povzemamo analitično preverjanje strukturne celovitosti reaktorske tlačne posode. Zaporedje dogodkov za izbrane scenarije je opisano v preglednici 5.

Pred začetkom prehodnega pojava je deloval reaktor s polno močjo. Ob času 0 s je bil simuliran v hladni veji št. 1 hipotetični zlom. Za boljši vpogled v simulirane prehodne pojave SBLO1, SBLO2 in SBLO3 so na slikah 2 do 5 predstavljeni nekateri pomembnejši sistemski parametri preračuna, čeprav RELAP5 omogoča opazovanje množice parametrov. Na sliki 2 je prikazan časovni potek tlaka v povratnem kanalu reaktorske tlačne posode za SBLO1, SBLO2 in SBLO3.

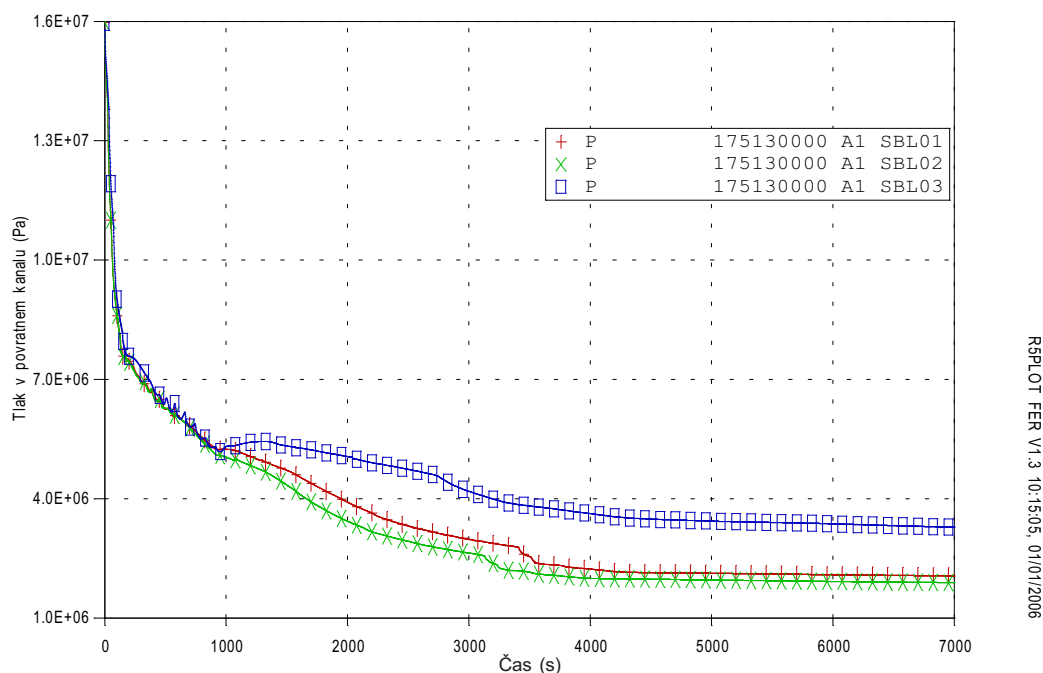
Začetno znižanje tlaka v primarnem sistemu z obratovalne vrednosti je zelo strmo. Pri vrednosti 12,9 MPa pride do hitre ustavitve reaktorja na nizek

tlak v tlačniku. Hitra ustavitev reaktorja povzroči ustavitev turbine z zaprtjem njenih zapornih ventilov. Model NEK je zasnovan tako, da se zaradi ustavitve turbine zapre tudi dotok glavne napajalne vode. Ko se tlak zniža na 12,1 MPa, se sproži signal za varnostno vbrizgavanje. Signal za varnostno vbrizgavanje sproži varnostne sisteme. Najprej se sproži visokotlačno varnostno vbrizgavanje, ki ima vgrajeno 12 s zakasnitev in začne dovajati v primarni sistem hladno borirano vodo iz zbiralnika vode za zamenjavo goriva. Vse črpalke sistema za zasilno hlajenje sredice so povezane na sesalni strani z zbiralnikom vode za zamenjavo goriva kot začetni vir vode. Po njegovi izpraznitvi se z ročnim vodenjem zagotovi dotok vode iz zbiralnika zadrževalnega hrama.

