Technická správa

Predprevádzková bezpečnostná správa Kapitola 06.01.01 Projekt jadrového paliva

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

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

		LC										
SE Rev	Date / Dátum	IS	Superv	ision Outcome / Sta	v schválenia		Supe	rvised by / O	veril	Checked by / Kontroloval	Approvec Schvá	d by / ilil
			Language / Jaz	yk	S E	Safety Class / Bezpečnostn rrieda	á N	SEC. INDEX / INDEX utajenia	Company	use/P		
	SLC	OVEN	ISKI	1	Submited to Cli	Submited to Client		Approval / X Schválenie		Information Only / Len na informáciu		
ELEKTRÁRNE			to / Predložené odberateľovi na:		The SE a.s. approval refers to the contract clauses only. All design responsibilities a charged to the Contractor / Schvålenie SE a.s. sa vzťahuje iba na zmluvné náležitos Za vypracovanie projektu nesie dodávateľ plnú zodpovednosť.				ties are ežitosti.			
EPS No / Revision index / Číslo EPS: PNM34365000 Index revízie:			/ 11		Size / Veľ- kosť	Activity Code / Aktivita	Type / Subtype Typ / Podtyp	Discipline / Profesia	Plant Ui Blok elektrá	nit/ c rne		
File name / SE doc. Code / Názov súboru: SE číslo dokumentu: PNM343610		1027		A4	6.01	RS	Z	8				
				Sheet / List	0	f/z	Plant System / Systém elektrárne	Compon Kompoi	nent/ nent			
	* P N M 3 4 3 6 1 0 2 7 1 1 *					1		92				

SE Contract No. / Číslo zmlu	IVY SE: 4600003952	VUJE Co	ntract No	. / číslo zmluvy V	/UJE: 1719/00/09
Part name / Označeni	e časti: PNM3436102711_S_C00_V		lss	ued on / Vydané	é dňa: 18.06.2019
Kód citlivosti ¹⁾ / Sensitivity code ¹⁾ 3	Name / Meno	Organization / Organizácia	Dept. / Útvar	Date / Dátum	Signature / Podpis
Author / Vypracoval:		• VUJE, a.s.	• 0220	• 18.06.2019	•
Co-author / Spolupracoval:	•	• VUJE, a.s.	• 0220	• 18.06.20 <mark>1</mark> 9	
	•	•	•	•	•
	•	•	•	•	•
Checked by / Kontroloval:	•	• VUJE, a.s.	• 0220	• 18.06.2019	•
		•	٠	•	•
	•	•	•	•	•
	•	•	•	۲	•
Verified by / Overil:	•	• VUJE, a.s.	• 0720	• 18.06.2019	•
Approved by / Schválil:		• VUJE, a.s.	• 1703	• 18.06.2019	

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 	 V súlade s dokumentom
	Aarhuského výboru	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 06.01.01 Projekt jadrového paliva 	• PNM3436102711_S_C00_V	• 11
2.	 Kapitola 06.01.01 Projekt jadrového paliva 	• PNM3436102711_S_C01_V	• 11
3.	•	•	•
4.	•	•	•
5.	•	•	•
6.	•	•	•
7.	•	•	•
8.	•	•	•
9.	•	•	•
10.	•	•	•



OBSAH

OBSAH		4
ZOZNAM POUŽITÝ	CH SKRATIEK A OZNAČENÍ	6
ÚVOD		11
6.1.1	Projekt jadrového paliva	12
6.1.1.1	Účel a klasifikácia	12
6.1.1.2	Materiály	13
6.1.1.2.1	Konštrukčné materiály	13
6.1.1.2.2	Zváranie	17
6.1.1.2.3	Palivo	17
6.1.1.2.4	Absorpčné materiály	19
6.1.1.3	Návrh palivovej kazety a prútika	21
6.1.1.3.1	Aktívna zóna	21
6.1.1.3.2	Kazeta pracovná	22
6.1.1.3.3	Havarijná, regulačná a kompenzačná kazeta	23
6.1.1.3.4	Palivový prútik a Gd palivový prútik	24
6.1.1.3.5	Dištančná mriežka	24
6.1.1.3.6	Obalová rúra	25
6.1.1.3.7		26
6.1.1.3.8		26
6.1.1.3.9		20
0.1.1.3.10		21
0.1.1.3.11	Pluzinovy Diok	21
0.1.1.3.12	Ridvice a palky	21 20
6111	Spojenila	20
611/1	Projektové kritériá prevádzkyschopnosti palivových prútikov	30
61142	Projektové kritériá heznečnosti	38
61143	Všeobecná metodológia	40
6.1.1.4.4	Vyhodnotenie splnenia bezpečnostných cieľov	41
6.1.1.5	Zdôvodnenie prevádzkyschopnosti palivových prútikov v stacionárnom stave	
6.1.1.5.1	Aplikované projektové kritériá	42
6.1.1.5.2	Zvolená metodológia a výpočtové programy	42
6.1.1.5.3	Získané výsledky	42
6.1.1.6	Ohodnotenie palivových prútikov pri prechodových procesoch normálnej prevádzky	<i>i</i>
	a manévrovaní výkonu	45
6.1.1.6.1	Projektové kritériá	45
6.1.1.6.2	Zvolená metodológia a výpočtové programy	45
6.1.1.6.3	Výsledky	46
6.1.1.7	Kríza prestupu tepla	48
6.1.1.8	Hydraulický odpor kaziet	61
6.1.1.9	Skúšky životnosti kaziet	63
6.1.1.10	Výpočty napätí v palivových kazetách	68
6.1.1.10.1	Projektové kritériá	68
6.1.1.10.2	Metódy výpočtu a programové prostriedky	69
6.1.1.10.3		69
6.1.1.10.4	Vysledky vypoctoveno zdovodnenia	/1
6.1.1.10.5	Výsledky vypočtoveno zdovodnenia pri navarijných rezimoch	/1
6.1.1.10.6	vysledky vypoctoveno zdovodnenia pri seizmických posobeniach	/1 72
0.1.1.11	Experimentalite puzuluvalita	13 75
0.1.1.1Z 6 1 1 12	Nauchic a Nulliula Dlán skúšak a proviorak	13 76
6 1 1 12 1	Pravidlá preherania a metódy kontroly vo výrobnom závode	70 76
611122	Preheracia kontrola na IF	76
611122	Kontrola hermetickosti nalivových prútikov ožiarených kaziet	70
6 1 1 13 4	Revízia nadstavca	77
6.1.1.13.5	Zaobchádzanie s palivom	77
6.1.1.14	Zdokonalenia palivových kaziet druhej generácie	80
		-

vůje

6.1.1.15	Limitné hodnoty parametrov, dôležitých z hľadiska bezpečnosti prevádzky paliva	druhej
	generácie	81
LITERATÚRA		84
ZOZNAM OBRÁZKO	OV	91
ZOZNAM TABULIEI	К	92

vůje

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A OZNAČENÍ

AO	- automatická ochrana
BOR	- blok ochranných rúr
BD	- bloková dozorňa
СВ	- koncentrácia bóru v chladive, g/kg
С _{НЗВОЗ}	 koncentrácia kyseliny boritej v chladive, g/kg
dov-	- dovolený
DM	- dištančná mriežka
DPSR	 dovolené prevádzkové stavy reaktora
DPZ	- samonapájací detektor
E	- Youngov modul, MPa
ENIC	 experimentálne vedecko-výskumné centrum
EIL-ENIN	 Elektromestské výskumné laboratórium – energetické vedecké výskumné laboratórium Križanovského
ELZ	- zváranie elektrónovým lúčom
F	- plocha, m ²
f _{HCČ}	- frekvencia napájacej siete HCČ, Hz
FNR JaRB	 Federálny dozor Ruska pre jadrovú a radiačnú bezpečnosť
G	- prietok chladiva cez reaktor, m ³ /h
Gd	- gadolínium
Н	- dĺžka palivového stĺpca PK v pracovnom stave, cm
H ₆ , H _{riad}	 výpočtová podľa BIPR-7A výška umiestnenia regulačnej (pracovnej) skupiny, cm
H ₁₋₅	 výpočtová výška umiestnenia palivových častí HRK 1-5 skupiny, cm
H _{AZ}	- výška aktívnej zóny, m
HCČ	- hlavné cirkulačné čerpadlo
HCP	- hlavné cirkulačné potrubie
HRK	 kazeta automatickej ochrany, regulácie a kompenzácie
HUA	- hlavná uzatváracia armatúra
inž	- inžiniersky
JE	- jadrová elektráreň
kaz	- kazeta
KB	- bezpečnostné kritérium
КНО	 koeficient hydraulického odporu
KHP	- kontrola hermetickosti pokrytia
KNI	- kanál merania neutrónov
КО	- kompenzátor objemu
KPN	- korózne praskanie pod napätím

vüje

KSS	 kontaktné zváranie natupo
KTS	- kontraktná technická dohoda
KTT	 kritický tepelný tok
KT	- tieniaca kazeta
LBP	- limit bezpečnej prevádzky
MKV	- minimálny kontrolovaný výkon
MPZ	- maximálne projektové zemetrasenie
NVJE	 Novovoronežská jadrová elektráreň
NPH	- nadprojektová havária
NPP	 normálne podmienky prevádzky
NNPP	 narušenie normálnych podmienok prevádzky
NIIAR	 vedecko-výskumný inštitút jadrových reaktorov
NFCh	- neutrónovo-fyzikálne charakteristiky
OKB	 vývojová konštrukčná kancelária
palivový prútik	- teplovyvíjajúci prvok
palivový prútik s Gd	 teplovyvíjajúci prvok s gadolíniom
perif	- periférny
PL	- prevádzkový limit
PG	- parogenerátor
PK	 programový komplex
PL	- prevádzkový limit
PMK	 programovo-metodický komplex
PpBS	-predprevádzková bezpečnostná správa
PZ	- projektové zemetrasenie
PV SVRK	 programové vybavenie systému vnútroreaktorovej kontroly
PR	- pracovný rozsah
PK	- pracovná kazeta
RNC KI	 Ruské vedecké centrum "Kurčatovský inštitút"
RZ	- reaktorové zariadenie
re	- reaktor
rel	- relatívna
R_{m}^{T}	 minimálna hodnota okamžitého odporu pri výpočtovej teplote, Mpa
$R_{p0,2}^{\scriptscriptstyle T}$	 minimálna hodnota medze pevnosti pri výpočtovej teplote, Mpa
SKVP	 systém kontroly a výmeny paliva
SORR	- systém ochrán a riadenia reaktora
SR	- spúšťací rozsah
SVRK	 systém vnútroreaktorovej kontroly

vůje

T _{ef}	- efektívna dĺžka prevádzky, dni
t	- teplota prostredia, °C
ТВК	- transportný a baliaci kontajner
ТČ	 termoelektrický prevodník (termočlánok)
TTO	- transportno-technologické operácie
t _{vst}	- teplota chladiva na vstupe do aktívnej zóny, °C
t _{výst}	 teplota chladiva na výstupe z aktívnej zóny, °C
TVS	- palivová časť kazety HRK
UČP	- uzol čerstvého paliva
udr	- udržiavanie
UGP	- uránovo-gadolíniové palivo
V	- vyhorenie, MW.dní/kgU
VRČ	- vnútroreaktorové časti
VNIINM	 vysokotechnologický vedecko-výskumný inštitút neorganických materiálov
VChR	- vodo-chemický režim
VPL	 výpočtový projektový limit
VVER	 vodo-vodný energetický reaktor
zn	- znalosť
ZrDM	 zirkóniová dištančná mriežka
ZS	- zavážací stroj
α	- súčiniteľ teplotnej rozťažnosti, (1/°C)
λ	 špecifická tepelná vodivosť, W/(m.K)
C _p	- merné teplo, J/(kg.K)
δ	 relatívne rovnomerné predĺženie, %
δ_0	 relatívne celkové predĺženie, %
σ _{0,2}	- relatívna medza klzu, MPa
σ_{B}	- medza pevnosti v ťahu, MPa
η	- relatívny výkon tvorby tepla
Re	- Reynoldsové číslo
ζ	 koeficient hydraulického odporu
Р	- tlak, MPa
n	 koeficient rezervy do krízy odvodu tepla
Т	- teplota, °C
N _{nom}	- nominálny výkon reaktora
q _{krit}	 kritický tepelný tok
QI	 lineárny výkon palivového prútika, kW/m
ß _{ef}	 efektívny podiel oneskorených neutrónov



∂ρ/∂γ	 hustotný koeficient reaktivity chladiva – derivácia reaktivity aktívnej zóny cez hustotu chladiva pri nemenných ostatných parametroch (teplote chladiva, výkone, koncentrácii bóru, otrave, vyhorení), cm³/g
$\partial \rho / \partial t_{\mathrm{u}^{\star}}$	 teplotný koeficient reaktivity paliva – derivácia reaktivity aktívnej zóny cez strednú teplotu paliva pri nemenných ostatných parametroch (nulový výkon), °C⁻¹
$\partial \rho / \partial t_u$	 teplotný koeficient reaktivity paliva – derivácia reaktivity aktívnej zóny cez rozloženú teplotu paliva pri nemenných ostatných parametroch (nenulový výkon), °C⁻¹
$\partial \rho / \partial t_M$	 teplotný koeficient reaktivity chladiva – derivácia reaktivity aktívnej zóny cez strednú teplotu chladiva, včítane zmeny jeho hustoty pri nemenných ostatných parametroch (výkone, koncentrácii bóru, atď.), °C⁻¹
∂p/∂N _B	 celkový výkonový koeficient reaktivity – derivácia reaktivity aktívnej zóny cez výkon pri konštantnej teplote chladiva na vstupe do aktívnej zóny, (zohľadňuje zmenu teploty paliva a chladiva včítane zmeny jeho hustoty po výške aktívnej zóny), 1/MW
∂p/∂C	 koeficient reaktivity kyseliny boritej, %/(g/kg)
γ	- hustota chladiva, g/cm ³
K0, BOC	- začiatok prevádzky palivovej zavážky
K1, T _{EOBC}	- moment ukončenia bórovej kampane
K2, T _{EOSC}	 koniec prevádzky palivovej zavážky na 100% výkone, pri úplnom vytiahnutí z aktívnej zóny palivových častí pracovnej skupiny HRK
K3, T _{EOC}	 koniec prevádzky palivovej zavážky so zohľadnením prevádzky na výkonovom a teplotnom efekte reaktivity
$K^{kaz}_{in\check{z}}$	 inžiniersky koeficient rezervy pre neurčitosť výkonu kazety
Κ ^{pal.pr.} inž	 inžiniersky koeficient rezervy pre neurčitosť výkonu palivového prútika
$K^{tabl}_{in\check{z}}$	 inžiniersky koeficient rezervy pre neurčitosť výkonu tabletky
${\sf K}^{kaz}_{mech}$	 mechanický koeficient rezervy pre výkon kazety, zohľadňuje technologické tolerancie na palivo
$K_{\textit{mech}}^{\textit{pal.pr.}}$	 mechanický koeficient rezervy pre výkon palivového prútika, zohľadňuje technologické tolerancie na palivo
K^{tabl}_{mech}	 mechanický koeficient rezervy pre neurčitosť výkonu tabletky, zohľadňuje technologické tolerancie na palivo
K _N	 koeficient rezervy pre neurčitosť výkonu reaktora
$K_{\mathit{in\check{z}}}^{\Delta t}$	- koeficient rezervy pre ohrev chladiva
Kk	 poprútikový koeficient nerovnomernosti vývinu energie v kazete
Kr	 koeficient nerovnomernosti výkonu palivových prútikov v aktívnej zóne
Ко	 koeficient nerovnomernosti rozloženia lineárneho výkonu palivových prútikov (koeficient nerovnomernosti výkonu tabletiek aktívnej zóny)
Kz	 koeficient nerovnomernosti vývinu energie po výške kazety
Kq	- koeficient nerovnomernosti výkonu kaziet
Kv	 koeficient nerovnomernosti vývinu energie po objeme aktívnej zóny (bez zohľadnenia nerovnomernosti po priereze kazety)
n, Nk	 číslo kazety, ktorej zodpovedá koeficient nerovnomernosti vývinu energie



m, Nz	 číslo najzaťaženejšieho úseku kazety, počítajúc od spodku aktívnej zóny (pod úsekom sa rozumie jedna štyridsaťdvatina dĺžky palivového stĺpca pracovnej kazety)
K_{ef}	 efektívny koeficient rozmnoženia
I _{ok} , I	 stredná v reaktore doba života okamžitých neutrónov, s
Q_{kaz}^{\max}	 maximálny prevádzkový výkon kazety, MW
Q max pal.pr.	 maximálny prevádzkový výkon palivového prútika, kW
Q_{tabl}^{\max}	 maximálny prevádzkový výkon tabletky (výška tabletky sa podmienečne prijíma 1 cm), W
$\overline{Q_{_{kaz}}}$	- stredný výkon kazety, MW
$\overline{Q_{\it pal.pr.}}$	- stredný výkon palivového prútika, kW
$\overline{\mathcal{Q}_{\scriptscriptstyle tabl}}$	 stredný výkon tabletky výšky 1 cm, W
N, W	- tepelný výkon reaktora, MW, %
Xe	 - index zohľadnenia vplyvu Xe-135 (Xe=0 – bez otravy; Xe=1 – stacionárna koncentrácia Xe; Xe=-1 - koncentrácia Xe sa prijíma z predchádzajúceho stavu; Xe=-2 - koncentrácia Xe vypočítaná v priebehu vyhorievania v daný moment kampane)
Sm	- index zohľadnenia vplyvu Sm-149 (Sm=-2 - koncentrácia Sm vypočítaná v priebehu vyhorievania v daný moment kampane)
Δρ	- účinnosť, %
ρ	- reaktivita aktívnej zóny, %
τ	 trvanie prechodového procesu pri nestacionárnej otrave Xe - hod, pri nestacionárnej otrave Sm – dni
\downarrow	 palivové časti kaziet HRK vysunuté
\uparrow	- palivové časti kaziet HRK zasunuté
Ν	- výkon , MW
n _{kaz}	- počet kaziet
n _{prút}	- počet palivových prútikov
P _{Ik}	 tlak chladiva na výstupe z reaktora, MPa
P _{nom}	- tlak nominálny, MPa
بح	- koeficient hydraulického odporu
i	- merná entalpia, kJ/kg
T _{ef}	- doba prevádzky na výkone, dni

ÚVOD

Táto technická správa je časťou Predprevádzkovej bezpečnostnej správy 3. a 4. bloku JE Mochovce.

Táto správa je vypracovaná podľa Atómového zákona [II.27] v znení neskorších úprav a doplnkov (posledný [II.28]), a dokumentov [II.12], [II.29], [II.30] v znení neskorších úprav a doplnkov (posledný [II.31]), [II.4] a [II.26] a čiastočne [II.32].

Kapitola je vypracovaná tiež na základe podkladov a údajov od dodávateľa paliva.

Podľa [II.4] opisuje a charakterizuje (t.j. udáva fyzikálne vlastnosti, chemické vlastnosti, tepelné vlastnosti, mechanické vlastnosti, projektové kritériá, konštrukčné výkresy) hlavných častí konštrukcie jadrového paliva t.j. palivových kaziet, regulačných tyčí, palivových prútikov, palivových peliet, pokrytí palivových prútikov a konštrukčných elementov ako sú mriežky a obálky kaziet.

6.1.1 PROJEKT JADROVÉHO PALIVA

6.1.1.1 ÚČEL A KLASIFIKÁCIA

Aktívna zóna jadrového reaktora a jej prvky sú určené na generovanie tepla a jeho odovzdanie chladivu z povrchu palivových prútikov počas určenej životnosti bez presiahnutia povolených limitov poškodenia palivových prútikov.

Aktívna zóna reaktora pozostáva z 312 pracovných kaziet [III.1] a 37 kaziet HRK, ktoré sa môžu premiestňovať vo vertikálnom smere. Kazeta HRK sa skladá z palivovej časti [III.2] a absorbujúceho nadstavca [III.3].

Klasifikačné označenie kaziet je prijaté ako 1N (1- trieda bezpečnosti, N- prvok normálnej bezpečnosti) podľa [III.4] . V súlade s klasifikáciou podľa kategórií seizmickej odolnosti patrí aktívna zóna do 1. kategórie. Bezpečnostná klasifikácia zariadení je riešená v Kapitole 05.03 Predprevádzkovej bezpečnostnej správy 3. a 4. Bloku JE Mochovce. Palivové kazety aregulačné kazety sú klasifikované v bezpečnostnej triede 2 (SC2). Seizmická odolnosť regulačných kaziet je klasifikovaná ako 1a.

Vypracovanie aktívnej zóny zodpovedá požiadavkám nasledujúcich normatívnych dokumentov: [III.4]; [II.5]; [II.1]; [II.2]; [II.3]; [II.4]; [II.5]; [II.6]; [II.7].

Výroba jadrového paliva je v súlade s plánom kvality. Plán kvality pre pokrytie prútika palivovej kazety je uvedený v dokumente [I.31].

Verifikácia a validácia výpočtových programov, použitých pri vypracovaní kapitoly 6.1.1, je dokladovaná "pasmi" jednotlivých programov, obsiahnutými v dokumentoch [I.35], [I.36].

6.1.1.2 MATERIÁLY

6.1.1.2.1 Konštrukčné materiály

Prevádzkyschopnosť a spoľahlivosť konštrukcie kaziet, palivových prútikov, absorpčných materiálov pri namáhaniach a vplyvoch v podmienkach reaktorového zariadenia je tiež zabezpečovaná výberom konštrukčných materiálov, paliva a absorbátora.

Konštrukčné materiály pre aktívnu zónu jadrového reaktora sú vyberané tak, aby v rámci možností vykazovali minimálnu aktiváciu pri normálnej prevádzke. Správanie sa konštrukčných materiálov hlavných častí v aktívnej zóne z hľadiska vplyvu neutrónového toku je charakterizované v kapitole 6.1.2 tejto bezpečnostnej správy (podkap. 6.1.2.3). V prípade palivovej kazety a prútika je dominantné radiačné pôsobenie vyhoreného paliva, voči ktorému je aktivácia ich konštrukčných častí prakticky zanedbateľná.

V konštrukcii pracovnej kazety, palivovej časti kazety HRK a nadstavca je použitá oceľ typu 12Ch18N10T (08Ch18N10T, 06Ch18N10T) a zirkóniové zliatiny. Tieto materiály sa široko používajú v konštrukciách palivových kaziet a ich použitie je povolené pravidlami [III.6].

Ocele 12Ch18N10T, 08Ch18N10T a 06Ch18N10T sa vyznačujú vysokou koróznou a radiačnou odolnosťou, majú veľmi dobré technologické vlastnosti, čo je zachytené v GOST 5632-72. Chemické zloženie ocelí je uvedené v Tab. 6.1.1.2-1.

Chemický	06Ch18N10T	08Ch18N10T	12Ch18N10T
prvok	%	%	%
Uhlík	Maximálne 0,06	Maximálne 0,08	Maximálne 0,12
Kremík	Maximálne 0,6	Maximálne 0,8	Maximálne 0,8
Mangán	Maximálne 2,0	Maximálne 2,0	Maximálne 2,0
Chróm	17,0÷19,0	17,0÷19,0	17,0÷19,0
Nikel	9,0÷11,0	9,0÷11,0	9,0÷11,0
Titán*	5c-0,7	5c-0,7	5c-0,8
Hliník	-	-	-
Volfrám	Maximálne 0,2	Maximálne 0,2	Maximálne 0,2
Molybdén	Maximálne 0,5	Maximálne 0,5	Maximálne 0,5
Niób	-	-	-
Vanád	Maximálne 0,2	Maximálne 0,2	Maximálne 0,2
Síra	0,020	0,020	0,020
Fosfor	Maximálne 0,40	Maximálne 0,40	Maximálne 0,40
Iné prvky	-	-	-

Tab. 6.1.1.2-1 Chemické zloženie ocelí (hmotnostné percentá)

*Pre titán c - množstvo uhlíka v oceli

Na pokrytie palivových prútikov a na dištančné mriežky je použitá zirkóniová zliatina E-110 (Zr+1%Nb), na obalové rúry pracovných kaziet a palivových častí HRK je použitá zirkóniová zliatina E-125 (Zr+2,5%Nb).

Tieto materiály spájajú v sebe nízky absorpčný prierez neutrónov "tepelného spektra", vysokú odolnosť voči deformácii, spôsobenej tlakovými rozdielmi a vzájomným mechanickým pôsobením, vysokú koróznu odolnosť voči pôsobeniu chladiva, paliva, štiepnych produktov. Zirkóniové zliatiny E-110 a E-125 sa dobre uviedli v úlohe pokrytia palivových prútikov a obalových rúr, čo je potvrdené značnými skúsenosťami z prevádzky reaktorov VVER-440, uvedenými napríklad v [III.7].

Používanie zliatiny E-110 ako materiálu pre dištančné mriežky je tiež potvrdené skúsenosťami z prevádzky a výsledkami postradiačných skúšok, uvedených v [III.8].

Ako pokrytie palivových prútikov sa používajú rúrky zo zliatiny zirkónia s 1 % nióbu - zliatina E-110. Hmotnostný podiel nióbu je 0,9 ÷ 1,1 %. Chemické zloženie zliatiny (okrem zirkónia a nióbu) je uvedené v Tab. 6.1.1.2-2.

Názov prvkov	Hmotnostný podiel, %, maximálne
1	2
Hliník	0,008
Berýlium	0,003
Železo	0,05
Kremík	0,02
Vápnik	0,03
Kyslík	0,099
Meď	0,005
Mangán	0,002
Titán	0,005
Vodík [*]	0,0015
Olovo	0,005
Dusík	0,006
Uhlík	0,02
Hafnium	0,01
Kadmium	0,00003
Nikel	0,02
Bór	0,00005
Molybdén	0,005
Chróm	0,02
Lítium	0,0002

^{*} Kontroluje sa v hotovom valcovanom materiáli

Normatívne požiadavky na mechanické vlastnosti materiálu rúrky sú uvedené v Tab. 6.1.1.2-3.

Fab. 6.1.1.2-3 Mechanické vlastnosti ru	úrky v súlade s	normatívnymi požiadavkami
---	-----------------	---------------------------

Smortaatov	Testová teplota [°] C						
Smerileslov	20			380			
	σ _в , MPa	σ _{0,2} , MPa	δ, %	σ _в , MPa	σ _{0,2} , MPa	δ, %	
Pozdĺžne	-	-	-	-	80	-	
Priečne	min. 270,	min. 210,	min. 28,	min. 150,	min. 130,	min. 33,	

Mechanické vlastnosti materiálu rúrky (skutočné) pri priečnom ťahu (na kruhových vzorkách) sú uvedené v Tab. 6.1.1.2-4.

Teplota skúšok, °C	Medza pevnosti, σ _v , MPa	Podmienečná medza klzu _{o_{0,2}, MPa}	Relatívne predĺženie δ, %
20 (skutočne)	360÷380	320÷340	33÷38
380 (skutočne)	190÷210	170÷190	38÷43

Tab. 6.1.1.2-4 Mechanické vlastnosti rúrky pri priečnom ťahu
--

Mechanické vlastnosti materiálu rúrky (skutočné) pri pozdĺžnom ťahu (na segmentových vzorkách) sú uvedené v Tab. 6.1.1.2-5.

Tab. 6.1.1.2-5 Mechanicke vlastnosti materialu rurky pri pozulznom tar	Tab.	6.1.1.2-5	Mechanické	vlastnosti	materiálu	rúrky	pri	pozdĺžnom	ťał
--	------	-----------	------------	------------	-----------	-------	-----	-----------	-----

Teplota	Medza pevnosti,	Podmienečná medza klzu,	Relatívne
skúšok,	σ _ν ,	σ _{0,2} ,	predĺženie δ ,
C°	MPa	MPa	%
20(skutočne)	400÷420	240÷260	46÷49
350÷380 (skutočne)	190÷220	100÷115	52÷56

Vzorky z rúrok sa podrobujú koróznym skúškam počas 72 a 200 hodín pri teplote 400 ⁰C a tlaku 19,6 MPa. Prírastok váhy nepresahuje 22 resp. 38 mg/dm². Rúrky sa dodávajú v rekryštalizovanom stave, s brúseným vonkajším a leptaným vnútorným povrchom.

Hĺbka defektov na vonkajšom resp. vnútornom povrchu pokrytia hotového palivového prútika sa povoľuje nie viac ako 50 resp.35 μ. Rúrky sa vo výrobnom závode podrobujú úplnej kontrole s vyradením defektných rúrok. Fyzikálne vlastnosti materiálu rúrok sú uvedené v Tab. 6.1.1.2-6.

Teplota skúšok, °C	Modul pružnosti v ťahu E, MPa	Súčiniteľ teplotnej rozťažnosti, α.10 ⁻⁶ , 1/K	Špecifická tepelná vodivosť λ, W/mK	Merné teplo Cp, J/kgK
20	96000	5,3	17,2	282
380	72000	5,5	20,3	361

Tab. 6.1.1.2-6 Fyzikálne vlastnosti materiálu rúrok

Mechanické vlastnosti materiálu pokrytia palivových prútikov, uvedené v Tab. 6.1.1.2-7 sa určovali pri priečnom rozťahovaní kruhových vzoriek, vyrezaných z axiálne rôznych častí prútikov v kazete č. 198 a č. 222, ktoré odpracovali 4 a 5 rokov na JE Kola v podmienkach priemyselnej prevádzky. Konzervatívne ocenenie nahromadenej fluencie rýchlych neutrónov v pokrytí prútikov sledovaných kaziet ukazuje, že fluencia podstatne prevyšuje hodnotu nasýtenia radiačného spevnenia materiálu pokrytia (~1·10²¹ n/cm²).

Pri výrobe pokrytia prútikov bola použitá zliatina E110, rovnaká zliatina bola použitá tiež pri výrobe pokrytia prútikov v kazetách č. 198 a č. 222, vyhorených v JE Kola.

Mechanické vlastnosti, uvedené v Tab. 6.1.1.2-7 je možné rozšíriť na palivo s vyšším stredným vyhorením do vysokých hodnôt vyhorenia, lebo nasýtenie mechanických vlastností sa dosahuje už pri fluenciách rýchlych neutrónov 1.10²¹ n/cm², čo zodpovedá prvému - druhému roku prevádzky kazety.



Číslo pal. prútika (kazety) vyhorenie, MWd/kgU	Teplota skúšok, °C	Medza pevnosti, _{σ_v, MPa}	Podmienečná medza klzu, σ _{0,2} , MPa	Relatívne rovnomerné predĺženie δ, %	Relatívne celkové predĺženie δ, %
1(198) stredné 50,8 maximálne 58,3	20	603,5	546,8	4,5	15,1
1(198) stredné 50,8 maximálne 58,3	350	398	362	5,0	23,1
7(222) stredné 55,3 maximálne 63,8		573	520	6,5	23,9
65(222) stredné 45,6 maximálne 52,9	20	597	527	6,5	20,3
92(222)		560	487	6,6	24,5
stredné pre (222)	20	576	512	6,6	22,9
7(222) stredné 55,3 maximálne 63,8		412	367	4,8	24,9
65(222) stredné 45,6 maximálne 52,9	350	407	378	4,7	21,4
92(222)		380	340	5,3	21,7
stredné pre (222)	350	400	362	4,9	22,7

Ožiarenie palivových prútikov vedie k zvýšeniu pevnosti materiálu pokrytia pri zachovaní plasticity. Experimentálny výskum, skúsenosti z prevádzky a výpočtová analýza správania palivových prútikov ukazujú, že palivové prútiky si zachovávajú prevádzkyschopnosť pri projektových vyhoreniach.

Pre zhotovenie obalových rúr pracovných kaziet a palivových častí HRK sa používajú listy zo zliatiny zirkónia s 2,5 % nióbu - zliatina E125. Hmotnostný podiel nióbu je 2,4 až 2,7 %. Chemické zloženie zliatiny E125 zodpovedá chemickému zloženiu zliatiny E110, ktoré je uvedené v Tab. 6.1.1.2-2, s výnimkou vodíka, ktorý sa nekontroluje, lítia, ktorého hmotnostný podiel neprevyšuje 8.10⁻⁴% a kyslíku, hmotnostný podiel ktorého neprevyšuje 0,10 %.

Krátkodobé mechanické vlastnosti ožiarených obalov zo zliatiny E125, uvedené v Tab. 6.1.1.2-8, boli získané ako výsledky testov kruhových vzoriek, ožiarených vo výskumných reaktoroch. Experimentálne vzorky boli ožiarené pri hustotách neutrónového toku a do hodnôt fluencie rýchlych neutrónov, ktoré zodpovedajú prevádzke kaziet v aktívnej zóne po dobu 6 rokov.

