Technická správa

Predprevádzková bezpečnostná správa Kapitola 07.02.02 Namáhanie vnútroreaktorových častí

Stavba: Construction: Dostavba 3. a 4. blok JE Mochovce, stavenisko: Jadrová časť 3&4 Unit NPP Mochovce Completion, site: Nuclear Island

Stavebník: Constructor: Slovenské elektrárne, a.s., Bratislava, 3. a 4. blok JE Mochovce Slovenské elektrárne, a.s., Bratislava, 3&4 Unit NPP Mochovce

		LC											
SE Rev	Date / Dátum	IS	Superv	ision Outcome / Sta	v schválenia	v schválenia Supervised by / Overil				Checked by / Kontroloval	Appro Sci	ved by / hválil	
SLOVENSKÉ ELEKTRÁRNE			Language / Jazyk Submited to Client to / Predložené odberateľovi na:		S E	Safety Class / Bezpečnostná N/N trieda		SEC. INDEX / INDEX utajenia	Compa	any use/P			
					Approval / Schválenie		>	<	Information O Len na inform	nly / áciu			
					The SE a.s. approval refers to the contract clauses only. All design responsibilities are charged to the Contractor / Schválenie SE a.s. sa vzťahuje iba na zmluvné náležitosti. Zá vypracovanie projektu nesie dodávateľ plnú zodpovednosť.								
EPS No / Číslo EPS: PNM34365000 Revision index Index revízie:			/ 07		Size / Veľ- kosť	Activity Code / Aktivita	Tyı Sub Ty Poo	pe / type p / Ityp	Discipline / Profesia	Plant L elek	Init / Blok ktrárne		
File nam Názov s	File name / SE doc. Code / SE číslo dokumentu: PNM34361119				A4	6.01	R	s	Z		8		
* P N M 3 4 3 6 1 1 1 9 0 7 *				Sheet / List	0	Of/z		Plant System / Systém elektrárne	Com Kom	ponent / ponent			
					1		58						

SE Contract No. / Číslo z	mluvy S	E: 4600003952		VUJE Co	ntract No.	/ číslo zmluvy \	/UJE: 1719/00/09
Part name / Označ	enie ča	sti: PNM3436111	1907_S_C00_V		Iss	ued on / Vydane	dňa: 11.07.2019
Kód citlivosti ¹⁾ / Sensitivity code ¹⁾ 3	Na Me	me / no		Organization / Organizácia	Dept. / Útvar	Date / Dátum	Signature / P <u>odpis</u>
Author / Vypracoval:			5	• VUJE, a.s.	• 0350	• 11.07.2019	•
Co-author / Spolupracov	al: •		8	• VUJE, a.s.	• 0350	• 11.07.2019	
	•			•	•	•	•
Checked by / Kontrolova	ıl: •			• VUJE, a.s.	• 0220	• 11.07.2019	•
			5	•	•	•	
	•			•	•	•	alas Nete
	•			•		•	•
Verified by / Overil:	•			· VUJE, a.s.	• 0720	• 11.07.2019	•
Approved by / Schválil:				· VUJE, a.s.	• 1703	• 11.07.2019	

Tento dokument je vlastníctvom Slovenských elektrární, a.s.. Tento dokument, ako aj informácie z neho, môžu byť použité, kopírované, rozmnožované alebo zverejňované iba so súhlasom Slovenských elektrární, a.s.. Uvedené riešenie je obchodným tajomstvom VUJE, a.s..

This document is property of Slovenské elektrárne, a.s. This document as well as information it contains can only be used, copied, reproduced or published with consent of Slovenské elektrárne, a.s. The solution presented is trade secret of VUJE, a.s.

Revision record / Záznam o revízii

Identification /	Brief description of modification /	Reason of modification /			
Identifikácia (part/page/chapter/ member/section) (časť/strana/kapitola/ článok/odstavec)	Stručná charakteristika úpravy (description of modification and manner of implementation) (popis úpravy a spôsobu zapracovanie)	Dôvod úpravy (author company, number of comments or other stimulation, name of author, comment document No.) (firma autora a číslo pripomienky, resp. iný podnet, meno autora, č. dokumentu pripomienok)			
 Celý dokument 	Zapracovanie pripomienok ÚJD podľa Aarhuského výboru	 V súlade s dokumentom 			
		PNM34482979			
•	•	•			

List of document part Zoznam častí dokumentu

Por. č. No.	Názov dokumentu Document name		Ev. č. súboru časti dokumentu / File ref. No. of document part	Číslo revízie / Revision No.	
1.	Kapitola 07.02.02 Namáhanie vnútroreaktorových častí	•	PNM3436111907_S_C00_V	•	07
2.	Kapitola 07.02.02 Namáhanie vnútroreaktorových častí	•	PNM3436111907_S_C01_V	•	07
3.	•	•		•	
4.	•	•		•	
5.	•	•		•	
6.	•	•		•	
7.	•	•		•	
8.	•	•		•	
9.	•	•		•	
10.	•	•		•	
11.	•	•		•	

vůje

OBSAH

OBSAH		4
ZOZNAM POUŽITÝ(CH SKRATIEK A OZNAČENÍ	5
7.2.2 Namáh	anie vnútroreaktorových častí	6
7.2.2.1	Úvod	6
7.2.2.2	Charakteristika udalosti	7
7.2.2.3	Použité kritériá prijateľnosti	7
7.2.2.4	Metodika riešenia	8
7.2.2.5	Výpočtový model	9
7.2.2.6	Zaťaženie modelu	13
7.2.2.6.1	Zaťaženie podtlakovou vlnou	13
7.2.2.6.2	Zaťaženie vlastnou hmotnosťou VRC a primárneho chladiva	16
7.2.2.0.3	Zatazenie SR pritakom anuioloovych rurkovych segmentov	16
7.2.2.0.4	Okrajové podmienky a modelovanie kontaktov	10
7.2.2.6.6	Modelovanie prietočných prierezov	17
7.2.2.7	Materiálové charakteristiky	19
7.2.2.8	Popis a rozbor výsledkov pre haváriu LOCA SV	22
7.2.2.8.1	Priebeh tlakov - LOCA SV	22
7.2.2.8.2	Deformácie vnútroreaktorových konštrukcií – LOCA SV	29
7.2.2.8.3	Napätosť vnútroreaktorových konštrukcií – LOCA SV	33
7.2.2.9	Popis a rozbor výsledkov pre haváriu LOCA HV	36
7.2.2.9.1	Priebehy tlakov – LOCA HV	36
7.2.2.9.2	Deformácie VRČ – LOCA HV	41
7.2.2.9.3	Napätosť vnútroreaktorových konštrukcií – LOCA HV	46
7.2.2.10	Kontrolný výpočet na statickú pevnosť	49
7.2.2.11	Závery	53
LITERATÚRA		55
ZOZNAM OBRÁZKO	DV	58
ZOZNAM TABULIEK	٢	58

vüje

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A OZNAČENÍ

AZ	aktívna zóna
BOR	blok ochranných rúr
DŠR	dno šachty reaktora
EMO	elektráreň Mochovce
FSI	Fluid Structure Interaction (interakcia kvapaliny a konštrukcie)
HCČ	hlavné cirkulačné čerpadlo
НСР	hlavné cirkulačné potrubie
HP	havarijné podmienky
HRK	havarijná a regulačná kazeta
HV	horúca vetva hlavnej cirkulačnej slučky I.O.
I.O.	primárny okruh
JE	jadrová elektráreň
KAZ	kôš aktívnej zóny
LOCA	havária s únikom chladiva
MKP	metóda konečných prvkov
MAAE	Medzinárodná agentúra pre atómovú energiu
Ms	menovitá svetlosť
NP	normálne prevádzkové podmienky
NNP	narušenie normálnych prevádzkových podmienok
NTD	normatívne technický dokument
N _{nom}	nominálny výkon
РК	pracovná kazeta
PBS	predbežná bezpečnostná správa
PpBS	predprevádzková bezpečnostná správa
SV	studená vetva hlavnej cirkulačnej slučky I.O.
ŠR	šachta reaktora
TNR	tlaková nádoba reaktora
UJD SR	Úrad jadrového dozoru Slovenskej republiky
VRČ	vnútroreaktorové časti
VVER	vodo-vodný energetický reaktor
E [MPa]	modul pružnosti
R _p ^{0,2} [MPa]	dohovorená medza klzu
R _m [MPa]	medza pevnosti
ρ [kg/m3]	hustota

7.2.2 Namáhanie vnútroreaktorových častí

7.2.2.1 Úvod

Táto kapitola **PpBS MO34** obsahuje popis a hodnotenie výsledkov analýz odozvy VRČ (vnútroreaktorových častí) reaktora VVER 440 na maximálnu projektovú haváriu, ktorá predstavuje najnepriaznivejšie namáhanie vnútroreaktorových častí.

Cieľom týchto analýz je skontrolovať splnenie pevnostných podmienok VRČ podľa normatívnych dokumentov platných v SR pre jadrovú energetiku **[II.4]**, **[II.5]**, **[II.6]** a preukázať, že po iniciácii LOCA havárie nevzniknú vo VRČ také deformácie, ktoré by zabránili včasnej a správnej aktivácii kaziet HRK (havarijná, regulačná a kompenzačná kazeta).

Správa obsahuje popis spomenutých prechodových dejov, prijatú metodiku analýzy, kritériá hodnotenia, materiálové vlastnosti VRČ, popis výpočtového modelu konečných prvkov pre numerickú simuláciu, výsledky analýz pre obidve uvažované varianty výpočtov a zhodnotenie vypočítaných hodnôt namáhania.

Preukazná dokumentácia TNR je obsiahnutá v nasledovných dokumentoch - Návrhové špecifikácie [I.11], [I.12], [I.13], Výpočty pevnosti, životnosti a seizmickej odolnosti [I.14], [I.15], [I.16], [I.17], [I.18], [I.19], [I.20], [I.21].

7.2.2.2 Charakteristika udalosti

Podľa vyhlášky UJD SR č.430/2011, Príloha 3, časť B II, bod A(4), písmeno a), projekt reaktora musí zaistiť, že všetky vnútroreaktorové časti boli navrhnuté, vyrobené a zmontované tak, aby odolali statickým účinkom a dynamickým účinkom pri normálnej prevádzke, abnormálnej prevádzke a pri projektových haváriách v rozsahu potrebnom na zaistenie bezpečného odstavenia jadrového reaktora, na udržanie podkritickosti a dostatočného chladenia aktívnej zóny.

Táto kapitola **PpBS MO34** obsahuje hodnotenie odozvy VRČ reaktora VVER 440 na maximálnu projektovú LOCA haváriu, predstavujúcu najhorší scenár namáhanie VRČ.

Analýza uvažovala dva prípady roztrhnutia potrubia primárneho okruhu:

- okamžité roztrhnutie vstupného (studeného) nátrubku TNR LOCA SV;
- okamžité roztrhnutie výstupného (horúceho) nátrubku TNR LOCA HV

Cieľom týchto analýz je skontrolovať splnenie pevnostných podmienok VRČ podľa normatívnych dokumentov platných v SR pre jadrovú energetiku **[II.4]**, **[II.5]**, **[II.6]** a preukázať, že ani pri najnepriaznivejšom namáhaní nevznikne taká deformácia VRČ, ktorá by zabránila včasnej a správnej aktiváciu HRK.

Analýzy bezpečnosti používajú deterministický a/alebo pravdepodobnostný prístup. Výsledky týchto analýz musia byť v súlade s definovanými kritériami prijateľnosti, aby bolo preukázané, že je dosiahnutá požadovaná úroveň bezpečnosti JE. Za týmto účelom sa postulujú hypotetické havárie a analyzujú sa ich odozvy na konštrukcie.

V prípade vzniku LOCA havárie tlakovodného reaktora sa uvažuje rýchle tzv. "gilotínové" roztrhnutie jednej z hlavných cirkulačných slučiek, pričom dochádza k náhlemu poklesu tlaku z nominálnej hodnoty na tlak nasýtenej pary pri danej teplote média v mieste porušenia potrubia. Vzniká tlaková vlna, ktorá sa šíri rýchlosťou zvuku v primárnom okruhu. Táto vlna vstupuje do tlakovej nádoby reaktora a spôsobuje rozdiel tlakov na vnútroreaktorových konštrukciách. Dochádza k nesymetrickému namáhaniu šachty reaktora v dôsledku postupného šírenia tlakovej vlny v priestore medzi šachtou a tlakovou nádobou reaktora.