Naslednja bi se sprožila pomožna napajalna voda, ki pa se sproži še na signal osamitve glavne napajalne vode. Ker se prej sproži signal za osamitev

Preglednica 5. Zaporedje dogodkov za osnovni preračun SBLO1, SBLO2 in SBLO3

Dogodek	Scenarij	SBLO1	SBLO2	SBLO3
odprtje zloma v hladni veji		0 s	0 s	0 s
ustavitev reaktorja/turbine		23 s	23 s	33 s
osamitev glavne napajalne vode		24 s	24 s	34 s
sprožitev signala za varnostno vbrizgavanje		35 s	35 s	47 s
tlačnik prazen		38 s	38 s	50 s
ustavitev reaktorske črpalke		127 s	127 s	145 s
izenačitev primarnega in sekundarnega tlaka		1100 s	980 s	1400 s
vbrizgavanje zbiralnikov		1180 s	1090 s	2090 s
nastanek/umaknitev parnega mehurja v glavi reaktorske posode		193 s / 3900 s	200 s / 3626 s	223 s / 3450 s
konec preračuna		7000 s	7000 s	7000 s



Sl. 2. Časovni potek tlaka v povratnem kanalu reaktorske posode

glavne napajalne vode kakor pa signal za varnostno vbrizgavanje, se črpalke za pomožno napajalno vodo vklopijo na signal za osamitev glavne napajalne vode z vgrajeno zakasnitvijo 20 s po prejemu signala. Namen pomožne napajalne vode je med drugim tudi ohraniti uparjalnike kot ponor toplote, ki iz primarnega sistema odstranijo nakopičeno in zaostalo toploto. Uparjalnika morata biti razpoložljiva vse dotlej, dokler vse zaostale toplote ne odvajamo samo skozi poškodovano mesto.

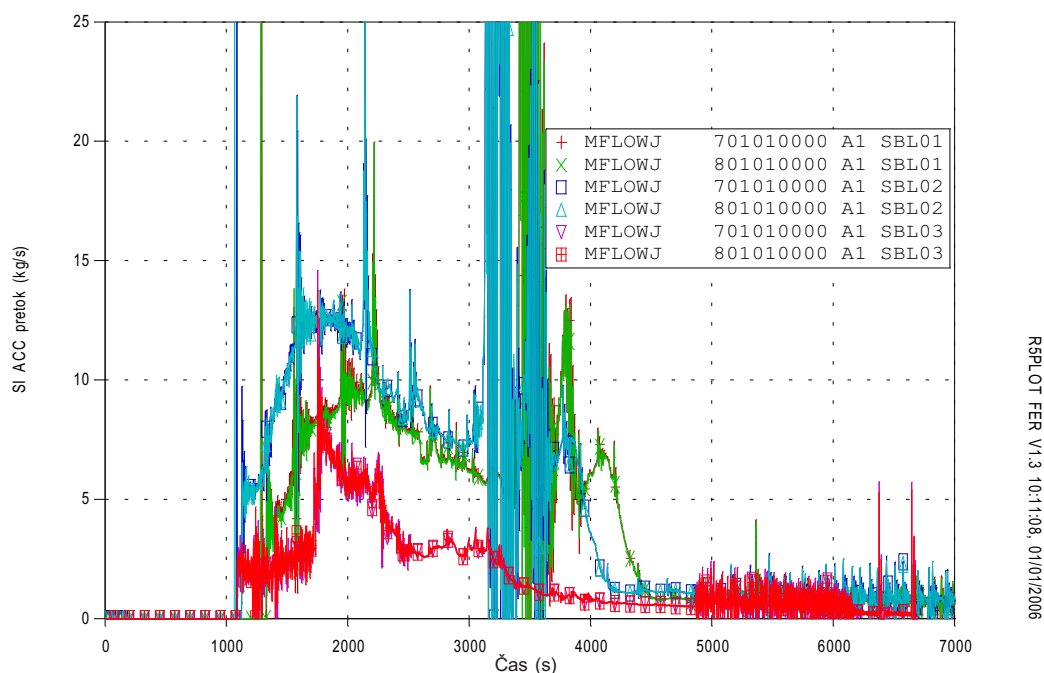
Pretok hladiva skozi zlom je omejen s kritičnim iztokom, zato je s tem omejeno tudi odvajanje toplote. Toplota, ki se ne more odvesti skozi zlom, se odvede na sekundarno stran uparjalnika. Tlak v primarnem sistemu je krmiljen s temperaturo vode na sekundarni strani uparjalnika. Pogoji za ohlajanje reaktorskega hladiva je, da je tlak na sekundarni strani manjši od tlaka v primarnem sistemu, ker je v pogojih med malo izlivno neizgodo tlačna razlika merilo za temperaturno razliko.