Reaktor (prostredie pri ožarovaní)	Fluencia neutrónov (E>0,1 MeV) cm ⁻²	Hustota toku neutrónov cm ⁻² s ⁻¹	Teplota ožarovania °C	Testovaci a teplota °C	σ _в MPa	σ _{0.2} MPa	δ %	δ ₀ %
RBT-10 (para)	1.10 ¹⁹	3·10 ¹²	440-450	20	370	290	11	29
				300	310	270	9,2	27
				400	250	220	8,1	30
				450	220	170	7,4	37
				500	190	170	8,9	40
				550	160	140	7,3	52
				20	400	340	7,7	23
RBT-6 (para)	3,7·10 ²⁰	5,6·10 ¹³	450	450	230	200	11	34
				500	100	88	14	41
BOR-60	0.0.40 ²²	Г. С. 4.0 ¹⁴	000 050	20	580	520	3,6	21
ampule)	3,8.1022	5,6.10	330-350	350	400	390	4,3	25

Tab. 6.1.1.2-8 Mechanické vlastnosti kruhových vzoriek zo zliatiny E125

6.1.1.2.2 Zváranie

Časti kaziet z korózne odolnej ocele austenitickej triedy (06Ch18N10T, 08Ch18N10T, 12Ch18N10T) sú zvárané oblúkovým zváraním v argónovej atmosfére. Na zváranie sa používa zvárací drôt Sv - 04Ch19N11M3 alebo Sv - 07Ch19N10B

Obal pracovnej kazety a kazety HRK sa zvára oblúkovým zváraním v kontrolovanom prostredí volfrámovou elektródou bez prísadových materiálov, pre naplnenie zváracej komory sa používa argón.

Na zvary sú kladené požiadavky ohľadne žiaropevnosti (žiaruvzdornosti) a koróznej odolnosti počas prevádzky.

Obal nadstavca sa privára ku koncovým dielom odporovo bodovými zvarmi.

Na hermetizáciu zvarov palivových prútikov v palivových kazetách sa používa odporovo-stykové zváranie.

6.1.1.2.3 Palivo

Ako palivo sa používa spekaný oxid uraničitý v tvare tabletiek, z ktorých sa formuje palivové jadro palivového prútika.

Chemické zloženie tabletiek UO_2 a UO_2 + Gd_2 O_3 zodpovedá príslušným požiadavkám a normám.

Izotopické zloženie a hmotnostný obsah gadolínia vychádzajú z [II.8].

Vykonáva sa metalografický výskum tabletiek na neleptaných (rozdelenie a veľkosť pórov) a leptaných (veľkosť zrna) výbruskoch.

Odporúčaná závislosť teploty tavenia uránového oxidového paliva na vyhorení má tvar:

$$T_{tav} = T_{tav 0} - 0,56 \cdot B \tag{6.1.1.2-1}$$

VUJE, a. s.

kde je B – vyhorenie, MWd/kgU.

Závislosť (6.1.1.2-1) bola získaná na základe výsledkov experimentov [I.1], [III.9], v ktorých bola použitá metóda teplotného zastavenia alebo teplotnej analýzy (thermal arrest method), opísaná v [I.2].

V radu prác [I.2], [I.3] bolo uvedené, že táto metóda zabezpečuje získanie kvalitných výsledkov v porovnaní s metódou "tavenia na wolfrámovej páske", ktorú je treba odmietnuť vzhľadom na veľké chyby a referované zmeny zloženia vzoriek v procese náhrevu. Metóda "tavenia na wolfrámovej páske" bola používaná na získanie prvých experimentálnych hodnôt. Experimentálna chyba metódy teplotnej analýzy sa pohybuje okolo ≈ 1 %.

Experimentálne potvrdenie závislosti (6.1.1.2-1) existuje do maximálnej hodnoty vyhorenia 63 MWd/kgU [III.9].

Výpočtový model Adamsona a ost. [I.4] potvrdzuje závislosť (6.1.1.2-1) pre vyhorenia presahujúce 90 MWd/kgU.

Konzervatizmus výpočtov teploty paliva programom START-3 sa zabezpečuje konzervatívnym výberom prevádzkových parametrov, konzervatívnymi odchýlkami konštrukčných parametrov prútika, zavedením normatívnych koeficientov rezervy ([K_{TC1}]=1,1 pre teplotu paliva).

Pridanie Gd₂ O₃ znižuje teplotu solidusu [II.9], [I.5].

Závislosť teploty tavenia UO₂ od vyhorenia je uvedená na Obr. 6.1.1.2-1.



Obr. 6.1.1.2-1 Závislosť teploty tavenia UO₂ od vyhorenia

Závislosť objemového napuchania dioxidu uránu od vyhorenia je uvedená na Obr. 6.1.1.2-2 [III.10].





6.1.1.2.4 Absorpčné materiály

Ako absorpčný materiál v nadstavcoch kaziet HRK slúži korózne odolná bórová oceľ vo forme vložiek s chemickým zložením uvedeným v Tab. 6.1.1.2-9.

Tab. 6.1.1.2-9 Chemické zloženie korózne odolnej bórovej ocele

Názvy prvkov	Hmotnostný podiel, %
Bór	1,6 ÷ 2,0
Uhlík	maximálne 0,05
Chróm	19 ÷ 22
Nikel	15 ÷ 18
Kremík	maximálne 0,4
Hliník	maximálne 0,3
Železo	ostatné

Vrubová húževnatosť bórovej ocele - minimálne 5 Nm/cm² pri teplote (20 \pm 10) °C

Pri fluencii tepelných neutrónov približne 3.10²¹ n/cm² vyhorieva bór-10 vo vložkách do 74 %, štruktúra materiálu prakticky zostane počiatočnou, no napriek tomu boli objavené vzniknuté dutiny, v ktorých sa okolo boridov zhromažďuje hélium, hustota bórovej ocele sa znižuje o ~1,5 %, mikrotvrdosť základného kovu sa zvyšuje o ~60 %, bola zistená výrazná zmena mechanických vlastností (zväčšuje sa pevnosť pri silnom skrehnutí) [III.11].

V palivovej časti kazety HRK ako absorpčný materiál slúži hafnium vo forme doštičiek, privarených k vnútornému povrchu obalovej rúry. Môže sa používať hafnium dvoch typov, ktorých chemické zloženie je uvedené v Tab. 6.1.1.2-10.

Názov prvku	Hmotnostný podiel, %, maximálne		
	typ GFI1*	typ GFE1**	
Zirkónium	1,0	1	
Dusík	0,005	0,005	
Železo	0,04	0,04	
Kremík	0,005	0,005	
Nikel	0,05	0,02	
Titan	0,005	0,005	
Hliník	0,005	0,005	
Vápnik	0,01	0,01	
Horčík	0,004	0,004	
Mangán	0,0005	0,0005	
Uhlík	0,01	0,01	
Chróm	0,003	0,003	
Molybdén	0,1	0,01	
Kyslík	-	0,05	
Meď	-	0,005	
Niób	-	0,01	
Wolfrám	-	0,01	
 * Hmotnostný podiel hafnia a zirkónia minima ** V ingotoch kovového hafnia hmotnostný podi 	álne 99,8 % el hafnia spolu so zirkóniom ne	esmie byť menší ako 99,8 %	

Tab. 6.1.1.2-10 Chemické zloženie materiálu hafniových doštičiek

Fyzikálno-mechanické vlastnosti hafnia sú uvedené v Tab. 6.1.1.2-11.

Tab. 6.1.1.2-11 Fyzikálno-mechanické vlastnosti hafnia

Charakteristika	Hodnota
Hustota, g/cm ³	13,09
Teplota tavenia, °C	2220-2740
Merné teplo pri teplote 25-100 °C, J/(kg· °C)	146,5
Špecifická tepelná vodivosť, W/(m·°C):	
- pri T=50 °C	22,3
- pri T=100 °C	22,0
- pri T=200 °C	21,0
Súčiniteľ teplotnej rozťažnosti v intervale teplôt 0-1000 °C, (1/°C)	5,9·10 ⁻⁶
Modul pružnosti pri teplote 20°C, MPa:	
- axiálny	117·10 ³
- radiálny	126.10 ³
Tvrdosť podľa Vickersa pri teplote 20°C, MPa	1700-1900

Pri výbere materiálu absorbátora sa vychádzalo z nasledujúcich požiadaviek, ktorým vyhovuje hafnium:

- vysoká absorpčná schopnosť "tepelných" a rezonančných neutrónov;
- zlučiteľnosť so zirkóniovými zliatinami;
- minimálny radiačný rast pri ožiarení;
- zachovanie dostatočne vysokých plastických vlastností pri ožiarení;
- vysoká korózna stabilita v chladive;
- vyhovujúca technológia.

6.1.1.3 NÁVRH PALIVOVEJ KAZETY A PRÚTIKA

6.1.1.3.1 Aktívna zóna

Aktívna zóna reaktora pozostáva z 349 kaziet, z ktorých:

- 312 je pracovných kaziet
- 37 je kaziet HRK

Kazeta HRK je pracovným orgánom systému riadenia a ochrany a skladá sa z dvoch častí: palivovej časti HRK a nadstavca, spojených spojovacou tyčou, ktorá sa zas spája s tyčou pohonu. Kazeta HRK plní nasledujúce funkcie:

- zabezpečuje rýchle prerušenie štiepnej reťazovej reakcie v reaktore, rýchlym zavedením absorbátora do aktívnej zóny a súčasne vyvedením palivovej časti z aktívnej zóny;
- zúčastňuje sa automatickej regulácie s cieľom udržiavania výkonu reaktora na zadanej úrovni a jeho prevedenia z jednej úrovne výkonu na druhú;
- kompenzuje rýchle zmeny reaktivity (teplotný, výkonový efekt, otrava, atď.).

V aktívnej zóne sú PK a kazety HRK rozmiestnené v trojuholníkovej mriežke s krokom **147**^{+0,6}_{-0.6} mm.

Základné technické charakteristiky PK a kazety HRK, ich základných uzlov a súčastí sú uvedené v [II.10].

Na JE budú vo všetkých palivových zavážkach s tepelným výkonom reaktora 1375 MW_t použité kazety druhej generácie. V prvej zavážke to budú neprofilované kazety s projektovým obohatením ²³⁵U. Od druhej vsádzky budú zavážané profilované kazety obsahujúce gadolíniové prútiky a s vyšším stredným obohatením. Od piatej a v nasledujúcich nepárnych vsádzkach bude do centra aktívnej zóny na dva roky zavážaná jedna kazeta HRK druhej generácie s projektovým obohatením palivovej časti.

6.1.1.3.2 Kazeta pracovná

V navrhovanom palivovom cykle sa budú do aktívnej zóny zavážať PK druhej generácie. Pracovná kazeta druhej generácie pozostáva zo zväzku palivových prútikov a palivových prútikov s gadolíniom, hlavice, pätky a obalovej rúry. Palivové prútiky sú vo zväzku rozmiestnené v trojuholníkovej mriežke a sú spojené navzájom dištančnými mriežkami "plástového" typu, mechanicky upevnenými na centrálnej rúrke a spodnou nosnou mriežkou, upevnenou v pätke. Vrchná dištančná mriežka má široký lem, prostredníctvom ktorého je horná časť zväzku centrovaná v hornej časti obalovej rúrky špeciálne na tento účel určenými výstupkami v šesťhrannej rúre. To umožňuje vylúčiť prípadnú deformáciu vrchnej mriežky pri nerovnomernom radiačnom raste palivových prútikov vo zväzku. Palivové prútiky a palivové prútiky s gadolíniom sú v spodnej nosnej mriežke upevnené pomocou pružnej zátky, toto spojenie striktne ohraničuje pohyb dolných koncov palivových prútikov a palivových prútikov s gadolíniom v troch smeroch a týmto spôsobom je zväzok palivových prútikov a palivových prútikov s gadolíniom zafixovaný v spodnej nosnej mriežke. Spodná nosná mriežka sa privaruje k pätke, určenej na umiestnenie PK do dna koša reaktora. Na kompenzáciu tepelného rozšírenia a radiačného rastu zväzku palivových prútikov vzhľadom na nosnú mriežku je konštrukciou PK zabezpečená možnosť predĺženia palivových prútikov.

Vo vrchnej a spodnej časti obalu pracovnej kazety v oblasti hlavice a pätky sú otvory (po dva na každej strane), určené na zníženie radiálneho namáhania obalovej rúry od tlakového rozdielu chladiva v prípade vzniku maximálnej projektovej havárie, spojenej s roztrhnutím hlavného cirkulačného potrubia.

Konštrukcia PK umožňuje odňať (rozobrať) hlavicu spolu s obalovou rúrou pri vykonávaní revízie zväzku prútikov a pri nutnosti vytiahnutia prútikov.

Základné charakteristiky PK druhej generácie:

- upevnenie prútikov a prútikov s gadolíniom v spodnej mriežke je zabezpečené pružnou zátkou, vrchná zátka prútika a Gd prútika majú kruhový otvor pre spojenie so záchytom pre ich vytiahnutie zo zväzku;
- spojenie obalovej rúry s pätkou je urobené pomocou skrutiek. V oblasti otvorov pre skrutky obalová rúra má cylindrické priehlbiny. Po obvode každého otvoru pod uhlom 90 ° sú na obalovej rúre dva polkruhové výrezy;
- na hlavici každej skrutky pre zaistenie fixačného jamkovania skrutky k pätke je kruhová drážka;
- skrutky upevňujúce obalovú rúru k pätke sú zaistené proti samouvoľneniu jamkovaním, ktoré umožňuje povolenie skrutiek pomocou špeciálneho nástroja;
- vzdialenosť medzi dolnou opornou mriežkou a prvou dištančnou mriežkou je 160 mm;
- dĺžka výstupku na bunke dištančnej mriežky s výškou 10 mm je 4,5 -5,5 mm;
- pod dolnú opornú mriežku sa dáva podporné rebro;
- uholníky, ktorými sa dolná mriežka privaruje k pätke, sa vyrábajú bez ohybu pre privarenie k cylindru;
- k sieťke sa privaruje vložka, do ktorej zachádza centrálna rúrka;
- tri spodné dištančné mriežky majú výšku 20 mm;
- v PK druhej generácie sa pri výrobe obalových rúr a povlakov prútikov používajú zirkóniové zliatiny so zníženým obsahom hafnia - hmotnostný podiel hafnia je maximálne 0,01 %.
- Vonkajšia geometria PK druhej generácie, gabaritné a pripojovacie rozmery, vrátane funkčných rozmerov uzlov, používaných pri transportno-technologických operáciách s palivom na JE, sa neodlišujú od rozmerov štandardného paliva.
- PK druhej generácie nevyžadujú zmeny existujúceho systému kontroly vnútroreaktorových meraní ako dôsledok zachovania geometrických rozmerov centrálnej rúrky zväzku prútikov a tiež nevyžaduje doplňujúce požiadavky k používaniu zariadenia na kontrolu hermetickosti prútikov typu "sipping".

6.1.1.3.3 Havarijná, regulačná a kompenzačná kazeta

Kazeta HRK pozostáva z nadstavca a palivovej časti HRK, spojených navzájom spojovacou tyčou. Palivové prútiky vo zväzku palivovej časti druhej generácie sú rozmiestnené v trojuholníkovej mriežke. Nadstavec je zvarovanou konštrukciou z nehrdzavejúcej ocele, vo vnútri ktorej sú umiestnené šesťhranné vložky z bórovej ocele.

V predpokladanom palivovom cykle sa budú do aktívnej zóny zavážať palivové časti HRK druhej Možnosť spoločnej prevádzky pracovných kaziet druhej generácie s palivovými časťami HRK a pracovnými kazetami predchádzajúcich konštrukcií je ukázaná v [II.10].

Palivová časť HRK je svojou konštrukciou analogická PK s výnimkou nasledujúcich rozdielov: špeciálna pätka, obal palivovej časti HRK nemá perforáciu a v hlavici palivovej časti HRK nie sú pružinové palce.

V palivovej časti HRK druhej generácie upevnenie prútikov a prútikov s gadolíniom v spodnej mriežke je zabezpečené pružnou zátkou.

Kazeta HRK je cez spojovaciu tyč spojená a držaná tyčou pohonu SORR.

Konštrukcia PK umožňuje odňať (rozobrať) hlavicu spolu s obalovou rúrou pri vykonávaní revízie zväzku prútikov a pri nutnosti vytiahnutia prútikov. Upevnenie prútikov v spodnej nosnej mriežke pružnými zátkami typu "цанга" umožňuje ich vytiahnutie zo zväzku za hornú zátku s tvarom pre špeciálny úchyt.

Z výsledkov experimentálnych a výpočtových prác vykonaných v RNC "Kurčatovský inštitút" a v FGUP OKB "GIDROPRESS" vyplynulo, že horná časť palivovej časti HRK (od oceľových stĺpcov po sieťku) je zdrojom píku tepelných neutrónov.

V procese práce reaktora pracovná skupina HRK je čiastočne zasunutá a horné oblasti palivových častí HRK iniciujú pík vývinu energie v prútikoch pracovných kaziet, ktoré obkolesujú pracovnú skupinu HRK. Pre potlačenie týchto píkov sú v palivových častiach HRK na vnútornom povrchu obalovej rúry od horného okraja stĺpca v prútiku po dolný okraj hlavice rozmiestnené doštičky z hafnia (po jednej na každej hrane) s dĺžkou 150,4 mm, šírkou 76,2 mm a hrúbkou 0,6 mm v palivových častiach HRK druhej generácie. Upevnenie doštičiek k obalovej rúre sa vykonáva bodovým zvarom.

V spojitosti s rozmiestnením hafniových doštičiek do konštrukcie palivovej časti HRK v porovnaní s PK sú vnesené nasledujúce zmeny:

- obalová rúra sa vyrába bez výstupkov;
- pre radiálne upevnenie zväzku prútikov vo vrchnej časti palivovej časti HRK sú na širokom obvode dištančnej mriežky realizované výstupky.

Základné charakteristiky palivovej časti HRK druhej generácie:

- prútiky a Gd prútiky sú upevnené v spodnej miežke pomocou zátky, vyrobenej vo forme pružného prvku cylindrického tvaru na konci s ústupkom;
- dĺžka výstupku na bunke dištančnej mriežky s výškou 10 mm je 4,5 -5,5 mm;
- tri spodné dištančné mriežky majú výšku 20 mm;
- v palivovej časti HRK druhej generácie sa pri výrobe obalových rúr a povlakov prútikov používajú zirkóniové zliatiny so zníženým obsahom hafnia - hmotnostný podiel hafnia je maximálne 0,01 %.

Vonkajšia geometria palivových častí HRK druhej generácie, gabaritné a pripojovacie rozmery, vrátane funkčných rozmerov uzlov, používaných pri transportno-technologických operáciách s palivom na JE, sa neodlišujú od rozmerov štandardného paliva. Palivové časti HRK druhej generácie nevyžadujú doplňujúce požiadavky k používaniu zariadenia na kontrolu hermetickosti prútikov typu "sipping".

6.1.1.3.4 Palivový prútik a Gd palivový prútik

Konštrukcia palivového prútika a Gd palivového prútika

Palivový prútik má cylindrický obal -pokrytie, zaslepené na koncoch záslepkami pomocou odporovostykového zvárania. Konštrukcia a rozmery palivových prútikov aj Gd prútikov PK sú rovnaké, odlišnosť je v chemickom zložení tabletiek, ktoré sú v prútiku alebo Gd prútiku. Vo vnútri pokrytia sa nachádza stĺpec paliva, poskladaný z tabletiek oxidu uraničitého pre palivový prútik alebo tabletiek oxidu uraničitého s obsahom Gd₂O₃ pre Gd prútik. Stĺpec paliva je zaistený proti posunutiu pri preprave fixátorom pružinového typu zo železochrómniklovej zliatiny ChN40M5T2GJuBR-ID (EK173-ID) alebo z chrómniklovej nerezovej ocele austenitickej triedy 12Ch18N10T. Sumárna veľkosť medzier v stĺpci paliva, bez uvažovania jednotlivých medzier veľkosti menej ako 1 mm u každej, nie je viac ako 2 mm.

Palivový prútik palivovej časti kazety HRK je svojou konštrukciou analogický palivovému prútiku pracovnej kazety a líši sa od neho tým, že na kompenzáciu lokálnych maxím neutrónového poľa je nad stĺpcom paliva umiestnený stĺpček z chrómniklovej nehrdzavejúcej ocele austenitickej triedy 08Ch18N10T dĺžky 60 mm.

Konštrukcia palivového prútika s dvojšvíkovou hermetizáciou pomocou odporovo-stykového zvárania, dovoľuje vykonávať jeho montáž, zapĺňanie palivom a kontrolu na plnoautomatizovanej linke.

Za účelom zníženia teploty paliva a zlepšenia tepelnej vodivosti plynovej medzery medzi palivovou tabletkou a vnútorným povrchom obalovej rúry je vnútorná dutina palivového prútika zaplnená héliom pod tlakom (0,5 ÷ 0,7) MPa.

Pre účely kompenzácie plynných štiepnych produktov, vytvárajúcich sa v procese prevádzky palivového prútika na výkone, je v konštrukcii palivového prútika vytvorený kompenzačný objem, nachádzajúci sa v hornej časti palivového prútika a tvorený voľným objemom medzi spodným koncom vrchnej záslepky a vrchným koncom palivového stĺpca v pracovných kazetách a vrchným koncom stĺpčeka v palivových prútikoch kaziet HRK.

Materiálom súčastí, z ktorých sa skladajú palivové prútiky, je zirkóniová zliatina (Zr+1%Nb), s výnimkou fixátora a stĺpca.

6.1.1.3.5 Dištančná mriežka

Všetky mriežky v konštrukcii kaziet aktívnej zóny je možné rozdeliť na tri typy: nosné, dištančné a ochranné.

Nosná mriežka sa pomocou umiestňovacích uhlov privára k pätke kazety a slúži na zachytenie váhy zväzku palivových prútikov a na upevnenie palivových prútikov kvôli ich možnému posunutiu. Okrem toho má nosná mriežka potrebný počet priechodných otvorov (perforáciu) pre prúd chladiva, prechádzajúci cez pätku kazety do zväzku. Materiál nosnej mriežky - chrómniklová nehrdzavejúca oceľ.

Dištančné mriežky slúžia na montáž palivových prútikov do zväzku a na udržanie vzdialeností medzi palivovými prútikmi v kazete počas prevádzky v reaktore.

Vrchná mriežka PK hmotnosti 0,279 kg má široký lem s hrúbkou 0,8 mm. Pomocou tohto lemu sa zabezpečuje centrovanie vrchnej časti zväzku palivových prútikov proti výstupkom obalovej rúrky.

Vrchná mriežka palivovej časti kazety HRK hmotnosti 0,193 kg má široký lem s hrúbkou 0,5 mm s výstupkami. Pomocou tohto lemu sa zabezpečuje centrovanie vrchnej časti zväzku palivových prútikov vzhľadom na obalovú rúru v zóne hafniových doštičiek.

Dištančné mriežky PK a palivovej časti kazety HRK majú lem s hrúbkou 0,3 mm.

Na výrobu buniek dištančných mriežok PK a palivových častí kaziet HRK sa používajú rúrky zo zirkóniovej zliatiny E-110.

Ochranná mriežka alebo sieťka je umiestnená v hlavici kazety a je k nej upevnená pomocou privarenia. Funkčne je táto mriežka určená na vyrovnávanie profilu rýchlosti prúdu chladiva na výstupe z kazety, a tiež na zabránenie vyplavovania úlomkov (častí palivových prútikov) do primárneho okruhu reaktorového zariadenia v prípade možnej fragmentácie palivových prútikov v havarijnej situácii.

V konštrukcii PK a palivových častí kaziet HRK sa používa rovnaká ochranná mriežka. Materiál ochrannej mriežky - nehrdzavejúca oceľ.

Konštrukcia dištančnej mriežky predstavuje masív zo 126 tenkostenných buniek špeciálneho profilu spojených bodovým zváraním.

Rozmiestnenie buniek v dištančnej mriežke je trojuholníkové. V každej bunke sú tri výstupky dĺžky 4,5-5,5 mm, zabezpečujúce fixáciu palivového prútika.

V centre dištančnej mriežky je pomocou kontaktného bodového zvárania upevnená centrálna objímka, pomocou ktorej sa mriežka upevňuje na centrálnu rúrku zväzku. Všetky bunky sú na navzájom sa dotýkajúcich stenách a s objímkou pospájané kontaktným bodovým zváraním.

Priebežné DM výšky 10 mm majú hmotnosť 0,093 kg. Do palivových kaziet môžu byť umiestnené tri dolné DM výšky 20 mm a hmotnosti 0,184 kg.

Konštrukcia a technológia zhotovenia bunkových dištančných mriežok zabezpečuje potrebnú zásobu pružnosti pri fixácii palivových prútikov vo zväzku počas doby prevádzky kaziet v reaktore.

Zirkóniové DM prešli komplexným zdôvodnením. Zdôvodnenie zahrňovalo nasledujúce práce:

- výpočtové a experimentálne určenie pružno-plastických charakteristík konštrukcie a odladenie technológie výroby;
- skúmanie koróznych vlastností;
- skúmanie správania ZrDM v podmienkach havárií so stratou chladiva;
- skúmanie opotrebovania na vzorkách pri korózii typu fretting;
- skúšky životnosti kaziet s ZrDM na stende;
- prevádzka skúšobných sérií kaziet v reaktore;
- poradiačné skúmanie jednej kazety po 3 rokoch prevádzky a jednej po 4 rokoch prevádzky.

Výsledky poradiačného skúmania [III.14] ukázali, že dištančné mriežky si zachovali vlastnosti pre splnenie funkčného určenia.

Sila potrebná na vytiahnutie palivových prútikov zo zväzku bola 49 - 225 N, mechanické poškodenia sa nevyskytli, bola zmeraná pevnosť ZrDM, uhlové bunky sa odtrhávali na základnom kove.

6.1.1.3.6 Obalová rúra

Obalová ochranná rúra PK je rúrou šesťhranného prierezu.

Na koncoch rúry sa nachádzajú otvory (po jednom na každej stane), určené na upevnenie rúry k hlavici a pätke PK a otvory priemeru 9 mm (po štyri na každej stane) pre zníženie namáhania rúry pri vzniku tlakových rozdielov v prípade havárií, spojených s roztrhnutím HCP. Funkčné určenie obalovej rúry - vytvorenie silovej kostry, ochrana zväzku palivových prútikov pred mechanickým pôsobením a organizovanie

prúdu chladiva. Zväčšenie rozmeru "pod kľúč" obalovej rúry má za dôsledok zníženie medzikazetových prietokov chladiva a zvýšenie prietoku chladiva cez zväzok palivových prútikov, čo znižuje teplotu chladiva na výstupe z PK.

Obalová rúra palivovej časti kazety HRK je konštrukčne analogická s obalovou rúrou PK, s výnimkou nasledujúcich odlišností:

- chýbajú otvory priemeru 9 mm;
- na hornom konci rúry sa na každej stene nachádzajú po dva otvory, určené na upevnenie k hlavici a pätke;
- na vnútornom povrchu obalovej rúry je rozmiestnených šesť doštičiek z hafnia (po jednej na každej strane);
- obalová rúra sa vyrába bez výstupkov.

Povrch obalových rúr musí byť bez prasklín a rozvrstvenia. Hĺbka mechanických poškodení (otlačenín, rýh, škrabancov) maximálne 0,1 mm. Sú dovolené preliačeniny s miernym sklonom hĺbky maximálne 0,3 mm.

Materiál obalových rúr - zirkóniová zliatina E-125 (Zr+2,5%Nb).

6.1.1.3.7 Nadstavec

Nadstavec je súčasťou kazety HRK a pozostáva z nasledujúcich základných častí: hlavice, 22 vložiek, centrálnej rúry a pätky.

Hlavica nadstavca je určená na umiestnenie v nej prepravných kolíkov a tiež pre upevnenie horného konca obalovej rúry.

Vložka je zhotovená z bórovej ocele a je určená na absorpciu neutrónov.

Centrálna rúra je určená na formovanie vnútornej prietočnej časti a potrebných absorpčných vlastností nadstavca.

Obalová rúra je určená na formovanie pevnej silovej kostry nadstavca a umiestňujú sa do nej vložky. Obalová rúra je spojená s hlavicou a pätkou nadstavca odporovým elektrickým zváraním (dva body na každej stene).

Pätka nadstavca je určená na upevnenie dolnej časti obalovej rúry a formovanie dosadacieho cylindrického povrchu, ktorého vonkajším obvodom sa pätka nadstavca spája s hlavicou palivovej časti kazety HRK.

6.1.1.3.8 Vložka

Vložka je hexagonálnou rúrou. Na vonkajšom povrchu každej steny sú umiestnené štyri sférické výstupky s výškou 2,5 mm a s priemerom sféry 8 mm. Pri zakladaní vložiek do nástavca sa pomocou týchto výstupkov realizuje centrovanie vložiek na vnútornom povrchu obalovej rúry.

Materiál vložiek - chrómniklová nehrdzavejúca oceľ s prísadou prírodného bóru (1,6 ÷ 2,0) hmotnostných %. Vložka sa označuje elektrografickou metódou na podstavcovom povrchu.

6.1.1.3.9 Upevňovacie prvky

Medzi upevňovacie dielce patria prvky konštrukcie PK a palivovej časti kazety HRK, určené na upevnenie základných uzlov PK a palivovej časti kazety HRK v procese montáže mechanicky, alebo pomocou zvárania.

Medzi upevňovacie súčiastky patria:

- skrutky M10, M12 a M14 pripevňujúce obalovú rúru ku koncovým dielcom;

- kolíky, fixujúce pružiny v hlaviciach PK.

Materiál upevňovacích súčiastok - chrómniklová nehrdzavejúca oceľ.

6.1.1.3.10 Centrálna rúrka

Centrálna rúrka je umiestnená v centre palivového zväzku a skladá sa z rúrky zo zliatiny E-110 a koncovky z nehrdzavejúcej ocele. Rúrka sa pripevňuje ku koncovke prostredníctvom stlačenia na dvoch prstencových drážkach. Geometria koncovky je analogická geometrii dolnej záslepky palivového prútika. V koncovke sú dva priečne otvory priemeru 2 mm, ktoré sa spájajú s pozdĺžnym vŕtaním priemeru 4 mm, daný kanál zabezpečuje prietok chladiva cez centrálnu rúrku. Koncovka sa vsádza do otvoru v dolnej nosnej mriežke a privarí sa k nej oblúkovým zváraním v argóne. Hore sa centrálna rúrka vsádza do objímky, privarenej k závernej sieťke.

Po výške centrálnej rúrky sú urobené jedna dvojstranná drážka výšky 1 mm a dĺžky 5 mm, päť dvojstranných drážok výšky 1 mm a dĺžky 15 mm, pre upevnenie dištančných mriežok. Na týchto drážkach sú upevnené dištančné mriežky stlačením centrálnych objímok dištančných mriežok. Cez drážky chladivo prechádza do centrálnej rúrky.

Počas prevádzky v reaktore do centrálnej rúrky PK môžu byť umiestnené snímače DPZ pre meranie neutrónového toku.

6.1.1.3.11 Pružinový blok

V hlavici PK je šesť pružných dorazov. Konštrukcia dorazu zahŕňa prítlačný kolík priemeru 15 mm s hornou časťou sférickej formy z nehrdzavejúcej ocele a pružinu z ocele ChN77TJuR. V uhle hlavice PK sú urobené vŕtania, do ktorých sa umiestňujú pružiny a zhora sa na ne umiestnia prítlačné kolíky. V stave dodávky PK prítlačné palce vystupujú do výšky 22 mm od hornej podstavy hlavice PK. Pre ohraničenie veľkosti premiestnenia prítlačných kolíkov a pre ich upevnenie v hlavici PK slúžia čapy. Počas prevádzky PK sa v reaktore prítlačné kolíky opierajú o blok ochranných rúr.

Pružinové dorazy zabraňujú vyplávaniu pracovnej kazety a slúžia ako kompenzátory teplotného predĺženia a technologických tolerancií vnútroreaktorových častí reaktora a PK.

6.1.1.3.12 Hlavice a pätky

Hlavica pracovnej kazety

Hlavica PK je pevne na šesťhrannom povrchu spojená s obalovou rúrou. Pripevnenie je realizované šiestimi skrutkami M10 alebo M12, po skrutke na stranu. V hlavici PK sú dva kolíky pre transportný záchyt zavážacieho stroja a šesť pružných dorazov. K dolnej podstave hlavice sa na troch úsekoch upevňuje ochranná mriežka. Ochranná mriežka slúži pre udržanie úlomkov v prípade poškodenia palivového prútika v rámci objemu PK a pre vyrovnanie prúdu chladiva na výstupe z PK.

Pätka pracovnej kazety

Pätka PK, rovnako ako hlavica, sa vyrába z nehrdzavejúcej ocele. Pätka sa na šesťhrannom povrchu spája s obalom. Spojenie je realizované šiestimi skrutkami v strede strany kazety. Spojenie obalu s pätkou je rozoberateľné.

PK sa do hniezda dna koša reaktora ustanovuje pätkou, opierajúc sa guľovým povrchom na pätke o kónickú časť hniezda, čo bráni pretekaniu chladiva do medzikazetového priestoru.

Pre orientáciu v pôdoryse je na pätke PK fixačný kolík a v dne koša – príslušná drážka.