Ako preukázali modelové experimenty **[III.10]**, **[III.11]**, **[III.12]** urobené na VVER 440 reaktoroch, toto namáhanie je významné iba v počiatočnej fáze havárie, v rámci časového intervalu desatiny sekundy po vzniku havárie. Po tomto časovom intervale sa tlak stabilizuje a dynamické namáhanie vnútroreaktorových častí zanikne. Namáhanie VRČ je úmerné veľkosti poklesu tlaku v primárnom okruhu, ktorý je určený rozdielom počiatočnej hodnoty tlaku a tlaku sýtosti pary pri danej teploty chladiva v mieste roztrhnutia. Pri analýze VRČ boli počiatočné hodnoty tlaku a teploty primárneho chladiva uvažované pre výkon reaktora 100% Nnom.

Z uvedeného popisu je zrejmé, že z hľadiska namáhania vnútroreaktorových konštrukcií je obecne vážnejšia havária LOCA s porušením studenej vetvy primárneho okruhu. Pri tejto havárii je pokles tlaku z nominálnej hodnoty na tlak nasýtenej pary väčší ako v prípade porušenia horúcej vetvy. Navyše dochádza k nesymetrickému zaťaženiu hlavnej konštrukcie (šachty reaktora) vplyvom postupného šírenia podtlakovej vlny v medzere medzi šachtou a nádobou reaktora.

7.2.2.3 Použité kritériá prijateľnosti

Prostriedkom na preukázanie dosiahnutej úrovne bezpečnosti JE sú analýzy bezpečnosti. Návody analýz bezpečnosti jadrových elektrární **[II.3]**, **[II.8]** definujú základné požiadavky a podmienky pre analýzy bezpečnosti. Analýzy bezpečnosti používajú dve základné vzájomne sa doplňujúce metódy: deterministické a/alebo pravdepodobnostné. Výsledky analýz bezpečnosti sa porovnávajú s definovanými kritériami prijateľnosti, aby bolo dokladované, že je dosiahnutá požadovaná úroveň bezpečnosti JE. Postulujú sa hypotetické havárie a urobia sa analýzy dynamickej odozvy na tieto havárie.

V **[II.8]**, Príloha II, časť II.1, bod 2 sú definované nasledovné kritériá prijateľnosti pre projektové havárie dotýkajúce VRČ, ktoré sú tiež uvedené v kapitole 7.2.1.0:

• DB-A3/e - je zabezpečená pohyblivosť havarijných a regulačných kaziet;

• **DB-A7** - Všetky vnútorné časti jadrového reaktora musia odolať dynamickým účinkom pri abnormálnej prevádzke a pri projektových haváriách v rozsahu potrebnom na zaistenie bezpečného odstavenia jadrového reaktora, na udržanie podkritickosti a dostatočného chladenia aktívnej zóny

7.2.2.4 Metodika riešenia

Problém odozvy VRČ na dynamické namáhanie pri LOCA haváriách je možné riešiť v zásade dvomi rozdielnymi prístupmi:

<u>Dve nezávisle riešené úlohy</u> – v prvom kroku analýzy sa určia časové priebehy tlakovej diferencie pre jednotlivé vnútroreaktorové konštrukcie pri predpoklade, že tieto sú ideálne tuhé. Pre výpočet týchto tlakových prírastkov môžu byť použité výpočtové programy typu RELAP, alebo môžu byť určené experimentom. V druhom kroku analýzy sa rieši dynamické chovanie vnútroreaktorových konštrukcií pre tlakové zaťaženia určené v prvom kroku analýzy. Pre tieto analýzy sú vytvorené dva výpočtové modely, jeden pre termo-hydraulický výpočet a druhý pre štrukturálnu analýzu. Tento prístup nezohľadňuje existujúcu väzbu medzi dynamikou tekutiny a dynamikou konštrukcie.

Tento prístup bol použitý pri analýze VRČ EMO12. Výpočet bol urobený výpočtovými programami, ktoré riešia fyzikálne problémy pomocou numerických metód. Dynamický výpočet kvapaliny bol urobený programom S-TRAC/HAUPT a štrukturálna štrukturálny dynamická odozva bola vypočítaná programom ANSYS. Pre tieto analýzy boli vytvorené dva rozdielne modely, jeden pre termo-hydraulické analýzy a jeden pre štrukturálne analýzy.

<u>Združený prístup</u> - presnejšie popisuje skutočný proces, pretože na jednom výpočtovom modeli súčasne rieši šírenie podtlakovej vlny v chladive aj dynamickú odozvu namáhaných VRČ a zároveň zohľadňuje vzájomnú interakciu tekutiny a konštrukcie (FSI – Fluid Structure Interaction).

Analýza dynamického namáhania vnútroreaktorových častí reaktora **MO34 VVER 440/V213** bola urobená realistickým <u>"Združeným prístupom". Na výpočet boli použité trojrozmerné konečno-prvkové programy</u> MSC.Patran a MSC.Dytran.

Pri výpočte boli prijaté tieto predpoklady:

1. Analyzované boli 2 prípady maximálnej projektovej LOCA, ktoré predstavujú maximálny pesimistický prípad namáhania VRČ:

- okamžité roztrhnutie vstupného (studeného) nátrubku LOCA SV
- okamžité roztrhnutie výstupného (horúceho) nátrubku LOCA HV
- Pri globálnom termo-hydraulickom výpočte programom RELAP 5 boli počiatočné hodnoty tlaku a teploty primárneho chladiva uvažované pre výkon reaktora 100% N_{nom}.
- 3. Problém bol riešený výpočtovým kódom MSC.DYTRAN založenom na metóde konečných prvkov.
- 4. Vo výpočtovom modeli boli modelované všetky základné vnútroreaktorové konštrukcie šachta reaktora, dno šachty reaktora, kôš aktívnej zóny a blok ochranných rúr.
- 5. Na stykových plochách medzi VRČ s TNR boli definované kontakty.
- 6. Vo výpočtovom modeli bola rešpektovaná tuhosť pružín pre blok ochranných rúr a anuloidových prítlačných segmentov ŠR.
- 7. Pre hodnotenie prípustnosti deformácií a napätosti vnútroreaktorových konštrukcií boli použité príslušné normatívne dokumenty platné v SR pre jadrovo energetické zariadenia **[II.4]**, **[II.5]**, **[II.6]**.

7.2.2.5 Výpočtový model

Hlavné komponenty VRČ reaktora VVER 440 sú šachta reaktora, dno šachty, kôš aktívnej zóny a blok ochranných rúr. Tieto konštrukcie sú spojené navzájom a uložené v reaktore tak, aby bola zabezpečená ich demontáž, kontrola, čiastočná oprava ako aj kontrola vnútorného povrchu tlakovej nádoby reaktora. Šachta reaktora podopiera kôš aktívnej zóny a blok ochranných rúr, usmerňuje tok primárneho chladiva do spodnej časti reaktora a oddeľuje horúce slučky od studených. V hornej časti je šachta reaktora fixovaná elastickými rúrkami umiestnenými medzi veko TNR a prírubu šachty reaktora. V dolnej časti je šachta reaktora vedená ôsmimi perami privarenými k valcovej časti tlakovej nádoby reaktora. Tieto perá sú významné z hľadiska bezpečnosti, pretože zabraňujú priečnemu pohybu šachty reaktora, ale umožňujú radiálnu a osovú tepelnú rozťažnosť. Dno šachty reaktora pozostáva z eliptického perforovaného dna, valcového plášťa, hornej a dolnej kovanej mreže a 37 ochranných rúr pre HRK. V týchto rúrach sa nachádza palivová časť HRK kaziet, keď sú v dolnej polohe t.j. aj v prípade LOCA havárie.

Kôš aktívnej zóny zabezpečuje zníženie toku neutrónov na TNR a chráni integritu palivových kaziet v prípade tlakových rozdielov vo vnútri VRČ. V dolnej doske koša aktívnej zóny sú otvory pre prechod havarijných a regulačných kaziet. Na hornom prstenci koša aktívnej zóny je uložený blok ochranných rúr. Blok ochranných rúr je pritláčaný horným blokom TNR čím zabraňuje osové posunutie aktívnej zóny, koša aktívnej zóny a dna šachty reaktora pri všetkých prevádzkových podmienkach. Pozostáva z dolnej kruhovej dosky pre spojenie s KAZ a hornej dosky, ktorá slúži ako oporná štruktúra pre pružinové bloky.

Analýza dynamického namáhania VRČ VVER 440/V213 bola urobená realistickejším "**Združeným prístupom**". Pri tomto prístupe sa v jednom výpočtovom modeli súčasne rieši dynamika tekutiny aj odozva oceľových vnútorných konštrukcií na dynamické tlakové zmeny, ktoré nastanú pri LOCA havárii. Štrukturálna časť výpočtového MKP modelu VRČ zahŕňa šachtu reaktora, dno šachty reaktora, kôš aktívnej zóny a blok ochranných rúr. Kvapalinová časť modelu zahŕňa celý objem primárneho chladiva vo vnútri reaktora.

Geometria modelu a sieť konečných prvkov boli urobené programom MSC.Patran, bolo použitých 150 000 osemuzlových Lagrange masívnych prvkov a 270 000 osemuzlových masívnych Euler prvkov. Štrukturálna časť výpočtového modelu je na **Obrázok 7.2.2-1** a kvapalinová (fluidná) časť na

Obrázok 7.2.2-2. Vzájomná interakcia medzi vnútornými konštrukciami a kvapalinou bola modelovaná prostredníctvom Arbitrary Lagrange Euler (ALE) coupling **[III.7]**.

Pri výpočte boli definované nasledovné predpoklady:

1. vnútorný povrch tlakovej nádoby reaktora bol považovaný ako pevná okrajová hranica pre primárne chladivo aj pre nasledovné kontakty definované medzi šachtou reaktora a TNR:

- príruba šachty reaktora v hornej časti kruhové osadenie TNR;
- horizontálny tesniaci prstenec šachty reaktora oddeľujúci priestor studených a horúcich nátrubkov –TNR;
- drážky šachty reaktora vodiace perá privarené ku konzolám TNR

2. Príruba ŠR bola vo výpočte zaťažená na hornom okraji silou nahrádzajúcou účinok anuloidových tesniacich segmentov, ktoré sa pri utesnení hlavnej deliacej roviny reaktora deformujú v pružno-plastickej oblasti a tým pritláčajú prírubu ŠR na osadenie v TNR;

3. Pružinové bloky boli modelované konečnými prvkami typu SPRING s lineárnou závislosťou sila/stlačenie;

4. Vo výpočte bolo uvažované zaťaženie vlastnou tiažou všetkých modelovaných VRČ ako aj vlastnou tiažou primárneho chladiva, pričom hmotnosť palivových prútikov bola transformovaná do plášťa palivových kaziet;

5. Primárne chladivo bolo považované za ideálnu kvapalinu (mierne stlačiteľná, neviskózna). Dynamický výpočet bol riešený ako mechanická úloha bez výpočtu tepelného poľa v TNR. Rozloženie teplôt v reaktore bolo zohľadnené obmenou materiálových vlastností primárneho chladiva (kvapaliny).

6. V primárnom chladive sa počas analyzovaného krátkeho časového úseku LOCA havárie neuvažovalo s fázovou zmenou. Počas analyzovaného časového úseku nenastanú v reaktore také podmienky (tlak, teplota), ktoré by umožnili fázovú premenu primárneho chladiva. Je možné predpokladať, že dynamické účinky kvapaliny na VRČ sú nepriaznivejšie ako účinok pary.

Numerické analýzy odozvy VRČ reaktora **MO34 VVER 440/V213** na maximálnu hypotetickú LOCA haváriu boli riešené trojrozmerným programom MSC.Dytran. Tento výpočtový program je vhodný pre riešenie dynamického nelineárneho správania komponent, štruktúr a kvapalín a to najmä analyzovanie krátkych dynamických prechodových javov, ktoré zahŕňajú veľké deformácie, vysoký stupeň nelinearity a interakciu medzi štruktúrou a kvapalinou.

Program MSC.Dytran používa explicitný riešič, ktorý určuje stabilný výpočtový krok na základe veľkosti siete a rýchlosti prúdenia. Dynamické nesymetrické namáhanie vnútroreaktorových častí počas LOCA havárie trvá niekoľko desatín sekundy, a preto potrebný čas analýz bol iba 0.4s. Po tomto časovom úseku dynamické namáhanie vnútroreaktorových častí zanikne a sledované parameter sú dostatočne stabilné. Na druhej strane však, z dôvodu malých rozmerov konečných prvkov palivových kaziet riešič určil relatívne malý výpočtový krok, takže výpočet pozostával z asi 1.5 milióna výpočtových cyklov.