Ob nadaljnjem zniževanju tlaka pri 9,9 MPa operater ročno ustavi reaktorsko črpalko v skladu z nezgodnimi obratovalnimi navodili. Ko dosežemo pogoje nasičenja v najbolj vročem delu primarnega hladila, začne v pokrovu reaktorske posode rasti parni mehur, ki v naslednji fazi igra vlogo tlačnika in uravnava tlak v primarnem sistemu. Zaradi zmanjševanja pretoka v primarnem sistemu je odvod toplote na sekundarno stran postopoma zmanjšan.

Ko se parni mehur v pokrovu reaktorske posode zveča toliko, da doseže priključek vroče veje, je s tem začasno ustavljen naravni obtok primarnega hladiva. V primarnem krogu ostane kapljevina le v spodnjem delu reaktorske posode in v najnižjem delu hladne veje med črpalko in uparjalnikom. To vodno zaporo imenujemo tesnilo zanke.

Nastajanju in praznjenju tesnila zanke dvofazne mešanice v sifonu hladne veje je v literaturi posvečene precej pozornosti ([23] do [25]), saj razvoj tega pojava pri mali izlivni neizgodi bistveno vpliva na potek dogodkov v sredici, še posebej na čas, ko je sredica odkrita. Dokler se tesnilo zanke ne odzrači, je mesto zloma poplavljen in para ne more doseči zloma, s tem pa se ne more znižati tlak primarnega sistema, ampak je enak tistemu na sekundarni strani. Do tedaj izteka iz primarnega sistema veliko podhlajene kapljevine in sredica se začne odkrivati ter segrevati. Vezna posoda, ki jo sestavljajo sifon hladne veje, povratni kanal in reaktorska posoda, se prazni skozi zlom, dokler para ne prebije tesnila zanke. Voda, ki se je do tedaj zadrževala v povratnem kanalu, poplavi sredico in ustavi njeno morebitno pregrevanje. Raven v reaktorski posodi se ustali malo više, kakor je dno sifona v hladni veji.

Ko se zlom odkrije, se poveča odvod zaostale toplote skozi zlom in tlak v primarnem sistemu se zniža, dokler se pri nastavitvenih vrednostih za



Sl. 3. Pretok vbrizgavanja zbiralnikov v hladni veji primarnega sistema

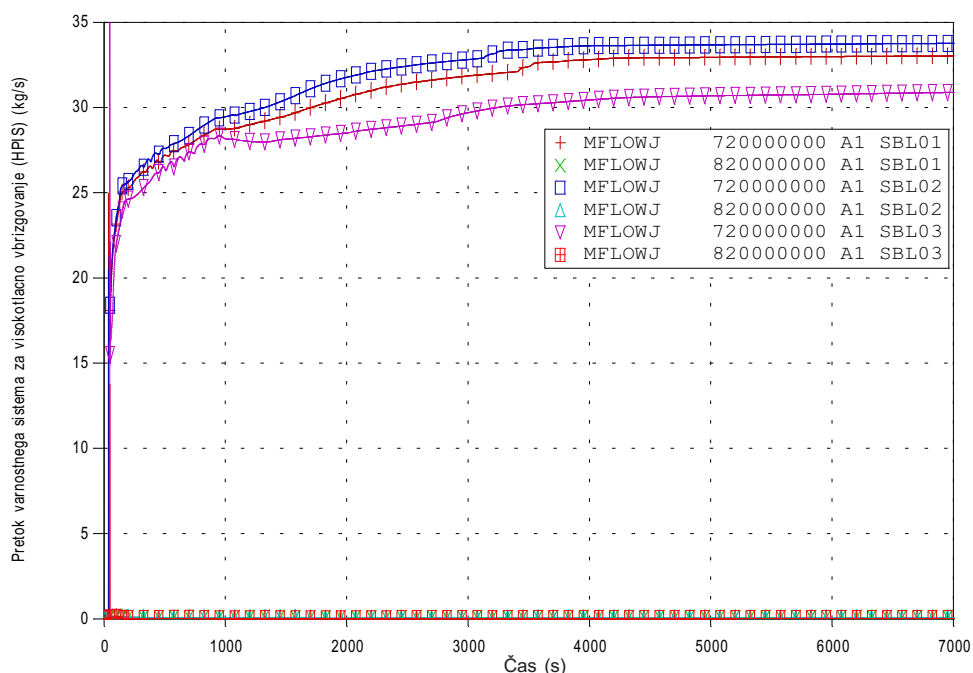
posamezne scenarije iz preglednice 4 zaradi višinske razlike ne izlije v primarni sistem velika količina hladne borirane vode iz pasivnih zbiralnikov. Slika 3 prikazuje pretok vbrizgavanja zbiralnikov v obeh vejah za scenarije SBLO1, SBLO2 in SBLO3. S slike je razbrati, da se v skladu z robnimi pogoji v preglednici 4 najprej sprožita zbiralnika v scenariju SBLO2 in najkasneje pri SBLO3. Kakor je razvidno s slike 3 se nobeden od zbiralnikov v preizkusu ni popolnoma izpraznil. Tlak v zbiralniku namreč nadzorujejo z dotokom dušika, ki pa ne sme zaiti v primarni sistem. Ker je dušik neukapljiv v razmerah, v katerih obratuje jedrska elektrarna, bi se lahko nabiral v nekaterih delih sistema in oviral ali popolnoma zaustavil naravni obtok primarnega hladiva.