Hlavica palivovej časti kazety HRK

Hlavica palivovej časti kazety HRK je pevne na šesťhrannom povrchu spojená s obalovou rúrou. Spojenie je realizované 12 skrutkami, po dve skrutky na stranu. K dolnej podstave hlavice sa na troch úsekoch upevňuje ochranná mriežka. V hlavici palivovej časti kazety HRK sú dva kolíky pre prepravný záves zavážacieho stroja, ktoré zároveň plnia úlohu fixátorov nadstavca od pootočenia. Na vnútornom povrchu hlavice palivovej časti kazety HRK je osadenie, na ktoré sa pätkou umiestňuje nadstavec pri skladaní kazety HRK v reaktore. Hlavica palivovej časti kazety HRK je vybavená upínacím zariadením bajonetového typu so sedlom pre trojuholníkový fixátor, zabezpečujúci spojenie so spojovacou tyčou. Záchytné zariadenie je umiestnené v centre hlavice a privára sa k nej pomocou troch rebier. Spojovacia tyč, prechádzajúca centrom nadstavca po celej jeho výške, sa spája s upínacím bajonetovým zariadením, umiestneným v hlavici palivovej časti kazety HRK, pritom fixujúci trojuholníkový čap spojovacej tyče vchádza do sedla hlavice palivovej časti kazety HRK, čím sa vylučuje možnosť potočenia a následného rozpojenia palivovej časti HRK a spojovacej tyče.

Pätka palivovej časti kazety HRK

Pätka palivovej časti kazety HRK, rovnako ako hlavica, sa vyrába z nehrdzavejúcej ocele. Pätka sa na šesťhrannom povrchu spája s obalom. Spojenie je realizované šiestimi skrutkami v strede strany kazety. Spojenie obalu s pätkou je rozoberateľné. V pätke palivovej časti kazety HRK sa nachádza hydraulický tlmič (zvon), ktorý zabezpečuje tlmenie kazety HRK pri jej samovoľnom pohybe (páde) od pôsobenia vlastnej hmotnosti v havarijnom režime, spojenom so zapracovaním automatickej ochrany prvého druhu, alebo roztrhnutím spojovacej tyče.

Princíp tlmenia sa zakladá na škrtení chladiva (vody) na štrbinách, ktoré sa vytvoria medzi čapom, nachádzajúcim sa v dne šachty reaktora a zvonom pätky palivovej časti HRK, v momente pádu kazety HRK a dosadnutia zvonu na čap. Okrem toho sa škrtenie vody uskutočňuje ešte cez jeden otvor priemeru 3 mm, umiestnenom v dne zvonu pätky palivovej časti kazety HRK.

V havarijnom režime, spojenom so zapracovaním automatickej ochrany prvého druhu, alebo roztrhnutím spojovacej tyče na palivovú časť kazety HRK pôsobia rázové namáhania a pre zabezpečenie pevnosti konštrukcie sa pod spodnú opornú mriežku umiestňujú štyri oporné rebrá, ktoré sa na koncoch privarujú k pätke a v centre ich podopiera rebro, privarené ku dnu zvona.

Hlavica nadstavca

Hlavica nadstavca je pevne na šesťhrannom povrchu spojená s obalovou rúrou. Spojenie je realizované 24 zvarovými bodmi, po dva zvarové body na stranu. V hlavici nadstavca sú dva kolíky pre transportný záchyt zavážacieho stroja a vysústruženie pre technologický záchyt pre manipulácie s nadstavcom. V centre hlavice je centrovacia vložka pre spojovaciu tyč.

Pätka nadstavca

Pätka nadstavca je pevne na šesťhrannom povrchu spojená s obalovou rúrou. Spojenie je realizované 24 zvarovými bodmi, po dva zvarové body na stranu. Na cylindrickej časti pätky sa nachádzajú dve štrbiny, do ktorých zapadajú palce hlavice palivovej časti kazety HRK pri skladaní kazety HRK v reaktore a fixujú nadstavec proti pootočeniu.

6.1.1.3.13 Spojenia

Všetky spojenia v palivových kazetách je možné rozdeliť na rozoberateľné a nerozoberateľné. K rozoberateľným spojeniam patria:

- upevnenia palivových prútikov a palivových prútikov s Gd v dolnej opornej mriežke v palivových kazetách druhej generácie;
- skrutkové spoje obalových rúr s pätkami v palivových kazetách druhej generácie.

Upevnenie palivových prútikov a palivových prútikov s Gd v spodnej mriežke je urobené pružnou koncovkou, zhotovenou vo forme pružného prvku (rúrka s pozdĺžnym zárezom po celej dĺžke) na konci s výstupkom, ktorým sa realizuje zachytenie o kraj otvoru v spodnej opornej mriežke.

Rozoberateľné skrutkové spojenie obalových rúr a pätiek v PK a palivových častiach kaziet HRK sú analogické svojou konštrukciou, len v PK sa používajú skrutky M12 a v palivových častiach kaziet HRK M14. Po nasadení obalovej rúry na pätku sa zatáčajú skrutky s kruhovou drážkou pre jamkovanie momentom 29,4 N·m. Ďalej sa tieto skrutky zaisťujú proti vytáčaniu jamkovaním v dvoch miestach, pre tento účel sú na obale urobené dve drážky polkruhovej formy.

K nerozoberateľným spojeniam sa radia skrutkové spoje obalových rúr k hlaviciam PK a palivovým častiam kaziet HRK. Tieto spoje sú realizované skrutkami M10 alebo M12 so zavalcovaním obalu pre skrutku. Zavalcovanie sa vykonáva špeciálnym nástrojom. Po zatiahnutí sa skrutky kontrujú zavarom.

Dielce hlavíc a pätiek PK, palivových častí kaziet HRK a nadstavca sa spájajú oblúkovým zváraním v argóne.

Všetky DM sú na navzájom sa dotýkajúcich stenách, s vložkou a lemom spojené kontaktným bodovým zváraním. Po výške bunky sa robí po dva zvarné body.

6.1.1.4 PROJEKTOVÉ KRITÉRIÁ PALIVOVÉHO SYSTÉMU

Dávkové limity pre obyvateľstvo sú definované v [I.9] a v [II.1].

Tieto dávkové limity sú logicky preformulované do nasledujúcich "kvalitatívnych požiadaviek na palivový systém" resp. "bezpečnostných cieľov":

- Palivový systém nie je poškodený pri normálnej prevádzke a očakávaných prechodových procesoch, pričom v tejto súvislosti "nie je poškodený" znamená, že palivové prútiky nezlyhajú, že rozmery palivových prútikov zostanú v rozsahu výrobných tolerancií a že funkčné schopnosti nie sú zredukovaná pod úroveň predpokladanú v bezpečnostných analýzach;
- Počet počkodených palivových prútikov nie je podcenený v zmysle dávkového príkonu pre obyvatelstvo pri projektovej havárii s uvážení skutočnosti, že palivová matrica predstavuje prvú bariéru zamedzujúcu šíreniu radioaktivity do životného prostredia a pokrytie palivových prútikov je druhou bariérou;
- 3. Vyšší počet poškodených palivových tyčí pri projektovej havárii je dovolený pokiaľ je zachovaná možnosť chadenia a zasunutia regulačných tyčí do aktívnej zóny.

Tieto kvalitatívne požiadavky na palivový systém sú opäť preformulované na súbor "kvantitatívnych požiadaviek na palivový systém": bezpečnostné kritériá, prevádzkové kritériá a projektové kritériá. Bezpečnostné kritériá sú limity stanovené jadrovým dozorom tak, že pokiaľ sú dodržané, zaručujú, že dopad akejkoľvek projektovej havárie je prijateľný z hľadiska vplyvu na životné prostredie. Prevádzkové kritériá sú limity väčšinou schválené jadrovým dozorom, ktoré pokrývajú normálne prevádzkové podmienky a častejšie prevádzkové udalosti. Projektové kritériá sú limity, ktoré napokon majú byť dodržané projektantom paliva, aby sa zaistilo splnenie bezpečnostných a prevádzkových kritérií.

Tieto projektové kritériá, rozdelené na prevádzkové projektové kritériá s aplikáciou pri normálnej a abnormálnej prevádzke a bezpečnostné projektové kritériá s aplikáciou na abnormálnu prevádzku a havarijné podmienky sú uvedené v Tab. 6.1.1.4-1 a Tab. 6.1.1.4-2 podľa [II.25].

Projektové kritérium	Projektový parameter
SC1	Korózneho praskanie pokrytia pod napätím
SC2	Medzné napätie v pokrytí palivového prútika
SC3	Medzný tlak chladiva
SC4	Medzná hodnota miery poškodenia pokrytia
SC5	Medzná zvyšková deformácia pokrytia
DC1	Medzná zmena priemeru pokrytia palivového prútika
DC2	Limitné predĺženie pokrytia palivového prútika (axiálny rast)
TC1	Limitná teplota paliva
TC2	Limitný tlak plynu v palivovom prútiku
TC3	Medzný lineárny výkon palivového prútika
TC4	Limitný skok lineárneho tepelného výkonu v palivovom prútiku

Tab. 6.1.1.4-1 Projektové kritériá spoľahlivosti prevádzky palivových prútikov

vůje

Projektové kritérium	Projektový parameter
KC1	Oxidácia vonkajšieho povrchu pokrytia palivového prútika
KC2	Hydrogenácia pokrytia palivového prútika
FD	Opotrebovanie pokrytia palivového prútika
FEN	Obohatenie paliva
PF	Koeficient nerovnomernosti rozloženia výkonu po polomere aktívnej zóny (Kr) a po objeme aktívnej zóny (K0)
CA	Aktivita primárneho chladiva
DNO	Pravdepodobnosť vzniku krízy prestupu tepla DNBR

Tab. 6.1.1.4-2 Projektové kritériá bezpečnosti palivových prútikov a palivových článkov

Projektové kritérium	Projektový parameter
DNS	Pravdepodobnosť vzniku krízy prestupu tepla DNBR
AC1	Maximálna teplota pokrytia palivových prútikov
AC2	Maximálna hĺbka lokálnej oxidácie pokrytia palivového prútika
AC3	Maximálny podiel Zr v aktívnej zóne zreagovaného s parou
AC4	Maximálna radiálne stredovaná entalpia v palivovom prútiku
AC5	Žiadne lokálne tavenie paliva
AC6	Dlhodobé chladenie aktívnej zóny
SL	Seismické zaťaženia
RC	Koeficient reaktivity od teploty moderátora
RD	Doba pádu mechanických orgánov regulovania (kazety HRK/ regulačné tyče) do aktívnej zóny reaktora
SDM	Rezerva podkritickosť aktívnej zóny
AHF	Prítlačná sila na palivovú kazetu
FD	Opotrebovanie palivovej kazety
TL	Zaťaženia paliva pri preprave

Tieto kritériá sú aplikované na palivové prútiky, palivové kazety, mechanické orgány na kontrolu reaktivity. Čiastočne sa vzťahujú tiež na vnútorné časti reaktora a na systémy chladenia a chemickú kontrolu reaktivity.

Verifikácia splnenia projektového kritéria pre palivo, limitujúce projektový parameter, je vykonaná pomocou rezervného koeficientu Zadefinujeme nasledujúce veličiny:

R = vypočítaná hodnota projektového parametra;

R_{limit} = limitná hodnota projektového parametra;

- [R] = prípustná hodnota projektového parametra;
- K = vypočítaná hodnota rezervného koeficienta;

[K] = prípustná hodnota rezervného koeficienta.

Predpokladajme, že medzi uvedenými veličinami platia nasledovné vzťahy:

 $K = R_{limit} / [R] a$

 $[R] = R_{limit} / K$

Projektové kritérium je splnené, pokiaľ

K≥ [K] alebo R≤ [R].

Takýto prístup je v súlade s [II.15] "Analýza rozdielov palivových bezpečnostných kritérií pre jadrové elektrárne s VVER a západnými PWR reaktormi" (v angličtine).

6.1.1.4.1 Projektové kritériá prevádzkyschopnosti palivových prútikov

6.1.1.4.1.1 Pevnostné kritériá

Korózne praskanie pod napätím v atmosfére agresívnych produktov štiepenia

Definícia kritéria SC1. Všeobecná podmienka zachovania pevnosti palivového prútika pri mechanizme KPN spočíva v tom, že vo všetkých projektových režimoch sa vylučuje vznik trhlín na vnútornom povrchu pokrytia a strhávanie počiatočného technologického defektu.

Preto sa pre zabezpečenie pevnosti palivového prútika používa podmienka:

$$\sigma_{\theta} \leq [\sigma_{SC1}], \ [\sigma_{SC1}] = \sigma_{SCC} / [K_{SC1}],$$
 (6.1.1.4.1-1)

kde je σ_{θ} – obvodové napätia v pokrytí;

 $[\sigma_{SC1}]$ – dovolené napätia pre dané kritérium SC1, MPa;

 σ_{SCC} – prahové napätie korózneho praskania pod napätím ožiareného pokrytia zo zliatiny E-110;

 $[K_{SC1}]$ – normatívny koeficient rezervy, $[K_{SC1}] = 1,2$.

Príčina zavedenia kritéria. Podmienky prevádzkovania pokrytia palivového prútika v aktívnej zóne sú charakterizované prítomnosťou korózneho prostredia, čo spolu s pôsobením mechanického zaťaženia môže, pri určitých podmienkach, viesť k rozvoju procesu korózneho praskania pod napätím. Pod pokrytím palivových prútikov sa prostredie agresívne voči zirkóniu vytvára na účet štiepnych produktov, určujúcu úlohu spomedzi ktorých, ako ukázal experimentálny výskum, hrá jód.

Medzné ekvivalentné napätia v pokrytí

Definícia kritéria SC2 Maximálne ekvivalentné napätie v pokrytí palivového prútika nesmie presiahnuť dovolenú hodnotu - medzu klzu materiálu pokrytia.

$$\sigma eff \le [\sigma_{SC2}], \ [\sigma_{SC2}] = \sigma_{02},$$
 (6.1.1.4.1-2)

kde je σ_{02} – medza klzu materiálu pokrytia v závislosti od fluencie a teploty, MPa;

σeff – efektívne napätia, vypočítavané podľa vzorca Hilla, MPa;

 $[\sigma_{SC2}]$ – dovolené napätia pre kritérium SC2, MPa.

Príčina zavedenia kritéria. Počas prevádzky musí byť vylúčené porušenie palivového prútika v dôsledku straty obvodovej odolnosti pokrytia (kolaps) od pôsobenia vonkajšieho pretlaku. Konzervatívne je vzaté, že strata odolnosti sa uskutočňuje mechanizmom «plastického kĺbu», keď ekvivalentné napätia v pokrytí

palivového prútika sa stávajú väčšími ako medza klzu. Tomuto stavu sa priraďuje výpočtová hodnota kritického tlaku.

Realizácia stavu plastického kĺbu je možná, napríklad, pri zvýšení tlaku v primárnom okruhu reaktora v režime hydraulických skúšok.

Tu je potrebné poznamenať, že presiahnutie medze klzu nie je faktorom, limitujúcim prevádzkyschopnosť palivového prútika, preto sa kritérium SC2 používa len vo výpočtoch odolnosti v rámci kritéria SC3.

Strata obvodovej odolnosti pokrytia pri tlakovom rozdiele

Definícia kritéria SC3. Kritérium SC3 sa používa pre zhodnotenie rezervy do straty odolnosti voči tlakovému rozdielu na pokrytí. Hodnota limitného tlaku sa určuje výpočtovou cestou.

Pokrytie palivového prútika si pod pôsobením vonkajšieho pretlaku chladiva zachováva obvodovú odolnosť so zohľadnením nahromadenej (alebo počiatočnej) oválnosti za podmienky:

$$\mathsf{P}_{\mathsf{CHL}} \leq [\mathsf{P}_{\mathsf{SC3}}], \quad [\mathsf{P}_{\mathsf{SC3}}] = \mathsf{P}_{\mathsf{LIMIT}} / [\mathsf{K}_{\mathsf{SC3}}],$$

(6.1.1.4.1-3)

(6.1.1.4.1-4)

kde je P_{CHL} – tlak chladiva, MPa;

[P_{SC3}] – dovolená hodnota vonkajšieho tlaku, MPa;

P_{LIMIT} – výpočtový limitný vonkajší tlak, vyvolávajúci okamžitú stratu odolnosti pokrytia mechanizmom plastického kĺbu (kritérium SC2), MPa;
 [K_{SC3}] – normatívny koeficient rezervy;

 $[K_{SC3}] = 1,5.$

Príčina zavedenia kritéria. Kritérium sa zavádza pre vylúčenie poškodenia palivového prútika v dôsledku straty obvodovej odolnosti pokrytia (kolaps) pod pôsobením vonkajšieho pretlaku.

Únavová a dlhodobá pevnosť pokrytia

Definícia kritéria SC4. Počas prevádzky sa v pokrytí palivového prútika hromadia poškodenia, spôsobené cyklickým a dlhodobým statickým namáhaním. Nahromadené sumárne poškodenia sa charakterizujú bezrozmernou veličinou – mierou poškodení:

 $W = W_{cycl} + W_{stat}$

kde je W – nahromadená miera poškodenia;

W_{cycl} – nahromadené únavové poškodenie;

W_{stat} – nahromadené statické poškodenie.

Miera nahromadenia poškodení od cyklických záťaží sa určuje podľa pravidla lineárneho sčítavania poškodení, nasledujúcim spôsobom:

$$W_{cycl} = \sum_{i=1}^{k} \frac{N_i}{\langle N_0 \rangle_i}$$
(6.1.1.4.1-5)

kde je Ni – počet cyklov i-teho typu za čas prevádzkovania pokrytia palivového prútika;

<No>i – dovolený počet cyklov i-teho typu, určovaný podľa únavovej krivky;

k – počet rôznych typov cyklov.

Analogicky sa vypočítava miera nahromadenia statických poškodení, určovaných dlhodobým statickým namáhaním:

$$W_{\text{stat}} = \int_{0}^{t} \frac{dt}{\langle t \rangle}$$
(6.1.1.4.1-6)

kde je <t> – doba, určovaná podľa krivky dlhodobej odolnosti pre dané podmienky namáhania.

Part name / Označenie časti:	PNM3436102711_S_C01_V	Page No. / Strana č.:	33/92
		MO34-002r00	



Pokrytie palivového prútika pod vplyvom cyklických a dlhodobých statických záťaží počas kampane nevyčerpáva svoju životnosť pri splnení nasledujúcej podmienky:

$$W \le [W], [W] = W_{LIMIT} / [K_{SC4}]$$
 (6.1.1.4.1-7)

kde je [W] – dovolená hodnota miery poškodenia;

$$[K_{SC4}]$$
 – normatívny koeficient rezervy, $[K_{SC4}]$ = 10.

Príčina zavedenia kritéria. Nahromadenie poškodení v pokrytí palivového prútika, spôsobených cyklickým a dlhodobým statickým namáhaním počas prevádzky, môže viesť k dehermitizácii pokrytia.

Limitná zvyšková deformácia pokrytia

Definícia kritéria SC5. Aby bola zachovaná pevnosť pokrytia prútika nahromadená kruhová zvyšková deformácia roztiahnutia pokrytia v prechodovom režime nesmie byť väčšia ako 0,5 %.

$$\mathcal{E}_{\theta}^{\rho} \leq [\mathcal{E}_{\theta}^{\rho}], \quad [\mathcal{E}_{\theta}^{\rho}] = \mathcal{E}_{\theta \text{ LIMIT}}^{\rho} / [\mathsf{K}_{\mathsf{SC5}}]$$
(6.1.1.4.1-8)

kde je $\mathcal{E}^{\rho}_{\theta}$ – nahromadená kruhová zvyšková deformácia pokrytia;

 $[\mathcal{E}_{\theta}^{\rho}]$ – dovolená nahromadená kruhová zvyšková deformácia pokrytia;

 $\mathcal{E}^{\rho}_{\theta \text{ LIMIT}}$ – limitná hodnota kruhovej zvyškovej deformácie, rovná 0,5 %;

 $[K_{SC5}]$ – normatívny koeficient rezervy, $[K_{SC5}] = 1$.

Príčina zavedenia kritéria. Toto kritérium sa používa v prechodových režimoch NPP na hodnotenie pevnosti pokrytia v krátkodobých režimoch termo-mechanických záťaží, kedy úroveň napätia prekračuje prahovú hodnotu KPN, ale podmienky pre porušenie týmto mechanizmom nevznikli vzhľadom na krátku dobu trvania režimu.

Vysoké napätia sa môžu objaviť iba pri deformácii (roztiahnutí) pokrytia tepelne sa rozťahujúcim palivovým jadrom (zaťaženie deformáciou) v prechodových režimoch prevádzky.

Kritérium je použiteľné v prechodových režimoch NNPP so zvýšením výkonu, pri ktorých trvajú napätia v pokrytí pomerne krátku dobu, behom ktorej nevznikajú podmienky na porušenia typu KNP, napríklad pri neriadenom vysunutí skupiny kaziet HRK z aktívnej zóny.

6.1.1.4.1.2 Deformačné kritériá

Limitná hodnota zmeny priemeru pokrytia

Definícia kritéria DC1. Zmena vonkajšieho priemeru pokrytia palivového prútika počas prevádzky je maximálne ΔD_{MAX} s koeficientom rezervy.

$$\Delta \mathsf{D} \le [\Delta \mathsf{D}], \quad [\Delta \mathsf{D}] = \Delta \mathsf{D}_{\mathsf{MAX}} / [\mathsf{K}_{\mathsf{DC1}}] \tag{6.1.1.4.1-9}$$

kde je ΔD – zmena vonkajšieho priemeru pokrytia, mm;

[ΔD] – dovolená zmena vonkajšieho priemeru pokrytia, mm;

- ΔD_{MAX} limitná zmena vonkajšieho priemeru pokrytia, definujú sa dve hodnoty: pre zväčšenie a pre zmenšenie priemeru pokrytia, ΔD_{MAX} = -0,12 / +0,03 mm;
- $[K_{DC1}]$ normatívny koeficient rezervy, $[K_{DC1}] = 1,2$.

Príčina zavedenia kritéria. Toto kritérium kontroluje prevádzkyschopnosť palivových prútikov v zostave kazety. Limitná hodnota zmeny priemeru zabezpečuje potrebné termohydraulické charakteristiky pre spoľahlivý odvod tepla, spoľahlivosť upevnenia palivového prútika v dištančných mriežkach a vylúčenie opotrebovania pokrytia typu fretting.

Medzná hodnota predĺženia palivového prútika

Definícia kritéria DC2. Predĺženie palivových prútikov počas prevádzky je ohraničené medzerou medzi hornými záslepkami palivových prútikov a hlavicou kazety.

$$\Delta L \leq [\Delta L], \quad [\Delta L] = \Delta L_{MAX} / [K_{DC2}] \tag{6.1.1.4.1-10}$$

kde je ΔL – zväčšenie dĺžky palivového prútika od počiatočnej výrobnej hodnoty, mm;

[Δ L] – dovolená hodnota predĺženia palivového prútika, mm;

ΔL_{MAX} – medzera medzi hornými záslepkami palivových prútikov a hlavicou kazety;

[K_{DC2}] – normatívny koeficient rezervy.

Príčina zavedenia kritéria. Predĺženie palivových prútikov počas prevádzky nesmie viesť k opretiu horných záslepiek palivových prútikov o hlavicu kazety. Nadmerné predĺženie môže viesť k objaveniu sa veľkých osových zaťažení, nedovolenému pokriveniu palivového prútika, alebo strate osovej pevnosti.

6.1.1.4.1.3 Teplofyzikálne kritériá

Limitná teplota paliva

Definícia kritéria TC1. Veličina limitnej teploty paliva je ohraničená teplotou tavenia paliva. Pod teplotou tavenia sa rozumie teplota pevnej fázy.

Teplota paliva v režimoch NPP a NNPP nesmie prevyšovať dovolenú hodnotu:

$$T \leq [T], [T] = T_{TAV} / [K_{TCI}],$$
 (6.1.1.4.1-11)

kde je T – teplota paliva, °C;

[T] – dovolená hodnota teploty paliva, °C;

T_{TAV} – teplota tavenia dioxidu uránu v závislosti od vyhorenia (6.1.1.2-1), °C;

B – vyhorenie paliva, MW.dní/kgU;

 $[K_{TC1}]$ – normativny koeficient rezervy, $[K_{TC1}] = 1, 1$.

Prídavok Gd_2O_3 znižuje teplotu solidusu [II.14]. Preto sa v analýzach teplotného stavu palivového prútika prijíma teplota tavenia dioxidu uránu, ale aj tak sa ako normatívny koeficient rezervy používa vyššia hodnota [K_{TC1}].

Príčina zavedenia kritéria. Kritérium sa zavádza pre odvrátenie tavenia paliva. Roztavené palivo pri vzájomnom pôsobení s pokrytím môže spôsobiť dehermetizáciu palivového prútika.

Medzná hodnota tlaku plynov pod pokrytím palivového prútika

Definícia kritéria TC2. Tlak plynov pod pokrytím palivového prútika musí byť:

 $P_{P} \leq [P], [P] = P_{CHL} / [K_{TC2}]$

(6.1.1.4.1-12)

kde je P_P – tlak plynov pod pokrytím palivového prútika, MPa;

[P] – dovolená hodnota tlaku plynov, MPa;

P_{CHL} – limitná hodnota tlaku, rovná tlaku chladiva pre režimy NPP a NNPP, MPa;

 $[K_{TC2}]$ – normatívny koeficient rezervy, $[K_{TC2}] = 1, 1$.

vūje

Príčina zavedenia kritéria. Zvýšenie tlaku plynnej zmesi pod pokrytím do hodnôt, prevyšujúcich tlak chladiva, môže viesť k opätovnému otvoreniu medzery medzi palivom a pokrytím, t.j. realizuje sa takzvaný stav LIFT-OFF, ktorý vedie k objaveniu sa spätnej kladnej väzby pre uvoľňovanie plynu. Otvorenie medzery zmenšuje koeficient prestupu tepla cez medzeru palivo-pokrytie, toto vedie k zvýšeniu teploty paliva, čo zintenzívňuje proces uvoľňovania plynov. Zvýšenie uvoľňovania plynov privádza, za prvé, k zvýšeniu vnútorného tlaku a za druhé, k zvýšeniu koncentrácie xenónu a kryptónu. Tieto dva faktory spôsobujú ešte väčšie zhoršenie prestupu tepla v medzere palivo-pokrytie, z dôvodu dodatočného zväčšenia medzery v dôsledku tečenia pokrytia palivového prútika (zväčšenie tlaku plynov) a zmenšenia koeficientu tepelnej vodivosti plynnej zmesi (zvýšenie koncentrácie xenónu a kryptónu). To znamená, že sa proces zvýšenia tlaku pod pokrytím palivového prútika urýchľuje, čo môže viesť k nedovolenému zväčšeniu priemeru pokrytia v dôsledku tečenia a, v konečnom výsledku, k poškodeniu.

Preto, aby sa vylúčil proces LIFT-OFF, projektanti palivových prútikov určujú buď medznú hodnotu prevýšenia vnútorného tlaku nad tlakom chladiva, alebo ohraničujú limitný tlak plynov hodnotou, rovnou tlaku chladiva. Druhá z uvedených limít je konzervatívnejšia a garantovane vylučuje efekt LIFT-OFF.

Limitný lineárny výkon palivového prútika

Definícia kritéria OC1 (TC3). Maximálny lineárny výkon v palivových prútikoch nesmie prevyšovať hodnoty, určované príslušnou limitnou krivkou lineárneho výkonu od vyhorenia.

Limitná krivka lineárneho výkonu palivového prútika v stacionárnom režime prevádzky do určeného, projektového vyhorenia predstavuje výpočtovo-analytickú závislosť dovoleného maximálneho lokálneho lineárneho výkonu palivového prútika od stredného vyhorenia paliva.

Limitná krivka predstavuje úsekovo-lineárnu závislosť dovoleného lineárneho výkonu od stredného vyhorenia v palivovom prútiku.

Príčina zavedenia kritéria. Toto kritérium je klasifikované ako prevádzkové kritérium pre režimy NPP vo forme limitného lokálneho výkonu v závislosti od stredného vyhorenia v palivovom prútiku. Jeho zavedenie zabezpečuje splnenie nasledujúcich teplo-fyzikálnych parametrov:

- neprítomnosť tavenia paliva;
- zabezpečenie limitne dovoleného tlaku plynov pod pokrytím palivového prútika;
- ohraničenie úniku agresívnych produktov štiepenia (Cs, I) v prechodových režimoch, čo znižuje riziko poškodenia pokrytia palivového prútika prostredníctvom mechanizmu KPN.
Splnenie ohraničenia na maximálny lineárny výkon palivového prútika v kazete s UGP zabezpečuje požadované ohraničenia pre výkon palivových prútikov s Gd.

Limitný lineárny skok tepelného výkonu palivového prútika

Definícia kritéria TC4. Maximálny skok lineárneho tepelného výkonu (LHGR) nesmie prekročiť hodnotu definovanú príslušnou limitnou krivkou dovoleného lokálneho vzrastu lineárneho výkonu v závislosti na vyhorení. Táto krivka je uvedená v Kapitole 06.01.03 Predprevádzkovej bezpečnostnej správy 3. a 4. bloku JE Mochovce (Obr. 6.1.3.2.3-1).

Zdôvodnenie kritéria. Zmeny výkonu prútika v priebehu premenlivej prevádzky reaktora vyvolávajú zmeny teploty paliva ktoré spôsobujú mechanické zaťaženia pokrytia palivových prútikov.

Prevádzkový limit DNB

Definícia kritéria DNO. Na zabezpečenie toho, aby v reaktore nedochádzalo k zmene skupenstva chladiva, bude použitá nasledovná podmienka:

		$\Phi_q \leq [\Phi_q], [\Phi_q] = \Phi_{q \text{ limit}} \ / \ [K_{DNO}]$	(6.1.1.4.1-13)				
kde je	Φ_q	 výpočtová hodnots tepelného toku; 					
	[Φ _q]	 dovolená hodnota tepelného toku; 					
	$\Phi_{q limit}$	 tepelný tok spôsobujúci odklon od bublinkového varu; 					
	[K _{DNO}]	 dovolená hodnota rezervného koeficientu, [K_{DNO}] = [DNBR_{DNO}]; 					
		dovoloná hodnoto DNPD					

 $[DNBR_{DNO}]$ - dovolena hodnota DNBR.

Zdôvodnenie kritéria. Zmena skupenstva chladiva v reaktore pri nahrievaní je spojená s vytvorením parného filmu na povrchu prútika. Nízky prestup tepla cez parný film a oscilácie pozície tohto filmu spôsobujú významné zmeny teploty povrchu pokrytia. Možná nasledovná rýchla oxidácia (alebo dokonca tavenie) môžu spôsobiť poruchu pokrytia.

6.1.1.4.1.4 Korózne kritériá

Oxidácia vonkajšieho povrchu pokrytia

Definícia kritéria KC1. Hodnota hrúbky oxidačného povlaku na vonkajšom povrchu pokrytia palivového prútika nesmie presiahnuť:

$$h \le [h], [h] = h_{limit} / [K_{KC1}]$$
 (6.1.1.4.1-14)

kde je h – hrúbka oxidačného povlaku na vonkajšom povrchu pokrytia;

[h] – dovolená hrúbka oxidačného povlaku na vonkajšom povrchu pokrytia;

h_{limit} – limitná hodnota hrúbky oxidačného povlaku na vonkajšom povrchu pokrytia;

[K_{KC1}] – normatívny koeficient rezervy.

Príčina zavedenia kritéria. Nadmerná korózia pokrytia palivových prútikov môže viesť k porušeniu požiadaviek na prevádzkyschopnosť v zostave kaziet; narušeniu odvodu tepla a nárastu teploty pokrytia, jeho zvýšenej hydratácii a neprípustnému zníženiu mechanických charakteristík pokrytia počas celej doby životnosti pri pracovných parametroch chladiva.

Vodíkové krehnutie

Definícia kritéria KC2. Obsah vodíka v pokrytí palivového prútika:

VUJE, a. s.



$$H \leq [H], \quad [H] = H_{limit} \, / \, [K_{KC2}]$$

- [H] dovolený obsah vodíka v pokrytí;
- H_{limit} limitný obsah vodíka v pokrytí;
- $\left[K_{\text{KC2}}\right]$ normatívny koeficient rezervy.

Príčina zavedenia kritéria. Zvýšený obsah vodíka v zirkóniovom pokrytí môže viesť k hydrogénovému poškodeniu.

Fretting-opotrebovanie pokrytia

Definícia kritéria FD. Fretting-opotrebovanie pokrytia v miere, ovplyvňujúcej prevádzkyschopnosť palivového prútika, nie je dovolené.

Príčina zavedenia kritéria. V rade prípadov v dôsledku vibrácie teplo vyvíjajúcich prvkov v prúde chladiva je možné obrusovanie pokrytia v miestach kontaktu s dištančnými mriežkami až do dehermetizácie.

6.1.1.4.2 Projektové kritériá bezpečnosti

Experimentálne zdôvodnenie limitných hodnôt bezpečnostných kritérií je uvedené v [III.13].