7.2.2.6 Zaťaženie modelu

7.2.2.6.1 Zaťaženie podtlakovou vlnou

Pri analyzovanej LOCA havárii bolo uvažované roztrhnutie v mieste zvaru primárneho potrubia slučky č.2 so studeným nátrubkom TNR pri variante **LOCA SV** resp. v mieste zvaru primárneho potrubia slučky č.2 s horúcim nátrubkom TNR pri variante **LOCA HV**. Pri tlakovodných reaktoroch dochádza v mieste roztrhnutia k prudkému poklesu tlaku. Vzniknutá tlaková vlna sa šíri v primárnom okruhu, vstupuje do reaktora, kde spôsobí dynamické namáhanie vnútroreaktorových častí.

Globálny termo-hydraulický výpočet LOCA havárie bol urobený programom RELAP5/Mod.3.2.2 na šesťslučkovom výpočtovom modeli systému chladenia reaktora. Tento program je určený na analýzy prechodových procesov a havárií v chladiacom systéme ľahko vodných reaktorov. Je založený na modeli 2 fázového nehomogénneho a nerovnovážneho termo-mechanického systému. Validácia výpočtového programu RELAP je vykonávaná v rámci programu CAMP (Code Application and Maintenance Program), ktorého je Slovensko (a teda aj VÚJE, a.s.) členom. Garantom a koordinátorom tohto programu je US NRC (United States Nuclear Regulatory Commission). Vývoj a validácia programu je vykonávaná v inštitúciách ISL (Information Systems Laboratories, Inc.) a Pennstate University.

Počiatočné podmienky globálneho termo-hydraulického výpočtu LOCA havárie urobeného programom RELAP5/Mod.3.2.2 sú uvedené **Tabuľka 7.2.2-1.** Časový priebeh tlakov vypočítaných programom RELAP5/Mod.3.2.2 pre roztrhnutý nátrubok a pre zostávajúce studené a horúce nátrubky sú znázornené pre **LOCA SV** na **Obrázok 7.2.2-3**, **Obrázok 7.2.2-4** a pre **LOCA HV** na **Obrázok 7.2.2-5**, **Obrázok 7.2.2-6**. Tieto priebehy tlakov boli použité ako okrajová podmienka v prierezoch nátrubkov pri dynamickej analýze urobenej pomocou programu MSC.Dytran. V každom nátrubku TNR bola definovaná tzv. okrajová podmienka FLOWT (časovo závislý tok). Tento parameter definuje časovo závislú materiálovú vlastnosť kvapalinového (Euler) konečného prvku predstavujúceho vtekajúci alebo vytekajúci prúd chladiva.

Označenie havárie	LOCA SV	LOCA HV		
Porušený nátrubok	vstupný	výstupný		
Počiatočný tlak [MPa]	12,90	12,56		
Počiatočná teplota [°C]	269	298		

Tabuľka 7.2.2-1 Počiatočné podmienky LOCA



Obrázok 7.2.2-3 LOCA SV - Priebeh tlaku v studených nátrubkoch TNR





LOCA SV2 - Tlak za horúcimi nátrubkami TRN

vůje



Obrázok 7.2.2-5 LOCA HV - Priebeh tlaku v horúcich nátrubkoch TNR

LOCA HV2 - Tlak za horúcimi nátrubkami TRN

Obrázok 7.2.2-6 LOCA HV - Priebeh tlaku v studených nátrubkoch TNR



LOCA HV2 - Tlak za studenými nátrubkami TRN

7.2.2.6.2 Zaťaženie vlastnou hmotnosťou VRČ a primárneho chladiva

Hmotnosti jednotlivých VRČ boli získané z projektovej dokumentácie a "Súhrnu vstupných dát pre deterministické analýzy bezpečnosti MO34" popísaných v PpBS MO34 [I.2].

Prehľad hmotností jednotlivých VRČ je v **Tabuľka 7.2.2-2**. Ako je zrejmé z hodnôt uvedených v tabuľke, modelovanie ŠR, DŠR, KAZ a BOR bolo z hľadiska dodržania reálnej a modelovanej hmotnosti veľmi dobré. Vzhľadom na zložitosť konštrukcie palivovej časti PK a kaziet HRK bol modelovaný iba zjednodušený plášť všetkých týchto kaziet, pričom hmotnosti paliva každej kazety boli transformované do ich plášťov.

RVI	Hmotnosť podľa dokumentácie [kg]	Hmotnosť v modeli [kg]	Poznámka (týka sa modelu)
ŠR	37900	37900	
DŠR	30795	30795	
KAZ	22000	22000	
BOR	35200	35200	
РК	312 ks á 219	68328	Hmotnosť paliva transformovaná do plášťa PK
HRK	37 ks á 330	12210	Hmotnosť paliva transformovaná do plášťa HRK
Celkom		206 433	

Tabuľka 7.2.2-2 Hmotnosti VRČ

7.2.2.6.3 Zaťaženie ŠR prítlakom anuloidových rúrkových segmentov

Šachta reaktora je fixovaná pomocou rúrkových segmentov umiestnených medzi veko tlakovej nádoby reaktora a prírubu šachty. Počas uťahovania veka reaktora sa tieto rúrky stláčajú a pritláčajú prírubu šachty k osadeniu nádoby reaktora. Vo výpočtoch bol tento efekt simulovaný prítlačnou silou na hornej ploche príruby.

7.2.2.6.4 Zaťaženie prítlačnými silami od pružinových blokov BOR

Blok ochranných rúr má po obvode dolnej časti plášťa privarené tri krúžky. Na týchto krúžkoch je umiestnených 72 pružinových blokov BOR. Teleskopické pružiny pritláčajú (fixujú) BOR, KAZ a DŠR v osovom smere a tým zaisťujú ich polohu vo všetkých pracovných režimoch. Pružinové bloky boli vo výpočte modelované prvkami typu SPRING s lineárnou závislosťou sila/stlačenie, výpočtové parametre sú uvedené v **Tabuľka 7.2.2-3**.

Devementes provětím		Pružinové bloky BOR				
Parametre pruzin	Rurkove segmenty SR	ΤΥΡΙ	TYP II			
Počet pružín	6	60	12			
Sila pružiny [N]	1 510 000	11768	5884			
Celková sila pružín [N]	9 063 000	706 080	70 608			
Stlačenie pružín [mm]	5	36	36			
Tuhosť pružiny [N/mm]	302 000	327	163,5			
Celková tuhosť pružín [N/mm]	1 812 000	19 613	1 961			

Tabuľka 7.2.2-3 Parametre pružín

7.2.2.6.5 Okrajové podmienky a modelovanie kontaktov

Rovina symetrie modelu bola zvolená rovina XY globálneho kartézskeho súradného systému. Okrajová podmienka UZ=0 bola uvažovaná pre všetky uzly ležiace v tejto rovine symetrie. V dolnej časti ŠR je dosadacia plocha a 3 perá, ktoré centrujú dno šachty reaktora. Na hornej doske DŠR sú 3 čapy ¢120, na ktoré sa centruje kôš aktívnej zóny otvormi v jeho dolnej doske. Po obvode dolnej dosky BOR sú tri drážky, pomocou ktorých sa BOR ustavuje a centruje perami voči KAZ. Tieto konštrukčné prvky spolu s pružinovými blokmi zaisťujú, že VRČ sú vzájomne pritláčané a zabezpečené voči vzájomnému pootočeniu počas prevádzky.

Vzhľadom na uvedené skutočnosti boli vo výpočtovom modeli všetky vzájomné kontaktné plochy VRČ modelované ako pevné spojenie. Pri dynamickom výpočte boli teda všetky VRČ (ŠR, DŠR, KAZ a BOR) uvažované ako jedno teleso, ktoré je zavesené na osadení v TNR, centrované na horizontálnom tesniacom prstenci a vedené v osovom smere ôsmimi perami v dolnej časti ŠR. Na stykových plochách medzi VRČ a TNR boli definované nasledovné kontakty:

1. Šachta reaktora je prírubou zavesená na osadenie v hornej časti TNR a je pritáčaná silou od deformovaných anuloidových rúrkových segmentov. Kontakt bol definovaný medzi dolnou plochou príruby ŠR a dosadacou plochou na osadení TNR a taktiež medzi vonkajším obvodom príruby ŠR a stenou TNR.

2. Šachta reaktora je centrovaná v mieste horizontálneho rozdeľovacieho prstenca, ktorý labyrintovým tesnením oddeľuje priestor studených nátrubkov od priestoru horúcich nátrubkov. Kontakt bol definovaný medzi vonkajšou obvodovou plochou tesniaceho prstenca ŠR a vnútorným povrchom prstenca TNR.

3. V dolnej časti je ŠR vedená v osovom smere 8 drážkam a 8 perami privarenými na konzoly TNR, čím je ŠR počas prevádzky zaistená proti pootočeniu a vibráciám. Vzájomný kontakt bol definovaný na stykových plochách modelovaných drážok ŠR s príslušnými perami. Kontakt definovaný medzi drážkami šachty reaktora a vodiacimi perami umožňuje voľné posuvy týchto drážok šachty v radiálnom a osovom smere a zabraňuje ich posuvu iba v tangenciálnom smere t.j. v smere normály kontaktnej plochy.

7.2.2.6.6 Modelovanie prietočných prierezov

Výpočtový model musí zachovať veľkosť skutočných prietočných prierezov VRČ, aby pri šírení tlakovej vlny od miesta roztrhnutia do TNR a do vnútorných častí jednotlivých VRČ boli zachované reálne podmienky

vüje

prúdenia primárneho chladiva. Hlavné rozmery VRČ boli modelované presne podľa výkresovej dokumentácie, avšak v niektorých miestach mreží a perforácií s veľkým množstvom otvorov museli byť modelované náhradné prietočné prierezy. Tieto zjednodušenia boli nutné najmä z dôvodu definovania interakcie medzi konštrukciou VRČ a primárnym chladivom. Prietočné prierezy podľa výkresovej dokumentácie, prierezy definované v modeli ako aj ich percentuálne odchýlky sú uvedené v **Tabuľka 7.2.2-4**.

Tabuľka 7.2.2-4 Prietočné prierezy

Popis prierezu	Hlavné rozmery prierezu [mm]	Skutočný prierez [mm ²]	Modelovaný prierez [mm ²]	Rozdiel [%]
Vstupné nátrubky (6x)	φ 4 96	1159323	1159323	0
Prierezy medzi ŠR a TNR	φ3542 / φ3300	1300434	1300434	0
Oproti AZ	φ3542 / φ3230	1659440	1659440	0
Horný okraj drážky	φ3542 / φ3196	1831036	1831036	0
Dolný okraj drážky	φ3542 / φ3145	2085027	2085027	0
Dolný okraj ŠR	φ3542 / φ3065	2475213	2475213	0
Štrbina medzi DŠR a TNR	φ3542 / φ3005	2761255	2761255	0
Perforácia eliptického DŠR - 1362 otvorov	1362 x φ40 1 x φ480	1892456	1925326	+1,74
Prierez medzi doskou DŠR a eliptickým dnom	ф 290 5	6627995	6627995	0
Perforácia dolnej dosky dna ŠR	1662 otvorov	2088531	2045236	-2,07
Prietočné prierezy v hornej doske dna ŠR otvor φ76mm so škrtiacou clonou φ50mm	312 x φ50	612610	613016	+0,066
Prietočné prierezy v dne koša AZ	φ96	2258328	2276975	+0,83
Prietočné prierezy v dolnej doske BOR	φ85	1770445	1729278	-2,33
Perforácia ŠR v oblasti výstupného nátrubku	1302 x 	1047130	1025641	-2,05
Výstupné nátrubky	φ496	1159323	1159323	0

7.2.2.7 Materiálové charakteristiky

Všetky VRČ (šachta reaktora, dno šachty reaktora, kôš aktívnej zóny, blok ochranných rúr) sú vyrobené z titanom stabilizovanej austenitickej nehrdzavejúcej ocele 08CH18N10T podľa normy GOST 5632-72. Oceľ je ekvivalentná oceli 17247.4 podľa STN 417247 (Slovenská technická norma).

V normatívnych dokumentoch **[II.4]**, **[II.6] a [II.7]** sú pre oceľ 08CH18N10T a teplotu 300°C uvedené zaručené minimálne hodnoty mechanických vlastností $R_p^{0.2}$ =162MPa a R_m =358MPa. Jednotlivé VRČ sú zvarené z polotovarov (prstenec, mreža, rúrka, dno atď.), pre ktoré sú skutočné hodnoty medze klzu $R_p^{0.2}$ a medze pevnosti R_m uvedené v príslušných pasportoch **[I.3]**, **[I.4]**, **[I.5]**, **[I.6]** pre **3.blok EMO** a v pasportoch **[I.7]**, **[I.8]**, **[I.9]**, **[I.10]** pre **4.blok EMO**. Pri kontrolnom výpočte na statickú pevnosť (popísanom v Kap.7.2.2.10) boli pri posudzovaní napätí použité tieto skutočné hodnoty z pasportov. Modul pružnosti v ťahu E bol prevzatý z **[II.7]**. Pre jednotlivé polotovary sú hodnoty mechanických vlastností zhrnuté pre VRČ EMO 3.blok v Tabuľka 7.2.2-5 a pre VRČ EMO 4.blok v Tabuľka 7.2.2-6.