Vbrizgavanje zbiralnikov še dodatno pospeši znižanje tlaka. Po vključitvi zbiralnikov prihaja v povratnem kanalu reaktorske posode do izrazito neravnovesnega termohidrodinamičnega fizikalnega pojava, saj se večja količina hladne vode iz zbiralnikov na razmeroma majhnem prostoru meša z nasičeno kapljevino iz hladne veje, vsebina pa odteka v povratni kanal in delno skozi zlom [15]. V tej fazi preizkusa lahko spremljamo izrazita nihanja dvofaznega kritičnega pretoka skozi zlom, te pričajo o burnih tridirazsežnih pojavih v zgornjem delu povratnega kanala reaktorske posode in pričakovati je bilo, da jih RELAP5/MOD3.3 ne bo mogel zadovoljivo poustvarjati.

Omeniti velja še pomen zbiralnika, ki vbrizgava hladivo v hladno vejo št. 2. Izbrizgana hladna voda iz tega zbiralnika sicer ne more uiti neposredno proti zlomu in se zato vsebina tega zbiralnika popolnoma prelije v primarni sistem. Pomembno pa je, koliko vode odteče v sredico in koliko se je nateče v sifon hladne veje. Tako lahko tlak v primarnem sistemu za kratek čas zviša in vbrizgavanje zbiralnikov se upočasni ali za kratek čas ustavi.

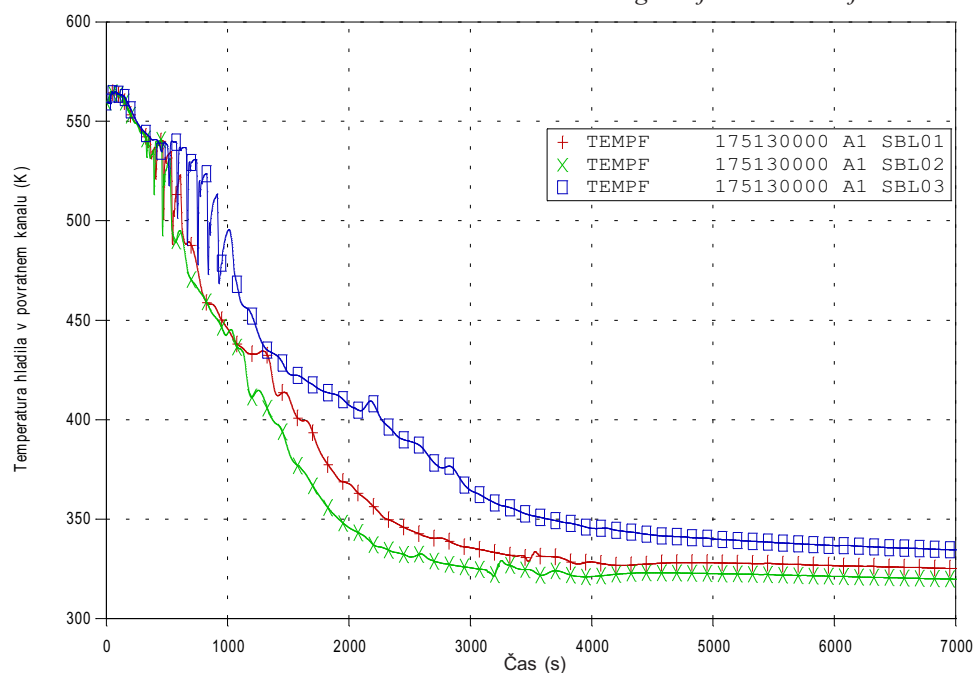
Ker pa je nadaljnji potek preizkusa močno odvisen od tega, koliko hladne vode je iz zbiralnika oteklo naravnost v zlom in koliko po povratnem kanalu v sredico, je treba poudariti, da je pravilno modeliranje te faze nezgode odločujočega pomena. Od tega je namreč odvisna količina hladiva, ki po prenehanju vbrizgavanja iz zbiralnikov ostane v primarnem sistemu. Le tako je mogoče kasneje pravilno napovedati čas in sam mehanizem odkrivanja in pregrevanja reaktorske sredice.