Bezpečnostný limit DNB

Definícia kritéria DNS:

Na zabezpečenie toho, aby v reaktore nedochádzalo k zmene skupenstva chladiva, bude použitá nasledovná podmienka:

ሰ / [ሰ]	[/ [/]	(611121)
$\Psi_{a} \geq \Psi_{a} ,$	$ \Psi_{a} = \Psi_{a} \text{imit} / \Gamma_{DNS} ,$	(0.1.1.4.2-1)

kde je	Φ_q	 výpočtová hodnots tepelného toku;
	[Φ _q]	 dovolená hodnota tepelného toku;
	$\Phi_{q limit}$	 tepelný tok spôsobujúci odklon od bublinkového varu;
	[K _{DNS}]	 dovolená hodnota rezervného koeficientu, [K_{DNS}] = [DNBR_{DNS}];
	[DNBR _{DNS}]	- dovolená hodnota DNBR.

Zdôvodnenie kritéria

Zmena skupenstva chladiva v reaktore pri nahrievaní je spojená s vytvorením parného filmu na povrchu prútika. Nízky prestup tepla cez parný film a oscilácie pozície tohto filmu spôsobujú významné zmeny teploty povrchu pokrytia. Možná nasledovná rýchla oxidácia (alebo dokonca tavenie) môžu spôsobiť poruchu pokrytia.

Limitná teplota pokrytia

Definícia kritéria. Teplota pokrytia palivových prútikov nesmie byť viac ako 1200 °C (kritérium AC1);

Ekvivalentný stupeň oxidácie pokrytia nesmie byť vyšší ako limitná hodnota, definovaná v projekte na základe experimentálnych údajov.

V tomto projekte je zvolená limitná hodnota ekvivalentného stupňa oxidácie 17 % [II.13].

Ekvivalentný stupeň oxidácie pokrytia – sumárna hrúbka ekvivalentnej vrstvy, ktorá by zreagovala s vodnou parou za predpokladu, že všetok lokálne pohltený kyslík sa použil na vytvorenie stechiometrického dioxidu

zirkónia ZrO₂, vztiahnutá k počiatočnej hrúbke pokrytia. V prípade dehermetizácie pokrytia sa zohľadňuje oxidácia ako vonkajšieho, tak aj vnútorného povrchu pokrytia;

Príčina zavedenia kritéria. Nie je dovolený vznik samoudržiavajúcej sa paro-zirkóniovej reakcie.

Krehnutie pokrytia v dôsledku jeho chemickej reakcie s chladivom musí byť ohraničené takým spôsobom, aby palivové prútiky odolali termo-mechanickému namáhaniu počas procesu havárie a pri vyvážaní palivových kaziet. Toto je nutné pre splnenie požiadavky o zabránení poškodenia paliva a pokrytia, ktoré by mohlo mať vplyv na dlhodobé efektívne chladenie aktívnej zóny [III.5], [II.13], [II.15].

Limitná hĺbka oxidácie pokrytia

Definícia kritéria AC2:

Na zabezpečenie toho, aby lokálna oxidácia neohrožovala stabilitu pokrytia, bude použitá nasledovná podmienka:

 $h_{l} \le h_{limit}$ (6.1.1.4.2-2)

kde je

h_I – hĺbka lokálnej oxidácie;

h_{limit} – limitná hodnota hĺbky lokálnej oxidácie .

Zdôvodnenie kritéria:

Nadmerná korózia pokrytia palivového prútika môže viesť k nedodrženiu požiadaviek na prevádzku palivových kaziet, k prekročeniu podmienok na prestup tepla a k nárastu teploty pokrytia, k zvýšenej koncentrácii hydridov a k nedovolenej degradácii mechanických charakteristík pokrytia za dobu jeho životnosti v chladive s prevádzkovými parametrami.

Limitné množstvo zoxidovaného zirkónia

Definícia kritéria AC3. Podiel zreagovaného zirkónia v aktívnej zóne nesmie byť viac ako 1 % jeho hmotnosti v pokrytí palivových prútikov.

Príčina zavedenia kritéria. V dôsledku reakcie oxidácie zirkónia sa uvoľňuje plynný vodík.

Množstvo vytvoreného vodíka v aktívnej zóne v dôsledku interakcie zirkónia s chladivom musí byť ohraničené takým spôsobom, aby sa vylúčilo vytvorenie výbušnej zmesi. Je to potrebné pre vylúčenie poškodení, schopných značne zhoršiť chladiteľnosť aktívnej zóny [III.5], [II.13], [II.15].

Neprítomnosť tavenia paliva

Definícia kritéria AC4. Maximálne teplota paliva nesmie byť vyššia ako teplota tavenia:

$$T_{tav} = T_{tav 0} - 0,56 \cdot B \qquad (6.1.1.4.2-3)$$

kde je B – vyhorenie, MW.dni/kgU [III.9].

Príčina zavedenia kritéria. V dôsledku čiastočného tavenia palivových tabletiek je možná interakcia taveniny s pokrytím palivového prútika, čo môže viesť k prehriatiu a poškodeniu pokrytia (oxidácia, eutektická interakcia, tavenie) a, ako dôsledok, k porušeniu chladiteľnej geometrie. Okrem toho, premiestnenie taveniny paliva môže vplývať na hodnotu a rozloženie vývinu energie v aktívnej zóne.

Kritérium je zavedené pre splnenie požiadavky na vylúčenie poškodenia paliva a pokrytia, ktoré by mohlo vplývať na dlhodobé efektívne chladenie aktívnej zóny [III.5], [II.13] a pre splnenie požiadavky o zabezpečení spoľahlivého riadenia zmien reaktivity v postulovaných haváriách [III.5], [II.13], [II.15].

Absencia fragmentácie palivových prútikov počas havárie s nárastom reaktivity

Definícia kritéria AC5. V projektových haváriách, spojených s rýchlym zvýšením reaktivity, stredná v priečnom priereze palivovej tabletky (stredná radiálna) entalpia paliva nesmie byť vyššia ako limitná hodnota, určovaná v projekte na základe experimentálnych údajov a tiež musí byť vylúčené poškodenie palivových prútikov a palivových kaziet.

Príčina zavedenia kritéria. V dôsledku rýchleho uvoľnenia energie v palive pri náraste reaktivity je možné prevýšenie špecifickej prahovej energie fragmentácie palivového prútika. Fragmentácia palivových prútikov môže byť sprevádzaná uvoľnením značného množstva mechanickej energie a prudkým nárastom tlaku v primárnom okruhu, ktorý môže viesť k jeho poškodeniu. Rovnako môže fragmentácia palivových prútikov porušiť chladiteľnú geometriu aktívnej zóny.

Kritérium je zavedené pre splnenie požiadavky na vylúčenie poškodenia hraníc primárneho okruhu nad rámec limitného lokálneho úniku a na vylúčenie poškodení, schopných značne zhoršiť chladiteľnosť aktívnej zóny [III.5], [II.13], [II.15].

Ako miera špecifickej prahovej energie fragmentácie palivového prútika slúži limitná dovolená hodnota strednej v priečnom priereze tabletky enatalpie paliva.

Pre JE V2 Bohunice a JE Mochovce - 1. a 2. blok bolo v správe [I.37] ukázané, že i pri najrazantnejšej havárii typu RIA - vystrelení regulačnej kazety - zostáva rezerva 20 % v hodnotách strednej radiálnej entalpie paliva do vyššie uvedeného limitu pri vyhoreniach nad 50 MWd/kgU. Pri nižších vyhorenich je táto rezerva vyše 30 %. Uvedené bloku by teda splnili i prípadné prísnejšie kritérium. Vyššie opísané závery sú vzhľadom na podobnosť energoblokov a palivových cyklov aplikovateľné i na 3. a 4. blok JE Mochovce.

Požiadavka zhodnotenia počtu dehermetizovaných palivových prútikov v projektových haváriách

Definícia kritéria. Analýza projektových havárií musí zahŕňať zhodnotenie počtu dehermetizovaných palivových prútikov. Kritérium je splnené, pokiaľ je poškodených menší počet ako stanovená frakcia z (pôvodne nepoškodených) prútikov. Táto frakcia je stanovená v príslušnom dokumente a analyzovaná v Kapitole 6.1.7 tejto bezpečnostnej správy.

Príčina zavedenia kritéria. Požiadavka zhodnotenia počtu dehermetizovaných palivových prútikov v projektových haváriách je zavedená za účelom zabezpečenia splnenia základnej požiadavky bezpečnosti JE o ohraničení radiačného pôsobenia na personál, obyvateľstvo a životné prostredie pri normálnej prevádzke, narušeniach normálnej prevádzky a projektových haváriách [II.10], [II.15].

6.1.1.4.3 Všeobecná metodológia

Výpočtové preukázanie palivových prútikov a palivových prútikov s Gd sú vykonané na základe poprútikových neutróno-fyzikálnych charakteristík palivových zavážok 3. a 4. bloku JE Mochovce, vypracovaných v RNC Kurčatovský inštitút [III.44], [III.45]]

Údaje neutróno-fyzikálnych výpočtov predstavujú časové a výškové (42 úsekov) rozloženia poprútikového vyhorenia a lineárnych výkonov kaziet 60° sektoru symetrie aktívnej zóny.

Na 3. a 4. bloku JE "Mochovce" je plánované zavedenie urán-gadolíniového paliva druhej generácie VVER-440.

Vlastnosti paliva a konštrukčných materiálov palivových kaziet druhej generácie dôležité z hľadiska vykonania bezpečnostných anylýz sú uvedené v správe [I.34].

6.1.1.4.4 Vyhodnotenie splnenia bezpečnostných cieľov

V nasledujúcich kapitolách je zhodnotený projekt jadrového paliva. Splnenie projektových kritérií pre palivové prútiky je v Kapitolách 6.1.1.5 a 6.1.1.6 overené pri normálnej prevádzke, v stacionárnych stavoch a tiež v priebehu prechodových procesov. Podmienky projektovej havárie boli zobrané do úvahy pri projekte palivového systému. V Kapitole 07.02 v Predprevádzkovej bezpečnostnej správe 3. a 4. bloku JE Mochovce je overované splnenie akceptačných kritérií v havarijných podmienkach, pri projektovej a nadprojektovej havárii. Kríza prestupu tepla a hydraulický odpor sú analyzované v Kapitolách 6.1.1.8 a 6.1.1.9. Kapitola 6.1.1.11 sa zaoberá napäťovými výpočtami palivových kaziet.

Príslušné kapitoly Predprevádzkovej bezpečnostnej správy 3. a 4. bloku JE Mochovce analyzujú jadrový projekt, termohydraulický projekt a ostatné požiadavky ako sú tie pre manipuláciu s palivom, pre vytiahnutie regulačných tyčí a pre možnosti chladenia aktívnej zóny.

Na základe uvedeného je možné konštatovať, že "bezpečnostné ciele" resp. "kvalitatívne požiadavky na palivový systém" boli splnené.

6.1.1.5 ZDÔVODNENIE PREVÁDZKYSCHOPNOSTI PALIVOVÝCH PRÚTIKOV V STACIONÁRNOM STAVE

Ohodnotenie projektu palivových prútikov vykonané v stacionárnom stave je opísané v príslušnom dokumente.

Cieľom je ukázať, že v zhode s prvou "kvalitatívnou požiadavkou" uvedenou v kap. 6.1.1.4, v stacionárnom stave nedochádza k poškodeniu palivového systému.

V nasledujúcich kapitolách sú uvedené projektové kritériá aplikované pre tento prípad, predpokladané hypotézy pre dosiahnutie konzervativizmu a tiež použité výpočtové programy. Je tiež prezentovaný súhrn dosiahnutých výsledkov.

6.1.1.5.1 Aplikované projektové kritériá

Teplotné, napäťové a deformačné výpočty orientované na ohodnotenie stability pokrytia boli vykonané s cieľom overiť v stacionárnom stave splnenie nasledovných kritérií: TC1, TC2, SC1, SC2, SC3, DC1 a DC2.

6.1.1.5.2 Zvolená metodológia a výpočtové programy

Splnenie uvedených projektových kritérií bolo overené pomocou výpočtových analýz vykonaných licencovaným termomechanickým výpočtovým programom START-3: "Program pre pevnostné a temofyzikálne výpočty plnorozmerových palivových prútikov tepelných a rýchlych reaktorov v normálnych prevádzkových podmienkach a v režimoch sledovania zaťaženia siete, FNR JRB, registračné číslo licenčného dokladu programu 76, od 22.9.1997", alebo pomocou špeciálnych experimentov využívajúcich prevádzkové skúsenosti a testov vyhoreného paliva.

Konzervatizmus deterministických numerických analýz je dosiahnutý nasledujúcimi spôsobmi:

- 1. lineárne výkony palivových prútikov sú uvažované s ich neurčitosťami;
- 2. konzervatívne vstupné hodnoty pri teplotných výpočtoch maximálna šírka plynovej medzery, minimálna hustota paliva, maximálne vyhorenie, minimálny rozmer zŕn, ...;
- 3. konzervatívne vstupné hodnoty pre napäťové a deformačné výpočty minimálna šírka plynovej medzery, maximálna hustota paliva, minimálne vyhorenie, maximálny rozmer zŕn,...;
- 4. konzervatívne faktory.

6.1.1.5.3 Získané výsledky

Tepelné výpočty

Vykonané tepelné výpočty predovšetkým ukázali, že lineárny výkon palivových prútikov, ako čisto uránových, tak aj s gadolíniom, neprekračujú v analyzovanom 6.ročnom palivovom cykle (do vyhorenia ~73 MWd/kgU) limitnú krivku, stanovenú v projektovom kritériu TC3.

Výsledky tiež zaručili splnenie limít stanovených projektovými kritériami TC1 a TC2 na maximálne teploty paliva.

Napäťové výpočty

Prevádzkové skúsenosti, výpočty a experimentálne výskumy uvedené v príslušných dokumentoch potvrdzujú, že obvodové napätia pôsobiace na vnútornom povrchu pokrytia predstavujú limitujúci parameter z hľadiska pevnosti v stacionárnom stave a preto na nich boli zamerané napäťové výpočty.

Výsledky umožňujú odvodiť charakter dynamiky tohto parametra v závislosti na vyhorení a tiež preukázať splnenie projektového kritéria SC1.

Dynamika obvodového napätia pôsobiaceho na vnútornom povrchu pokrytia je podobná pre čisto uránové aj gadolíniové palivové prútiky. Na začiatku kampane je tlaková a závisí hlavne na teplotnom gradiente a vonkajšom tlaku. Po uzatvorení medzery sa objavuje prvý "mäkký" kontakt paliva s pokrytím; tento kontakt sa stáva "tvrdým" po spojení palivových prasklín, čo vedie k nárastu obvodových napätí pôsobiacich na vnútornom povrchu pokrytia a k zmene ich smeru z tlakových na ťahové.

Pri tejto dynamike je vždy splnený limit, stanovený v projektovom kritériu SC1.

Deformačné výpočty

Deformačné výpočty boli zamerané na zmenu priemeru pokrytia a na jav predlžovania palivového prútika.

Výsledky umožňujú odvodiť charakter dynamiky oboch týchto javov v závislosti na vyhorení, a tiež preukázať splnenie projektových kritérií DC1 a DC2.

Evolúcia priemeru pokrytia v závislosti na vyhorení je mierne odlišná pre čisto uránové a pre gadolíniové prútiky. Pre oba typy je charakteristické počiatočné zväčšenie vzhľadom na ohrev pokrytia nasledované zmenšením vzhľadom na "scvrknutie" pokrytia, pričom je potvrdené, že uvedené javy nevedú k prekročeniu projektového kritéria DC1. Nasledovne vzhľadom na napúchanie palivových peliet a ich interakciu s pokrytím priemer pokrytia opäť narastá, avšak rôznym spôsobom v čisto uránových a v gadolíniových prútikoch; u prvých sa deformácia priemeru pokrytia na konci kampane stáva pozitívnou a zostáva pod prípustným limitom zatiaľ čo u druhých zostáva negatívna.

Predĺženie palivového prútika v závislosti na vyhorení je podobné pre čisto uránové i gadolíniové prútiky. Na začiatku kampane dochádza k prudkému nárastu dĺžky palivovéh prútika. Neskôr je nárast viacej kontrolovaný vzhľadom na radiálny rast pokrytia. Nový intenzívny nárast sa objavuje pri interakcii palivových peliet s pokrytím.

V tejto dynamike je limit, stanovený projektovým kritériom DC2, vždy splnený.

Výpočty stability pokrytia

Bolo vykonané ohodnotenie ovalizácie pokrytia v dôsledku jeho tečenia a výsledky boli použité ako vstup pre ocenenie možného okamžitého kolapsu s cieľom overiť splnenie projektového kritéria SC3: ovalizácia pokrytia je samozrejme javom, ktorý znižuje odolnosť pokrytia proti vonkajšiemu tlaku.

Maximálna ovalita aktívnej časti palivového prútika je spojená s kontaktom palivových peliet a pokrytia. Maximálna ovalizácia pozdĺž pléna pre štiepne plyny dosahuje maximálnu hodnotu na konci kampane.

Napätie vzťahujúce sa k uvedenej ovalizácii tiež s uvážením príspevku zložky od ohybu prútika zostáva pod medzou plasticity, pri ktorej je možná strata stability v dôsledku spojeného plastického mechanizmu.



Korózne výpočty

Splnenie projektových koróznych kritérií KC1 a KC2 je odôvodnené prevádzkovými skúsenosťami a výsledkami skúmania pokrytia vyhorených palivových prútikov.

Pozorovaná korózia pokrytia palivových prútikov v kazetách reaktora VVER-440 nie je faktorom, ktorý by mal zásadný vplyv na zostatkovú životnosť palivových prútikov a palivových prútikov s gadolíniom s pokrytím zo zliatiny Zr+1% Nb.

Typickou je nasledovná situácia:

- Žiadna nodálna korózia;
- Vonkajší povrch pokrytia palivových prútikov je pokrytý rovnomernou vrstvičkou oxidov tmavej farby s hrúbkou nie väčšou ako11 µm.

Projektové kritériá sú splnené s veľkou rezervou.

Skúmanie vyhorených palivových prútikov ukazuje, že pokrytie si zachováva vysokú pevnosť. Bolo nazhromaždené veľké množstvo skúseností s prevádzkou kazietVVER-440 po dobu 6 rokov [I.29], [I.30]. Na tomto základe je možné predpovedať vysokú koróznu odolnosť zirkóniového pokrytia palivových prútikov a palivových prútikov s gadolíniom, pokiaľ je dodržaný chemický režim chladiacej vody. Skúmanie pokrytia vyhorených palivových prútikov ukázalo, že hydrogenácia pokrytia zo zliatiny E110 spravidla nie je väčšia ako 80 ppm a je dominantne tangenciálne orientovaná. Pri daných koncentráciách vodíka skúmanie pokrytia vyhorených prútikov potvrdilo, že vodík nemá vplyv na mechanické vlastnosti pokrytia.

<u>Záver</u>

Vykonané tepelné, napäťové a deformačné výpočty ako aj výpočty stability pokrytia preukazujú, že palivové prútiky sú spoľahlivé v stacionárnych podmienkach, čo je potvrdené získanými rezervnými koeficientami.

Analýza výsledkov poprútikových neutrónovo-fyzikálnych výpočtov prechodových palivových zavážok 3. a 4. bloku JE Mochovce [III.44] ukázala, že vo všetkých zavážkach okrem šiestej sú splnené obmedzenia na skoky lineárneho výkonu v palivových prútikoch a palivových prútikoch s Gd. V šiestej zavážke pri premiestnení PK zo štvrtého do piateho roku prevádzky z periférie bližšie k centru aktívnej zóny vznikajú značné skoky výkonu v palivových prútikoch a palivových prútikoch s Gd. Zvyšovanie výkonu po prekládke paliva je vykonávané v súlade s prevádzkovým predpisom; v piatom roku prevádzky, vzhľadom na uvedené značné skoky lineárneho výkonu, bude aplikované pomalšie zvyšovanie výkonu reaktora.

vüje

6.1.1.6 OHODNOTENIE PALIVOVÝCH PRÚTIKOV PRI PRECHODOVÝCH PROCESOCH NORMÁLNEJ PREVÁDZKY A MANÉVROVANÍ VÝKONU

Ohodnotenie projektu palivových prútikov v priebehu prechodových procesov v normálnych prevádzkových podmienkach a pri manévrovaní výkonu je opísané v príslušných dokumentoch. Všetky výpočty boli vykonané s uvážením nominálneho výkonu reaktora 1375 MW_{th}.

Cieľom je ukázať, že v priebehu týchto prechodových procesov nedôjde k poškodeniu palivového systému, čo je vyžadované prvou "kvalitatívnou požiadavkou", uvedenou v kapitole 6.1.1.4.

Kapitola 06.01.07 v POSAR je špecificky venovaná verifikácii kritéria na skok lineárneho výkonu v režimoch sledovania zaťaženia siete. Tu sú definované dovolené pozície 6. skupiny regulačných kaziet, ktoré zabezpečujú splnenie tohto kritéria.

V nasledujúcich kapitolách sú uvedené projektové kritériá aplikované pre tento prípad, predpokladané hypotézy pre dosiahnutie konzervativizmu a tiež použité výpočtové programy. Je tiež prezentovaný súhrn dosiahnutých výsledkov.

6.1.1.6.1 Projektové kritériá

Splnenie projektových kritérií SC1, SC4 a SC5 bolo overené tak ako je opísané ďalej tak, aby bola zaručená prevádzkyschopnosť palivových prútikov pri prechodových procesoch normálnej prevádzky ako aj v režimoch manévrovania. Splnenie projektových kritérií TC1, TC2, DC1 a DC2 môže byť ohodnotené na základe porovnania záťaží palivových prútikov, charakteristických pre stacionárny stav a pre uvedené prechodové procesy. Projektové kritériá SC3, KC1 a KC2 pri prechodových procesoch normálnej prevádzky ako aj v režimoch manévrovania sú ohodnotené v príslušných dokumentoch.

6.1.1.6.2 Zvolená metodológia a výpočtové programy

Splnenie uvedených projektových kritérií bolo overené pomocou výpočtových analýz vykonaných licencovaným termomechanickým výpočtovým programom START-3: "Program pre pevnostné a termofyzikálne výpočty plnorozmerových palivových prútikov tepelných a rýchlych reaktorov v normálnych prevádzkových podmienkach a v režimoch sledovania zaťaženia siete, FNR JRB, registračné číslo licenčného dokladu programu 76, od 22.9.1997", alebo s pomocou špeciálnych experimentov využívajúcich prevádzkové skúsenosti a testy vyhoreného paliva.

Konzervativizmus deteministických výpočtov vykonaných uvedenými programami je zabezpečený nasledovne:

- 1. Výkony palivových prútikov sú uvažované vrátane ich neurčitostí;
- Vstupné dáta pre výpočty napätí boli vybrané konzervatívne tak, aby bola zaistená silná mechanická interakcia medzi palivovými peletami a pokrytím (minimálna hrúbka medzery, maximálna teplota paliva, minimálne vyhorenie, maximálna veľkosť zŕn,...);
- 3. Sú analyzované palivové prútiky, vyhorievajúce 3., 4. 5. a 6. rok, lebo plynová medzera "mladších" prútikov ešte nie je zatvorená a je schopná pojať expanziu paliva;
- 4. Analýzy sú založené na 11. kampani 3. bloku JE Mochovce, ktorá sa vyznačuje vyššou nerovnomernosťou výkonu a vyšším vyhorením v porovnaní s ostatnými kampaňami;
- 5. Sú vybrané výpočtové scenáre prechodových procesov a režimov sledovania zaťaženia siete s maximálne deformovanými teplotnými poliami.

Sú použité konzervatívne koeficienty definované v príslušných dokumentoch.

Pri výpočtoch bol použitý nominálny tepelný výkon reaktora 1375 MW_{th}.

6.1.1.6.3 Výsledky

Ohodnotenie projektových kritérií TC1 a TC2

Teplotné výpočty sú založené na predpoklade, že lineárny výkon neprekročí limitnú krivku závislosti na vyhorení, platnú pre prechodové procesy a manévrovanie výkonu. Prípustné zmeny výkonu reaktora počas doby životnosti kaziet sú nasledovné:

- maximálne 30 ohrevov zo "studeného" stavu do "horúceho" stavu;
- maximálne 60 zapracovaní AO reaktora (AO-1 a AO-2 druhu, sumárne, z ktorých 40 zapracovaní na výkone vyššom ako MKV).

Na tomto základe, sumarizovanom v Kapitole 6.1.1.5, je stanovené, že projektové kritérium pre teplotu paliva TC1 je splnené. Takýto prístup bol použitý pre tepelné výpočty, uvažované prevádzkové módy nezahŕňajú relevantné doplnkové javy.

Napriel uvedenému prístupu bola skúmaná možnosť doplnkového zvýšenia vnútorného tlaku v prútiku v dôsledku uvoľňovania štiepnych plynov z priestoru medzi palivovými zrnami, potvrdená v príslušných dokumentoch. Projektové kritérium TC2 je splnené.

Ohodnotenie projektových kritérií DC1 a DC2

Pre prechodové procesy a režimy manévrovania výkonu nie sú potrebné žiadne dodatočné overovania, keď uvážime použité rezervné koeficienty.

Na základe numerickej analýzy je ukázané, že deformácia pokrytia zostáva v pružnej oblasti a teda kritérium DC1 je splnené. Pri mnohonásobných prechodových procesoch normálnej prevádzky alebo režimoch manévrovania výkonu sa časť deformácie môže zmeniť na nevratné tečenie. Jeho prídavok k akumulovanej statickej deformácii je však zanedbateľný a nemá žiaden vplyv na splnenie kritéria.

Z výsledkov merania vyhorených palivových prútikov, ktoré boli prevádzkované v kampaniach s rôznym počtom prechodových procesov (od jedného do niekoľkých desiatok) je zrejmé, že závislosť predĺženia prútikov na vyhorení je lineárna a predĺženie nezávisí na počte prechodových procesov. Preto nie sú potrebné doplnkové analýzy kritéria DC2.

Výpočty projektových kritérií SC1, SC4 a SC5

Prechodové procesy a režimy sledovania zaťaženia siete sú realizované pomocou malého počtu regulačných kaziet. Ako dôsledok môžeme pozorovať veľké zmeny výkonovej distribúcie a napätia v palive a v pokrytí.

Skúsenosti a analýzy uvedené v príslušných dokumentoch ukazujú, že je potrebné analyzovať kritériá projektové kritériá SC1 a SC4. Projektové kritérium SC5 je treba overovať v prechodových procesoch abnormálnej prevádzky v prípade prekročenia kritéria SC1.

Z hľadiska kritéria SC1 boli analyzované rôzne prechodové procesy, pokrývajúce celú normálnu prevádzku aktívnej zóny. Ostatné prechodové procesy normálnej prevádzky uvedené v príslušných dokumentoch nevyvolávajú napätia vedúce k poškodeniu pokrytia.

Maximálne hodnoty napätia v pokrytí vo všetkých prechodových procesoch v celom priebehu 11. kampane 3. bloku JE Mochovce preukazujú splnenie projektového kritéria SC1. Kombinovaný vplyv dlhodobých statických zaťažení a cyklických zaťažení spôsobených prechodovými procesmi normálnej prevádzky nemajú vplyv na prevádzkyschopnosť palivových prútikov.

To je zaistené hodnotou rezervného koeficienta KSC4. V hodnoteniach boli uvažované nasledovné charakteristiky cyklických procesov:

- konzervatívny počet cyklov s významnými zmenami;
- maximákna hodnota napäťovej amlitúdy spomedzi prechodových procesov normálnej prevádzky, uvedených v predchádzajúcej sekcii;
- statická charakteristika maximálna hodnota obvodového napätia v pokrytí palivového prútika.

Napäťovými výpočtami čisto uránových prútikov a prútikov s gadolíniom bolo ukázané, že je možné zvýšiť počet procesov sekundárnej a terciálnej regulácie.

Pravidelné opakovanie režimov sledovania zaťaženia siete v prevádzke energobloku môže významne zmeniť termomechanický stav paliva. Preto sú tu potrebné špeciálne napäťové a deformačné analýzy.

Boli analyzované nasledovné metódy riadenia výkonu:

- primárna regulácia výkonu;
- sekundárna regulácia výkonu;
- terciálna regulácia výkonu;
- limitný stav I;
- limitný stav II;
- limitný stav III.

Kritérium SC4 bolo analyzované v [I.1] pre mnohonásobné prechodové procesy normálnej prevádzky a pre plánované režimy sledovania zaťaženia siete s výkonovými zmenami do 20 % N_{nom}. Vo všetkých uvedených režimoch bolo konštatované splnenie kritéria SC4.

Boli analyzované procesy s neočakávaným vyťahovaním pracovnej skupiny regulačných kaziet z aktívnej zóny, tj prechodové procesy abnormálnej prevádzky.

<u>Záver</u>

Analýzy prechodových procesov pri normálnych prevádzkových podmienkach a analýzy režimov sledovania zaťaženia siete ukázali, že napätia v palivových prútikoch neprekračujú hodnoty, vedúce k ich poškodeniu. Optimalizáciou prechodových procesov, pohybu regulačných kaziet a režimov sledovania zaťaženia siete je možné sa vyhnúť významným rýchlym zmenám výkonu.

6.1.1.7 KRÍZA PRESTUPU TEPLA

Jedným z hlavných kritérií spoľahlivosti práce palivových prútikov VVER je veľkosť rezervy do krízy odvodu tepla v normálnych, prechodových a havarijných podmienkach. Táto hodnota sa určuje ako pomer kritického tepelného toku k reálnemu tepelnému toku z povrchu palivového prútika pri rovnakých režimových parametroch. Výpočty koeficientov rezervy sa vykonávajú porovnaním režimov práce palivových prútikov s výpočtovými vzorcami pre krízu odvodu tepla ktoré sú, spravidla, podložené experimentálnymi údajmi.

Pre získanie výpočtovej závislosti bolo v OKB "Gidropress" vykonané experimentálne skúmanie krízy odvodu tepla na zväzkoch prútikov použiteľne k režimovým parametrom VVER. Časť experimentov bola vykonávaná na zväzkoch prútikov s dištančnými mriežkami pre reaktor VVER-440, druhá - s mriežkami pre reaktor VVER-1000. Pre VVER-440 výška mriežok bola rovná 10 mm a pre VVER-1000 - 20 mm. Nakoľko sú konfigurácie prvkov dištančných mriežok pre reaktory VVER-440 a VVER-1000 navzájom blízke a pomerné kroky rozopretia palivových prútikov (pod pomerným krokom sa myslí pomer kroku palivových prútikov k priemeru palivového prútika) sa líšia nevýznamne, tak bolo prijaté rozhodnutie zanedbať vplyv týchto faktorov, čo bolo potvrdené experimentom.

Experimenty boli vykonané na experimentálnom zariadení - cirkulačný okruh, ktorý zabezpečoval vytvorenie potrebných parametrov.

Stend bol vybavený príslušnou kontrolno-meracou aparatúrou na registráciu parametrov a zaznamenanie krízy odvodu tepla.

Základné experimenty [I.10], boli vykonané na zväzkoch zo siedmych experimentálnych tyčí, umiestnených v trojuholníkovej mriežke. Experimentálne tyče boli bezprostredne ohrievané jednosmerným elektrickým prúdom. Ohrievaná dĺžka zväzkov sa menila od 1,0 do 3,5 m. Po dĺžke boli experimentálne tyče udržiavané mriežkami plástového typu, vyhotovenými zo štandardných buniek.

Nepozerajúc na malé množstvo experimentálnych tyčí vo zväzku, v experimente boli dodržané také podmienky, aby výsledky experimentov mohli byť prenesené na skutočnú kazetu, pozostávajúcu z veľkého počtu prútikov. Sedemtyčový zväzok predstavoval fragment zväzku palivových prútikov so "štandardnými" bunkami bez teplohydraulických nehomogénností.

Jedna zo základných požiadaviek: vybrať taký rozmer šesťhranného kanála, aby kríza odvodu tepla vznikala súčasne na všetkých experimentálny tyčiach zväzku. Súčasnosť vzniku krízy na všetkých experimentálnych tyčiach znamená, že všetky sú približne v rovnakých podmienkach chladenia a v tomto prípade také výsledky možno preniesť na skutočnú kazetu. Nedodržanie tejto požiadavky vedie k nahromadenie termohydraulickej nehomogenity po priereze zväzku, ktorá je tým väčšia, čím je väčšia jeho dĺžka. Kríza vzniká len v "horúcich" bunkách zväzku a stredné parametre vo zväzku ešte nedosahujú kritických hodnôt. To vytvára nesprávne zdanie vplyvu dĺžky zväzku na kritický tepelný tok.

Po výbere optimálneho rozmeru šesťhranného kanálu v OKB "Gidropress" boli skúšané zväzky s rôznou dĺžkou pre rozšírenie rozsahu sledovaných parametrov.

Experimenty boli vykonané ako na zväzkoch s rovnomerným vývinom tepla po dĺžke, tak aj na zväzkoch s nerovnomerným vývinom tepla s maximálnym koeficientom nerovnomernosti Kz do 1,36.

Spolu bolo skúšaných 19 zväzkov experimentálnych tyčí rozličnej konfigurácie a geometrických rozmerov, z nich 16 s rovnomerným vývinom tepla po dĺžke a priemere a tri zväzky s nerovnomerným vývinom tepla po dĺžke. Celkovo bolo získaných okolo 1000 experimentálnych bodov, z nich okolo 700 pri rovnomernom

vývine tepla. Všetky experimentálne body získané v OKB "Gidropress" na zväzkoch s rovnomerným vývinom tepla boli podmienečne rozdelené do piatich skupín.