Vo výpočte bol použitý lineárne elastický materiálový model pre štrukturálnu časť (Lagrange elementy) modelu VRČ. Tlmenie bolo použité podľa odporučenia v manuáli programu MSC.Dytran [III.14].

Pre primárne chladivo (Euler elementy) bol použitý materiálový model mierne stlačiteľnej kvapaliny. Vo výpočtoch boli pre tento typ materiálu zadané parametre Hustoty ρ a Bulk modul. Bolo uvažované, že počas analyzovaného časového úseku LOCA havárie nedôjde vo vnútri reaktora k fázovej zmene primárneho chladiva.

EMO - 3. blok										
			Teplot	a 20 °C		Teplota 325 °C				
U8CN18N101		R _m	R_p^{02}	Ε ρ		R _m R _p ⁰²		Е	ρ	
VRČ	Polotovar	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[kg/m ³]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[kg/m ³]	
	Prstenec 1	544	239	201000	7900	372	168	186000	7800	
ora	Prstenec 2	518	234	201000	7900	390	180	186000	7800	
eakt	Prstenec 3	553	260	201000	7900	392	209	186000	7800	
hta r	Prstenec 4	535	219	201000	7900	371	166	186000	7800	
Šac	Prstenec 5	561	270	201000	7900	399	183	186000	7800	
	Prstenec 6	545	237	201000	7900	377	173	186000	7800	
	Prstenec 1	550	223	201000	7900	386	171	186000	7800	
tora	Prstenec 2	559	226	201000	7900	387	177	186000	7800	
eakt	Prstenec 3	569	275	201000	7900	392	201	186000	7800	
hty ı	Dno	535	236	201000	7900	373	163	186000	7800	
šac	Mreža horná	565	283	201000	7900	404	236	186000	7800	
Dno	Mreža dolná	538	266	201000	7900	382	206	186000	7800	
	Rúrky	541	288	201000	7900	358	167	186000	7800	
	Prstenec 1	555	232	201000	7900	392	163	186000	7800	
	Prstenec 2	545	205	201000	7900	390	196	186000	7800	
KAZ	Prstenec 3	558	233	201000	7900	381	164	186000	7800	
	Prstenec 4	552	236	201000	7900	391	172	186000	7800	
	Dno	545	248	201000	7900	358	181	186000	7800	
	Horná doska	558	239	201000	7900	377	171	186000	7800	
R	Dolná doska	532	241	201000	7900	377	180	186000	7800	
BC	Plášť	594	251	201000	7900	410	180	186000	7800	
	Rúrky	546	-	201000	7900	358	185	186000	7800	

Tabuľka 7.2.2-5 VRČ EMO 3.blok - Základné materiálové vlastnosti ocele 08CH18N10T

* polotovar na výrobu príslušného dielu VRČ



EMO – 4. blok											
00			Teplot	a 20 °C		Teplota 325 °C					
08Cn18N101		R _m R _p ⁰²		Ε ρ		R _m R _p ⁰²		E	ρ		
VRČ	Polotovar	[Map]	[MPa]	[MPa]	[kg/m ³]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[kg/m ³]		
	Prstenec 1	538	232	201000	7900	368	166	186000	7800		
ora	Prstenec 2	558	255	201000	7900	392	183	186000	7800		
eakt	Prstenec 3	557	242	201000	7900	380	182	186000	7800		
hta r	Prstenec 4	556	239	201000	7900	388	187	186000	7800		
Šacl	Prstenec 5	557	237	201000	7900	394	176	186000	7800		
	Prstenec 6	535	223	201000	7900	378	159	186000	7800		
	Prstenec 1	559	275	201000	7900	399	184	186000	7800		
ora	Prstenec 2	555	261	201000	7900	358	185	186000	7800		
eakt	Prstenec 3	563	234	201000	7900	382	172	186000	7800		
hty r	Dno	538	265	201000	7900	369	214	186000	7800		
šac	Mreža horná	540	273	201000	7900	380	218	186000	7800		
Dno	Mreža dolná	536	246	201000	7900	401	194	186000	7800		
	Rúrky	554	221	201000	7900	358	175	186000	7800		
	Prstenec 1	565	209	201000	7900	390	160	186000	7800		
	Prstenec 2	563	234	201000	7900	388	173	186000	7800		
KAZ	Prstenec 3	572	214	201000	7900	392	164	186000	7800		
	Prstenec 4	564	229	201000	7900	390	158	186000	7800		
	Dno	529	222	201000	7900	373	187	186000	7800		
	Horná doska	560	266	201000	7900	387	191	186000	7800		
R	Dolná doska	547	242	201000	7900	390	186	186000	7800		
BO	Plášť	599	346	201000	7900	420	292	186000	7800		
	Rúrky	541	-	201000	7900	358	172	186000	7800		

Tabuľka 7.2.2-6 VRČ EMO 4.blok - Základné materiálové vlastnosti ocele 08CH18N10T

* polotovar na výrobu príslušného dielu VRČ

7.2.2.8 Popis a rozbor výsledkov pre haváriu LOCA SV

Namáhanie vnútroreaktorových častí počas LOCA havárie je úmerné poklesu tlaku z nominálnej hodnoty v reaktore na tlak sýtosti pary pri danej teplote chladiva v roztrhnutom nátrubku. Z tohto dôvodu sa predpokladajú nepriaznivejšie podmienky v prípade uvažovania LOCA havárie na studenej vetve primárneho okruhu (LOCA SV), pretože pokles tlaku je väčší ako v prípade roztrhnutia horúcej vetvy (LOCA HV). Okrem toho šachta reaktora je perforovaná v oblasti horúcich nátrubkov a preto dopad namáhania na šachtu reaktora zanikne rýchlejšie v prípade LOCA HV. Priebehy tlaku a rýchlosti kvapaliny (primárneho chladiva), deformácie a napätia VRČ boli získané z numerickej simulácie odozvy VRČ na LOCA haváriu.

7.2.2.8.1 Priebeh tlakov - LOCA SV

Symetrický model VRČ bol použitý pri dynamickej analýze pri LOCA havárii. Zvislá rovina symetrie pretína horizontálne osi nátrubkov TNR slučiek č.2 a č.5. Zostávajúce dva modelované nátrubky boli považované za nátrubky slučiek č.1 a č.6. Pri dynamickom výpočte boli vo vybraných miestach sledované časové priebehy (Time History–THS- Files) tlaku v primárnom chladive, deformácie (posunutia) a napätia VRČ. Z dôvodu jednoduchšieho a prehľadnejšieho popisu a znázornenia výsledkov výpočtov bol definovaný nasledovný systém symbolov.

Prvá časť symbolu popisuje variant uvažovanej LOCA havárie, kde "**S**" znamená roztrhnutie studeného nátrubku (**LOCA SV**) a "**H**" roztrhnutie horúceho nátrubku (**LOCA HV**).

Druhá časť symbolu popisuje polohu miesta v obvodovom smere. Všetky sledované miesta boli vybrané vo zvislých rovinách symetrie nátrubkov TNR. Príslušné symboly sú N2, N1, N6 a N5, ako je to znázornené na Obrázok 7.2.2-7 a Obrázok 7.2.2-8. Posledná časť symbolu definuje polohu miesta v osovom smere (vertikálna os modelu je v smere globálnej osi Y). Vo výpočtovom modeli bolo definovaných 14 horizontálnych rezových rovín označených Y1, Y2,Y3... Y14 (znázornených na Obrázok 7.2.2-9). Tieto roviny boli zvolené s ohľadom na predpokladané maximálne namáhania, geometrické nespojitosti ŠR (napr. zmena hrúbky steny), v blízkosti definovaných okrajových podmienok a kontaktov.

<u>Príklad označenia</u>: Variant havárie LOCA SV, miesto ležiace vo zvislej rovine symetrie nátrubku slučky č.2 (N2) a zároveň v horizontálnej rezovej rovine Y1 (pod prírubou ŠR) má výsledky označené symbolom SN2Y1.

Pri variante postulovanej havárie **LOCA SV** boli pre sledovanie priebehu tlaku zvolené 4 miesta v blízkosti vonkajšieho povrchu šachty reaktora **SN2Y5**, **SN1Y5**, **SN6Y5** a **SN5Y5**. Priebeh tlaku pre tieto miesta je na **Obrázok 7.2.2-11**. Prudký pokles tlaku je v roztrhnutom nátrubku slučky č.2 a pozvoľnejší pokles tlaku v ostatných sledovaných nátrubkoch slučiek č.1, 6 a 5.

Na **Obrázok 7.2.2-10** je znázornený rozdiel tlakov pôsobiacich na stenu ŠR z jej vnútornej a vonkajšej strany oproti roztrhnutému nátrubku slučky č.2. v horizontálnej rovine **Y5**. Pri variante havárie LOCA SV bol zistený maximálny tlakový rozdiel $\Delta p=5,87$ MPa v čase **5ms**.

Tlak primárneho chladiva bol sledovaný aj priestore medzi TNR a ŠR v rôznych miestach označených:

- SN2Y7, SN2Y8, SN2Y9, SN2Y10;
- SN1Y7, SN1Y8, SN1Y9, SN1Y10;
- SN6Y7, SN6Y8, SN6Y9, SN6Y10;
- SN5Y7, SN5Y8, SN5Y9, SN5Y10.

Priebehy vypočítaných tlakov sú na **Obrázok 7.2.2-12**, grafické znázornenie rozloženia tlaku v priestore medzi ŠR, DŠR a TNR vo vybraných časových okamihoch je na **Obrázok 7.2.2-15**.

Vo vnútornom priestore VRČ bol priebeh tlaku sledovaný v tesnej blízkosti valcového plášťa DŠR vo zvislých rovinách symetrie nátrubkov slučiek č.2, č.5 a v troch horizontálnych rovinách Y11, Y12 a Y13. Symboly boli doplnené písmenami VN, takže označenie je SN2VNY11, SN2VNY12, SN2VNY13, SN5VNY11, SN5VNY12 a SN5VNY13, priebehy tlaku sú znázornené na Obrázok 7.2.2-13.

Vo vnútri KAZ bol tlak primárneho chladiva sledovaný v troch rôznych horizontálnych rovinách **Y7**, **Y8** a **Y9** v miestach označených symbolmi **KAZ Y7**, **KAZ Y8** a **KAZ Y9**, priebehy tlaku sú na **Obrázok 7.2.2-14**.

V oblasti BOR bol priebeh tlaku taktiež sledovaný iba v strede a v troch rovinách Y2, Y4 a Y5, v miestach označených symbolmi BOR Y2, BOR Y4 a BOR Y5, pre ktoré sú priebehy tlakov na Obrázok 7.2.2-14.

Zhrnutie výsledkov tlaku primárneho chladiva – LOCA SV

Počas LOCA SV havárie tlak v roztrhnutom nátrubku klesol z nominálnej hodnoty na hodnotu tlaku sýtosti v mieste roztrhnutia. Okamžite po vzniku havárie pôsobil oproti roztrhnutému nátrubku na stenu ŠR tlakový rozdiel. Tlaková vlna sa šírila od roztrhnutého nátrubku dolu do priestoru medzi TNR a ŠR a cez perforované eliptické dno do vnútra VRČ. Táto tlaková vlna spôsobila nesymetrické namáhanie VRČ. Maximálna hodnota tohto rozdielu tlakov $\Delta p=5.87$ MPa bola zistená v čase 5ms.

Získané priebehy vypočítaných tlakov primárneho chladiva korešpondujú s výsledkami experimentov popísaných v **[III.10]**, **[III.11]**, **[III.12]**. Tieto experimenty boli urobené ešte v roku 1984 vo SVÚSS Praha-Běchovice na skúšobnom zariadení modelujúcom vnútroreaktorové časti reaktora typu VVER 440 v mierke 1:8. Zariadenie umožňovalo robiť experimenty pri parametroch (tlak, teplota) zodpovedajúcich reálnym prevádzkovým podmienkam. Systém zberu a spracovania dát umožňoval registrovať šírenie rázových tlakových vĺn v časovom intervale desiatok milisekúnd. Jedným zo záverov experimentov bolo, že k utlmeniu rázovej vlny dochádza po cca 8ms.

Ako už bolo spomenuté, pri výpočtoch popísaných v tejto kapitole **PpBS MO34** bol maximálny rozdiel tlaku pôsobiaci na stenu šachty reaktora oproti roztrhnutému nátrubku zistený v čase **5ms**. Po tomto časovom okamihu sa tlakový rozdiel v priestore VRČ vyrovnal (približne v čase 50ms) a dynamické namáhanie vnútroreaktorových častí zaniklo v čase približne 100ms. Výsledky výpočtov šírenia tlakovej vlny počas LOCA havárie sú v dobrej zhode s výsledkami experimentu popísanými v [III.10], [III.11], [III.12].