V zadnji fazi lahko opazujemo sorazmerno umirjen prehodni pojav ob postopnem zmanjševanju masnega pretoka skozi zlom. Ko se masni pretok skozi zlom izenači z masnim pretokom, ki ga dobavlja črpalka za visokotlačno varnostno vbrizgavanje, se ustvari ravnovesje mase v primarnem hladilnem krogu in elektrarna se še naprej počasi ohlaja. Slika 4 prikazuje količino mase, ki smo jo vbrizgali v primarni sistem s črpalko za visokotlačno varnostno vbrizgavanje.



RPLOT FER V1.3 10:21:20, 01/01/2006

Sl. 4. Pretok sistema za visokotlačno vbrizgavanje v hladno vejo



RPLOT FER V1.3 10:23:31, 01/01/2006

Sl. 5. Časovni potek ohlajanja hladiva v spodnjem delu povratnega kanala

Krivulja + pomeni časovni potek za SBLO1, □ za SBLO2 in ∇ za SBLO3. Prav tako je s slike razvidno, da se visokotlačna črpalka v veji št. 2 v nobenem scenariju ni sprožila.

Po približno 4000 s se vzpostavi toplotno ravnovesje, saj zlom in sistem za varnostno

vbrizgavanje odvajata vso zaostalo toploto. Stanje je stabilno, saj je sredica pokrita, tlak je stabilen in uparjalnika nista potrebna za hlajenje. Voda iz sistema za visokotlačno varnostno vbrizgavanje zadošča za hlajenje sredice, zato je po 7000 s računanje končano. Ob odvajanju zaostale toplote skozi zlom dosežemo

parametre elektrarne, pri katerih lahko začneta črpalki sistema za nizkotlačno varnostno vbrizgavanje dovajati v primarni sistem velike količine hladne vode. S tem se zopet vzpostavi povratni obtok in zagotovi dolgoročno hlajenje sredice.

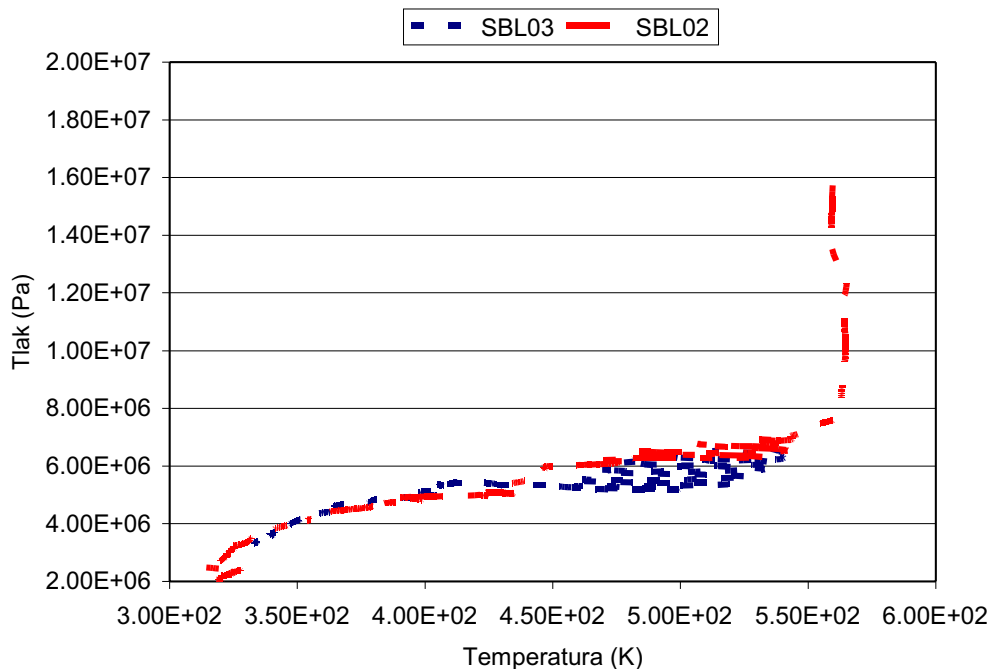
Ker potrebuje mehanika loma za svoje preračune poleg tlaka v primarnem sistemu še temperaturni potek v povratnem kanalu, si oglejmo še najpomembnejše temperaturne poteke, ki smo jih ob danih robnih pogojih preračunali za posamezne scenarije s programom RELAP5/MOD3.3.