Okrem bodov získaných na zväzkoch s rovnomerným vývinom tepla po dĺžke, do databázy OKB "Gidropress" bolo zahrnutých 294 experimentálnych bodov podľa výsledkov sledovania krízy na zväzkoch s nerovnomerným vývinom tepla po dĺžke [I.11].

Po štatistickom spracovaní experimentálnych hodnôt, získaných v OKB "Gidropress" a experimentálnych bodov RNC KI a ENIC, bola navrhnutá korelácia OKB "Gidropress" (niekedy nazývaná vzorec Bezrukova). Má nasledujúci tvar:

$$^{\rm Q}{\rm CHF}^{=0,795(1-X)}$$
^{0,105·P-0,5}^{($ho w$)^{0,184-0,311·X}^(1-0,0185·P) (6.1.1.7-1)}

kde je Q_{CHF} – kritický tepelný tok, MW/m²;

- X relatívna entalpia v mieste krízy;
- ρ w hmotnostná rýchlosť, kg/(m².s);

P – tlak, MPa.

Celkove bolo na vypracovanie korelácie použitých 765 experimentálnych bodov (vrátane bodov RNC KI a ENIC). Podmienečne všetky tieto experimentálne body boli rozdelené podľa deviatich typov zväzkov. Korelácia (6.1.1.7-1) opisuje tento výber so strednou kvadratickou odchýlkou σ =13,1 % (úroveň pravdepodobnosti – 67 %) pri odchýlke od strednej hodnoty $\overline{\Delta}_{q} = 0,25$ %.

Získaná korelácia uvažuje v implicitnom tvare vplyv DM, ktoré boli rozložené s krokom 255 mm. Posledná mriežka sa nachádzala na takej istej vzdialenosti od konca ohrievanej časti zväzku, čo zabezpečovalo minimálny vplyv DM na stranu zvýšenia kritického tepelného toku. Okrem toho, kontrolovala sa teplota povlaku blízko dvoch posledných DM, kde sa kríza odvodu nezaznamenala.

Vzorec (6.1.1.7-1) sa používa pre výpočet kritických tepelných tokov v SVRK na JE Mochove.

Stredná kvadratická chyba korelácie (6.1.1.7-1) je rovná 13,1 % pri prakticky nulovom posunutí od strednej hodnoty. Uvedené odchýlky sa určovali podľa vzorcov:

$$\Delta_{\mathbf{q}\mathbf{i}} = \frac{\mathbf{q}_{\mathbf{k}\mathbf{r}\mathbf{i}\mathbf{i}}^{\mathbf{v}\mathbf{j}} \cdot \mathbf{q}_{\mathbf{k}\mathbf{r}\mathbf{i}\mathbf{i}}^{\mathbf{e}\mathbf{x}\mathbf{p}}}{\mathbf{q}_{\mathbf{k}\mathbf{r}\mathbf{i}\mathbf{i}}^{\mathbf{v}\mathbf{p}}} \cdot 100 \qquad (6.1.1.7-2)$$

$$\overline{\Delta}_{\mathbf{q}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \Delta_{\mathbf{q}i}}{N} \cdot 100 \qquad (6.1.1.7-3)$$

$$\sigma_{q} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (\Delta_{qi} - \overline{\Delta}_{q})^{2}}{N-1}} \cdot 100 \qquad (6.1.1.7-4)$$

Histogram rozloženia odchýlok výpočtových hodnôt od experimentálnych pre celý výber bodov je uvedený na Obr. 6.1.1.7-1. Na osi X je relatívna odchýlka výpočtu od experimentu, na osi Y - počet bodov N, nachádzajúcich sa v jednom stĺpci.

Ako je vidieť z histogramu, získané rozloženie odchýlok je blízke normálnemu rozloženiu a stredná hodnota $\overline{\Delta}_{\alpha}$ je blízka nule (0,25 %).

Part name / Označenie časti:	PNM3436102711_S_C01_V	Page No. / Strana č.:	49/92
		MO34-002r00	

Hodnota chyby výpočtovej korelácie pre zväzky sa ukazuje približne 2 až 2,5 krát väčšia, ako pre okrúhle rúrky, ktoré majú jednoduchšiu formu priečneho prierezu.

Geometria priečneho prierezu zväzku je omnoho zložitejšia a jej presné opakovanie každý raz bez technologických chýb nie je možné. A ich vplyv na výsledky experimentu je značný. Výsledky určenia kritického tepelného toku na zväzkoch s rovnakými nominálnymi charakteristikami sa môžu odlišovať o 10 %, čo dáva podstatný príspevok k celkovej chybe korelácie ako doplnenie k ostatným metodickým a prístrojovým chybám. Ak v experimentoch nie sú urobené hrubé chyby, tak nie sú dôvody ignorovať experimentálne hodnoty z jedného zväzku a zahrňovať do štatistiky hodnoty z iného. Získaná hodnota chyby je v súlade so závermi analýzy, vykonanej L. Tongom pre zväzky prútikov [I.12]. Podľa jeho odhadu, chyba 1,96 σ_q (pre úroveň pravdepodobnosti 95 %) nemôže byť menšia ako ±25 % pri určení kritického tepelného toku podľa stredných parametrov v priereze zväzku, čo je ukázané v Tab. 6.1.1.7-1. Takáto hodnota σ_q pre koreláciu Bezrukova sa nachádza na úrovni iných známych korelácií pre zväzky.

Tab. 6.1.1.7-1 Príspevok rôznych faktorov k celkovej chybe korelácie pre zväzky prútikov (v percentách) v súlade s L. Tongom [I.15]

Faktor	Príspevok faktora k celkovej chybe korelácie pre zväzky prútikov, %	
Náhodné a systematické chyby a rozdiel	10	
v charakteristikách cirkulačných slučiek	10	
Nedokonalosť vzorca pri uvažovaní vplyvu parametrov	5	
Technologické chyby pri výrobe zväzkov	5	
Štatistická povaha turbulentnosti prúdu	3	
Spolu	23	



Obr. 6.1.1.7-1 Histogram rozloženia odchýlok výpočtových hodnôt od experimentálnych pre celý výber (765 bodov)

vūje

Zvýšenie štatistickej spoľahlivosti korelácie vyžaduje vykonanie experimentov na niekoľkých zväzkoch. Vyplýva to z doporučení MAAE [II.16] a požiadaviek kontraktov so zahraničnými zákazníkmi, kde je vzhľadom k rezerve do krízy (DNBR) napísané nasledovné: "Pre DNBR musí byť pravdepodobnosť 95 %, že pri úrovni hodnovernosti 95 % ani na jednom palivovom prútiku v aktívnej zóne nedôjde ku kríze odvodu tepla". Úroveň hodnovernosti 95 % znamená, ako spoľahlivo je určené matematické očakávanie (t.j. odchýlka Δq od strednej hodnoty) korelácie, a nie len hodnota $σ_q$. Hovorí sa tu o reprodukovateľnosti experimentálnych údajov na niekoľkých jednotypových zväzkoch (s geometriou VVER), pričom je žiadúce ich získanie v rôznych organizáciách. Vyššie už bolo povedané, že technologické odchýlky a aj sama zložitosť takého javu, ako je kríza odvodu tepla, nepovoľuje vypracovanie výpočtovej korelácie na základe len jedného meraného zväzku.

Jej chyba je určená na základe štatistického spracovania 765 experimentálnych bodov, získaných na piatich zväzkoch OKB "Gidropress", troch zväzkoch RNC KI a jednom zväzku EIL-ENIN. Štatistické charakteristiky týchto zväzkov vzhľadom ku korelácii Bezrukova sú uvedené v Tab. 6.1.1.7-2.

Vykonáme analýzu korelácie Bezrukova s uvážením vyššie uvedeného kritéria. Odhad chyby korelácie bol urobený za predpokladu, že všetky zistené odchýlky zo všetkých zväzkoch sú náhodné a rozptyl týchto odchýlok je blízky normálnemu rozdeleniu. Tomuto záveru prispieva charakter histogramu celého výberu a prakticky nulový posun strednej hodnoty $\Delta q = 0,25$ %.

	Hodnota								
Názov ukazovateľa		Číslo zväzku							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Počet bodov	70	118	162	54	152	31	39	59	80
Odchýlka od strednej, $\overline{\Delta}_{ ext{q}}_{ ext{,\%}}$	2,6	-6,3	10,7	-11,3	4,8	8,4	-12,2	-8,4	2,9
Stredná kvadratická odchýlka, σ _q ,%	13,9	14,8	8,6	12,9	9,5	9,4	7,1	7,1	11, 3

Tab. 6.1.1.7-2 Štatistické charakteristiky zväzkov

Nakoľko do odhadovaného výberu boli brané údaje z deviatich zväzkov, ktoré zas majú rôzne disperzie, je potrebné určiť, či tieto výberové disperzie prislúchajú jednej a tej istej generálnej disperzii. Boli vykonané odhady podľa rôznych kritérií v súlade s [I.13]. Počiatočné údaje so všetkých zväzkov boli sústredené do Tab. 6.1.1.7-3.

ab. 6.1.1.7-3 Počiatočné údaje pre odhadnú analýzu zväzkov									
Číslo zväzku	Počet bodov	Počet stupňov voľnosti, f	S=Si	Disperzia, s _i ²	$f_i S_i^2$	lgsi ²	f _i ∙lgsi²	1/f _i	
OKB №1	70	69	0,139	0,019321	1,333149	-1,714	-118,26	0,01449	
OKB №2	118	117	0,148	0,021904	2,562768	-1,6595	-194,16	0,00855	
OKB №3	162	161	0,086	0,007396	1,190756	-2,131	-343,09	0,00621	
OKB №4	54	53	0,129	0,016641	0,881973	-1,7788	-94,277	0,01887	
OKB №5	152	151	0,095	0,009025	1,362775	-2,0446	-308,73	0,00662	
RNC KI-37	59	58	0,071	0,005041	0,292378	-2,2975	-133,25	0,01724	
RNC KI-19	39	38	0,071	0,005041	0,191558	-2,2975	-87,304	0,02632	
RNC KI-7	31	30	0,094	0,008836	0,26508	-2,0537	-61,612	0,03333	
EIL-ENIN	80	79	0,113	0,012769	1,008751	-1,8938	-149,61	0,01266	
Suma	765	756			9,089188		-1490,3	0,14429	

т

Kvalifikované porovnanie možno vykonať pomocou kritéria Bartleta. S použitím vyššie uvedenej tabuľky najprv určíme strednú váženú disperziu S² a sumárny stupeň voľnosti «f» (k - počet zväzkov).

$$S^{2} = \frac{\sum_{i=1}^{K} f_{i} s_{i}^{2}}{\mathbf{f}}, \qquad (6.1.1.7-5)$$

vūje

$$f = \sum_{i=1}^{k} f_i$$
(6.1.1.7-6)

Vypočítame veličiny B a C:

$$B = 2,303 \quad \left(f \cdot \lg S^2 - \sum_{i=1}^k f_i - \lg S_i^2 \right)$$
(6.1.1.7-7)

$$C = 1 + \frac{1}{3 \ (k-1)} \quad \left(\sum_{i=1}^{k} \frac{1}{f_i} - \frac{1}{f} \right)$$
(6.1.1.7-8)

Z vyššie uvedenej tabuľky vyplýva, že:

$$S^2$$
 = 0,012022735
f = 756
f·lg S^2 = -1451,5175
B = 89,3241
C = 1,0060121

Bartlet ukázal, že v prípade, keď všetky S²_i zodpovedajú jednej celkovej disperzii, pomer B/C je približne rozdelený ako parameter χ^2 s «k-1» stupňami voľnosti, nezávisle od fi , pri fi \geq 5. Znamená to, že hypotéza o rovnosti celkových disperzií sa prijíma, ak B/C < $\chi^2_{\ 1\text{-p}}$.

B/C= 88,79

 χ^2_{1-p} = 15,5 pri úrovni významnosti 0,05 alebo hodnovernej pravdepodobnosti 95 %. Toto kritérium je zobraté z [l.13].

Part name / Označenie časti:	PNM3436102711_S_C01_V	Page No. / Strana č.:	52/92
		MO34-002r00	

vůje

Pomer B/C je omnoho väčší ako χ^2_{1-p} preto kritérium Bartleta nie je splnené a preto rozdiel v disperziách, patriacich rôznym zväzkom, treba považovať za významný. Možno určiť aké zväzky prispievajú k tomuto rozdielu. V súlade s Tabuľkou 6.1.1.7-5 možno prijať fakt, že zväzky OKB "Gidropress" №1,2 a 4 vnášajú najväčší príspevok. K nim ešte možno pridať zväzok EIL-ENIN. Napríklad, ak by sa stredná kvadratická odchýlka o týchto zväzkov zmenšila na 0,100, potom by kritérium Bartleta bolo už prakticky splnené. V tomto prípade je pomer B/C = 16,1, čo je už blízke k χ^2_{1-p} = 15,5.

Nakoľko kritérium Bartleta v našom prípade nie je splnené, možno vykonať odhad podľa kritéria Pearsona na predmet, aký bude horný odhad strednej kvadratickej odchýlky generálneho výberu z týchto deviatich zväzkov. Pre odhad generálnej disperzie sa používa výberová disperzia S². Táto disperzia vzhľadom k náhodnosti výberu je sama náhodnou veličinou. Je známe, že matematickým očakávaním pre S² je generálna disperzia σ^2 . Odtiaľ vyplýva, že σ^2 možno odhadnúť, ak je známe rozloženie veličiny S².

Rozdelenie veličiny S² možno získať pomocou rozloženia Pearsona (alebo χ^2 – rozloženia). V súlade s [l.12] je možné napísať:

$$S.\sqrt{\frac{f}{\chi^2_{1/p/2}}} \le \sigma \le S.\sqrt{\frac{f}{\chi^2_{p/2}}}$$
 (6.1.1.7-9)

Keď zavedieme náhodnú veličinu

$$v = \sqrt{\frac{f}{X^2}}$$
 (6.1.1.7-10)

Jednostranný odhad možno napísať v tvare:

$$\sigma \leq S.v_{1-p}$$

 $v_{p} = \sqrt{\frac{f}{\chi^{2}_{1-p}}}$ - kvantil. (6.1.1.7-11)

V súlade s [I.13] $v_p = 1,3$ pri úrovni významnosti 0,05 alebo hodnovernej pravdepodobnosti 95 %. Odtiaľ horná hranica σ bude rovná:

$$\sigma = \sqrt{0,012023} \quad 1,3 = 0,1425. \tag{6.1.1.7-12}$$

Týmto spôsobom, s použitím analýzy podľa kritérií Batlera a Pearsona, sa stredná kvadratická chyba korelácie (6.1.1.7-1) zväčšila o 8,8 % a stala sa rovnou 14,3 %. Predtým bola dolná hranica hodnoverného intervalu pre túto koreláciu určená hodnotou 1,96.σ. Pritom pre úroveň pravdepodobnosti 95 % sa uvažovalo dvojstranné odseknutie ostávajúcich 5 % bodov.

V súlade so základmi štatistiky, hodnoverný interval pre parameter A (v našom prípade pre kritický tepelný tok) je interval (A1, A2), obsahujúci skutočnú hodnotu tohto parametra so zadanou pravdepodobnosťou $P=(1-\alpha)$, t.j. $P[A1<A<A2]=(1-\alpha)$. Číslo $(1-\alpha)$ sa nazýva hodnovernou pravdepodobnosťou a hodnota α - úroveň významnosti. Objasníme to na Obr. 6.1.1.7-2a) , kde je uvedené rozloženie hodnôt parametra A podľa jeho odchýlky od skutočnej hodnoty v súlade s rozložením Gaussa. Plocha pod krivkou je rovná pravdepodobnosti nachádzania sa parametra A v intervale (A1, A2). Vo svetovej praxi sa pri výpočte rezerv do krízy odvodu tepla berie hodnoverná pravdepodobnosť 95 %, ktorá určuje šírku hodnoverného intervalu ako ±1,96 σ_q pri dvojstrannom odhade. Ale výpočet rezervy do krízy sa vykonáva vzhľadom k dolnej hranici hodnoverného intervalu, čo vyžaduje jednostranný odhad pre tú istú úroveň pravdepodobnosti, čo je

Part name / Označenie časti:	PNM3436102711_S_C01_V	Page No. / Strana č.:	53/92
		MO34-002r00	

VUJE, a. s.

uvedené na Obr. 6.1.1.7-2b). V tomto prípade sa dôveryhodný interval odhaduje ako (-1,645 σ_q , ∞). To znamená, že ak rezerva do krízy, vypočítaná vzhľadom k dolnej hranici dôveryhodného intervalu, je rovná, alebo väčšia ako jedna, že s pravdepodobnosťou 95 % kríza v danom prípade vzniknúť nemôže.

Pre skôr určenú chybu korelácie (6.1.1.7-1) dolná hranica hodnoverného intervalu bola rovná 1,645·13,1=21,55 %. S uvážením podrobnejšej štatistickej analýzy sa táto hranica zmenila na 1,645·14,26=23,46 %. Ak uvážime už prvotnú chybu korelácie (6.1.1.7-1), potom sa dolná hranica hodnoverného intervalu určuje ako 1,79.σ.

Existuje druhý spôsob odhadu korelácií. Dielčie histogramy pre jednotlivé zväzky ukazujú že úplná reprodukovateľnosť experimentálnych údajov na rôznych zväzkoch neexistuje. Preto korelácia, získaná na základe experimentov len na jednom zväzku bude najmenej spoľahlivou a to aj v prípade, ak bude rozptyl experimentálnych bodov menší. Rozptyl stredných hodnôt pre deväť zväzkov uvedených v Tab. 6.1.1.7-2 umožňuje určiť hodnoverný interval pre strednú hodnotu celkového histogramu, ktorý je na Obr. 6.1.1.7-1. Analyzujúc výber z deviatich prvkov s odchýlkami od strednej ∆i (i= 1...9), uvedený v Tab. 6.1.1.7-3, určíme strednú disperziu D s uvážením strednej odchýlky na celkovom histograme Δq=0,25 % (Obr. 6.1.1.7-1).

$$D = \sum_{1}^{9} (\Delta_q - \Delta_i)^2 . n_i / 9. \sum_{1}^{9} n_i = 6,76$$
(6.1.1.7-13)

Odtiaľto sa určuje výberový štandard s (stredná kvadratická odchýlka pre ohraničený objem výberu)

$$s = \sqrt{D} = 2,6$$
 (6.1.1.7-14)

jednostranný hodnoverný interval pre pravdepodobnosť 95 %.



Obr. 6.1.1.7-2 Určenie dôveryhodnej pravdepodobnosti a hraníc dôveryhodného intervalu



V danom prípade nepoužijeme kvantil normálneho rozdelenia 1,645 vzhľadom k ohraničenosti objemu výberu. Tu sa používa kvantil Studentovho rozdelenia, ktorý je rovný 1,83 pre výber z deviatich prvkov (ôsmich stupňov voľnosti).

Ak predpokladáme, že σ_q a s sú nezávislé veličiny, možno určiť dolnú hranicu hodnoverného intervalu pre hodnovernú pravdepodobnosť 95% ako

$$(1 \quad \frac{\sqrt{(1,8.13,1)^2 + (1,83.2,6)^2}}{100}) = 0,76 \tag{6.1.1.7-15}$$

Takto, sa dolná hranica korelácie Bezrukova musí používať v tvare $0,76.q_{kr}$. Ak predpokladáme, že táto korelácia nemá neurčitosti v odhade strednej hodnoty (s=0), zmenšujúci súčiniteľ pre q_{kr} je rovný 0,765, t.j. o 0,5 % viac.

Navrhovaný vzorec (6.1.1.7-1)) pokrýva širšie pásmo parametrov, ako sa požaduje pre reaktor VVER-440. Vylúčenie z analýzy, napríklad experimentálnych hodnôt pri zvýšených tlakoch, by viedlo k zmenšeniu chyby tohto vzorca (približne na 10,4%), predsa však pre univerzálnosť výpočtového programu bolo rozhodnuté ponechať vzorec, pokrývajúci najväčšie pásmo parametrov. Na tomto stende tiež boli vykonané experimenty s krízou v režimoch, ktoré imitovali zníženie prietoku chladiva v aktívnej zóne v dôsledku zadretia jedného z pracujúcich HCČ, alebo v dôsledku úplnej straty napájania reaktorového zariadenia. Bolo ukázané, že kríza vzniká pri tých istých parametroch chladiva, ako v stacionárnych režimoch. Korelácia (6.1.1.7-1) sa porovnávala s experimentmi, vykonanými na stende Škody (ČR) a na stende NVH v Maďarsku spolu s ruskými špecialistami. Bolo preukázané, že korelácia (6.1.1.7-1) popisuje experimentálne údaje, získané na vyššie uvedených stendoch.

Korelácie (6.1.1.7-1) boli porovnané s najznámejšími koreláciami B&W [I.14], W-3 [I.15], Smolina [I.16], a tiež s na západe známymi skeletnými tabuľkami pre kritické tepelné toky pre rúrky [I.17]. Ku koreláciám sa nepridáva znižujúci koeficient, určujúci dolnú hranicu hodnoverného intervalu. Ako ukazuje porovnanie, v oblasti relatívnych entalpií od mínus 0,1 do plus 0,25 korelácia (6.1.1.7-1) je v dobrom súlade s koreláciami B&W a Smolina.

Korelácia W-3 a krivky podľa skeletných tabuliek predpovedajú o niečo vyšší kritický tepelný tok ako korelácia (6.1.1.7-1).). Ono to tak aj musí byť, pretože kritický tepelný tok vo zväzkoch prútikov je vždy nižší ako v rúrkach. Napríklad kód RELAP5 predpokladá opravný koeficient 0,8. Korelácia W-3 bola vypracovaná k použitiu pre bunkovú analýzu vo zväzkoch prútikov a preto, prirodzene, musí byť blízka k rúrkam.

Boli porovnané závislosti kritického tepelného toku od tlaku pri konštantnej hmotnostnej rýchlosti 3000 kg/(m2.s) pre dve hodnoty relatívnej entalpie (mínus 0,1 a 0,0). Korelácie (6.1.1.7-1) a Smolina sú približne v súlade a ležia trochu nižšie oproti skeletným tabuľkám pre rúrky. Pri nízkych tlakoch tieto korelácie predpovedajú konzervatívny výsledok.

Korelácia Smogaleva z [I.18] vyhovujúco súhlasí so skeletnými tabuľkami pre rúrky pri hmotnostných rýchlostiach blízkych k nule. V oblasti hmotnostných rýchlostí od 50 do 500 kg/(m².s) tiež ako aj korelácia (6.1.1.7-1) a Smolina predpovedajú konzervatívny výsledok.

Pri hmotnostnej rýchlosti rovnej nule, korelácia Kutateladze z [I.19] predpovedá menší tepelný kritický tok, ako tabuľkové hodnoty.

V reaktore je tepelný tok po výške rozdelený nerovnomerne. Toto vplýva na kritický tepelný tok, nakoľko pomer entalpií v jadre toku a v hraničnej vrstve v danom priečnom priereze sa odlišuje od takého pre rovnomerný tepelný tok, hoci je bilančná entalpia jedna a tá istá. Kríza varu sa určuje parametrami chladiva v hraničnej vrstve. Keď kríza vzniká na úseku so znižujúcim sa tepelným tokom, hraničná vrstva, ktorá sa

vůje

sformovala pred daným priečnym prierezom, má vyššiu hodnotu entalpie a pre vznik krízy je potrebný menší tepelný tok pri menšej bilančnej entalpii. Naopak na úseku s narastajúcim tepelným tokom je entalpia v hraničnej vrstve znížená a pre dosiahnutie krízy je potrebný vyšší tepelný tok. Avšak tento prípad pre reaktor nie je aktuálny, nakoľko sú tam rezervy do krízy veľké. Popísaný jav sa nazýva "efektom pamäti" toku.

V OKB "Gidropress" [I.11] bolo vykonané sledovanie vplyvu nerovnomernosti rozloženia tepelného toku po výške na krízu odvodu tepla na niekoľkých sedem tyčových zväzkoch, geometria ktorých je popísaná vyššie. Sledované profily tepelného toku po dĺžke zväzku sú uvedené na Obr. 6.1.1.7-3.

Okrem vlastných 294 experimentálnych bodov boli pre analýzu použité údaje prác [I.20], [I.21], takže celkovo do skúmaného objemu bolo použitých 438 bodov.



Obr. 6.1.1.7-3 Sledované profily tepelného toku po dĺžke zväzku

Korelácia (6.1.1.7-16) opisuje experimentálne dáta OKB "Gidropress" s parametrami $\sigma_q = 6,9$ % a $\Delta_q = 0,6$ %, a celý analyzovaný súbor s parametrami $\sigma_q = 10,4$ %, $\Delta_q = 4,1$ %.

Porovnanie experimentálnych údajov OKB "Gidropress" s výpočtom podľa vzorca (6.1.1.7-16) je uvedené na Obr. 6.1.1.7-4.



Obr. 6.1.1.7-4 Porovnanie kritických tepelných tokov OKB "Gidropress" pri nerovnomernom vývine energie po dĺžke s výpočtom podľa vzorca (6.1.1.7-16)



Tieto údaje sa tiež porovnávali s výpočtami s použitím faktorov formy Smolina [I.16], Wilsona [I.20], Tonga [I.21]. Analýza ukázala, že údaje OKB "Gidropress" najlepšie zo všetkých popisuje korelácia (6.1.1.7-16), ktorá je doporučená k použitiu pre výpočet stacionárnych režimov práce reaktorov typu VVER. Treba si všimnúť, že osová nerovnomernosť rozloženia tepelného toku nerovnako vplýva na kritický tepelný tok pri rôznych tlakoch.

V poslednej dobe boli vykonané doplňujúce experimenty pre sledovanie vplyvu profilu vývinu energie po dĺžke kanála na krízu odvodu tepla. Experimenty sa vykonali na rúrkach s vnútorným priemerom 8 mm. Skúmaných bolo päť rôznych profilov vývinu tepla, charakteristických pre posledné projekty palivových kaziet VVER. Bolo získaných viac ako 560 krízových bodov. Hľadanie korelácie, ktorá najlepším spôsobom popisuje získané výsledky, pokračuje.

Berúc do úvahy vyššie uvedené, pre výpočet zásob do krízy v stacionárnych režimoch, ako aj počiatočných stacionárnych stavov v havarijných a prechodových režimoch, je treba používať koreláciu (6.1.1.7-16) s pre ňu uvedenou chybou (σ = 6,9 %), ohraničujúc dolnú hranicu faktora formy hodnotou 0,85.

Vo výpočtoch havarijných a prechodových režimoch je treba používať koreláciu (6.1.1.7-1) pre rovnomerný vývin tepla s pre ňu uvedenou chybou (σ =14,26%), nakoľko pre veľkú časť nestacionárnych procesov faktor formy, ktorý uvažuje predhistóriu formovania podmienok krízy na teplo-odvodnom povrchu, stráca fyzikálny zmysel.

V OKB "Gidropress" boli vykonané experimenty pre sledovanie odvodu tepla po vzniku krízy varu.

V reaktorových podmienkach sa uplatňujú dva druhy pokrízneho odvodu tepla. Prvý druh - to je prechod od bublinkového režimu varu k blanovému pri vysokých tepelných tokoch, zodpovedajúcich nominálnej úrovni výkonu reaktora. V tomto prípade v dôsledku rýchleho poklesu koeficientu odvodu tepla dochádza k rýchlemu narastaniu teploty ohrievaného povrchu, až do jeho prepálenia. Druhý typ - je vysychanie ohrievaného povrchu, chladeného parovodnou zmesou s vysokým obsahom pary. Tento typ odvodu tepla sa

pozoruje v havarijných režimoch, spojených s únikmi chladiva z primárneho okruhu, keď aktívna zóna vrie pri nie vysokom výkone, zodpovedajúcom zostatkovému vývinu tepla. V tomto prípade k rastu teploty dochádza pomalšie a závisí od kombinácie parametrov a úrovne výkonu. Korelácie pre určenie koeficienta odvodu tepla, používané vo výpočtových kódoch, si žiadajú experimentálnu previerku.

Nakoľko v analýzach kritického tepelného toku bolo ukázané, že relatívny krok dištancovania prútikov v hraniciach od 1,34 do 1,385 nemá vplyv na výsledky experimentov, experimenty pre pokrízový odvod tepla sa vykonávali na zväzkoch s dištančnými mriežkami pre reaktory VVER-1000.

Prvé experimenty boli vykonané na zväzkoch z experimentálnych tyčí [I.10]. Zväzky boli identické s tými, na ktorých sa sledovala kríza odvodu tepla. Experimentálne tyče boli rozložené v trojuholníkovej mriežke. Ohrievaná dĺžka zväzku bola 1750 mm. Stend, na ktorom sa vykonávali experimenty, mohol pracovať podľa uzavretej a otvorenej schémy. Pri otvorenej schéme sa na vstup zväzku podávala parovodná zmes, pripravená zmiešaním vody a prehriatej pary.

Registrácia parametrov sa počas experimentov vykonávala pri dosiahnutí stacionárneho stavu.

V OKB "Gidropress" boli vykonané experimenty na kruhovom kanále [I.22].

Experimentálne údaje, získané na zväzkoch experimentálnych tyčí, boli porovnávané so známymi koreláciami pre pokrízovú výmenu tepla. Výmenu tepla po vzniku krízy odvodu tepla je možné rozdeliť na dve časti. Prvá - prechodový režim s rozdielom teplôt medzi teplotou steny a teplotou pary menej ako 150 °C, druhá - stabilný režim blanového varu s väčším rozdielom teplôt. Pre režim stabilného blanového varu sa porovnanie vykonávalo so vzorcom Miropoľského [I.23].

Nu=0,023·(Re")^{0.8} · [X+(
$$\rho$$
"/ ρ ')·(1-X)]^{0.8} · Pr_w^{0.8} · y (6.1.1.7-18)

kde je Re"=($\rho W \cdot D_h$)/(μ "·g);

$$y=1-0,1\cdot((\rho'/\rho'')-1)^{0,4}\cdot(1-X)^{0,4}$$

Tento vzorec je analogický korelácii Groeneveld 5.9 [I.24], široko známej na západe. Porovnanie vzorca (6.1.1.7-18) s experimentálnymi údajmi ukázalo, že tento vzťah dobre (s odchýlkou maximálne \pm 25 %) opisuje experiment nielen v oblasti parametrov odporúčaných autorom, ale aj pri menších hmotnostných rýchlostiach až do 390 kg/m²s. Pri tlakoch menej ako 4,0 MPa a hmotnostných rýchlostiach menej ako 390 kg/m²s sa vzorec (6.1.1.7-18) silno líši od experimentu.

V oblasti prechodových režimov s teplotným rozdielom menej ako 150 °C boli experimentálne údaje porovnávané s koreláciami Matsona [I.25] a Tonga [I.26].

$$\begin{array}{ll} \alpha = 166460 \cdot \exp[-0,671 \cdot \Delta T^{0,5}] + 5,479 \cdot (\text{Re}")^{0,505} \cdot \Pr_{w}^{-4,56} \cdot D_{h}^{-0,16} \cdot (\lambda")^{0,189} \cdot X^{-0,113} \\ \alpha = 5037,62 + 94540 \cdot \exp[-0,018(T_{w} - T_{s})] \end{array} \tag{6.1.1.7-19} \\ (6.1.1.7-20) \end{array}$$

kde je T_w-teplota steny, °C; T_s-teplota sýtosti, °C.

Porovnanie ukázalo, že obe korelácie sú v súlade s experimentálnymi údajmi. Bol urobený záver, že v oblasti určitých parametrov, sa z dvoch korelácií (6.1.1.7-19) a (6.1.1.7-20)) používa tá, ktorá dá menšiu hodnotu súčiniteľa odvodu tepla.

Experimenty vykonané na kruhovom kanále pri malých hmotnostných rýchlostiach, charakteristických pre chladenie aktívnej zóny pri zostatkovom tepelnom výkone ukázali, že vzorec (6.1.1.7-18) opisuje tieto

VUJE, a. s.

experimenty nevyhovujúco. Dobrú zhodu s vykonanými experimentmi dáva korelácia Condi-Bengston [I.27], ktorá vyzerá nasledujúco:

$$q=0,00128 \frac{(\lambda/1000)^{0,4593} Pr_w^{2,2598}}{D_h^{0,8095} (1+X)^{2,0514}} Re_g^{[0,6246+0,2043 \cdot ln(X+1)]} \cdot (T_w - T_s)$$
(6.1.1.7-21)

No aj napriek tomu v oblasti malých hmotnostných rýchlostí (menej ako 50 kg/m²s) korelácia (6.1.1.7-21) silne zmenšuje súčiniteľ odvodu tepla a v oblasti veľkých rýchlostí ho, naopak, zväčšuje. Korelácia (6.1.1.7-21) lepšie opisuje získané experimentálne údaje, ak sa k nej pridá korekčný koeficient, rovný:

 $K = 1,6772 - 0,1526 \cdot (\text{Re}_{g}/1000) + 7,6709 \cdot 10^{-3} \cdot (\text{Re}_{g}/1000)^{2} - 1,0971 \cdot 10^{-4} \cdot (\text{Re}_{g}/1000)^{3}$ (6.1.1.7-22)

V konečnom tvare vyzerá modifikovaná korelácia Condi-Bengston nasledujúcim spôsobom:

(λ/1000) 0,4593Pr_w2,2598

$$\begin{array}{c} \mbox{$q=K$\cdot$0,00128$} \\ \mbox{D_h 0,8095$ (1+X)2,0514$} \end{array} \\ \begin{array}{c} \mbox{$Re_g[0,6246+0,2043$\cdot$In(X+1)]$\cdot$(T_w$-T_s)} \\ \mbox{$(6.1.1.7$-23)$} \end{array} \\ \end{array}$$

kde je Re_g= $\rho W \cdot D_h / \Box \mu$

Korelácia (6.1.1.7-23) opisuje experimentálne údaje OKB "Gidropress" v počte 1146 bodov so strednou kvadratickou odchýlkou σ =14,8 % a odchýlkou od aritmetického priemeru Δ = -3,1 %.