Obrázok 7.2.2-8 Prstenec studených nátrubkov TNR - označenie miest v obvodovom smere





Obrázok 7.2.2-9 Systém označenia miest symbolmi – LOCA SV



Obrázok 7.2.2-10 LOCA SV - Priebeh tlakov pôsobiacich na stenu ŠR oproti nátrubku SN2

Obrázok 7.2.2-11 LOCA SV - Priebeh tlaku v studených nátrubkoch SN2, SN1, SN6 a SN5



Priebeh tlaku v studených nátrubkoch













vūje





7.2.2.8.2 Deformácie vnútroreaktorových konštrukcií – LOCA SV

Priebehy radiálneho posunutia steny ŠR boli sledované v priesečníku horizontálnej roviny studených nátrubkov Y5 a zvislej roviny symetrie nátrubku slučky č.2. Vypočítané priebehy posunutí pre toto miesto sú na **Obrázok 7.2.2-16**. Prvé maximum $\Delta x=5,1mm$ radiálneho posunutia steny ŠR oproti roztrhnutému nátrubku bolo dosiahnuté v rovnakom čase **0,005s** ako maximálny rozdiel tlakov pôsobiacich na stenu ŠR (viď **Obrázok 7.2.2-10**). Maximálna vypočítaná deformácia steny ŠR oproti studenému nátrubku slučky č.2 však bola až **5,8mm** v čase **28ms**. Je to spôsobené superpozíciou posuvov spôsobených Δp pôsobiaceho v danom mieste na stenu ŠR a celkovou deformáciou ŠR od nesymetricky šíriacej sa podtlakovej vlny v medzikruhovom priestore medzi ŠR a TNR.

Ďalšie miesta pre sledovanie deformácie steny ŠR a DŠR boli zvolené pod roztrhnutým nátrubkom slučky č.2 v horizontálnych rezových rovinách Y6, Y7, Y8, Y9, Y11, Y12, Y13 a Y14. Časové priebehy v týchto miestach sú zobrazené na **Obrázok 7.2.2-18**.

Počas normálnej prevádzky palivová časť kazety HRK je prevažne umiestnená v koši aktívnej zóny a absorpčná časť sa nachádza v bloku ochranných rúr. V prípade LOCA havárie tieto HRK padajú dolu a ich absorpčná časť sa presunie do koša aktívnej zóny a palivová časť do dna šachty reaktora. Kritérium prijateľnosti pre vnútroreaktorové časti požaduje, aby bola zaistená pohyblivosť HRK pri všetkých prevádzkových podmienkach vrátane projektových havárií. Havarijné a regulačné kazety majú šesťuholníkový prierez s rozmerom cca 145 mm. Kritickým miestom pre posuv havarijných a regulačných kaziet sú šesťuholníkové otvory (rozmer 150mm) v dolnej mreži koša aktívnej zóny. Maximálne dovolené priečne posunutie v tomto kritickom mieste teda je (150-145)/2=2,5mm. V prípade vzniku trvalej plastickej deformácie VRČ v tomto mieste väčšej ako 2,5mm by mohlo dôjsť k vzpriečeniu HRK a nebola by zaistená pohyblivosť HRK. Maximálne vypočítané priečne posunutie v tomto kritickom mieste je znázornené na Obrázok 7.2.2-17. Z tohto grafu je zrejmé, že maximálne vypočítané posunutie 0,87 je menšie ako prípustné (2,5mm) a pohyb havarijných regulačných kaziet je zaistený t.j. kritérium prijateľnosti DB-A3/e je splnené.

Zhrnutie výsledkov posunutí VRČ – LOCA SV

Je nutné pripomenúť, že celkové posuvy šachty reaktora sú obmedzené pomocou vodiacich pier a drážok šachty reaktora. Šachta reaktora je v hornej časti zavesená svojou prírubou na kruhovom osadení TNR. Bez spomenutých vodiacich pier by sa šachta pri analyzovanej LOCA havárii správala ako kyvadlo a deformácie v dolnej časti ŠR by mohli byť väčšie ako dovolené hodnoty.

Posunutie dolného konca šachty reaktora bolo pri experimente namerané cca **1mm** a vypočítané posunutie v tomto mieste bolo **-1,5mm / +0,915mm / -1,9mm**. Vypočítané priebehy radiálnych posunutí VRČ korešpondujú s výsledkami experimentov popísanými v [III.10], [III.11], [III.12].

vūje



Obrázok 7.2.2-16 LOCA SV - Priebeh radiálneho posunutia steny ŠR oproti nátrubku SN2

Obrázok 7.2.2-17 LOCA SV - Priebeh radiálneho posunutia dolnej dosky KAZ



Priebeh radiálneho posunutia dolnej dosky KAZ



Obrázok 7.2.2-18 LOCA SV - Priebeh radiálneho posunutia ŠR a plášťa DŠR





Obrázok 7.2.2-19 LOCA SV - Deformácia ŠR a DŠR (deformácie zväčšené 100x)

Part name / Označenie časti: PNM3436111907_S_C01_V

Page No. / Strana č.: 32/58

7.2.2.8.3 Napätosť vnútroreaktorových konštrukcií – LOCA SV

Pri dynamickej analýze VRČ boli sledované aj časové priebehy napätí v stene ŠR. Na **Obrázok 7.2.2-20** a **Obrázok 7.2.2-21** sú priebehy napätí v šachte reaktora.

Okamžite po roztrhnutí potrubia vznikne maximálne napätie v stene ŠR oproti roztrhnutému nátrubku. Maximálna hodnota redukovaného napätia $\sigma_{red}=209MPa$ bola vypočítaná v čase **5ms**. Toto maximum napätia sa neskôr presunulo k miestu kontaktu medzi horizontálnym tesniacim prstencom a TNR (viď prvý graf na Obrázok 7.2.2-21 – priebeh **SN2Y4**).

Zhrnutie výsledkov vypočítaných napätí – LOCA SV

Výsledky výpočtov napätí ukázali, že najviac namáhanou časťou vnútroreaktorových konštrukcií je šachta reaktora. Úroveň stavu napätosti ostatných vnútroreaktorových konštrukcií je významne nižšia. Na hodnotenie najviac namáhanej konštrukcie (ŠR) boli vybrané v stene šachty reaktora kritické rezy. Podrobná analýza vypočítaných napätí je popísaná v **Kap.7.2.2.10**. Rozloženie napätí v šachte reaktora pre rôzne časové okamihy je na **Obrázok 7.2.2-22**.

Vypočítané napätia vo vnútroreaktorových častiach splnili limity pre projektové havarijné situácie definované v príslušných normách a predpisoch [II.4], [II.5], [II.6].

Priebeh napätia σ_{red} v stene ŠR v rovine studených nátrubkov Y5 225 SN2Y5 200 SN1Y5 175 SN6Y5 150 SN5Y5 σ_{red} [MPa] 125 100 75 50 25 0 0 0.05 0.2 0.1 0.15 0.25 0.3 0.35 0.4 Čas [s]







vūje





Obrázok 7.2.2-22 LOCA SV - Redukované napätie v ŠR (deformácie zväčšené 100x)

7.2.2.9 Popis a rozbor výsledkov pre haváriu LOCA HV

7.2.2.9.1 Priebehy tlakov – LOCA HV

Pri variante postulovanej havárie LOCA HV boli pre sledovanie priebehu tlaku zvolené 4 miesta v blízkosti vonkajšieho povrchu šachty reaktora HN2Y2, HN1Y2, HN6Y2 a HN5Y2. Priebeh tlaku pre tieto miesta je na Obrázok 7.2.2-25. Prudký pokles tlaku je v roztrhnutom nátrubku slučky č.2 a pozvoľnejší pokles tlaku v ostatných sledovaných nátrubkoch slučiek č.1, 6 a 5. Na Obrázok 7.2.2-24 je znázornený rozdiel tlakov pôsobiacich na stenu ŠR z jej vnútornej a vonkajšej strany oproti roztrhnutého nátrubku slučky č.2. a v rovine "Y2". Maximálny tlakový rozdiel $\Delta p=3,47$ MPa počas LOCA HV havárie bol zistený v čase 0,011s.

Tlak primárneho chladiva bol sledovaný aj priestore medzi TNR a ŠR v rôznych miestach označených ako:

- HN2Y5, HN2Y6, HN2Y7, HN2Y8, HN2Y9, HN2Y10
- HN1Y5, HN1Y6, HN1Y7, HN1Y8, HN1Y9, HN1Y10
- HN6Y5, HN6Y6, HN6Y7, HN6Y8, HN6Y9, HN6Y10
- HN5Y5, HN5Y6, HN5Y7, HN5Y8, HN5Y9, HN5Y10

Priebehy vypočítaných tlakov sú na **Obrázok 7.2.2-26**, grafické znázornenie rozloženia tlaku v priestore medzi ŠR, DŠR a TNR vo vybraných časových okamihoch je na **Obrázok 7.2.2-29**.

Vo vnútornom priestore VRČ bol priebeh tlaku sledovaný v tesnej blízkosti valcového plášťa DŠR vo zvislých rovinách symetrie nátrubkov slučky č.2 a protiľahlého nátrubku slučky č.5 a v troch horizontálnych rovinách Y11, Y12 a Y13. Symboly boli doplnené písmenami VN, takže označenie je HN2VNY11, HN2VNY12, HN2VNY13, HN5VNY11, HN5VNY12 a HN5VNY13, priebehy tlaku sú znázornené na Obrázok 7.2.2-27.

Vo vnútri KAZ bol tlak primárneho chladiva sledovaný v troch rôznych horizontálnych rovinách **Y7, Y8** a **Y9** v miestach označených symbolmi **KAZY7, KAZY8** a **KAZY9**, priebehy tlaku sú na **Obrázok 7.2.2-28**.

V oblasti BOR bol priebeh tlaku taktiež sledovaný iba v strede a v troch rovinách Y2, Y4 a Y5, v miestach označených symbolmi BORY2, BORY4 a BORY5, pre ktoré sú priebehy tlakov na Obrázok 7.2.2-28.

Zhrnutie výsledkov tlaku primárneho chladiva – LOCA HV

Počas LOCA HV havárie tlak v roztrhnutom nátrubku klesal z nominálnej hodnoty na hodnotu tlaku sýtosti. Okamžite po vzniku havárie pôsobil oproti roztrhnutému nátrubku na stenu ŠR tlakový rozdiel. Tlaková vlna sa šírila od roztrhnutého nátrubku do priestoru medzi TNR a šachtou reaktora, ktorý však bol menší ako v prípade LOCA SV, pretože je ohraničený z hornej časti prírubou šachty reaktora a z dolnej časti horizontálnym tesnením medzi horúcou a studenou vetvou. Šachta reaktora je oproti horúcim nátrubkom perforovaná, a preto tlaková vlna vstupovala priamo do priestoru bloku ochranných rúr a ďalej sa šírila vo vnútri VRČ. Priebeh vypočítaného tlakového rozdielu pôsobiaceho na stenu ŠR je na **Obrázok 7.2.2-24**. Maximálna hodnota tohto rozdielu tlakov $\Delta p=3.47$ MPa bola vypočítaná v čase **11ms**.

Vypočítané priebehy radiálnych posunutí VRČ korešpondujú s výsledkami experimentov popísanými v[III.10], [III.11], [III.12].

Obrázok 7.2.2-23 Systém označenia miest symbolmi – LOCA HV







Obrázok 7.2.2-25 LOCA HV - Priebeh tlaku v studených nátrubkoch HN2, HN1, HN6 a HN5



Priebeh tlaku v horúcich nátrubkoch



Obrázok 7.2.2-26 LOCA HV - Priebeh tlaku v priestore medzi ŠR a TNR

Obrázok 7.2.2-27 LOCA HV - Priebeh tlaku vo vybraných miestach vo vnútri DŠR







vůje



Obrázok 7.2.2-29 LOCA HV - Rozloženie tlaku medzi VRČ a TNR

7.2.2.9.2 Deformácie VRČ – LOCA HV

Priebehy radiálneho posunutia steny ŠR boli sledované v priesečníku horizontálnej roviny horúcich nátrubkov "Y2" a zvislej roviny symetrie nátrubku slučky č.2. Vypočítané priebehy posunutí pre toto miesto sú na **Obrázok 7.2.2-30**. Maximum radiálneho posunutia Δx =4.3mm steny ŠR oproti roztrhnutému nátrubku bolo dosiahnuté v rovnakom čase 11ms ako maximálny rozdiel tlakov pôsobiacich na stenu ŠR (viď **Obrázok 7.2.2-24**).