Slika 5 prikazuje časovne poteke temperature hladiva v spodnjem delu povratnega kanala za SBLO1 (označeno s +), SBLO2 (označeno z X) in SBLO3 (označeno s □). Primerjajmo časovne poteke temperature v povratnem kanalu reaktorske posode za izbrane scenarije s tlačnimi (sl. 2). Zadošča primerjava za 3000 s simuliranih scenarijev male izlivne nezgode, ker dejansko ocenjujemo, da obstaja v tem času največja verjetnost za pojav morebitnega toplotnega prehodnega pojava pod tlakom. Očitno je, da so časovne spremembe temperature, ki so bistvene za nastanek toplotnega prehodnega pojava pod tlakom, večje v primeru SBLO2, saj je v tem primeru odvod dT/dt skoraj povsod bolj negativen kakor pri SBLO3.

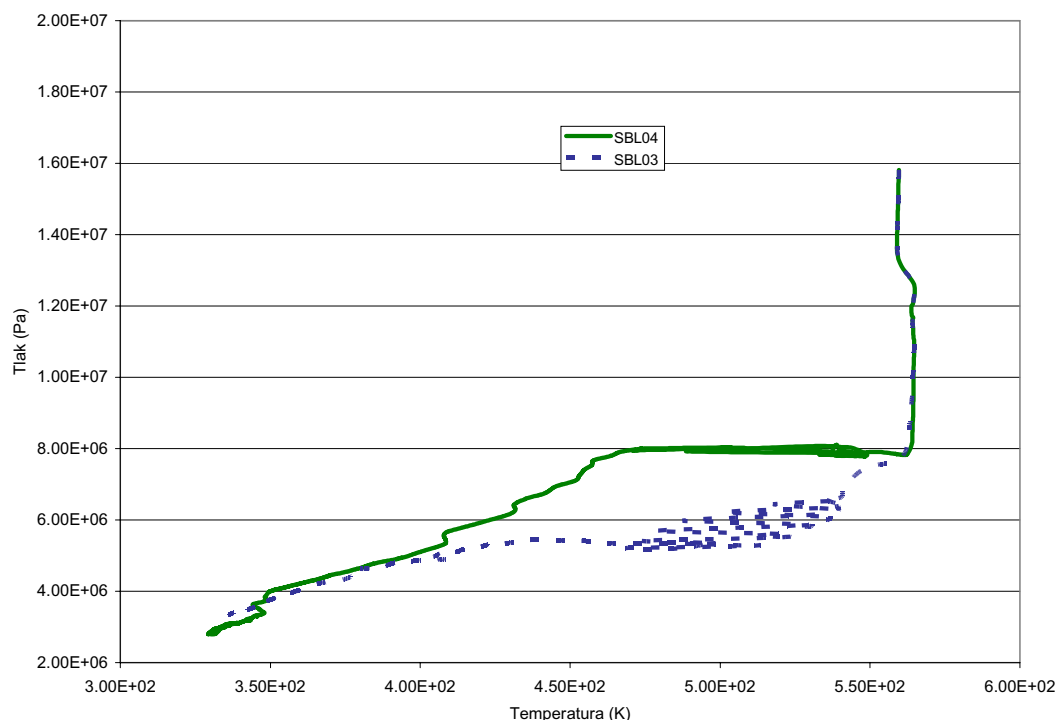
5.5 Uporaba preračunov za reaktorsko tlačno posodo

Namen študije je bil oceniti najbolj kritične pogoje, ki se lahko pojavijo v povratnem kanalu reaktorske tlačne posode med varnostnim vbrizgavanjem pri simuliranih scenarijih male izlivne nezgode. S časovnimi poteki tlaka (sl. 2) in temperature (sl. 5) izrazimo tlak v povratnem kanalu kot funkcijo temperature (okoli 4000 podatkov za scenarij dolg 7000 s), kar prikazuje slika 6.

S slike je razvidno, da je SBLO2 hujši primer kakor SBLO3, saj lahko ocenimo, da se v najbolj kritični točki scenarija SBLO2 za nastanek toplotnega prehodnega pojava pod tlakom ohladi voda v povratnem kanalu reaktorske tlačne posode za 92 K pri tlaku 6,16 MPa, medtem ko se pojavi v scenariju SBLO3 najbolj kritični trenutek pri nižjem tlaku 5,4 MPa, ko se voda ohladi le za 90 K. Slika tudi prikazuje, da je v področju tlakov med 6,5 MPa in 5,5 MPa temperatura vode v povratnem kanalu reaktorske posode povsod nižja v scenariju SBLO2. Druge izrazite temperaturne oscilacije pri SBLO2 in SBLO3, ki se pojavijo pri danih tlačnih vrednostih zaradi odvajanja pare skozi razbremenilne ventile uparjalnika, ne pomenijo mogoče nevarnosti za pojav toplotnega prehodnega pojava pod tlakom.