6.1.1.8 HYDRAULICKÝ ODPOR KAZIET

Určenie KHO pracovnej kazety a palivovej časti kazety HRK so zirkóniovými dištančnými mriežkami plastového typu bolo vykonané prostredníctvom hydraulických skúšok príslušných PK a palivových častí kaziet HRK na stende OKB "Gidropress". Chemické zloženie a teplohydraulické charakteristiky chladiva na tomto stende zodpovedali charakteristikám a parametrom chladiva primárneho okruhu reaktora VVER-440 s výnimkou rádioizotopického zloženia. Kanál tvorený vnútroreaktorovými zariadeniami, geometricky modeloval prietočnú časť kanálu reaktora VVER-440.

Ako výsledok hydraulických skúšok bola získaná závislosť KHO pracovnej kazety spolu so škrtiacou clonou v určenom rozsahu zmeny Reynoldsovho čísla a závislosť KHO palivovej časti kazety HRK v príslušnom rozsahu zmeny Reynoldsovho čísla.

Extrapoláciou experimentálnej závislosti na Reynoldsove číslo zodpovedajúce nominálnemu režimu práce reaktora VVER-440, sú získané hodnoty KHO s pravdepodobnosťou 0,95 pre pracovnú kazetu spolu so škrtiacou clonou a pre palivovú časť kazety HRK.

Porovnanie výsledkov týchto hydraulických skúšok s analogickými experimentálnymi hodnotami hydraulických skúšok PK a palivových častí kaziet HRK s dištančnými mriežkami z nehrdzavejúcej ocele ukázalo, že hydraulické charakteristiky oboch typov PK a palivových častí kaziet HRK sú identické.

To znamená, že umiestnenie PK a palivových častí kaziet HRK so ZrDM v aktívnej zóne v rámci presnosti merania nemení minimálne hodnoty prietoku chladiva cez reaktor, používané pre určenie teplotechnickej spoľahlivosti aktívnej zóny.

Výsledky stendových hydraulických skúšok PK a palivových častí kaziet HRK so zirkóniovými dištančnými mriežkami sú uvedené v správach: [III.16], [III.17], [[III.18], [III.19], [III.20], [III.21], [III.22].

V roku 1998 boli vykonané hydraulické skúšky a skúšky životnosti makety rozoberateľnej PK v objeme 1000 hodín. Výsledky týchto skúšok sú uvedené v správe [III.23].

Meranie KHO skúšanej makety PK bolo vykonané spolu so škrtiacou clonou.

Pre sledovaný rozsah Reynoldsovho čísla bola pomocou metódy najmenších štvorcov získaná empirická závislosť KHO makety PK s clonou na Reynoldsovom čísle, aproximovaná funkciou v tvare

$$\zeta = 107,5 \cdot \text{Re}^{-0,074}.$$
 (6.1.1.8-1)

Získané hodnoty KHO skúšanej makety rozoberateľnej kazety so škrtiacou clonou sa nachádzajú v hraniciach možného rozptylu KHO sériových kaziet so škrtiacou clonou - (41,9±3,6) (pri uzavretej perforácii obalovej rúry). Zmena rozmerov obalovej rúry rozoberateľnej kazety nepreukázala významný vplyv na veľkosť tlakového spádu na aktívnej zóne.

V roku 2001 boli vykonané hydraulické skúšky [III.24] makety PK druhej generácie (nastavenie zväzku prútikov vzhľadom k obalovej rúre je realizované s rozopretím dištančnými oporami privarenými na jednej z hrán lemu priebežných DM s pootočením po výške každej dištančnej mriežky o uhol 60°). Spolu so škrtiacou clonou s priemerom 50 mm a dvoch makiet palivovej časti kazety HRK druhej generácie. Maketa PK a jedna maketa palivovej časti kazety HRK boli skúšané v rámci dodávky. Druhá maketa palivovej časti HRK (nastavenie zväzku prútikov vzhľadom k obalovej rúre je realizované s rozopretím dištančnými oporami privarenými na jednej z hrán lemu priebežných DM s pootočením po výške každej dištančnej mriežky o uhol 60°) bola skúšaná do začiatku skúšok životnosti a po vykonaní skúšok životnosti v objeme 1500 hodín.

Ako výsledok hydraulických skúšok sú určené KHO troch makiet modernizovaných kaziet v určenom rozsahu čísiel Reynoldsa: pracovnej kazety spolu so škrtiacou clonou a dvoch palivových častí kaziet HRK.

Hodnoty KHO viedli k rýchlostiam vo zväzku prútikov (bez dištančnej mriežky), stredná kvadratická relatívna odchýlka ich určenia neprevýšila 3,3 %. V čase skúšok perforácie dolného radu obalovej rúry skúšanej makety pracovnej kazety boli zakrývané clonami.

V sledovanom rozsahu čísiel Reynoldsa sa zmena KHO makety pracovnej kazety so škrtiacou clonou daného priemeru popisuje empirickou závislosťou:

$$\xi = 111, 4 \cdot \text{Re}^{-0,0766} \tag{6.1.1.8-2}$$

Extrapolácia danej závislosti do určitého čísla Reynoldsa, zodpovedajúcemu nominálnemu režimu práce reaktora, dáva hodnotu KHO makety pracovnej kazety, ktorá sa nachádza v hraniciach intervalu rozptylu hodnôt KHO sériových kaziet, podmieneného chybou ich určenia a technologickými príčinami.

Závislosť KHO makety palivovej časti HRK na Reynoldsovom čísle, získaná po jej príjme z výrobného závodu, je charakterizovaná empirickou závislosťou:

$$\xi = 73,73 \cdot \text{Re}^{-0,1255}$$
(6.1.1.8-3)

Všetky hodnoty KHO tejto makety sa nachádzajú v hraniciach intervalu rozptylu hodnôt KHO sériových kaziet HRK.

Experimentálne hodnoty KHO makety palivovej časti kazety HRK do a po 1500 hodinách skúšok životnosti sú rovnaké. Vychádzajúc z celého súboru hodnôt KHO makety získaného do a po skúškach životnosti, bola určená jediná empirická závislosť KHO danej makety kazety HRK na Reynoldsovom čísle:

$$\xi = 94,74 \cdot \text{Re}^{-0,1419} \tag{6.1.1.8-4}$$

V roku 2003 boli vykonané hydraulické skúšky makety PK druhej generácie, s tromi dolnými dištančnými mriežkami s výškou 20 mm. V sledovanom rozsahu čísiel Reynoldsa sa zmena KHO makety pracovnej kazety so škrtiacou clonou popisuje empirickou závislosťou:

$$\xi = 77,04 \cdot \text{Re}^{-0,0474} \tag{6.1.1.8-5}$$

Hodnotu KHO makety PK sa nachádza v hraniciach intervalu rozptylu hodnôt KHO sériových kaziet, podmieneného chybou ich určenia a technologickými príčinami.

6.1.1.9 SKÚŠKY ŽIVOTNOSTI KAZIET

Mechanická celistvosť konštrukcie PK a palivových častí kaziet HRK sa preverovala stendovými skúškami životnosti.

Skúšky životnosti PK a palivových častí kaziet HRK boli vykonávané na stende horúcej hydroskúšky V-440. Termohydraulické charakteristiky chladiva zodpovedali charakteristikám a parametrom chladiva primárneho okruhu reaktora VVER-440, s výnimkou rádioizotopického zloženia. Vnútorný priestor stendu svojou geometriou plne imitoval štandardné kanály pre PK a palivové časti kaziet HRK.

Vodochemický režim na stende bol udržovaný v súlade s normami, platiacimi pre primárny okruh energetických zariadení vyššie uvedeného typu.

V rokoch 1969-1970 boli vykonané skúšky životnosti skúšobnej PK a kazety HRK s plástovými dištančnými mriežkami a s hrúbkou obalovej rúry 2,1 mm.

Sumárne trvanie skúšok pracovnej kazety - 6619 hodín.

Doba skúšania kazety HRK bola 9090 hodín. V priebehu tohto času bolo vykonaných 34870 dvojitých chodov a tiež 681 pádov.

Skúšky ukázali, dobrú koróznu odolnosť obalovej rúry, pokrytia palivových prútikov a tiež zvarových spojov.

Všetky PK a palivové časti kaziet HRK v procese a po skončení skúšok zostávali hermetické.

Zväzky pracovných kaziet sa po skončení skúšok nachádzali vo vyhovujúcom stave. Dištancovanie prútikov vo zväzku, stav dištančných mriežok a povrchy palivových prútikov počas skúšok sa prakticky nezmenili. Opotrebovanie palivových prútikov v miestach ich dotyku s dištančnými mriežkami nebolo zaznamenané.

Kazeta HRK sa z hľadiska mechanického stavu prakticky neodlišovala od pracovných kaziet.

Skúšobné kazety HRK a PK vydržali skúšky na hydromechanickú odolnosť a po ukončení skúšok boli naďalej prevádzkyschopné.

V rokoch 1983÷1984 boli vykonané skúšky životnosti skúšobnej kazety HRK so zdokonaleným horným uzlom upevnenia zväzku palivových prútikov (pridaná ochranná sieťka, ktorá sa pevne spájala s hlavicou) v rozsahu 4000 hodín.

S cieľom maximálneho priblíženia hydrodynamiky prúdu v stendových podmienkach k skutočným bol vypracovaný a zmontovaný pulzátor tlaku na vytvorenie pulzácie tlaku prúdu vody na vstupe do kanálu.

Počas prvých 3000 hodín sa kazeta HRK podrobovala skúškam v zostave s tyčou pohonu. Maximálna amplitúda okruhových pulzácií na vstupe vody do kazety HRK predstavovala - 0,09.10⁵ Pa.

Nasledujúcich 1000 hodín sa skúšky vykonávali s pulzátorom tlaku s parametrami:

- frekvencia pulzácie tlaku na vstupe do kazety HRK 10 ÷ 30 Hz;
- amplitúda pulzácií $(0,23 \div 0,24).10^5$ Pa.

Kazeta HRK bola v kanále cylindra zavesená v strednej polohe na špeciálnom prípravku.

Počas skúšok životnosti kazety HRK bolo vykonaných 1500 dvojitých chodov a 100 pádov z výšky pracovného chodu 2,5 m. V priebehu 3875 hodín sa kazeta HRK skúšala v strednej polohe po výške chodu.

Po skúškach sa všetky uzly a dielce zväzku palivových prútikov nachádzali vo vyhovujúcom stave.

Rozmer "pod kľúč" dištančných mriežok sa za dobu skúšok prakticky nezmenil. Zmeny geometrie upevňovacieho uzla hornej mriežky k hlavici kazety HRK neboli zaznamenané. Pri previerke hustoty dehermetizácie pokrytia zväzku palivových prútikov za dobu skúšok táto nebola zistená.

Na základe výsledkov skúšok životnosti v rozsahu 4000 hodín bol urobený záver o vyhovujúcej mechanickej stabilite kazety HRK a spoľahlivej konštrukcii horného upevňovacieho uzla zväzku palivových prútikov.

V rokoch 1986-1987 boli vykonané skúšky životnosti PK a kazety HRK so zirkóniovými dištančnými mriežkami plástového typu.

Rozsah skúšok PK a kazety HRK predstavoval 3000 hodín každej. Počas skúšok bola kazeta HRK zavesená v strednej polohe po výške na špeciálnom prípravku.

Výsledky skúšok životnosti pracovnej kazety a kazety HRK so ZrDM sú nasledujúce:

- neboli zaznamenané odchýlky rozmeru "pod kľúč" obalovej rúry od poľa tolerancie;
- obalová rúra sa počas revízií skladala a premiestňovala sa po celej dĺžke zväzku voľne vlastnou váhou;
- rozmer "pod kľúč" dištančných mriežok za dobu skúšok životnosti sa prakticky nemenil, stav buniek a lemov dištančných mriežok - vyhovujúci;
- pri kontrole opotrebovania pokrytia palivových prútikov boli zistené neveľké ryhy a odreniny v miestach kontaktu s bunkami dištančných mriežok;
- porušenie hermetickosti pokrytia palivových prútikov nebolo zistené.

To znamená, stav PK a kazety HRK sa po dobu skúšok životnosti prakticky nemenil. Konštrukcia PK a palivovej časti kazety HRK so zirkóniovými dištančnými mriežkami bola odporučená na reaktorové skúšky.

V rokoch 1991-1992 boli vykonané skúšky životnosti PK a kazety HRK s novým typom hornej mriežky (neupevnenej vzhľadom na hlavicu a majúcej možnosť osového premiestnenia vzhľadom na obal) v rozsahu 3900 hodín.

Za dobu skúšok životnosti sa geometrické rozmery dištančných mriežok nezmenili. Posuny dištančných mriežok a hornej mriežky neboli zaznamenané. Opotrebovanie pokrytia palivových prútikov na miestach dotyku s bunkami mriežok nebolo zistené. Pokrytia zostávali hermetické v procese celého trvania skúšok.

V miestach spriahnutia hornej mriežky s obalovou rúrou na vypuklinách obalovej rúry a leme hornej mriežky boli zaznamenané stopy kontaktu. Opotrebovanie kovu v miestach kontaktu nebolo zaznamenané.

Konštrukcia pracovnej kazety a kazety HRK s novým typom hornej mriežky bola odporučená na sériovú výrobu.

V roku 1998 boli vykonané hydraulické skúšky a skúšky životnosti makety rozoberateľnej PK v rozsahu 1000 hodín v dvoch etapách, 570 a 430 hodín. Za dobu skúšok životnosti PK sa geometrické rozmery obalovej rúry a prvkov zväzku nezmenili. Dištancovanie mriežok po výške a prútikov po priereze zväzku nebolo narušené. Radiálne vôle palivových prútikov vzhľadom k dištančným mriežkam neboli zaznamenané. Poloha hornej mriežky vzhľadom k dolnej sa nezmenila.

Zámena dvoch palivových prútikov za rezervný a dutý neviedla k vzniku vôlí vo zväzku. V procese skúšok neboli zaznamenané zmeny polôh skrutiek fixovaných jamkovaním.

Výsledky stendových (hydraulických a životnostných) skúšok sú uvedené v [III.16], [III.17], [III.18], [III.19], [III.20], [III.21], [III.22], [III.23], [III.26].

V roku 2001 boli vykonané skúšky životnosti makety PK druhej generácie (nastavenie zväzku palivových prútikov vzhľadom k obalovej rúre je realizované s rozopretím dištančnými oporami, privarenými na jednej z hrán lemu priebežných DM s pootočením po výške každej dištančnej mriežky o uhol 60°) [III.17]. Skúšky životnosti sa vykonávali v dvoch etapách.

Počas prvej etapy s trvaním 1500 hodín sa skúšky makety vykonávali pri nominálnych podmienkach v kanáli. Hodnota prietoku cez zväzok makety predstavovala 100 - 110 m³/hod. Počas druhej etapy s trvaním 1500 hodín sa skúšky makety vykonávali pri zvýšených prietokoch cez zväzok. Hodnota prietoku

cez zväzok makety dosahovala 125-135 m³/hod (určená podľa výsledkov meraných tlakových spádov na makete). Skúšky sa vykonali s pripojením pulzátora tlaku ku kolóne. Amplitúda pulzácií tlaku v prúde vody na vstupe do kolóny dosahovala 0,017-0,020 MPa s frekvenciou pulzácií 8 Hz.

Počas doby životnosti makety sa geometrické rozmery obalovej rúry a prvkov zväzku palivových prútikov prakticky nezmenili. Zmeny množstva a veľkosti radiálnych vôli neboli prakticky zaznamenané.

Pri porovnávaní výškovej polohy palivových prútikov zväzku v etapách skúšok bolo zaznamenané nasledujúce:

- po prvej etape skúšok makety v porovnaní s počiatočnými hodnotami, maximálny rozdiel v polohe každého palivového prútika po výške vzhľadom k lemu hornej mriežky neprevyšoval 0,10 mm;
- po druhej etape skúšok v porovnaní s hodnotami prvej etapy sa vyššie uvedený rozdiel nachádzal v hraniciach presnosti merania.

Stav makety PK po skúškach životnosti v rozsahu 3000 hodín s pulzátorom tlaku bol vyhovujúci.

V roku 2003 boli vykonané skúšky životnosti makety PK druhej generácie s tromi dolnými dištančnými mriežkami s výškou 20 mm [III.28].

Boli vykonané skúšky životnosti makety zdokonalenej pracovnej kazety druhej generácie s pulzátorom tlaku v rozsahu 3000 hodín.

Skúšky životnosti sa vykonávali pri nominálnych podmienkach v kolóne pri prietoku vody cez zväzok makety 125-135 m³/hod. Amplitúda pulzácii tlaku v prúde vody na vstupe do kolóny s frekvenciou pulzácií 8 Hz dosahovala 0,016-0,020 MPa.

Za dobu skúšok životnosti sa geometrické rozmery makety, dištancovanie prútikov vo zväzku a ich poloha podľa výšky hornej mriežky nezmenili.

Pred skúškami životnosti vo zväzku makety boli dve miesta s radiálnymi vôľami periférnych prútikov o veľkosti 0,19 a 0,25 mm. Po skončení skúšok životnosti sa ich veľkosť nezmenila. Mechanický stav makety PK druhej generácie bol po skúškach životnosti v rozsahu 3000 hodín s pulzátorom tlaku vyhovujúci.

V roku 2001 boli vykonané skúšky životnosti makety palivovej časti kazety HRK druhej generácie (nastavenie zväzku prútikov vzhľadom k obalovej rúre realizované s rozopretím dištančnými oporami privarenými na jednej z hrán lemu dištančných mriežok s pootočením po výške každej dištančnej mriežky o uhol 60°) [III.29].

Skúšky sa vykonali v priebehu 1500 hodín každá s pripojením pulzátoru tlaku ku kolóne.

Parametre pulzácii tlaku v prúde vody na vstupe do kolóny boli:

- amplitúda pulzácií 0,017-0,020 MPa;
- frekvencia pulzácií 8 Hz.

V čase prvej etapy skúšok životnosti v trvaní 1500 hodín nominálna hodnota prietoku cez zväzok makety bola 125-135 m³/hod. Na dobu skúšok bola maketa palivovej časti kazety HRK pomocou imitátora tyče zavesená v strede výšky kanála.

Skúšky životnosti makety boli vykonané spolu s ozubeným pohonom HRK. Za dobu skúšok bolo vykonaných 100 zhodení makety z výšky pracovného chodu s kontrolou doby pádov. Zvyšný čas sa pohon nachádzal na výške 1700 mm od spodného dorazu v brzdnom režime.

Po skočení skúšok životnosti bol vykonaný pád makety palivovej časti kazety HRK z výšky 2500 mm s imitáciou roztrhnutia spojovacej tyče pri nominálnej teplote a tlaku vody v okruhu bez cirkulácie cez kolónu.

Za dobu skúšok životnosti makety palivovej časti HRK pri nominálnych podmienkach (prvá etapa) v kanále sa geometrické rozmery obalovej rúry a prvkov zväzku palivových prútikov, radiálne vôle periférnych palivových prútikov z hľadiska počtu a hodnoty, prakticky nezmenili. Mechanický stav makety palivovej časti kazety HRK druhej generácie bol po skúškach životnosti v rozsahu 1500 hodín a s pulzátorom tlaku vyhovujúci.

Berúc do úvahy, že pri previerke makety palivovej časti kazety HRK po skúškach životnosti spolu s ozubeným pohonom HRK pri prietokoch cez zväzok 125-135 m³/hod.

V roku 2004 boli vykonané skúšky životnosti palivovej časti kazety HRK [III.30] druhej generácie s tromi dolnými dištančnými mriežkami s výškou 20 mm a s pulzátorom tlaku na stende VVER-440 v rozsahu 3000 hodín. Amplitúda pulzácii tlaku na vstupe do kolóny s frekvenciou pulzácií 8 Hz dosahovala 0,016-0,020 MPa. Na začiatku skúšok životnosti maketa kazety HRK bola zmontovaná v kolóne s ozubeným pohonom HRK. Potom sa maketa kazety HRK zavesovala pomocou imitátora tyče v strednej polohe po výške kanála (na výške 1250 mm od dolného dorazu).

Skúšky životnosti makety palivovej časti kazety HRK sa vykonali v dvoch etapách, s trvaním každej po 1500 hodín. Na začiatku každej etapy bolo vykonaných 30 zhodení palivovej časti kazety HRK s pracovnej výšky 2500 mm.

Veľkosť prietoku cez zväzok makety bola 130-140 m³/hod, čo zodpovedalo kontrolovanému spádu na makete 0,0784-0,0980 MPa.

Počas skúšok životnosti makety palivovej časti kazety HRK sa geometrické rozmery obalovej rúry a prvkov zväzku palivových prútikov prakticky nezmenili.

V roku 2007 boli vykonané skúšky životnosti palivovej časti kazety HRK [III.31] druhej generácie s deviatimi dištančnými mriežkami s výškou 20 mm, dolnou mriežkou s prietokovými drážkami typu "romaška" a rozoberateľným upevnením obalu k pätke šiestimi skrutkami s pulzátorom tlaku na stende VVER-440 v rozsahu 3000 hodín. Amplitúda pulzácii tlaku na vstupe do kolóny s frekvenciou pulzácií 8 Hz dosahovala 0,016-0,020 MPa. Na začiatku skúšok životnosti maketa kazety HRK bola zmontovaná v kolóne s ozubeným pohonom HRK. Potom sa maketa kazety HRK zavesovala pomocou imitátora tyče v strednej polohe po výške kanála (na výške 1250 mm od dolného dorazu).

Počas skúšok životnosti bol tlakový spád na makete nastavený a udržovaný v hraniciach 0,0744-0,0864 MPa, čo zodpovedalo nominálnej hodnote prietoku cez zväzok makety 130-140 m³/hod pri koeficiente hydraulického odporu makety – 13,7, vztiahnutom k prierezu zväzku 91,84 10^{-4} m².

Trvanie skúšok životnosti makety palivovej časti kazety HRK bolo 1500 hodín. Po skončení skúšok bolo vykonaných 60 zhodení makety kazety z výšky pracovného zdvihu, t.j. 2500 mm, doba pádu makety bola 8,66 - 9,05 s.

Počas skúšok životnosti makety palivovej časti kazety HRK sa geometrické rozmery obalovej rúry a prvkov zväzku palivových prútikov prakticky nezmenili. Skrutky, upevňujúce hlavicu a pätku k obalu, sa nachádzali v počiatočnej polohe, ich samovoľné pootočenie nebolo zaznamenané.

Zovšeobecnené výsledky poreaktorových skúmaní PK VVER-440 [III.32], ktoré pracovali v štandardných prevádzkových režimoch počas štyroch palivových cyklov ukazujú, že obalová rúra ako základ nosnej konštrukcie PK spoľahlivo plní svoje funkcie. Povrch obalovej rúry mení farbu od tmavej po striebristo-bielu. Sila potrebná na zloženie obalu je rovná hmotnosti obalu s hlavicou. Zvary obalovej rúry sa nachádzajú vo vyhovujúcom stave.

Maximálny rozmer neprevyšuje limity technologickej tolerancie. Uhol skrútenia neprevyšuje 0,2°.

Vonkajší vzhľad zväzku svedčí o jeho vyhovujúcom stave: všetky prútiky majú tmavú farbu, na prútikoch vnútorných radov sú kontúrne belavé škvrny. Na povrchu prútikov sú vidieť slabé stopy mechanického vzájomného pôsobenia s DM, ale fretting-poškodenie nebolo zistené.

Všetky ZrDM sa nachádzali v drážkach centrálnej rúrky. Dĺžka centrálnej rúrky sa zväčšila.

Pre ocenenie stavu pružín pružných palcov boli vykonané experimentálne práce [III.33] na prvom bloku Rovenskej a Kolskej JE. Pre sledovanie boli vybrané pružiny pružných palcov v hlaviciach tieniacich kaziet, pretože tieniace kazety sa nachádzali v aktívnej zóne dlhšie ako PK a tlakový spád je na nich vyšší ako na PK.

Dlhé pôsobenie namáhania pružín vedie k zníženiu sily ich stlačenia blokom ochranných rúr v dôsledku tečenia materiálu pružín.

Vzhľadom k mnohotvárnosti a zložitosti pôsobiacich faktorov, získanie informácie o stave pružín hlavice tieniacich kaziet bolo realizované experimentálnymi metódami, prostredníctvom mnohonásobného merania síl, vyvíjaných každou pružinou pri jej stlačení na hodnotu pracovného chodu, vykonaných na tieniacich kazetách v etape realizácie odstávkových prác.

Výsledky meraní síl, vyvíjaných pružinami pri ich stlačení na hodnotu pracovného chodu, ktoré boli vykonané po 6, 7 a 8-mich rokoch prevádzky ukazujú, že existuje reálny rozptyl výsledkov meraní ako pre pružiny namontované v jednej kazete tak i pre pružiny rôznych tieniacich kaziet. Minimálna hodnota sily na pružinu po 6 rokoch bola 51,35 N, maximálna hodnota 88,82 N. Interval rozptylu hodnôt je rovný 37,47 N. Príslušne, po 7 a 8 rokoch tieto hodnoty boli: 42,96; 87,89; 37,78 a 79,04 N, intervaly rozptylu hodnôt síl sú rovné 44,93 a 41,26 N. Pre stredné hodnoty síl, vyvíjaných pružinami na premiestnení 19 mm, sa pozoruje tendencia k zníženiu hodnoty sily. Takto pri meraní po 6 rokoch bola získaná stredná hodnota sily na pružinu 69,64 N, po 7 rokoch 63,71 N a po 8 rokoch 55,12 N.

Získané hodnoty ukazujú, že v procese prevádzky dochádza k zníženiu sily stlačenia tieniacich kaziet blokom ochranných rúr v dôsledku sadania pružín.

6.1.1.10 VÝPOČTY NAPÄTÍ V PALIVOVÝCH KAZETÁCH

6.1.1.10.1 Projektové kritériá

Ako základ metód výpočtu pevnostných charakteristík a životnosti kaziet sú položené princípy oceňovania podľa nasledovných limitných stavov:

- krátkodobý húževnatý lom;
- plastická deformácia po celom priereze súčiastky;
- vznik makrotrhlín pri cyklickom zaťažení;
- strata stability.

Pre odhad pevnosti podľa vyššie uvedených limitných stavov sa vykonáva kontrolný výpočet, v ktorom sa uvažujú všetky pôsobiace zaťaženia a skúmajú sa režimy namáhania. Kontrolný výpočet obsahuje výpočet na statickú pevnosť, výpočet na stabilitu, výpočet na cyklickú pevnosť.

Základným výsledkom výpočtu na statickú pevnosť je porovnanie výpočtových ideálnych napätí s napätiami dovolenými. Ideálne napätia sa určujú podľa teórie najväčších tangenciálnych napätí. Dovolené napätia sa určujú podľa garantovaných hodnôt mechanických charakteristík materiálov cestou zavedenia zodpovedajúcich koeficientov rezervy pevnosti v závislosti od režimu práce, kategórie pôsobiacich napätí, typu uzla a charakteru zaťaženia.

Výpočet na stabilitu spočíva v určení dovolených záťaží, ktorých prevýšenie vyvoláva možnosť straty stability pri zaťažení stláčacími zaťaženiami.

Výpočet na cyklickú pevnosť sa vykonáva na základe analýzy celkovej a miestnej napätosti s cieľom vylúčiť objavenie sa únavových trhlín. Používajú sa charakteristiky cyklickej pevnosti materiálov (krivky únavy) so zavedením napäťových a životnostných koeficientov rezervy pevnosti. Z výsledkov výpočtov na cyklickú pevnosť sa určuje dovolený počet opakovaní prevádzkových zaťažení pri zadaných parametroch cyklov záťaže alebo dovolená amplitúda zadávaného cyklu zmeny napätí pri známom počte opakovaní cyklu.

Nominálne dovolené napätie pre prvky kaziet sa berie ako minimálne z nasledovných hodnôt:

$$[\sigma] = \min \{ \mathsf{R}_{\mathsf{m}}^{\mathsf{T}} / \mathsf{n}_{\mathsf{m}}; \, \mathsf{R}_{\mathsf{p}0,2}^{\mathsf{T}} / \mathsf{n}_{0,2} \}$$
(6.1.1.10-1)

Dovolené napätia pre počítané prvky sa berú podľa analógie s [II.17]. V prípade zaťaženia konštrukcie veľkými dynamickými silami, vznikajúcimi pri zapracovaní automatickej ochrany, sa pre výpočet nominálnych dovolených napätí používa [II.18].

Pri posudzovaní havarijných situácií sa na konštrukciu kaziet uplatňujú požiadavky, spojené so zaistením bezpečnosti: deformácie prvkov konštrukcie nesmú brániť pohybu regulačných orgánov, významne obmedzovať chladenie aktívnej zóny, brániť demontáži aktívnej zóny po havárii. Splnenie týchto požiadaviek je zabezpečené, ak sú splnené podmienky pevnosti v limitnom stave a niektoré ohraničenia na vzájomné premiestnenie deformujúcich sa dielcov.

Podľa príslušného dokumentu parameter HCLPFMO34 (High Confidence Low Probability of failure – Vysoká istota nízkej pravdepodobnosti zničenia) pre počítané elementy sa určuje nasledovným spôsobom:

HCLPFMO34 =
$$\frac{1.8[\sigma] - (\sigma)_2}{(\sigma_s)_2}$$
 PGA (6.1.1.10-2)

6.1.1.10.2 Metódy výpočtu a programové prostriedky

Pre určenie namáhaní a momentov, pôsobiacich v prierezoch, premiestnení a napätí v počítaných prvkoch konštrukcií pri statickom namáhaní sa používajú všeobecne známe metódy teoretickej mechaniky, odporu materiálov, teórie doštičiek a povlakov.

Pri sledovaní transportno technologických operácií a iných režimov, spojených s nárazovým zaťažením kaziet, sa široko používa prístup, založený na používaní pojmu koeficienta dynamiky. Ako koeficient dynamiky sa používa veličina vytvárajúca približnú väzbu medzi výstupnými charakteristikami počítaného systému (premiestnenia, napätia) pri vonkajšom dynamickom (V \neq 0) a statickom (V = 0) pôsobení, kde V je rýchlosť pohybu v momente nárazu. Vzorce pre výpočet koeficientov dynamiky pre konkrétne prípady výpočtu a počítaných prvkov konštrukcií sa zakladajú na zjednodušených, no obvykle v inžinierskej praxi používaných, predstavách o náraze s používaním zákonov o zachovaní energie a hybnosti. Takýto prístup zabezpečuje konzervatívnosť zdôvodnenia.

Spolu s vyššie uvedenými metódami a prístupmi sa teraz používajú súčasné programové komplexy, umožňujúce riešiť zložité úlohy s minimom vynaloženého času, čo sa dosahuje automatizovaním zadávania vstupných údajov, používaním zrýchlených metód riešenia systémov rovníc a vizuálnym sledovaním výpočtových schém a výsledkov výpočtu na obrazovkách monitorov personálnych počítačov. Pre zdôvodnenie pevnosti kaziet sa používajú nasledovné programové komplexy.

FEMINA je orientovaný na riešenie úloh nelineárnej termo-mechaniky v ľubovoľnej rovinnej geometrii metódou konečných prvkov. Výsledkom výpočtu je určenie napätostno-deformačného stavu prvkov konštrukcie. Programový komplex FEMINA je atestovaný v GAN Ruska. Pasport – č.106 zo 17.06.99

MicroFe umožňuje metódou konečných prvkov vykonávať statické výpočty rôznych typov kombinovaných priestorových systémov, určovať frekvencie a tvary vlastných kmitov konštrukcií. Programový komplex MicroFe je atestovaný v GAN Ruska. Pasport – č.114 z 02.03.02

DINARA sa používa pre výpočet dynamiky kazety HRK. PMK DINARA umožňuje vykonávať súčasný dynamický výpočet priestorového lineárno-pružného tyčového systému a diskrétnych podsystémov s konečným počtom stupňov voľnosti. Systémy zahrnuté v obecnom dynamickom modeli, môžu mať medzi sebou nelineárne a parametrické väzby, so základňou i vo vnútri v sebe. Programový komplex DINARA je atestovaný v GAN Ruska. Pasport – č.194 z 26.05.05

MSC.MARC sa používa na riešenie pevnostných úloh, v ktorých sú tuhé deformujúce sa telesá vystavené súčasným kinematickým, silovým a tepelným vplyvom. Berie sa do úvahy, že sa vyskytujú nelineárne vlastnosti materiálov alebo vlastnosti, závisiace od histórie zaťaženia. MSC.MARC je postavený na metóde konečných elementov, má obšírnu knižnicu konečných elementov. PK MSC.MARC je atestovaný v Rostechnadzoru Ruska. Pasport – č. 246 z 18.12.08.