Ďalšie miesta pre sledovanie deformácie steny ŠR a DŠR boli zvolené pod roztrhnutým nátrubkom slučky č.2 v horizontálnych rezových rovinách Y6, Y7, Y8, Y9, Y11, Y12, Y13 a Y14. Časové priebehy v týchto miestach sú zobrazené na **Obrázok 7.2.2-32**.

Na **Obrázok 7.2.2-34** je znázornený priebeh **osového posunutia (smer Y)** bodov príruby šachty reaktora (poloha bodov je zrejmá z Obrázok 7.2.2-33). Z týchto priebehov je zrejmé, že vo všetkých analyzovaných bodoch príruby šachty reaktora bolo počas analyzovaného časového úseku LOCA havárie "**Y** – **posunutie" záporné (smerom dolu)** a teda nedôjde k zdvihnutiu šachty reaktora.

Počas normálnej prevádzky palivová časť kazety HRK je prevažne umiestnená v koši aktívnej zóny a absorpčná časť sa nachádza v bloku ochranných rúr. V prípade LOCA havárie tieto HRK padajú dolu a ich absorpčná časť sa presunie do koša aktívnej zóny a palivová časť do dna šachty reaktora. Kritérium prijateľnosti pre vnútroreaktorové časti požaduje, aby bola zaistená pohyblivosť HRK pri všetkých prevádzkových podmienkach vrátane projektových havárií. Havarijné a regulačné kazety majú šesťuholníkový prierez s rozmerom 145 mm. Kritickým miestom pre posuv havarijných a regulačných kaziet sú šesťuholníkové otvory (rozmer 150mm) v dolnej mreži koša aktívnej zóny. Maximálne dovolené priečne posunutie v tomto kritickom mieste teda je (150-145)/2=2,5mm. V prípade vzniku trvalej plastickej deformácie VRČ v tomto mieste väčšej ako 2,5mm by mohlo dôjsť k vzpriečeniu HRK a nebola by zaistená pohyblivosť HRK. Maximálne vypočítané priečne posunutie v tomto kritickom mieste väčšej ako 2,5mm by mohlo dôjsť k vzpriečeniu HRK a nebola by zaistená pohyblivosť HRK. Maximálne vypočítané priečne posunutie v tomto kritickom mieste bolo pri LOCA HV iba 0,54mm. Časový priebeh posunutia v tomto mieste je znázornené na Obrázok 7.2.2-31. Z tohto grafu je zrejmé, že maximálne vypočítané posunutie 0,54mm je menšie ako prípustné (2,5mm) a pohyb

Obrázok 7.2.2-30 LOCA HV - Priebeh radiálneho posunutia steny ŠR oproti nátrubku HN2



Priebeh radiálneho posunutia steny ŠR oproti nátrubku - HN2Y2

Obrázok 7.2.2-31 LOCA HV - Priebeh radiálneho posunutia dolnej dosky KAZ





Obrázok 7.2.2-32 LOCA HV - Priebeh radiálneho posunutia ŠR a plášťa DŠR









vůje



Obrázok 7.2.2-35 LOCA HV - Deformácia ŠR a DŠR (deformácie zväčšené 100x)

Part name / Označenie časti: PNM3436111907_S_C01_V

Page No. / Strana č.: 45/58

7.2.2.9.3 Napätosť vnútroreaktorových konštrukcií – LOCA HV

Pri dynamickej analýze VRČ boli sledované aj časové priebehy napätí v stene ŠR. Na **Obrázok 7.2.2-36** a **Obrázok 7.2.2-37** sú priebehy napätí v šachte reaktora.

Okamžite po roztrhnutí potrubia vznikne maximálne napätie v stene ŠR oproti roztrhnutému nátrubku v reze HN2Y5 a maximálna hodnota redukovaného napätia σ_{red}=108,21MPa bola vypočítaná v čase 4ms. Po kontaktovaní labyrintového tesnenia ŠR s rozdeľovacím prstencom TNR maximálne napätie bolo v reze HN2Y3 a dosiahlo hodnotu 151,8MPa v čase 11ms.

Zhrnutie výsledkov vypočítaných napätí – LOCA HV

Výsledky výpočtov napätí ukázali, že najviac namáhanou časťou vnútroreaktorových konštrukcií je šachta reaktora. Úroveň stavu napätosti ostatných vnútroreaktorových konštrukcií je významne nižšia. Na hodnotenie najviac namáhanej konštrukcie (ŠR) boli vybrané v stene šachty reaktora kritické rezy. Podrobná analýza vypočítaných napätí je popísaná v **Kap**. **7.2.2.10**. Rozloženie napätí v šachte reaktora pre rôzne časové okamihy je na **Obrázok 7.2.2-38**.

Vypočítané napätia vo vnútroreaktorových častiach splnili limity pre projektové havarijné situácie definované v príslušných normách a predpisoch [II.4], [II.5], [II.6].



Obrázok 7.2.2-36 LOCA HV - Priebeh napätia v ŠR v rovine studených nátrubkov Y2

Obrázok 7.2.2-37 LOCA HV - Priebeh napätia v ŠR pod nátrubkami v rôznych rovinách





Obrázok 7.2.2-38 LOCA HV - Redukované napätie v ŠR (deformácie zväčšené 100x)

7.2.2.10 Kontrolný výpočet na statickú pevnosť

V Kap.7.2.2.8 a Kap.7.2.2.9 sú popísané výsledky dvoch variantov výpočtov stavu napätosti VRČ pri dynamickom namáhaní spôsobenom maximálnou projektovou LOCA haváriou. V kritických miestach jednotlivých VRČ boli počas výpočtu sledované časové priebehy napätí. V tejto kapitole je popísané zhodnotenie prípustnosti vypočítaných napätí z hľadiska statickej pevnosti.

Hodnotenie napätí bolo urobené podľa normatívnych dokumentov platných v SR pre jadrovú energetiku [II.4], [II.5], [II.6]. Dynamické analýzy VRČ pri rôznych variantoch LOCA havárie boli urobené MKP programom MSC.Dytran. Bol použitý kartézsky súradnicový systém, takže výsledkom výpočtov sú časové priebehy zložiek napätosti σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} vo všetkých Lagrange konečných prvkov._Pre najviac namáhané oblasti VRČ boli určené redukované napätia podľa nasledovného postupu:

- 1. V každom okamihu analyzovanej LOCA havárie sa zo zložiek napätia určili hlavné napätia $\sigma_1, \sigma_2,$ σ_3 , pre ktoré platí podmienka $\sigma_1 \ge \sigma_2 \ge \sigma_3$
- 2. Hlavné napätia σ_1 , σ_2 , σ_3 sa v každom okamihu označili σ_i , σ_i , σ_k
- 3. Podľa teórie maximálnych šmykových napätí sa vypočítali tri hodnoty redukovaného napätia:

$$(\sigma)_{ij,l} = (\sigma)_{i,l} - (\sigma)_{j,l}$$
$$(\sigma)_{jk,l} = (\sigma)_{j,l} - (\sigma)_{k,l}$$
$$(\sigma)_{ik,l} = (\sigma)_{i,l} - (\sigma)_{k,l}$$

4. Za redukované napätia v analyzovanej oblasti VRČ sa považovala absolútne najväčšia hodnota (σ) $= \max \{ (\sigma)_{ii}, (\sigma)_{ik}, (\sigma)_{ik} \}$

Maximálne vypočítané hodnoty redukovaného napätia (g) v sledovaných miestach VRČ sú uvedené v Tabuľka 7.2.2-7. Pre každé analyzované miesto sú v tejto tabuľke vždy uvedené a hodnotené iba maximálne hodnoty redukovaného napätia z vypočítaných napätí v troch prvkoch po hrúbke steny príslušnej VRČ.

Kontrolný pevnostný výpočet na statickú pevnosť

Dovolené napätie – pre časti zariadení a potrubia sa menovité dovolené napätie stanoví ako menšia z dvoch hodnôt v nasledujúcich vzťahoch:

$[\sigma] = \frac{R_m}{n_m} \qquad [\sigma] =$	$\frac{R_{p^{0,2}}}{n_{0,2}} $ (2.1)
--	--------------------------------------

R_m - medza pevnosti **R**_p^{0.2} - zmluvná medza klzu

 $R_p^{0.2}$ - zmluvná medza Klzu n_m - koeficient bezpečnosti podľa medze pevnosti n_m =2,6 *Coloret bezpečnosti podľa medze klzu* $n_{0.2}$ =1,5

Pri výpočte dovoleného napätia [o] podľa vzťahov (2.1) boli použité mechanických vlastnosti z pasportov [I.3], [I.4], [I.5], [I.6] pre 3.blok EMO (vid Tabulka 7.2.2-5) a z pasportov pre [I.7], [I.8], [I.9], [I.10] pre 4. blok EMO (viď Tabuľka 7.2.2-6). Použitie hodnôt materiálových vlastností z pasportov namiesto hodnôt z noriem nie je štandardný postup ale tento prístup bol schválený UJD SR v rámci hodnotenia LOCA analýz VRČ JE V2 Bohunice (2009) [II.14].

Pre posúdenie vypočítaných napätí bola pre príslušné posudzované miesto použitá najnižšia hodnota [σ] zistená pre obidva bloky.

Posúdenie napätia - pri kontrolnom výpočte na statickú pevnosť sa redukované napätie (σ) porovná s dovoleným napätím $[\sigma]$, pričom musí byť splnená podmienka:

$(\sigma) \leq \eta[$	$\sigma]$
-----------------------	-----------

(2.2)

kde

- (σ) redukované (zrovnávacie) napätie
- [o] dovolené nominálne napätie
- $\eta\square$ súčiniteľ pre príslušnú kategóriu napätí

Vypočítané napätia patria do kategórie miestnych membránových a ohybových napätí (σ)₂ Analyzovaná LOCA predstavuje havarijné podmienky, a preto pevnostná podmienka bude mať tvar podľa posledného riadku v **Tabuľka 7.2.2-8**.

$$[\sigma] \leq \eta[\sigma] \ (\sigma) \leq 1.8[\sigma]$$

Tabuľka 7.2.2-7 Maximálne redukované napätia pre jednotlivé rezy VRČ

LOCA SV			LOCA HV						
VRČ	Polotovar	Značka rezu	(σ) [MPa]	η .[σ] * [MPa]	VRČ	Polotovar	Značka rezu	(ơ) [MPa]	ղ .[σ] * [MPa]
ŠR	Prstenec 1	SN2Y1	130,62	199,2	ŠR	Prstenec 1	HN2Y1	118,39	199,2
ŠR	Prstenec 3	SN2Y3	124,36	218,4	ŠR	Prstenec 3	HN2Y3	151,77	218,4
ŠR	Prstenec 3	SN2Y4	179,02	218,4	ŠR	Prstenec 3	HN2Y4	68,5	218,4
ŠR	Prstenec 3	SN2Y5	209,02	218,4	ŠR	Prstenec 2	HN2Y2	108,21	218,4
ŠR	Prstenec 3	SN1Y5	82,8	218,4	ŠR	Prstenec 2	HN1Y2	56,15	218,4
ŠR	Prstenec 3	SN6Y5	84,0	218,4	ŠR	Prstenec 2	HN6Y2	30,62	218,4
ŠR	Prstenec 3	SN5Y5	88,99	218,4	ŠR	Prstenec 2	HN5Y2	40,74	218,4
ŠR	Prstenec 4	SN2Y6	165,39	199,2	ŠR	Prstenec 4	HN2Y6	36,44	199,2
ŠR	Prstenec 5	SN2Y7	151,0	211,2	ŠR	Prstenec 5	HN2Y7	44,41	211,2
ŠR	Prstenec 5	SN2Y8	153,38	211,2	ŠR	Prstenec 5	HN2Y8	44,19	211,2
ŠR	Prstenec 6	SN2Y9	52,62	190,8	ŠR	Prstenec 6	HN2Y9	27,91	190,8
ŠR	Prstenec 6	SN2Y10	9,45	190,8	ŠR	Prstenec 6	HN2Y10	8,50	190,8
ŠR	Prstenec 4	SN1Y6	67,44	199,2	ŠR	Prstenec 4	HN1Y6	43,69	199,2
ŠR	Prstenec 5	SN1Y7	93,59	211,2	ŠR	Prstenec 5	HN1Y7	41,60	211,2
ŠR	Prstenec 5	SN1Y8	101,81	211,2	ŠR	Prstenec 5	HN1Y8	47,64	211,2
ŠR	Prstenec 6	SN1Y9	63,25	190,8	ŠR	Prstenec 6	HN1Y9	34,06	190,8
ŠR	Prstenec 6	SN1Y10	23,80	190,8	ŠR	Prstenec 6	HN1Y10	10,81	190,8
ŠR	Prstenec 4	SN6Y6	76,95	199,2	ŠR	Prstenec 4	HN6Y6	39,99	199,2
ŠR	Prstenec 5	SN6Y7	104,63	211,2	ŠR	Prstenec 5	HN6Y7	35,78	211,2
ŠR	Prstenec 5	SN6Y8	127,33	211,2	ŠR	Prstenec 5	HN6Y8	45,74	211,2
ŠR	Prstenec 6	SN6Y9	49,95	190,8	ŠR	Prstenec 6	HN6Y9	31,36	190,8
ŠR	Prstenec 6	SN6Y10	37,19	190,8	ŠR	Prstenec 6	HN6Y10	21,3	190,8
ŠR	Prstenec 4	SN5Y6	74,64	199,2	ŠR	Prstenec 4	HN5Y6	34,49	199,2
ŠR	Prstenec 5	SN5Y7	90,73	211,2	ŠR	Prstenec 5	HN5Y7	34,26	211,2
ŠR	Prstenec 5	SN5Y8	97,21	211,2	ŠR	Prstenec 5	HN5Y8	47,56	211,2
ŠR	Prstenec 6	SN5Y9	37,71	190,8	ŠR	Prstenec 6	HN5Y9	30,54	190,8
ŠR	Prstenec 6	SN5Y10	14,74	190,8	ŠR	Prstenec 6	HN5Y10	8,53	190,8
DŠR	Prstenec 1-3	-	51,8	205,2	DŠR	Prstenec 1-3	-	31,4	205,2
DŠR	Dno	-	32,7	195,6	DŠR	Dno	-	33,3	195,6
DŠR	Horná mreža	-	27,6	261,6	DŠR	Horná mreža	-	21,9	261,6
DŠR	Dolná mreža	-	32,7	232,8	DŠR	Dolná mreža	-	22,5	232,8
DŠR	Rúrky HRK	-	29,8	200,4	DŠR	Rúrky HRK	-	10,4	200,4
KAZ	Prstenec 1-4	-	37,2	192,0	KAZ	Prstenec 1-4	-	8,8	192,0
KAZ	Dolná doska	-	75,6	217,2	KAZ	Dolná doska	-	36,6	217,2
BOR	Horná doska	-	22,7	205,2	BOR	Horná doska	-	12,5	205,2
BOR	Dolná doska	-	31,1	216,0	BOR	Dolná doska	-	16,7	216,0
BOR	Plášť	-	19,3	216,0	BOR	Plášť	-	11,3	216,0
BOR	Rúrky HRK	-	47,5	206,4	BOR	Rúrky HRK	-	35,1	206,4