Sl. 6. Tlak v povratnem kanalu v odvisnosti od temperature pri SBLO2 in SBLO3



Sl. 7. Odvisnost tlaka od temperature v povratnem kanalu pri SBLO3 in SBLO4

Rezultati simulacije so jasno odgovorili na vprašanje, da so izbrani mejni vhodni parametri scenarija SBLO2 nevarnejši za toplotni prehodni pojav pod tlakom kakor izbira parametrov pri SBLO3. Mnoge študije so pokazale, kako pomembna blažitvena naprava je v primeru majhne izlivne nezgode sistem pomožne napajalne vode, ki zagotavlja ponor toplote iz uparjalnikov [4]. Zato smo pričakovali zanimive sklepe tudi pri spremenjenem scenariju SBLO4, v katerem smo predpostavili, da pomožna napajalna voda ni razpoložljiva. To pomeni, da smo izgubili ponor toplote na sekundarni strani in da se zaostala toplota lahko odvaja le skozi zlom, medtem ko so začetni pogoji modela in predpostavke ostale prav takšne kakor pri SBLO3. Odvisnost tlaka od temperature v povratnem kanalu reaktorske posode za izbrana scenarija prikazuje slika 7.

S slike je razvidno, da se v najbolj kritični točki scenarija SBLO4 za pojav toplotnega prehodnega pojava pod tlakom ohladi voda v povratnem kanalu reaktorske tlačne posode za 95 K pri bistveno višjem tlaku 8 MPa, ker ni prišlo do polnjenja uparjalnika in odvajanja toplote skozi razbremenilne ventile sekundarnega kroga. Tako lahko sklenemo, da je ta primer morda še nevarnejši za pojav toplotnega prehodnega pojava pod tlakom v gradivu reaktorske posode kakor SBLO2, pri

katerem so bili robni pogoji izbrani kot verjetnejši za pojav toplotnega prehodnega pojava pod tlakom, vendar je deloval sistem pomožnega napajanja uparjalnikov.

6 SKLEP

Rezultati študije kažejo uspešnost izračuna termohidravličnega računalniškega programa RELAP5/MOD3.3 na področju izbora mejnih prehodnih pojavov in scenarijev (vključno z odzivom celotne elektrarne in njenih varnostnih ter pomožnih sistemov), potrebnih za mehanske in trdnostne analize toplotnega prehodnega pojava pod tlakom v tlačnovodnih jedrskih elektrarnah, predvsem pri ocenjevanju negotovosti vhodnih parametrov (p in T kot funkciji časa ali izbira najbolj kritičnih vrednosti odvodov dT/dt ter dT/dp). Pomembnost uporabe sistemskega orodja RELAP5/MOD3.3 se je pokazala predvsem pri vzpostavitvi zanesljivih temperaturnih in tlačnih robnih pogojev v izbranem kritičnem delu (področje reaktorske posode, ki je izpostavljeno nevtronskemu fluksu in zviri posameznih delov) pri analizi zapletenega modela primarnega kroga in medsebojnega vpliva niza pomožnih sistemov (krmljenje tlaka v tlačniku, vbrizgavanje varnostnih zbiralnikov ali sistema za

visokotlačno vbrizgavanje, delovanje sistema pomožne napajalne vode uparjalnikov ipd). Poudariti pa moramo, da bi bilo potrebno za podrobnejšo analizo spreminjati še dodatne

parametre za ocenjevanje temperaturnega gradienta skozi gradivo reaktorske posode, kakor je npr. koeficient toplotne prestopnosti med vodo in gradivom ter gradivom in izolacijo oz. okolico.