6.1.1.10.3 Pôsobiace záťaže

Charakter zaťaženia pracovných kaziet a kaziet HRK v procese prevádzky je určený ich funkčným určením a podstatne sa líši. Spolu s existujúcimi konštrukčnými rozdielmi to vedie k nevyhnutnosti ich samostatného posudzovania pri preukazovaní pevnosti. Skupinové efekty, spojené s prácou celej aktívnej zóny, sa nemusia zohľadňovať. Tieto majú vplyv na vnútorné časti reaktora a zohľadňujú sa pri analýze ich pevnosti.

Napriek tomuto zjednodušeniu sú pracovná kazeta a kazeta HRK veľmi zložité objekty pre výpočtovú pevnostnú analýzu. S ohľadom na existujúce tolerancie a nedostatočnú vierohodnosť teoretického popisu radu procesov,

sprevádzajúcich činnosť a pôsobiacich na pevnosť prvkov aktívnej zóny, pripadá značný objem prác pri preukazovaní pevnosti na experimentálny výskum a skúsenosti z prevádzky.

Pracovná kazeta v procese prevádzky nemení svoju polohu vzhľadom na aktívnu zónu s výnimkou plánovaných transportno-technologických operácií. Počas transportno-technologických operácií môže byť pracovná kazeta premiestňovaná rýchlosťami, určovanými technológiou zavážania - vyvážania kaziet.

Kazeta HRK môže v procese prevádzky zaujímať rôzne polohy po výške aktívnej zóny pri regulovaní výkonu reaktora a pri zapracovaní HO. Rýchlosti premiestňovania a zodpovedajúce inerčné záťaže sú rôzne.

Na základe analýzy zmeny parametrov zaťaženia v projektových režimoch NPP boli ako výpočtové prijaté:

- transportno-technologické operácie;
- stacionárny režim;
- režim regulácie;
- režim zapracovania automatickej ochrany reaktora.

Seizmické záťaže prvkov kaziet sú vyvolané silami zotrvačnosti pri rýchlych horizontálnych a vertikálnych zrýchleniach nádoby reaktora. V projekte sa posudzuje PZ - zemetrasenie maximálnej intenzity s priemerným výskytom raz za 1000 rokov a MPZ - zemetrasenie s priemerným výskytom raz za 10000 rokov.

Maximálne horizontálne a vertikálne koeficienty preťaženia v podieloch g, pôsobiace na PK a palivové časti HRK pri PZ a MPZ v zostave aktívnej zóny reaktora VVER-440 na miestach 3. a 4. bloku JE "Mochovce" sú v zhode s [III.34].

Pri PZ sa východzie pôsobenia a výsledky výpočtu koeficientov preťaženia a posunov berú ako polovičné hodnoty príslušných hodnôt pre MPZ.

Maximálne horizontálne a vertikálne koeficienty preťaženia v podieloch g, pôsobiace na PK a palivové časti HRK pri PZ a MPZ pri ich skladovaní v bazéne skladovania reaktora VVER-440 na miestach 3. a 4. bloku JE "Mochovce" sú uvedené v zhode s príslušným dokumentom.

Pri PZ sa východzie pôsobenia a výsledky výpočtu koeficientov preťaženia a posunov berú ako polovičné hodnoty príslušných hodnôt pre MPZ.

Uvažuje sa spoločné pôsobenie seizmických záťaží so záťažami režimov NPP a havarijných situácií (skladanie záťaží NPP+PZ, NPP+MPZ, NPP+PH).

Hodnoty tlakových rozdielov na oblakových rúrach PK a palivových častí HRK zo systému riadenia a ochrany reaktora pri projektovej havárii, spojenej s prasknutím HCP, sú uvažované v zhode s [[III.35].

Okrem režimov, ktoré boli posudzované pri analýze pevnosti kaziet, existuje aj režim, kedy sa kazety HRK nachádzajú na mechanických dorazoch po zapracovaní AO. V tejto situácii sa narušuje projektová väzba medzi prvkami kaziet HRK (palivová časť, nadstavec) a pohonom HRK (tyč pohonu, spojovacia tyč), ktoré pod vplyvom prúdu chladiva a jeho pulzácií môžu vykonávať neurčité kmitania, pričom amplitúda a frekvencia kmitania závisia od počtu pracujúcich HCČ. V dôsledku týchto kmitaní sú možné poškodenia stykových a dosadacích povrchov týchto elementov. Vo väzbe na zložitosť modelovania poškodení sa pre tento režim výpočtové zdôvodnenie nevykonáva. Prevádzkovým predpisom sa ohraničuje doba pobytu kaziet HRK na mechanických dorazoch. V priebehu 30 minút po pôsobení AO1, alebo AO2 musia byť všetky kazety HRK zdvihnuté na dolné koncové vypínače.

6.1.1.10.4 Výsledky výpočtového zdôvodnenia

Úroveň napätí rôznych namáhaných prvkov kaziet pre režimy NPP a TTO vychádzajú z výpočtov [III.36], [III.37]. Pôsobiace napätia neprevyšujú dovolenú hodnotu.

Pevnostný výpočet rozoberateľného uzla spojenia obalu s pätkou kazety [III.38] ukázal, že pri zatiahnutí skrutiek uzla spojenia obalu s pätkou momentom 19,6 Nm stredné ťahové napätia po priereze skrutky, napätia rezby v závitovej časti skrutky a špecifické napätia po priereze skrutky neprevyšujú dovolené hodnoty.

Odolnosť obalovej rúry pracovnej kazety v režime TTO proti pozdĺžnemu stláčaciemu namáhaniu od spojovacej tyče ZS je zabezpečená.

Hodnota pozdĺžnej kritickej sily pri skúškach za studena skutočnej kazety na odolnosť je uvedená v [III.39].

Získanú hodnotu koeficientu rezervy pevnosti pre stláčacie napätia považujeme za dostatočnú.

Odolnosť obalovej rúry kazety HRK v režime zapracovania automatickej ochrany od spoločného pôsobenia pozdĺžneho namáhania a vonkajšieho tlaku je zabezpečená.

Získanú hodnotu koeficientu rezervy pevnosti pre stláčacie napätia považujeme za dostatočnú. Odolnosť obalovej rúry je zabezpečená.

Celková úroveň napätí v pracovnej kazete a palivovej časti kazety HRK je nízka, preto sa zdôvodnenie cyklickej pevnosti nevykonáva.

Pevnosť nadstavca je preukázaná v [III.40]. Maximálne teplotné napätia vznikajú na vonkajšom povrchu pätky nadstavca. Analýza mechanických napätí ukázala, že maximálne napätia v prvkoch nadstavca vznikajú pri havarijnej situácii roztrhnutia spojovacej tyče.

6.1.1.10.5 Výsledky výpočtového zdôvodnenia pri havarijných režimoch

Pevnosť a deformácie prvkov pracovnej kazety a kazety HRK pri havarijnej situácii, spojenej s roztrhnutím hlavného cirkulačného potrubia v oblasti vstupného alebo výstupného nátrubku reaktora, sa analyzujú z hľadiska bezpečnosti vo výpočte [III.46].

Odolnosť prvkov PK a kazety HRK pri havarijnej situácii je zabezpečená.

Minimálna vzdialenosť medzi hranami obalových rúr kaziet HRK a pracovnej kazety v havarijnom režime, spojenom s roztrhnutím HCP pri vstupnom nátrubku a pri roztrhnutí HCP pri výstupnom nátrubku sú také, že v havarijných režimoch hrany obalových rúr pracovných kaziet nebudú brániť klesaniu kaziet HRK.

Medzera medzi obalovými rúrami sa nevyužíva.

6.1.1.10.6 Výsledky výpočtového zdôvodnenia pri seizmických pôsobeniach

Pevnosť a deformácie prvkov PK a palivovej časti kazety HRK pri pôsobení záťaží NPP+PZ a NPP+MPZ sa preukazuje vo výpočte [6.1.1.4-50].

Získané pôsobiace napätia v obalovej rúre PK a spodnej opornej konštrukcii PK pri uvažovaných skladaniach zaťažení neprekračujú prípustné hodnoty.

Získané pôsobiace napätia v obalovej rúre palivovej časti kazety HRK a spodnej opornej konštrukcii palivovej časti kazety HRK pri uvažovaných skladaniach zaťažení neprekračujú prípustné hodnoty.

Stabilita obalových rúr PK a palivovej časti kazety HRK je zabezpečená pri všetkých sčítaniach záťaží so zahrnutím zdôvodnenia odolnosti v NPP vo výpočtoch [III.36] a [III.37].

Celková úroveň napätí pri seismických vplyvoch je nízka, preto sa zdôvodnenie cyklickej pevnosti nevykonáva.
6.1.1.11 EXPERIMENTÁLNE POZOROVANIA

Podľa výsledkov poradiačného skúmania [III.7], [III.8], [II.10], vykonaného v horúcich komorách, bola zistená vysoká spoľahlivosť palivových prútikov a mriežok po prevádzkovaní kaziet počas 3, 4 a 5 rokov. Porušenie palivových článkov z dôvodu cyklickej únavy, opotrebovania alebo odierania sa nevyskytuje. Povrch zirkóniového pokrytia palivových prútikov a zirkóniových dištančných mriežok je čierny, bez stôp nodulov alebo stôp odierania a opotrebovania. Pri rozoberaní kaziet po ukončení prevádzky boli všetky palivové články vytiahnuté so silou v definovanom rozmedzí, čo svedčí o spoľahlivosti kontaktu bunky a palivového prútika. Pri prehliadke palivových prútikov tak pod mriežkami, ako aj v medzimriežkovom priestore bol stav povrchu vyhovujúci. Prehliadka mriežok ukázala, že kvalita povrchu v miestach kontaktu a mimo nich je dobrá a nie je v nej žiadny rozdiel.

Na základe výsledkov stendových a poradiačných skúmaní bolo konštatované, že v miestach kontaktu palivových prútikov a mriežok sa vyskytujú stopy kontaktu bez opotrebovania dotykových párov. Toto svedčí o dostatočnej odolnosti pokrytia palivových prútikov a dištančných mriežok proti korózii typu fretting.

Na vnútornom povrchu pokrytia je hĺbka vrstvy interakcie väčšia ako na vonkajšom povrchu a má hodnotu do 17 µm za 5 rokov prevádzky. Maximálnu hrúbku má vrstva v strednej zóne po výške pokrytia palivových prútikov. Na koncoch pokrytia je interakcia menšia. Lokálna korózia pokrytia nevzniká. Oxidné vrstvičky sú celistvé, čiernej farby.

Vodíkové krehnutie je nevýznamné. Vytvárajú sa rozmerom neveľké hydridy, majú prevažne tangenciálne smerovanie. Veľké radiálne hydridy, značne znižujúce prevádzkyschopnosť palivových prútikov, neboli v pokrytí zistené.

Výsledky metalografického skúmania materiálu ZrDM ukázali [III.8] že štruktúra kovu neprešla významnými zmenami (v porovnaní s počiatočným stavom). Po 1÷2 ročnom prevádzkovaní mriežok je počet a veľkosť hydridov v materiáli buniek nevýznamný a nelíši sa od hodnôt normálne pozorovaných v štádiu ich výroby.

Zvýšenie doby prevádzky na 3 ÷ 4 roky vedie k zvýšeniu tak množstva, ako aj rozmerov hydridových vtrúsenín v povrchových vrstvách buniek. Rozmery týchto hydridových tvarov zostávajú relatívne neveľké, v dôsledku čoho nemajú negatívny vplyv na prevádzkyschopnosť mriežok.

Vonkajší vzhľad mriežok po prevádzkovaní počas 5 rokov sa výrazne nelíši od počiatočného (v momente ich výroby). Mechanické defekty na ZrDM nie sú prítomné. Povrch buniek má tmavú farbu (takú istú, ako po termooxidácii), čo svedčí o veľkej koróznej odolnosti ich materiálu - zliatiny E-110.

Hrúbka oxidnej vrstvy má hodnotu do 5 µm. Na povrchu buniek, zvlášť na miestach ohybu, sa vyskytujú (vo forme ľahko zmývateľných usadenín) produkty korózie okruhu a bazénu skladovania, ktoré predstavujú nízkoteplotné železo-oxidné zlúčeniny.

Vyššie opísaná vysoká spoľahlivosť palivových prútikov a mriežok bola potvrdená a rozšírená na celé kazety pri analýzach vyhoreného paliva VVER so zvýšeným vyhorením [I.32], [I.33]. Boli analyzované palivové kazety prvej generácie. Boli u nich potvrdené nasledovné výborné charakteristiky:

- neprítomnosť deformácií základných konštrukčných častí;
- uspokojivý vonkajší vzhľad;
- uspokojivý stav spojov;
- minimálne zmeny geometrie;

- prijateľná interakcia paliva s pokrytím;
- prijateľná úroveň korózie (oxidácia pokrytia, obsah vodíka v pokrytí).

Jednou z analyzovaných kaziet bola tiež kazeta 1. generácie, radiálne neprofilovaná, bez vyhorievajúceho absorbátora, s oceľovými dištančnými mriežkami. Dobrý stav kazety po jej vyvezení z reaktora je detailne opísaný v [I.32].

V správe [I.33] je rozoberaný dobrý stav vyhorených kaziet reaktora VVER-1000.

Preukazovaniu bezpečnej a spoľhlivej prevádzky palivových kaziet VVER-440 sú venované teoreticko - experimentálne aktivity opísané v správach [I.38], [I.39] a [I.40].

Práce charakterizované v správe [I.38] boli zamerané na analýzu výsledkov skúšok prepracovaných palivových prútikov VVER na rýchlom impulznom grafitovom reaktore BIGR v režimoch, imitujúcich podmienky havárie typu RIA, z pohľadu požiadaviek bezpečnosti, kladených na stav palivových prútikov v projektových haváriách. Bolo preukázané, že pri projektovej havárii s vystrelením kazety HRK RZ s VVER-440 v JE «Mochovce» (bloky 1., 2.) a «Bohunice» (bloky 3., 4.) sú fragmentácia palivových prútikov a tavenie paliva vylúčené.

Cieľom prác rozoberaných v správe [I.39] bola analýza výsledkov experimentu MIR-LOCA/72 a poreaktorového výskumu skúšaného palivového prútika z pohľadu požiadaviek bezpečnosti, kladených na stav palivových prútikov v projektových haváriách.

Podmienky experimentu MIR-LOCA/72 sú konzervatívne v porovnaní s podmienkami projektových havárií LOCA pre palivové prútiky VVER vysokého vyhorenia.

Týmto spôsobom, v projektových haváriách so stratou chladiva RZ s VVER sa podmienky pre vznik relokácie fragmentovaných častíc paliva a ich výron do chladiva nerealizujú.

Bolo preukázané, že v projektovej havárii s veľkým únikom chladiva z primárneho okruhu RZ s VVER-440 v JE Mochovce (bloky 1., 2.) a Bohunice (bloky 3., 4.) sú relokácia a disperzovanie paliva do chladiva vylúčené.

Účelom prác zhrnutých v správe [I.40] bolo experimentálne-výpočtové preukázanie bezpečného správania sa palivových prútikov VVER-440. Za týmto účelom bol vykonaný komplex výpočtovo-analytického výskumu, zahrňujúcieho tiež experimenty IFA-650.6, IFA-650.11, MIR-LOCA/60 a MIR-LOCA/72 a tiež experimentálne práce na rýchlom impulznom grafitovom reaktore BIGR.

Týmto spôsobom, séria skúšok na reaktore BIGR prepracovaných palivových prútikov VVER je experimentálnym potvrdením bezpečného správania sa palivových prútikov VVER-440 v projektových haváriách typu RIA.

Na základe vykonanej analýzy experimentálnych údajov a vykonaného výpočtovo-analytického výskumu možno urobiť záver, že bezpečné správanie sa palivových prútikov v projektových haváriách LOCA a RIA reaktorov VVER-440 v JE Mochovce (bloky 1., 2.) a Bohunice (bloky 3., 4.) je preukázané do maximálneho projektového vyhorenia paliva v palivovom prútiku vrátane.

6.1.1.12 RIADENIE A KONTROLA

Systém riadenia orgánmi SORR je systémom normálnej prevádzky a bezpečnostným systémom a je určený na riadenie reaktora pri jeho spustení, prevádzke na výkone a odstavení a tiež na automatické odstavenie reaktora.

Riadenie a ochrana reaktora sa vykonáva pôsobením na reaktivitu pomocou mechanických regulačných orgánov, premiestňujúcich kazetu HRK.

Premiestňovania kaziet HRK sa uskutočňuje po skupinách v požadovanej postupnosti automaticky alebo ručne. Poloha kaziet HRK v aktívnej zóne je kontrolovaná pomocou snímačov, patriacich do konštrukcie pohonu.

Okrem SORR, sa pôsobenie na reaktivitu reaktora vykonáva systémom bórovej regulácie, vykonávajúcej nasledovné funkcie:

- kompenzáciu pomalých zmien reaktivity (vyhorievanie, stacionárna a nestacionárna xenónová otrava);
- prevedenie aktívnej zóny reaktora do podkritického stavu a jej udržanie v podkritickom stave.

Splnenie vymenovaných funkcií sa uskutočňuje zmenou množstva tekutého absorbátora (kyseliny boritej) v chladive pomocou systému odpúšťania - doplňovania primárneho okruhu.

Je zabezpečená nepretržitá automatická kontrola koncentrácie kyseliny boritej v primárnom okruhu.

Chyba merania je 0,1 g/kg pri obsahu kyseliny boritej do 10 g/kg a +1 % pri väčšom obsahu.

Systém vnútroreaktorovej kontroly (SVRK) je systémom normálnej prevádzky dôležitým pre bezpečnosť a je určený na získanie operatívnych a vierohodných informácií o stave aktívnej zóny v časti teplotechnických, teplofyzikálnych a jadrovo-fyzikálnych charakteristík, potrebných pre účely kontroly, riadenia a signalizácie ohľadne reaktorového zariadenia.

Kontrola teploty chladiva sa predpokladá v nasledujúcom rozsahu:

- teplota chladiva na výstupe z 210 pracovných kaziet;
- teplota na výstupe z reaktora v šiestich bodoch (na periférii bloku ochranných rúr na úrovni výstupných nátrubkov Ms500 reaktora).

Kontrola neutrónového toku po výške a polomere aktívnej zóny je zabezpečovaná pomocou KNI, umiestnených v centrálnych rúrkach pracovných kaziet, pritom sú KNI vyhotovené tak, že centrá siedmich snímačov sú umiestnené na rôznych úrovniach po výške aktívnej zóny a jeden je umiestnený po celej výške, počet kompletov s KNI - 36.

Úroveň neutrónového toku sa kontroluje pomocou systému Ex-core system DPS 3.10.01.01. Na pokrytie celého výkonového rozsahu reaktora sú použité nasledovná 2 typy detektorov:

- proporcionálny čítač s vysokou citlivosťou pre monitorovanie hustoty toku neutrónov pri odstavení reaktora, počas spúšťania alebo pri prekládke paliva;
- kompenzačné ionizačné komory pre meranie hustoty toku neutrónov pre prevádzke reaktora vo výkonovom pásme.

6.1.1.13 PLÁN SKÚŠOK A PREVIEROK

6.1.1.13.1 Pravidlá preberania a metódy kontroly vo výrobnom závode

Preberanie výrobkov, skladaných prvkov, uzlov a kompletujúcich súčiastok sa vykonáva vo všetkých štádiách výroby v súlade s dokumentom [I.8].

Je povolené použitie iných metód a objemov kontroly, ktoré nie sú uvedené v [I.8], predpokladaných konštrukčnou a technologickou dokumentáciou výrobného závodu, zabezpečujúcich splnenie technických požiadaviek KTS.

6.1.1.13.2 Preberacia kontrola na JE

Preberacia kontrola na JE zahŕňa vstupnú kontrolu výrobkov na JE počas garančnej doby skladovania [III.48].

Vstupnú kontrolu výrobkov vykonávať v nasledujúcom poradí:

- kontrola kompletnosti a správnosti vyplnenia sprievodnej dokumentácie;
- previerka prítomnosti plomb a neprítomnosti poškodení prepravného kontajnera;
- vybratie výrobku a jeho rozbalenie;
- kontrola výrobku.

Predkladanie a príjem výrobkov vykonávať pri existencii nasledujúcich dokumentov, zariadenia a nástrojov:

- zmluvnej technickej dohody;
- pasportu výrobku;
- žeriavu uzla čerstvého paliva;
- uchytávacieho prípravku;
- závesu pre PK;
- závesu pre palivovú časť kazety HRK a nadstavec;
- otáčacieho zariadenia na kontajnery;
- stendu na kontrolu dĺžky a odchýlok tvaru a rozmiestnenia povrchov výrobkov;
- univerzálneho meracieho nástroja zákazníka na kontrolu geometrických rozmerov výrobkov;
- kontrolných vzoriek vonkajšieho vzhľadu.

Počas vstupnej kontroly musí byť preverené splnenie nasledujúcich technických požiadaviek na výrobky príslušnými metódami kontroly:

- pohyblivosť a stlačiteľnosť pružinových palcov v hlaviciach PK;
- vonkajší vzhľad výrobkov (PK, palivová časť kazety HRK, nadstavec) a ich dielcov musí zodpovedať požiadavkám, uvedeným v KTS pre dodávku výrobkov a kontroluje sa vizuálne porovnaním s kontrolnými vzorkami vonkajšieho vzhľadu;
- geometrické rozmery výrobkov musia zodpovedať požiadavkám výkresov základných rozmerov, vykonávať kontrolu rozmerov s limitnými odchýlkami, uvedenými vo výkresoch základných rozmerov (kontroluje sa meracími prostriedkami výrobcu);
- dĺžka, odchýlka formy a rozmiestnenia povrchov výrobkov (kontroluje sa v stende vo vertikálnej polohe pri spúšťaní pôsobením vlastnej váhy).

V prípade vykonania vstupnej kontroly pre iné parametre musia byť metódy a prostriedky kontroly prerokované s výrobcom.

V prípade nevyhovujúcich výsledkov vstupnej kontroly sa otázka použiteľnosti výrobkov rieši spolu s výrobcom, spotrebiteľom a hlavným konštruktérom.

O výsledkoch vstupnej kontroly sa vyhotovuje zápisnica.

6.1.1.13.3 Kontrola hermetickosti palivových prútikov ožiarených kaziet

Počas prevádzky sa vykonáva kontrola aktivity chladiva, podľa hodnoty ktorej je možné určiť stav hermetickosti palivových prútikov kaziet. Porucha ako výsledok dehermetizácie palivových prútikov alebo mechanických poškodení v procese prevádzky sa charakterizuje:

- pre kazety hodnotou mernej aktivity jódu-131 v chladive primárneho okruhu v momente odberu vzorky;
- pre kazety podľa kritérií hodnotenia mechanických poškodení v súlade s [III.49].

Pri dosiahnutí definovanej úrovne sumárnej mernej aktivity izotopov jódu-131, 132, 133, 134, 135 v chladive primárneho okruhu v momente odberu vzorky alebo úrovne mernej aktivity jódu-131 v chladive primárneho okruhu v momente odberu vzorky je potrebné vykonať kontrolu hermetickosti pokrytia palivových prútikov všetkých kaziet počas plánovanej výmeny paliva.

Kontrola hermetickosti počas plánovanej výmeny paliva sa vykonáva štandardným systémom KHP, inštalovaným na bloku. Ako predbežnú operatívnu metódu kontroly, doplňujúcu štandardnú penálovú metódu KHP je možno použiť sipping-metódu KHP.

6.1.1.13.4 Revízia nadstavca

Nadstavec má definovanú životnosť. Inšpekcia povrchov nadstavca, ktoré sa opotrebúvajú, sa vykonáva v zhode s medodikou, vysvetlenou v [III.50].

6.1.1.13.5 Zaobchádzanie s palivom

Zaobchádzanie s "čerstvým" palivom

Dodávka ČJP na JE sa uskutočňuje v TBK. TBK je konštrukciou, skladajúcou sa zo štyroch rúr, ktoré sú medzi sebou zvarené rúrovými doskami, tvoriacimi stĺpiky opôr, a majúcou snímateľné kryty na čelách rúr. Každá rúra má vo vnútri drevené šesťhranné vložky s gumovými vložkami, chrániacimi "čerstvé " kazety, ktoré sú v nich rozmiestnené, pred poškodením pri transporte. Súčasťou baliacich kompletov sú puzdrá z polyetylénu a hrubého textilu. Hermetickosť vnútorného priestoru každej rúry sa zabezpečuje gumovými vložkami medzi krytmi a rúrami.

Pri nakladaní, transporte a vykladaní TBK je treba prijať bezpečnostné opatrenia, vylučujúce možnosť poškodenia TBK. Je zakázané balenie hádzať alebo posúvať pomocou úderov.

Na JE ČJP prechádza vstupnou kontrolou v zhode s časťou 6.1.1.13.2 "Preberacia kontrola na JE".

Pri prácach s ČJP je treba spĺňať nasledujúce obecné požiadavky:

Všetky práce s rozbalenými výrobkami a tiež vykladanie a nakladanie je treba vykonávať na čistom, suchom, zakrytom a nezaplaviteľnom mieste s teplotou vzduchu nie nižšou ako 5°C a relatívnou vlhkosťou vzduchu nie vyššou ako 85 %, ktoré je vybavené zariadeniami, prístrojmi a prípravkami, nutnými pre vykonávanie prác: mostovým žeriavom, závesami na výrobky, otáčacím zariadením atd.

Kontrolu teploty a vlhkosti vzduchu na pracovnom mieste je treba vykonávať minimálne raz za 24 hodín a zaznamenávať v denníku.

Na vykonávanie transportných a technologických operácií je nutné používať iba správne vybavenie, prístroje a prípravky, ktoré absolvovali periodické prehliadky v stanovenom poradí a kontrolnú obhliadku pred vykonaním technologických operácií.

Na pracovnom mieste je zakázané používať oheň, fajčiť, uchovávať cudzie predmety, ktoré nie sú potrebné na vykonanie prác s výrobkami. Zakazuje sa vykonávať stavebné a zváračské práce vo vzdialenosti menšej ako 3 metre od výrobkov.

S výrobkami môžu narábať iba osoby, ktoré absolvovali inštruktáž pre prácu s výrobkami, zakazuje sa pracovať bez špeciálneho odevu alebo v špeciálnom odeve s gombíkmi.

TBK je treba prijímať od výrobcu iba zablombované, bez vonkajších poškodení a so sprievodnou dokumentáciou.

Otvorenie balení (balíkov), vychladených na teplotu nižšiu ako je teplota pracovného miesta, sa vykonáva nie skôr, ako 24 hodín po ich donesení na pracovné miesto. Zakazuje sa odkryť balenie mimo pracovného miesta.

Otvorenie TBK a vyloženie výrobkov je treba vykonať iba vo vertikálnej polohe. Vyloženie výrobkov z TBK sa uskutočňuje pomocou závesov (pre palivovú časť HRK a pre PK sa používajú rôzne závesy). Zachytenie výrobku závesom má byť vykonané ľahko a voľne. Pri umiestnení výrobkov do roštov UČP alebo netesného zásobníka maximálna zavádzacia rýchlosť nesmie byť vyššia ako 0,3 m/min.

Pri všetkých etapách práce s výrobkami je treba prijať bezpečnostné opatrenia, vylučujúce možnosť poškodenia, skrivenia a zašpinenia výrobkov a zamedzujúce napadaniu cudzích predmetov do výrobkov.

Všetky práce s rozbalenými výrobkami je dovolené vykonávať iba v bavlnených rukaviciach.

Na otieranie výrobkov je treba používať krátkovlasú bavlnenú tkaninu s obšitými krajmi (obrúsky) a lieh. Po otieraní sa výrobok presúša na vzduchu minimálne 5 minút. Zakazuje sa používať ventilátor, mazacie materiály, acetón, benzín.

Zariadenia a prípravky, ktoré prichádzajú do kontaktu s výrobkami, je treba bezprostredne pred použitím otrieť obrúskami, namočenými v liehu a vysušiť na vzduchu.

Na miestach, kde sa skladujú TBK a z nich vyložené výrobky, sa zakazuje hasenie požiaru vodou. Povoľuje sa hasenie požiaru hasiacimi prístrojmi s kysličníkom uhličitým alebo práškovým a inertným plynom.

Preveruje sa rozloženie výrobkov v netesnom zásobníku na zhodu s kartogramom zavezenia netesného zásobníka. Bočné otvory v netesnom zásobníku sa zakrývajú polyetylénovou páskou, potom sa umiestňuje a plombuje kryt netesného zásobníka.

Celý komplex TTO s výrobkami, spojený so zavážaním do a vyvážaním z aktívnej zóny, je treba vykonávať iba s pomocoup ZS, pri tom vykonávanie všetkých operácií je treba kontrolovať pomocou televíznej kamery, umiestnenej na ZS.

Pri zavážke palivových súborov do reaktora s pomocou ZS rýchlosť ich premiestňovania nemá presahovať 16 m/min za podmienky, že od výšky 200 mm nad hlavicami kaziet do výškového prekrytia palivových súborov 450 mm a tiež od výšky 200 mm nad dnom koša bude stanovená maximálna zavádzacia rýchlosť 0,3 m/min. Zdôvodnenie veľkosti zavádzacej rýchlosti je uvedené v časti "6.1.1.10 Výpočty napätí v palivových kazetách". Zmena rýchlosti má byť plynulá - údery palivového súboru do uzlu tyče ZS a do

susedných kaziet nie sú prípustné. Rýchlosť tyče zavážacieho stroja pri priblížení sa k hlavici palivového súboru má byť znížená na 0,3 m/min.

Sila tlaku ZS na palivové súbory nemá prekračovať 5880 N, ťahová sila nemá prekračovať 19600 N, krútiaci moment nemá prekračovať 686 Nm.

Po úplnej zavážke aktívnej zóny reaktora palivovými súbormi sa kontroluje rozloženie hlavíc palivových súborov po výške.

Pri presunoch palivových súborov v reaktore je treba vykonávať ich obhliadku. Obhliadka sa vykonáva s pomocou televíznej kamery zavážacieho stroja.

Zaobchádzanie s "vyhoreným" palivom

Palivové súbory vyvezené z reaktora podstupujú, pokiaľ je to potrebné, pred svojim uskladnením kontrolu hermetickosti pokrytia palivových prútikov.

Palivové súbory sa považujú za porušené, pokiaľ:

- na obalovej rúre sa nachádzajú priechodzie otvory (korózneho, erózneho, fretting alebo akéhokoľvek iného charakteru), ktoré znemožňujú ďaľšiu prevádzku výrobku;
- na koncových detailoch (hlavice, pätky) alebo obalovej rúre sa nachádzajú trhliny alebo došlo k narušeniu celistvosti jednotlivých detailov (včítane porušenia úpravy skrutiek proti samouvolneniu);
- opotrebovanie, zostatkové deformácie, korózne poškodenie palivovej kazety, premiestnenie detailov zamedzujú vykonávaniu transportno-technologických operácií riadnymi systémovými prostriedkami alebo normálnemu premiestňovaniu palivových častí HRK v aktívnej zóne podľa signálov havarijnej ochrany alebo regulačného systému;
- došlo k odtrhnutiu jednotlivých detailov alebo častí detailov na výrobku;
- na palivovom súbore sa nachádzajú rýhy, zádery, priehlbiny, vedúce k poškodeniu alebo narušeniu funkcií susedných kaziet, vnútroreaktorových zariadení, zariadení pre TTO, prívodov SORR.

6.1.1.14 ZDOKONALENIA PALIVOVÝCH KAZIET DRUHEJ GENERÁCIE

Zdokonalenia konštrukcie kaziet druhej generácie v porovnaní so zdokonaleniami, ktoré je nutné brať do úvahy pri zdôvodnení plnenia bezpečnostných kritérií, v súlade s dokumentom [II.19] boli analyzované.