• minimálna hodnota dovoleného napätia [σ] podľa vzťahov (2.1) pre príslušný polotovar a mechanické vlastnosti EMO 3.a 4. blok z pasportov [I.3] až [I.10].

Prevádzkový režim	Kategória redukovaných napätí	Skupina kategórií napätí	súčiniteľ η [-]
Normálne prevádzkové podmienky	Prosté membránové napätie σ_m	(σ) ₁	1
	Miestne memb.+prosté ohybové	(σ) ₂	1,3
Narušenie normálnych	Prosté membránové napätie σ_m	(σ) ₁	1,2
prevadzkových podmienok	Miestne memb.+prosté ohybové	(σ) ₂	1,6
	Prosté membránové napätie σ _m	(σ) ₁	1,4
	Miestne memb.+prosté ohybové	(σ) ₂	1,8

Tabuľka 7.2.2-8 Hodnoty súčiniteľa η pre príslušnú kategóriu napätí podľa NTD

Porovnaním hodnôt maximálneho vypočítaného redukovaného napätia (σ) s minimálnymi hodnotami η.[σ] uvedenými pre vybrané rezy v Tabuľka 7.2.2-7 zistíme, že <u>podmienka statickej pevnosti je splnená</u> <u>pre všetky analyzované a hodnotené miesta VRČ MO34</u>.

7.2.2.11 Závery

Táto kapitola **PpBS MO34** obsahuje popis a zhodnotenie výsledkov analýz odozvy **vnútroreaktorových častí reaktora MO34 VVER 440** na maximálnu projektovú haváriu, ktorá predstavuje najnepriaznivejšie namáhanie VRČ.

Cieľom týchto analýz bolo v zmysle noriem a predpisov platných v SR **[II.4]**, **[II.5] a [II.6]** skontrolovať splnenie pevnostných podmienok VRČ pri dynamickom namáhaní počas LOCA havárie a splnenie kritérií prijateľnosti **[II.8]** pre projektové havárie dotýkajúce sa vnútroreaktorových častí:

• DB-A3/e - je zabezpečená pohyblivosť kaziet HRK

• **DB-A7** - Všetky vnútorné časti jadrového reaktora musia odolať dynamickým účinkom pri abnormálnej prevádzke a pri projektových haváriách v rozsahu potrebnom na zaistenie bezpečného odstavenia jadrového reaktora, na udržanie podkritickosti a dostatočného chladenia aktívnej zóny

Analýzy dynamického namáhania VRČ reaktora **MO34 VVER 440/V213** boli urobené realistickým "<u>Združeným prístupom</u>" s využitím výpočtového programu MSC.Dytran, ktorý je schopných riešiť 3D explicitné MKP analýzy dynamického nelineárneho správania komponent, štruktúr a kvapalín. Získané výsledky sú bližšie k reálnemu procesu, ako by mal dvojkrokový prístup, pri ktorom sú najprv určené tlakové diferencie a následne výpočet dynamiky konštrukcie.

Uvažované boli nasledujúce dva prípady roztrhnutia potrubia PO :

- okamžité prasknutie vstupného (studeného) nátrubku TNR LOCA SV;
- okamžité prasknutie výstupného (horúceho) nátrubku TNR LOCA HV

Pri numerickej simulácii odozvy VRČ na LOCA haváriu boli vo vybraných miestach sledované časové priebehy (Time History Files) tlaku v primárnom chladive, deformácie (posunutia) a napätia vo vybraných rezoch vnútroreaktorových častí.

Na základe hodnotenia odozvy VRČ reaktora **MO34** na maximálne projektové LOCA havárie, predstavujúce najhorší scenár namáhania VRČ, môžeme konštatovať nasledujúce závery:

<u>Tlak primárneho chladiva</u>

Na základe vypočítaných priebehov tlaku v primárnom chladive vo vnútri reaktora, uvedených pre variant LOCA SV v Kap. 7.2.2.8.1 a pre variant LOCA HV v Kap.7.2.2.9.1, môžu byť uvedené nasledovné závery:

• Okamžite po roztrhnutí potrubia pôsobí na stenu šachty reaktora oproti roztrhnutému nátrubku tlakový rozdiel;

maximálne hodnoty tohto rozdielu tlakov bola zistená pri LOCA SV Δp=5.87 MPa v čase 5ms a pri LOCA HV Δp=3.47 MPa v čase 11ms

• Pri LOCA SV sa tlaková expanzná vlna šíri od porušeného studeného nátrubku medzikruhovým priestorom medzi TNR a ŠR potom pokračuje perforovaným eliptickým dnom do vnútra VRČ. Táto tlaková vlna spôsobuje nesymetrické namáhanie VRČ

• pri LOCA HV sa tlaková vlna šíri od porušeného horúceho nátrubku medzi TNR a ŠR iba v oblasti horúcich nátrubkov a cez perforáciu v hornej časti ŠR vstupuje priamo do vnútorného priestoru VRČ.

Tlakový rozdiel pôsobiaci v prvých okamihoch LOCA havárie na stenu ŠR je väčší pre variant LOCA SV,
 čo následne spôsobuje aj väčšie deformácie a namáhanie steny ŠR oproti roztrhnutému nátrubku ako pri
 LOCA HV variante.

Posunutia

Z výsledkov priebehov posunutí VRČ uvedených pre LOCA SV v Kap.7.2.2.8.2 a pre LOCA HV v Kap.7.2.2.9.2 je vidieť:

• Pri variante LOCA SV prvé maximum $\Delta x=5,1mm$ radiálneho posunutia steny ŠR oproti roztrhnutému nátrubku bolo dosiahnuté v rovnakom čase **5ms** ako maximálny rozdiel tlakov pôsobiacich na stenu ŠR

Maximálna vypočítaná deformácia steny ŠR oproti roztrhnutému studenému nátrubku však bola až
 5,8mm v čase 28ms

 Je to spôsobené superpozíciou posuvov spôsobených Δp pôsobiaceho v danom mieste na stenu ŠR a celkovou deformáciou ŠR od nesymetricky šíriacej sa podtlakovej vlny v medzikruhovom priestore medzi ŠR a TNR

• Pri variante LOCA HV maximum radiálneho posunutia $\Delta x=4.3$ mm steny ŠR oproti roztrhnutému nátrubku bolo dosiahnuté v rovnakom čase **11ms** ako maximálny rozdiel tlakov pôsobiacich na stenu ŠR;

• Vypočítané posunutia v kritickom mieste dolnej dosky KAZ boli menšie ako prípustné, takže kritérium prijateľnosti DB-A3/e - je zabezpečená pohyblivosť kaziet HRK [II.8] je splnené pri obidvoch uvažovaných variantoch LOCA SV a LOCA HV

Pevnostná analýza

Na základe vypočítaných napätí, popísaných pre LOCA SV v Kap.7.2.2.8.3 a pre LOCA HV v Kap. 7.2.2.9.3, a podľa hodnotenia napätí v Kap. 7.2.2.10 môžeme konštatovať nasledovné závery:

- Pre hodnotenie namáhania VRČ boli aplikované normy výpočtu pevnosti [II.4], [II.5], [II.6]
- Šachta reaktora bola najviac namáhanou časťou VRČ;

• Podmienky pevnosti pre havarijné situácie <u>boli splnené</u> vo všetkých hodnotených kritických miestach VRČ (ŠR, DŠR, KAZ, BOR) reaktora MO34, takže kritérium prijateľnosti "DB-A7" je splnené pre obidve varianty LOCA SV a LOCA HV.

<u>Výsledky analýz odozvy VRČ reaktora VVER440 MO34 na LOCA havárie, predstavujúce</u> <u>maximálne namáhanie týchto konštrukcií, preukázali splnenie pevnostných podmienok a príslušných</u> <u>kritérií prijateľnosti.</u>

LITERATÚRA

I Zdrojové dokumenty, ktoré sú vlastníctvom SE, a.s.

- [I.1] Revízia a dopracovanie úvodného projektu (ÚP) pre MO34, EGP Praha, 21.1.2008
- [I.2] PpBS MO34, PNM3436110200_S_C00, Kap.07.02.00 Súhrn vstupných dát pre deterministické analýzy bezpečnosti, Predbežná verzia, VUJE, a.s., December 2009
- [I.3] Komplet reaktorového zařízení V-213-4, dodávkový uzol 1.4, Šachta, Pasport, Škoda, k.p.
 Plzeň, závod Energetické strojírenství, Ae 4557/Dok1, Číslo kompletu 20, Plzeň, 1980
- [I.4] Komplet reaktorového zařízení V-213-4, dodávkový uzol 1.5, Dno šachty, Pasport, Škoda, k.p.
 Plzeň, závod Energetické strojírenství, Ae 4558/Dok1, Číslo kompletu 20, Plzeň, 1980
- [I.5] Komplet reaktorového zařízení V-213-4, dodávkový uzol 1.6, Kôš aktívnej zóny, Pasport,
 Škoda, k.p. Plzeň, Energetické strojírenství, Ae 4559/Dok1, Číslo kompletu 20, Plzeň, 1980
- [I.6] Komplet reaktorového zařízení V-213-4, dodávkový uzol 1.7, Blok ochranných rúr, Pasport,
 Škoda, k.p. Plzeň, Energetické strojírenství, Ae 4560/Dok1, Číslo kompletu 20, Plzeň, 1980
- [I.7] Komplet reaktorového zařízení V-213-4, dodávkový uzol 1.4, Šachta, Pasport, Škoda, k.p.
 Plzeň, závod Energetické strojírenství, Ae 4557/Dok1, Číslo kompletu 21, Plzeň, 1980
- [I.8] Komplet reaktorového zařízení V-213-4, dodávkový uzol 1.5, Dno šachty, Pasport, Škoda, k.p.
 Plzeň, závod Energetické strojírenství, Ae 4558/Dok1, Číslo kompletu 21, Plzeň, 1980
- [I.9] Komplet reaktorového zařízení V-213-4, dodávkový uzol 1.6, Kôš aktívnej zóny, Pasport,
 Škoda, k.p. Plzeň, Energetické strojírenství, Ae 4559/Dok1, Číslo kompletu 21, Plzeň, 1980
- [I.10] Komplet reaktorového zařízení V-213-4, dodávkový uzol 1.7, Blok ochranných rúr, Pasport, Škoda, k.p. Plzeň, Energetické strojírenství, Ae 4560/Dok1, Číslo kompletu 21, Plzeň, 1980
- [I.11] PNM34205400 Návrhová specifikace (výpočet) Nádoby reaktoru uzly 1.3. 1.4. 1.5. 1.6. 1.7. 1.8 a 1.9
- [I.12] PNM34205401 Návrhová specifikace (výpočet) pro opěrný rám tlakové nádoby reaktoru uzel
 1.24
- [I.13] PNM34205402 Návrhová specifikace (výpočet) uzlu upevnění reaktorové nádoby v šachtě. Uzly 1.28. 1.29. 1.29.1
- [I.14] PNM34204560 Analýza tlakové nádoby reaktoru uzly 1.3. 1.4. 1.5. 1.6. 1.7. 1.8 A 1.9 -Prúkazná dokumentace
- [I.15] PNM34204562 Opěrný rám tlakové nádoby reaktoru uzel 1.24 Prúkazná dokumentace
- [I.16] PNM34204564 Analýza uzlu upevnění reaktorové nádoby v šachtě. Uzly 1.28. 1.29. 1.29.1-Prúkazná dokumentace
- [I.17] PNM34209887 Kontrolní výpočet pevnosti při vibracích
- [I.18] PMN34209888 Výpočet odolnosti vúči křehkému lomu
- [I.19] PNM34209518 Analýza P-T křivek dle metodiky VERLIFE
- [I.20] PNM34209920 Vnitřní časti reaktoru VVER 440 EMO34. Výpočet pevnosti a únavové životnosti
- [I.21] PNM34209957 Výpočet těsnosti přírubového spoje TNR

II Legislatívne dokumenty (zákony, vyhlášky, normy, dokumenty MAAE, apod.)