7 LITERATURA

- [1] R. Istenič (2003) Jedrska varnost, NEK, Strokovno usposabljanje, *NEK/SU, ICJT*, januar 2003.
- [2] M. Dušič, R. Istenič, B. Mavko, A. Stritar, J. Sušnik (1986) Osnove jedrske varnosti – A, Izobraževalni center za jedrsko tehnologijo, Univerza E. Kardelja, *Institut "Jožef Stefan"*, Ljubljana.
- [3] CSNI PWG2-TG-THSB, State of the art report on thermalhydraulics of emergency core cooling in light water reactors (1989) OECD-NEA-CSNI Report N. 161, *OECD Nuclear Energy Agency*.
- [4] A. Prošek, S. Petelin (1992) Analiza male izlivne nezgode in izguba pomožne napajalne vode, IJS-DP-6527, Univerza v Ljubljani, *Institut "Jožef Stefan"*, Ljubljana.
- [5] ANS-51.1/N18.2-1973, Nuclear safety criteria for the design of stationary pressurized water reactor plants (1973) *ANS*.
- [6] T. Setnikar, A. Stritar (1993) Mala izlivna nezgoda, *Izobraževalni center za jedrsko tehnologijo Milana Čopiča (ICJT)*, Ljubljana.
- [7] SNRC, 10 CFR Part 50, § 50.46, Acceptance criteria for emergency cooling systems for light water nuclear power reactors (1994) Appendix K, ECCS evaluation models, *US Nuclear Regulatory Commission*.
- [8] I. Remec (1991) Določitev ART_{NDT} tlačne posode Nuklearne elektrarne Krško do konca 10. cikla, Univerza v Ljubljani, *Institut "Jožef Stefan"*, Odsek za reaktorsko fiziko, Ljubljana.
- [9] T. G. Theofanous, D. L. Selby, et al. (1985) Pressurized thermal shock evaluation of calvert cliffs unit I nuclear power plant, NUREG-CR-4022 (ORNL/TM-9408), *U.S. Nuclear Regulatory Commission*.
- [10] A. Alujevič (1991) Elasto-plastomehanika, *Univerza v Mariboru, Tehniška fakulteta*.
- [11] S. Timoshenko, J. N. Goodier (1951) Theory of Elasticity, *McGraw-Hill*.
- [12] RELAP5/MOD3.3 Code manual, Vol.#1: Code structure, system models and solution methods, *NUREG/CR-5535, Sciencetech, Inc., Rockville, Maryland and Idaho Falls, Idaho, USA*.
- [13] I. Parzer, A. Krenker (2002) Navodila za uporabo programskih paketov SNAP in Xmgr5 pri modeliranju sistemov s programom RELAP5/MOD3.3, IJS-DP-8651, Univerza v Ljubljani, *Institut "Jožef Stefan"*, Ljubljana.
- [14] D. Grgić, T. Bajs, S. Špalj, etc. (2003) NEK RELAP5/MOD3.3 nodalization notebook (2000 MWt and new SGs), NEK-ESD-TR09/03, *Nuklearna elektrarna Krško*, Krško.
- [15] I. Parzer (2001) Model pregrevanja sredice reaktorja med izlivno nezgodo, disertacija, *Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko*, Ljubljana.
- [16] T. Bajs, V. Benčik, S. Šadek (2003) NEK RELAP5/MOD3.3 steady state qualification report (Based on NEK ESD TR 09/03), NEK-ESD-TR10/03, *Nuklearna elektrarna Krško*, Krško.
- [17] M. Senčar (1996) Review of the NEK data bank for RELAP5/mod2 input model, Draft report TR4-21/96, Phase I, rev.0, Maribor.
- [18] B. Mavko, S. Petelin, A. Prošek, I. Parzer (1999) Pregled, NEK RELAP5/mod2 nodalization notebook rev. 1 with control system, Univerza v Ljubljani, *Institut "Jožef Stefan"*, Ljubljana.
- [19] ANS (1979) American national standard: for decay heat power in light water reactors, ANSI/ANS-5.1-1979, *American Nuclear Society*, USA.
- [20] Emergency operating procedures – NEK, Rev. 1, 1992
- [21] I. Bašič (1996) Summary of NEK reactor coolant system leaks (0.5"; 1"; 4" and 8") best estimate RELAP5/mod2 analysis, *Nuclear power plant Krško*, Engineering Service Division, NEK ESD TR 03/96, Rev.0, Krško.
- [22] Updated safety analysis report (1992) *Nuclear power plant Krško*, Krško.
- [23] N. Lee (1987) Discussions on loop seal behavior during cold leg small break LOCAs of a PWR, *Nuclear Engineering and Design* 99, (1987), 453-458, North-Holland, Amsterdam.

- [24] M. Osakabe, T. Yonomoto, Y. Kukita, Y. Koizumi, K. Tasaka (1988) Core liquid level depression due to manometric effect during PWR small break LOCA, *Journal of Nuclear Science and Technology* 25, (1988) 3, 274-282.
- [25] H. Tuomisto, P. Kajanto (1988) Two-phase flow in a full scale loop seal facility, *Nuclear Engineering and Design* 110, (1988), 295-305, North-Holland, Amsterdam.

Naslova avtorjev: Ivica Bašić
Nuklearna elektrarna Krško
Vrbina 12
8270 Krško

Peter Crnjac
II. gimnazija Maribor
Trg Miloša Zidanška 1
2000 Maribor
petercrnjac@yahoo.com

Prejeto:
Received: 28.5.2005

Sprejeto:
Accepted: 23.2.2006

Odprto za diskusijo: 1 leto
Open for discussion: 1 year