- [II.1] Unified Procedure for Lifetime Assessment of Components and Piping in WWER NPPs "VERLIFE", Version 2008 – Final, April 2008
- [II.2] IAEA TECDOC-1119 Report "Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety : PWR Vessel Internals", 2007
- [II.3] Accident Analysis for Nuclear Power Plants, Safety Reports Series No.23, IAEA, Vienna, 2002
- [II.4] Normy rasčota na pročnosť oborudovanija i truboprovodov atomnych energetičeskich ustanovok, PNAEG G-7-002-86, Moskva 1989
- [II.5] Normy pevnostného výpočtu komponentov a potrubí JEZ, Energoatomizdat, Moskva, ZSSR, 1989
- [II.6] NTD MHS Interatomenergo, Normy výpočtu pevnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren, Normalizace v jaderné technice 4/1988, ČSKAE
- [II.7] Normativně technická dokumentace A.S.I., Charakteristiky materiálú pro zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER, SEKCE II, Praha a Brno 2007
- [II.8] J. Husárček: Požiadavky na deterministické analýzy bezpečnosti, BNS I.11.1/ 2012, ÚJD SR, Bratislava, máj 2012 (revízia vydaná v roku 2013 bola tiež vzatá do úvahy).
- [II.9] Zbierka zákonov č.541/2004, Zákon o mierovom využívaní jadrovej energie (atómový zákon) a o zmene a doplnení niektorých zákonov, 9.septembra 2004
- [II.10] Zbierka zákonov č.49/2006, Vyhláška Úradu jadrového dozoru Slovenskej republiky z 12.januára 2006
- [II.11] Zbierka zákonov č.430/2011, Vyhláška Úradu jadrového dozoru Slovenskej republiky z 16. novembra 2011
- [II.12] Zbierka zákonov č.56/2006, Vyhláška Úradu jadrového dozoru Slovenskej republiky z 12.januára 2006
- [II.13] Zbierka zákonov č.58/2006, Vyhláška Úradu jadrového dozoru Slovenskej republiky z 12.januára 2006
- [II.14] Plnenie podmienok platnosti rozhodnutí č.211/2008 a č.1/2009, UJD SR č. 102/320-44/2010, 19.2.2010

III Zdrojové dokumenty, ktoré sú spravidla vytvorené VUJE, a.s.

- [III.1] P.Hermanský, M.Krajčovič: The Dynamical Loading of the WWER440/V213 Reactor Pressure Vessel Internals during LOCA Accident in Hot and Cold Leg of the Primary Circuit, International conference Nuclear Energy for New Europe 2010, Portorož, Slovenia, Sept.6-9, 2010
- [III.2] P.Hermanský, M.Krajčovič: Numerická simulácia odozvy vnútorných častí reaktora VVER440/V213 na dynamické namáhanie pri LOCA havárii, Energetika, 6/2010
- [III.3] P.Hermanský, M.Krajčovič: The numerical simulation of the WWER440/V213 reactor pressure vessel internals response to maximum hypothetical large break loss of coolant accident, European Nuclear Conference, 30 May-2June 2010, Barcelona, Spain

- [III.4] P.Hermanský, M.Krajčovič: The numerical simulation of the WWER440/V213 reactor pressure vessel internals response to maximum hypothetical large break loss of coolant accident, Nuclear Engineering and Design, 2010
- [III.5] P.Hermanský, M.Krajčovič, M.Hrázský: Analýza vnútroreaktorových častí reaktorov V213, Správa VUJE, a.s. Ev.č. MP0350/2008/05/01, 2009
- [III.6] P.Hermanský, M.Krajčovič: The numerical simulation of the WWER440/V213 reactor pressure vessel internals response to maximum hypothetical large break loss of coolant accident, International conference Nuclear Energy for New Europe, Bled, Slovenia, Sept.14-17, 2009
- [III.7] T. Belytschko, W. K. Liu, B. Moran, Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, England, 2003
- [III.8] L. Andersson, P. Andersson, J. Lundwall, J. Sundquist, K.Nilsson, P. Veber, "On the validation and application of fluid-structure interaction analysis of reactor vessel internals at loss of coolants accidents", Computer & Structures, 81, 2003, pp.469-476.
- [III.9] A. Timperi, T. Pättikangas, I. Karppinen, V. Lestinen, J. Kähkonen, T. Toppila, "Validation of fluidstructure interaction calculations in a large break loss of coolant accident", Proc. of the 16th Int. Conf. on Nuclear Engineering ICONE16, Orlando, Florida, USA, May 11-15, 2008
- [III.10] Z.Havelka, M.Suchánek, Výzkum vlivu havárie se strátou chladiva na vnitřní vestavby tlakovodního reaktoru, Jaderná energie 7/1984, 264-267
- [III.11] G.A.Volkov, S.N.Krasnov, M.Suchánek, J.Barták: Výzkum účinku havárie se ztrátou chladiva na model reaktoru typu VVER, Jaderná energie 4/1989
- [III.12] Z.Havelka, M.Suchánek, O.Kodym, J.Barták: Púsobení expanzní rázové vlny na modely vnitřiních vestaveb reaktoru VVER (Souhrn výsledkú výzkumu za období 1981-1985), Správa SVUUS, ev.č. 85-05014, Praha, 1985
- [III.13] Dytran 2010, Reference manual, MSC.Software Corporation, 2010
- [III.14] Dytran 2010, Theory manual, MSC.Software Corporation, 2010
- [III.15] Dytran 2010, User's Guide, MSC.Software Corporation, 2010

vůje

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 7.2.2-1 Štrukturálna časť výpočtového modelu	. 11
Obrázok 7.2.2-2 Kvapalinová (fluid) časť výpočtového modelu	. 12
Obrázok 7.2.2-3 LOCA SV - Priebeh tlaku v studených nátrubkoch TNR	. 14
Obrázok 7.2.2-4 LOCA SV - Priebeh tlaku v horúcich nátrubkoch TNR	. 14
Obrázok 7.2.2-5 LOCA HV - Priebeh tlaku v horúcich nátrubkoch TNR	. 15
Obrázok 7.2.2-6 LOCA HV - Priebeh tlaku v studených nátrubkoch TNR	. 15
Obrázok 7.2.2-7 Prstenec horúcich nátrubkov TNR - označenie miest v obvodovom smere	. 24
Obrázok 7.2.2-8 Prstenec studených nátrubkov TNR - označenie miest v obvodovom smere	. 24
Obrázok 7.2.2-9 Systém označenia miest symbolmi – LOCA SV	. 25
Obrázok 7.2.2-10 LOCA SV - Priebeh tlakov pôsobiacich na stenu ŠR oproti nátrubku SN2	. 26
Obrázok 7.2.2-11 LOCA SV - Priebeh tlaku v studených nátrubkoch SN2, SN1, SN6 a SN5	. 26
Obrázok 7.2.2-12 LOCA SV - Priebeh tlaku v priestore medzi ŠR a TNR	. 27
Obrázok 7.2.2-13 LOCA SV - Priebeh tlaku vo vybraných miestach vo vnútri DŠR	. 27
Obrázok 7.2.2-14 LOCA SV - Priebeh tlaku v osiach KAZ a BOR pre rôzne súradnice Y	. 27
Obrázok 7.2.2-15 LOCA SV - Rozloženie tlaku medzi VRČ a TNR	. 28
Obrázok 7.2.2-16 LOCA SV - Priebeh radiálneho posunutia steny ŠR oproti nátrubku SN2	. 30
Obrázok 7.2.2-17 LOCA SV - Priebeh radiálneho posunutia dolnej dosky KAZ	. 30
Obrázok 7.2.2-18 LOCA SV - Priebeh radiálneho posunutia ŠR a plášťa DŠR	. 31
Obrázok 7.2.2-19 LOCA SV - Deformácia ŠR a DŠR (deformácie zväčšené 100x)	. 32
Obrázok 7.2.2-20 LOCA SV - Priebeh napätia v ŠR v rovine studených nátrubkov Y5	. 34
Obrázok 7.2.2-21 LOCA SV - Priebeh napätia v ŠR pod nátrubkami v rôznych rovinách	. 34
Obrázok 7.2.2-22 LOCA SV - Redukované napätie v ŠR (deformácie zväčšené 100x)	. 35
Obrázok 7.2.2-23 Systém označenia miest symbolmi – LOCA HV	. 37
Obrázok 7.2.2-24 LOCA HV - Priebeh tlakov pôsobiacich na stenu ŠR oproti nátrubku HN2	. 38
Obrázok 7.2.2-25 LOCA HV - Priebeh tlaku v studených nátrubkoch HN2, HN1, HN6 a HN5	. 38
Obrázok 7.2.2-26 LOCA HV - Priebeh tlaku v priestore medzi ŠR a TNR	. 39
Obrázok 7.2.2-27 LOCA HV - Priebeh tlaku vo vybraných miestach vo vnútri DSR	. 39
Obrázok 7.2.2-28 LOCA HV - Priebeh tlaku v osiach KAZ a BOR pre rôzne súradnice Y	. 39
Obrázok 7.2.2-29 LOCA HV - Rozloženie tlaku medzi VRČ a TNR	. 40
Obrázok 7.2.2-30 LOCA HV - Priebeh radiálneho posunutia steny SR oproti nátrubku HN2	. 42
Obrázok 7.2.2-31 LOCA HV - Priebeh radiálneho posunutia dolnej dosky KAZ	. 42
Obrázok 7.2.2-32 LOCA HV - Priebeh radiálneho posunutia SR a plášťa DSR	. 43
Obrázok 7.2.2-33 LOCA HV - Znázornenie polohy bodov príruby šachty reaktora	. 44
Obrázok 7.2.2-34 LOCA HV - Priebeh osového posunutia príruby šachty reaktora	. 44
Obrázok 7.2.2-35 LOCA HV - Deformácia SR a DSR (deformácie zväčšené 100x)	. 45
Obrázok 7.2.2-36 LOCA HV - Priebeh napätia v ŠR v rovine studených nátrubkov Y2	. 47
Obrázok 7.2.2-37 LOCA HV - Priebeh napätia v ŠR pod nátrubkami v rôznych rovinách	. 47
Obrázok 7.2.2-38 LOCA HV - Redukované napätie v SR (deformácie zväčšené 100x)	. 48

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 7.2.2-1 Počiatočné podmienky LOCA	13
Tabuľka 7.2.2-2 Hmotnosti VRČ	16
Tabuľka 7.2.2-3 Parametre pružín	17
Tabuľka 7.2.2-4 Prietočné prierezy	18
Tabuľka 7.2.2-5 VRČ EMO 3.blok - Základné materiálové vlastnosti ocele 08CH18N10T	20
Tabuľka 7.2.2-6 VRČ EMO 4.blok - Základné materiálové vlastnosti ocele 08CH18N10T	21
Tabuľka 7.2.2-7 Maximálne redukované napätia pre jednotlivé rezy VRČ	51
Tabuľka 7.2.2-8 Hodnoty súčiniteľa η pre príslušnú kategóriu napätí podľa NTD	52