6.1.1.15 LIMITNÉ HODNOTY PARAMETROV, DÔLEŽITÝCH Z HĽADISKA BEZPEČNOSTI PREVÁDZKY PALIVA DRUHEJ GENERÁCIE

Všeobecné pravidlá, v súlade s ktorými sa musia stavať a prevádzkovať JE sa vzťahujú ku Koncepcii bezpečnosti JE. Základné tézy koncepcie sa určujú normatívnymi dokumentmi vládnej úrovne krajiny, kde sa prevádzkuje JE. Ruská koncepcia bezpečnosti je sformulovaná v [III.5], [III.4], [III.52], [III.53], [II.1] a zodpovedá príslušným doporučeniam MAAE [II.19], [II.20], [II.21], [II.22], [II.23], [II.24]. V súlade s touto koncepciou sa JE môže nachádzať v jednom zo štyroch principiálne možných stavov (režimov):

- režim NPP zahrňuje samotný proces výroby elektrickej energie a všetky ďalšie štandardné situácie, vrátane odladenia a odskúšania zariadenia, údržbárske práce, odstávky atď.;
- režim NNPP, alebo predhavarijné situácie. Pravdepodobnosť NNPP sa odhaduje ako 10⁻² 1/reaktor-rok, alebo častejšie;
- režim projektová havária havária, pre ktorú sú v technickom projekte RZ stanovené počiatočné udalosti, priebeh procesu havárie a konečný stav, v ktorom sa nachádza JE a okolité prostredie po havárii.
 Pravdepodobnosť vzniku PH sa odhaduje ako (10⁻² až 10⁻⁴) 1/reaktor-rok;
- režim nadprojektová havária havária, vyvolaná počiatočnou udalosťou, ktorá nebola uvažovaná pri analýze projektových havárií, alebo prebiehajúca nie tak, ako je modelovaná v projekte.
 Pravdepodobnosť NPH sa odhaduje ako (10⁻⁵ až 10⁻⁸) 1/reaktor-rok.

Pre každý zo štyroch uvedených stavov JE sa určujú kvantitatívne KB: technologické kritériá, charakterizujúce stav bariér na ceste možného šírenia rádioaktivity a radiačné kritériá.

V súhlase s požiadavkami, ktoré su kladené na jadrové zariadenia pre zabezpečenie jadrovej bezpečnosti, radiačnej ochrany a havarijnej pripravenosti, aktívna zóna musí byť naprojektovaná takým spôsobom, aby sa pri NPP a NNPP neprekračovali projektové limity paliva, stanovené pre NPP a pre prípad NNPP.

Koncepcia limitov bezpečnej prevádzky je založená na zabránení neprípustných výpustí rádioaktívnych látok za hranice elektrárne prostredníctvom použitia limitov, kladených na teplotu paliva a teplotu pokrytia, tlak chladiva, celistvosť hraníc okruhu pod tlakom a iné prevádzkové charakteristiky, vplývajúce na uvolnenie rádioaktívnych látok z paliva.

Týmto spôsobom, KB určujú stav palivovej matrice, pokrytia palivových prútikov (teplota a podmienky prestupu tepla), dovolené percento dehermetizácie palivových prútikov, dovolené úniky chladiva z primárneho okruhu a dovolený rast tlaku. Radiačné kritériá určujú dovolené úrovne ožiarenia prevádzkového personálu JE a obyvateľstva v okolí JE.

Ako už bolo spomenuté vyššie, KB sa definujú v [III.5], [III.4], [III.52], [III.53], [II.1] a sú zozbierané spolu, napríklad v [I.28].

Splnenie KB sa musí zabezpečiť v procese projektovania a pri prevádzke. Spolu s tým, neustála bezprostredná previerka KB je veľmi náročná. Preto sa pre režim NPP vypracovávajú dielčie a, v konečnom dôsledku, dostatočné požiadavky - prevádzkové limity (PL) a limity bezpečnej prevádzky (LBP).

Prevádzku zariadenia je treba kontrolovať podľa súboru limitov a podmienok pre prevádzku (LBP), ktoré sú získané z analýzy bezpečnosti a určujú hranice bezpečnej prevádzky.

Limity a podmienky pre normálnu prevádzku sú určené na to, aby zabezpečili bezpečnú prevádzku; to znamená na zaručenie toho, že predpoklady, použité v správe o analýze bezpečnosti sú správne a limity bezpečnej prevádzky sa pri prevádzke elektrárne neprekračujú.

Tieto limity (PL a LBP) sa navzájom líšia úrovňou ohraničení a reakciou systémov riadenia a ochrany reaktory na ich porušenie. Tiež sa líšia nomenklatúrou do nich zahrnutého počtu parametrov. Dané

ohraničenia musia byť rozpracované v štádiu zdôvodnenia bezpečnosti projektu ako súbor limitov a podmienok pre prevádzku. Prevádzku zariadenia je treba kontrolovať podľa súboru limitov a podmienok pre prevádzku , ktoré sú získané z analýzy bezpečnosti a určujú hranice bezpečnej prevádzky JE.

Tieto limity a podmienky (PL a LBP) môžu byť prehodnotené z hľadiska skúseností, získaných pri uvádzaní do prevádzky a pri prevádzke. Pokiaľ je nutné čas od času modifikovať LBP, napríklad pri prevádzke novej aktívnej zóny, je treba následne vyvinúť špeciálne úsilie, aby bola zabezpečená analýza vplyvu zmien LBP.

Dokumentovaný systém parametrov, ohraničených PL a LBP, je dostatočný pre splnenie KB a ich číselné hodnoty sú zvolené ako výsledok mnohoročnej úspešnej prevádzky VVER-440. Pri tom je treba zdôrazniť, že vlastnosť dostatočnosti PL a LBP pre splnenie KB sa zabezpečuje previerkou súčasného splnenia celého súboru týchto ohraničení. Principiálne nie je správne spájať ktorékoľvek ohraničenie, patriace do skupiny PL a LBP, s jedným KB, alebo jednou projektovou haváriou, hoci pri želaní je možné vyčleniť určujúce väzby. Vybraná skupina PL zabezpečuje splnenie všetkých KB a toto sa preveruje v danom dokumente.

V súlade s doporučeniami MAAE, uvedenými v [II.20] a [II.19], PL a LBP, ktoré sa zdôvodňujú v danom dokumente sú nasmerované:

- na odvrátenie situácií, ktoré môžu viesť k havarijným stavom;
- na zmiernenie následkov takýto havarijných stavov, ak tieto vzniknú.

Predpokladá sa, že PL a LBP musia stanovovať hodnoty parametrov pre všetky stavy NPP, také ako, proces nábehu, výroba energie, proces odstavenia, odstávka, údržba, skúšky a výmena paliva a tiež pre udalosti očakávané pri prevádzke.

Treba brať do úvahy, že:

- PL sú určené k tomu, aby zaistili bezpečnú prevádzku a nedovolili dosiahnuť nastavenia, vedúce k činnosti bezpečnostných systémov a tiež k tomu, aby zabezpečili ich pohotovosť k splneniu potrebných funkcií v prípade havárie;
- LBP sú limitami zmeny parametrov, pre ktoré je dokázané, že prevádzka JE je bezpečná, tieto predstavujú poslednú hranicu bezpečných podmienok.

Časť LBP a PL môže byť totožná s KB pre NPP, ale súbor parametrov, ohraničených LBP a PL, je širší, nakoľko ich splnenie zabezpečuje dodržanie KB pri všetkých režimoch (nie len pre NPP).

Previerka splnenia ohraničení sa musí realizovať ako pri projektovaní palivovej zavážky (výpočtom spôsobom), tak aj pri práci reaktora prostredníctvom meraní.

Výpočty a merania majú odchýlky, ktoré sa zohľadňujú pri tvorbe medzí bezpečnostných systémov a pri kontrole plnenia PL. Zohľadnenie odchýliek je realizované pomocou koeficientov rezerv:

- K^{vyp}_{rez} koeficient rezervy pri výpočtovom modelovaní, s jeho pomocou sa zohľadňujú technologické odchýlky pri zhotovovaní paliva, metodické chyby výpočtových kódov a odchýlky výkonu reaktora od projektovej hodnoty pri prevádzke;
- K^{mer}- koeficient rezervy pri meraniach, z jeho pomocou sa zohľadňujú chyby merania a odchýlky výkonu reaktora od projektovej hodnoty pri prevádzke.

S uvážením K_{rez} vychádzajúc z LBP, sa formujú nadstavenia bezpečnostných systémov, vychádzajúc z PL sa formujú výpočtové projektové limity VPL a limity pre ohraničenia meraných parametrov pri prevádzke.

Hodnoty výpočtových projektových limít (Design limit) sú získané vychádzajúc z prevádzkových limít (Operation limit) so zohľadnením neurčitostí, ktoré sú určené pre výpočtové kódy komplexu «Kaskad». V prípade použitia iných výpočtových kódov Projektové limity musia byť získané vychádzajúc

z Prevádzkových limít so zohľadnením neurčitostí týchto kódov. Ak pri projektovaní palivovej zavážky ľubovoľný parameter presiahne limity ohraničení určené Projektovými limitami, tak tento parameter musí byť zmeraný a v prípade, ak znova presiahne za dovolené limity, je potrebné vykonať dodatočnú bezpečnostnú analýzu.

Vyššie opísaný prístup je realizovaný pri určení limitných hodnôt parametrov VVER-440 1. a 2. bloku JE Mochovce. Obmedzenia kladené na koeficienty reaktivity a efekty reaktivity sú podrobnejšie stanovené v dokumente [III.54].

LITERATÚRA

I Zdrojové dokumenty, ktoré sú vo vlastníctve SE, a.s.

- [I.1] S. Yamanouchi et al, Melting Temperature of Irradiated UO2 and UO2-2wt%Gd2O3 Fuel Pellets up to Burnup 30 GWd/tU, J. Nucl. Sci.Technol., 25 (1988), p. 94.
- [I.2] J.Komatsu, T.Tachibana, K.Konashi, J. Nucl. Mat. 154 (1988), p. 38.
- [I.3] Konno K., Chirosava T., «Atómová technika za hranicami», 1999, č. 5.
- [I.4] M.G. Adamson, E.A. Aitken, R.M. Caputi "Experimental and Thermodynamic of the Melting Behavior of Irradiated Oxide Fuels", J. Nucl. Mater., 130 (1985), p. 349.
- [I.5] S.G. Popov, V.N. Proselkov. Thermodynamic Assessment of Solidus and Liquidus of Urania-Gadolinia Fuels. Proceedings of Top Fuel 2009 Paris, France, September 6-10, Paper 2150, 2009
- [I.6] Medvedev A.V., Bogatyr S.M., Korystin L.V., Kuznecov V.I., Pudov V.A., Krupkin A.V. «Preukázanie limitných hodnôt pre projektové kritériá palivových prútikov a palivových prútikov s Gd VVER-440 v režimoch normálnych podmienok prevádzky (NPP) a narušeniach normálnych podmienok prevádzky (NNPP)».
- [I.7] Medvedev A.V., Bogatyr S.M., Korystin L.V., Kuznecov V.I., Lagovskij V.B., Chvostov G.A., Bibilašvili J.K. START-3: Program pre pevnostný a teplofyzikálny výpočet plno-rozsahového palivového prútika v základných a manévrovacích režimoch práce palivových prútikov teplotných a rýchlych reaktorov.
- [I.8] Komplex kaziet reaktora VVER-440. Kontraktná technická dohoda.
- [I.9] Zákon NR SR č. 87/2018 Z.z. o radiačnej ochrane a o zmene a doplnení niektorých zákonov
- [I.10] J.A.Bezrukov, V.I.Astachov, V.G.Brantov a iní. Experimentálne sledovania a štatistická analýza údajov pre krízu odvodu tepla vo zväzkoch tyčí pre reaktory VVER. Teploenergetika č.2, 1976, str.80-82.
- [I.11] V.I.Astachov, J.A.Bezrukov, S.A.Logvinov a iní. Sledovanie vplyvu profilu vývinu tepla na krízu odvodu tepla po dĺžke vo zväzkoch tyčí. Zborník referátov. "Seminár TF-78", RVHP, Budapešť, 1978.
- [I.12] L. S.Tong Critical heat fluxes in rod bundles. ASME Winter Annular Meeting, 1969.
- [I.13] E.I. Pustiľnik. Štatistické metódy analýzy a spracovania pozorovaní. Vyd. "Nauka", Moskva 1968.
- [I.14] Gellerstedt T. S., Lee R. A., Oberjohn W.J. et al. Correlation of critical heat flux in bundles cooled by pressurized water., ASME Winter Annular Meeting, 1969.
- [I.15] Tong L. S. Prediction of departure from nucleate boiling for an axially non-uniform heat flux distribution., Journal of Nuclear Energy, Vol. 21, 1967.
- [I.16] Smolin V.N., Poliakov V.K. Metodika výpočtu krízy odvodu tepla pri vare chladiva v tyčových súboroch. Práce teplofyzikálneho seminára štátov RVHP. TF-78, Budapešť, 1978.
- [I.17] Groeneveld D.C., L.K.H. Leung, Kirillov P.L. et al. The 1995 look-up table for critical heat flux in tubes. Nuclear Engineering and Design 163 (1996) p.p.1-23.
- [I.18] Smogalev I.P. Výpočet kritických tepelných tokov pri tečení nedohriatej vody s malou rýchlosťou. Teploenergetika č.4, 1981
- [I.19] Kutateladze S.S. Základy teórie výmeny tepla, Novosibirsk, Nauka, 1970.
- [I.20] Wilson R. H., Stanek T. S., Gellerstedt T. S. et al. Critical heat flux in a non-uniformly heated rod bundles., ASME Winter Meeting, 1969.
- [I.21] Rosal E. H., Germak J. 0., Tong L. S. et al. High pressure rod bundle DNB data with axially nonuniform heat., Nuclear Engineering and Design, 1974, vol. 31, №1.

- [I.22] J.A.Bezrukov, A.E.Jaskolko, A.M.Trušin. Sledovanie odvodu tepla použiteľné v čiastočne zaplnenej aktívnej zóne. Otázky atómovej vedy a techniky. Séria: Fyzika a technika jadrových reaktorov, vydanie 4, 1987, str.21-27.
- [I.23] L. Miropoľský. Odvod tepla pri blanovom vare parovodnej zmesi v parogenerujúcich potrubiach. Teploenergetika No5, 1963, str. 49
- [I.24] D.C.Groeneveld, G.G.Delorme. Prediction of thermal nonequilibrium in the post-dryout regime. Nuclear Engineering and Design. 1976. Vol. 36. №1. p.p. 17-26
- [I.25] R.L.Mattson, K.G.Kondie, S.I. Bengston and C.F. Oberchain. Regression Analysis of post-CHF flow boiling data. Proceedings of Fifth International Heat Transfer Conference. Tokyo, Vol. 4., paper B.3.8., 1974, p.p. 115-119
- [I.26] L.S. Tong. Heat Transfer Mechanisms in nucleate and film boiling. Nuclear Engineering and Design. 1972. Vol. 21. №1. p.p.1-25
- [I.27] D.G. Morris, C.R. Hyman, C.B. Mullins and G.L.Yoder. Transient Dispersed low Film Boiling of High Pressure Water in Rod Bundle Geometry. AIChE Symposium Series. № 208. Vol. 77. p.p. 282-289
- [I.28] G. Lunin, Yu. Dragunov, V. Voznesenskiy "The Russian advanced VVER reactor designs". Nuclear News. June 2002
- [I.29] Markov D. V., Smirnov A. V., Smirnov V. P., Polenok V. S., Ivaščenko A. A., Perepelkin S. O., Stupina L. N., Zbir E. A., Nikitin O. N., Bek E. G., Aksenov P. M.: Výsledky skúmania vyhorených palivových kaziet VVER-440 pri zdôvodnení 5-6 -ročného palivového cyklu".
- [I.30] Smirnov V. P., Markov D. V., Polenok V. S., Ivaščenko A. A., Majorščina G. I: "Výsledky skúmania vyhorených palivových kaziet VVER-440 s vysokým vyhorením".
- [I.31] V. A. Mochov: Plán kvality pokrytia palivového prútika palivovej kazety pre 1. a 2. blok JE Mochovce a 3. a 4. blok JE Bohunice, OKB Gidropress U213-Pr-1933, 19.7.2010
- [I.32] Žitelev V. A., Polenok V. S., Zvir E. A.: Analysis of research results of burned VVER fuel with higher burn-up, State Research Centre, UDK 621.039.546, Dimitrovgrad, 2011
- [I.33] Zvir E.A., Ionov V.B., Molčanova V.L., Pavlov S.V., Polenok V.S., Šiškin A.A.: ATLAS Stav palivových prútikov a kaziet VVER po vyvezení z reaktora, TVEL UDK 621.039.548, S-668, Moskva 2013
- [I.34] Medoedev A.V. a ost.: Východzie údaje pre zákazníka o vlastnostiach palivových a konštrukčných materiálov a palivovej kazety druhej generácie, zloženie plynnej zmesi a špecifickej tepelnej vodivosti v medzere medzi palivom a pokrytím v závislosti na vyhorení a výkone prútika, Rosatom Inv. č. 11476, Moskva, 2010
- [I.35] Ugoleva I.R., Zarickij S.M.: Atestačné pasy programov TVS-M, PERMAK-A, BIPR-7A, Vedecko-technické centrum pre jadrovú a radiačnú bezpečnosť, Moskva 2006 ÷ 2008
- [I.36] Kovalevič O.M., Ugoleva I.R., Taranov G.S., Lichačev J.I., Zarickij S.M.: Atestačné pasy programov STAR-1, PUČOK-1000, DINAMIKA-97, KADR-97, KANAL-97, SAPFIR 95.1, TEČ-M-97, DINARA, FEMINA^S, MicroFe, Vedecko-technické centrum pre jadrovú a riadačnú bezpečnosť, Moskva, 1997÷2005
- [I.37] Strmenský C., Majerčík J.: Analýza projektových havárií s vnosom reaktivity (RIA havárie) pri vysokom stupni vyhorenia paliva pre EBOV2 a EMO12, VUJE, a.s. TS9000814/0220/2015.12_r01, Trnava, jún 2015,
- [I.38] O. A. Nečajeva a ost.: Vypracovanie dodatočných technických materiálov pre licencovanie prevádzky paliva s novým profilovaním na JE «Mochovce» (bloky 1., 2.), «Bohunice» (bloky 3., 4.) na 107 % tepelného výkonu aktívnej zóny, 1. etapa. Impulzné skúšky na reaktore BIGR palivových prútikov VVER s vyhorením viac ako 72 MW.dní/kgU, Rosatom Inv. č. 12179, Moskva, 2015

- [I.39] V. Salatov a ost.: Vypracovanie dodatočných technických materiálov pre licencovanie prevádzky paliva s novým profilovaním na JE «Mochovce» (bloky 1., 2.), «Bohunice» (bloky 3., 4.) na 107 % tepelného výkonu aktívnej zóny, 1. etapa. Reaktorový experiment MIR-LOCA/72 s palivovým prútikom VVER vysokého vyhorenia, Rosatom Inv. č. 12180, Moskva 2015
- [I.40] V. Salatov a ost.: Vypracovanie dodatočných technických materiálov pre licencovanie prevádzky paliva s novým profilovaním na JE «Mochovce» (bloky 1., 2.), «Bohunice» (bloky 3., 4.) na 107 % tepelného výkonu aktívnej zóny, 1. etapa. Výpočtovo-experimentálne preukázanie bezpečnosti palivového prútika VVER-440 v podmienkach LOCA a RIA do projektových vyhorení 72 MW.dní/kgU, Rosatom Inv. č. 12181, Moskva, 2015

II Legislatívne dokumenty (zákony, vyhlášky, normy, dokumenty MAAE, a pod.)

- [II.1] 2.6.1 Ionizačné žiarenie, radiačná bezpečnosť. Normy radiačnej bezpečnosti (NRB-99, 2009). Sanitárne pravidlá a normy "SAN PiN", 2.6.1.2523-09, Moskva, Federálne centrum hygieny a epidemiológie Rospotrebnadzora, 2009
- [II.2] Ionizačné žiarenie, radiačná bezpečnosť. Základné sanitárne pravidlá zaistenia radiačnej bezpečnosti (OSPORB-99), SP 2.6.1. 799-99, Minzdrav Ruska, 2000
- [II.3] Pravidlá bezpečného transportu rádioaktívnych materiálov, MAAE, 1981
- [II.4] BNS I.1.2/2008 Rozsah a obsah bezpečnostnej správy, ISBN 978-80-88806-73-8, ÚJD SR, Bratislava, november 2008
- [II.5] Štandardný postup posudzovania bezpečnostných správ pre JE, NUREG-0800
- [II.6] Gudelines for accident analysis of WWER Nuclear Power Plant, IAEA-EBP-WWER-01, IAEA, December 1995
- [II.7] GS-G-4.1 Format and Content of the Safety Analysis Report for Nuclear Power Plants, Vienna 5/2004, 2004
- [II.8] Fyzikálne veličiny. Príručka, Energoatomizdat, 1991
- [II.9] Characteristics and use of urania-gadolinia fuels. IAEA-TECDOC-844, Vienna, Austria, November 1995.
- [II.10] U.S. Nuclear Regulatory Commission, «Standart Review Plan», Section 4.2 (Fuel System Design), NUREG-0800, Rev.3, March, 2007.
- [II.11] Regulatory Guide 1.70. Standart Format and Content of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants. LWR Edition. Rev. 3, November 1978, Section 4.2 (Fuel System Design).
- [II.12] Vyhláška ÚJD SR č. 430/2011 Z.z. o požiadavkách na jadrovú bezpečnosť, 16. novembra 2011
- [II.13] US Federal law 10 Code of Federal Regulation part 50. §50.46 and appendix A.
- [II.14] Characteristics and use of urania-gadolinia fuels. IAEA-TECDOC-844, Vienna, Austria, November 1995
- [II.15] Analysis of differences in fuel safety criteria for WWER and western PWR nuclear power plants. IAEA-TECDOC-1381, 2003
- [II.16] Odporúčania pre analýzu havárií pre JE s reaktormi typu VVER. IAEA-EBP-WWER-01, jún 1998.
- [II.17] Normy pevnostného výpočtu zariadení a parovodov atómových energetických zariadení, PNAE G-7-002-86, Moskva, Energoatomizdat, 1989.
- [II.18] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Nuclear Power Plant Components, subarticles Ng-3200, New York, 1986 edition, 1986.
- [II.19] Analysis of differences in fuel safety criteria for WWER and western PWR nuclear power plants. IAEA-TECDOC-1381, 2003

- [II.20] Prevádzkové limity a podmienky na atómových elektrárňach. Séria vydaní k bezpečnosti č.50-SG-03. Návod MAAE pre bezpečnosť. Viedeň, 1980
- [II.21] Safety-Related Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants. Safety series № 50-SG-D8. IAEA Safety Guides. Vienna, 1984
- [II.22] Full safety criteria for WWER reactors under «new» requirements. Report of CONSULTANTS MEETINGS, 30 November – 4 December 1998, 23 – 27 August 1999, Vienna, Austria. IAEA, 1999
- [II.23] Nuclear Fuel Safety Criteria. Technical Review. Nuclear Energy Agency Organisation for Economic Cooperation and Development. 2001
- [II.24] Hodnotenie bezpečnosti a nezávislá previerka pre atómové elektrárne. Séria noriem MAAE pre bezpečnosť. Návod č.NS-G-1.2. MAAE, 2004
- [II.25] IAEA Safety Standards GSR Part 3
- [II.26] BNS I.6.2/2013 Požiadavky na opis reaktora a jeho projektovej bázy v bezpečnostnej správe, ISBN 978-80-88806-96-7, ÚJD SR, Bratislava, marec 2013
- [II.27] Zákon NR SR č. 541/2004 Z.z. o mierovom využívaní jadrovej energie (Atómový zákon)
- [II.28] Zákon NR SR č. 143/2013 Z.z.
- [II.29] Vyhláška ÚJD SR č. 50/2006 Z.z. ktorou sa ustanovujú podrobnosti o požiadavkách na jadrovú bezpečnosť jadrových zariadení pri ich umiestňovaní, projektovaní, výstavbe, uvádzaní do prevádzky, prevádzke, vyraďovaní a pri uzatvorení úložiska, ako aj kritériá pre kategorizáciu vybraných zariadení do bezpečnostných tried, 12. januára 2006
- [II.30] Vyhláška ÚJD SR č. 58/2006 Z.z. ktorou sa ustanovujú podrobnosti o rozsahu, obsahu a spôsobe vyhotovovania dokumentácie jadrových zariadení potrebnej k jednotlivým rozhodnutiam, 12. januára 2006
- [II.31] Vyhláška ÚJD SR č. 31/2012 Z.z., 30. januára 2012
- [II.32] BNS I.1.2/2014 Rozsah a obsah bezpečnostnej správy, ISBN 978-80-88806-99-8, ÚJD SR, Bratislava, január 2014

III Dokumenty VUJE

- [III.1] Pracovná kazeta, 440.15.000GČ. Výkres rozmerový.
- [III.2] Palivová časť kazety HRK 440.12.000GČ. Výkres rozmerový.
- [III.3] Nadstavec 446K.10.000GČ. Výkres rozmerový.
- [III.4] Všeobecné ustanovenia zaistenia bezpečnosti atómových elektrární.
- [III.5] Pravidlá jadrovej bezpečnosti reaktorových zariadení jadrových elektrární.
- [III.6] Pravidlá stavby a bezpečnej prevádzky zariadení a potrubí atómových energetických zariadení.
- [III.7] Správa "Analýza skúseností prevádzky aktívnych zón, paliva, VRČ v zdokonalených palivových cykloch.
- [III.8] Správa "Stav dištančných mriežok zo zliatiny E110 po prevádzke v zostave pracovnej kazety č. 13626135 na 4. bloku NVJE počas štyroch palivových kampaní.
- [III.9] Harada K., Nakata M., Yasuda R., «Melting temperature of high burn-up UO2 pellet», Enlarged Halden Program Group Meeting, Lillehammer, Norway, 11-16 March 2001.
- [III.10] Markov D.V., Smirnov A.V., Smirnov V.P., Polenok V.S., Ivaščenko A.A., Perepelkin S.O., Stupina L.N, Zvir. E.A., Nikitin O.N., Bek E.G., Alexenov P.M., «Výsledky poreaktorového skúmania PK VVER-440 pre preukázanie 5-6 ročného palivového cyklu».



- [III.11] Správa "Analýza prevádzkyschopnosti nadstavcov VVER" (záverečná) U213-O-1721, OKB "Gidropress", 1989.
- [III.12] Kód konečných prvkov ANSYS. Licenčná zmluva s ANSYS, INC.
- [III.13] Salatov A.V., Nečajeva O.A., Gončarov A.A., Fedotov P.V., «Preukázanie kritérií bezpečného správania sa teplovyvíjajúcich prvkov VVER v podmienkach projektových havárií».
- [III.14] Správa «Niektoré výsledky poreaktorového skúmania TVS 14422198 a 14422222 po prevádzkovaní na 3. bloku Kolskej JE v priebehu 4 a 5 palivových cyklov».
- [III.15] Bogatyr S.M., Korystin L.V., Pudov V.A., Rykunov D.V., "Preukázanie prevádzkyschopnosti palivových prútikov a palivových prútikov s Gd v prechodových režimoch v normálnych podmienkach prevádzky, pri narušení normálnych podmienok prevádzky a v režimoch manévrovania 3. a 4. bloku JE "Mochovce" pri nominálnom tepelnom výkone aktívnej zóny reaktora.
- [III.16] Správa. "Hydraulické skúšky a skúšky životnosti experimentálnej kazety HRK reaktora V-213 so zdokonaleným horným uzlom upevnenia zväzku palivových prútikov" (záverečná).
- [III.17] Správa o vedecko-výskumnej práci. Výsledky hydraulických skúšok a skúšok životnosti pracovnej kazety so zirkóniovými dištančnými mriežkami plastového typu (záverečná).
- [III.18] Správa o vedecko-výskumnej práci. Výsledky hydraulických a životnostných skúšok TVS HRK so zirkóniovými dištančnými mriežkami plástového typu" (záverečná).
- [III.19] Správa. Výsledky hydraulických skúšok a skúšok životnosti makety TVS HRK s hrúbkou stien buniek dištančných mriežok 0,25 mm (záverečná).
- [III.20] Správa. Výsledky hydraulických skúšok a skúšok životnosti pracovnej kazety s hrúbkou stien buniek dištančných mriežok 0,25 mm (záverečná).
- [III.21] Správa o vedecko-výskumnej práci. Výsledky hydraulických skúšok a skúšok životnosti v objeme 3900 hod pracovnej kazety aparátu VVER-440 s novým typom hornej mriežky (záverečná).
- [III.22] Správa o vedecko-výskumnej práci. Výsledky hydraulických skúšok a skúšok životnosti v objeme 3900 hod TVS SUZ aparátu VVER-440 s novým typom hornej mriežky (záverečná).
- [III.23] Správa o vedecko-výskumnej práci. Výsledky hydraulických skúšok a skúšok životnosti makety pracovnej kazety VVER-440 v objeme 1000 hod.
- [III.24] Správa o vedecko-výskumnej práci. Výsledky hydraulických skúšok makiet pracovnej kazety a zborky teplovyvíjajúcej (záverečná).
- [III.25] Správa o vedecko-výskumnej práci. Výsledky hydraulických skúšok makety pracovnej kazety (záverečná).
- [III.26] Správa. Správa o výsledkoch skúšok životnosti skúšobných kaziet (pracovných a HRK) na stende horúcich skúšok.
- [III.27] Správa o vedecko-výskumnej práci. Výsledky hydraulických skúšok makety pracovnej kazety v objeme 3000 hodín (záverečná).
- [III.28] Správa o vedecko-výskumnej práci. Výsledky skúšok životnosti makety zdokonalenej pracovnej kazety druhej generácie v objeme 3000 hodín (záverečná).
- [III.29] Správa o vedecko-výskumnej práci. Výsledky skúšok životnosti makety sborky teplovyvíjajúcej v objeme 3000 hodín (záverečná).
- [III.30] Správa o vedecko-výskumnej práci. "Výsledky skúšok životnosti makety TVS HRK druhej generácie v objeme 3000 hodín" (záverečná).
- [III.31] Správa o vedecko výskumnej práci. Výsledky stendových skúšok makety zdokonalenej teplovyvíjajúcej zborky kazety havarijnej, regulačnej, kompenzačnej druhej generácie.

- [III.32] Správa. Zovšeobecnenie a analýza výsledkov sledovania paliva VVER-440, ktoré odpracovalo 4 a 5 palivových cyklov a skúšaného v prechodových a havarijných režimoch.
- [III.33] Správa. Výsledky merania charakteristiky pružín tieniacich kaziet na prvom bloku Rovenskej a Kolskej JE, 322-O-088, OKB Gidropress 1989.
- [III.34] Komplex kazet reaktora VVER-440. Výpočet dynamických namáhání aktívnej zóny pri projektovom zemetrasení a pri maximálnom výpočtovom zemetrasení.
- [III.35] Komplex kaziet druhej generácie reaktora VVER-440. Výpočet hydrodynamických namáhaní pri maximálnej projektovej havárii. Časť 2. Kazeta pracovná a zborka teplovyvíjajúca.
- [III.36] Kazeta pracovná. Výpočet pevnosti.
- [III.37] Zborka teplovyvíjajúca. Výpočet pevnosti.
- [III.38] Komplex kaziet reaktora VVER-440. Analýza pevnosti rozoberateľnej palivovej kazety.
- [III.39] Abramov V.V., Drančenko B.N., Komjagin V.V., Strebeževa L.M. Skúmanie odolnosti šesťhranných obalov kaziet reaktora. - Zb. "Experimentálne metódy skúmania deformácií a napätí". - Moskva, Nauka, 1977.
- [III.40] Kazeta HRK. Výpočet pevnosti regulačnej tyče, U 213-R-1711. OKB Gidropress, 1981.
- [III.41] Komplex kaziet druhej generácie reaktora VVER-440. Výpočet pevnosti kaziet aktívnej zóny pri seismických zaťaženiach a pri maximálnej projektovej havárii.
- [III.42] Bogatyr S.M., Korystin L.V., Pudov V.A., Krupkin A.V., Rykunov D.V., "Zdôvodnenie prevádzkyschopnosti palivových prútikov a palivových prútikov s Gd v stacionárnych podmienkach prevádzky 3. a 4. bloku JE Mochovce pri nominálnom tepelnom výkone aktívnej zóny reaktora".
- [III.43] Šiškov L.K., Kobzar L.L., Oleksjuk D.A., Dementjev V.G., Cyganov S.V., Parfenova N.A., "Zdôvodnenie nových inžinierskych a mechanických koeficientov rezervy, vplývajúcich na projekt zavedenia paliva so stredným obohatením na 3. A 4. Bloku JE Mochovce".
- [III.44] Saprykin V.V., Lazarenko A.P., Morozov V.V., Solovjeva, E.G., Tomilov, M.Ju., Jasnopolskaja, I.I., "Projekt zavedenia 6-ročného palivového cyklu založeného na použití profilovaných kaziet so stredným obohatením uránu 235 v podmienkach tepelného výkonu aktívnej zóny reaktorov 3. a 4. bloku JE "Mochovce" Nnom = 1375 MWt ".
- [III.45] Brik A.N., Livenceva, Ž, Ju., "Vstupné dáte pre zdôvodnenie prevádzkyschopnosti palivových prútikov a palivových prútikov s gadolíniom v stacionárnych a prechodových režimoch NPP, NNPP reaktorov 3. a 4. bloku JE "Mochovce" pri nominálnom tepelnom výkone aktívnej zóny reaktora".
- [III.46] A.V.Salatov, O.A.Nečajeva, P.V.Fedotov, A.A.Gončarov, A.V.Kumačev. Popis a výsledky verifikácie kódu RAPTA-5.2.
- [III.47] A.V.Salatov, O.A.Nečajeva, A.A.Gončarov, P.V.Fedotov, A.V.Kumačev. "Analýza správania sa palivových prútikov a palivových prútikov s gadolíniom v projektových haváriách na 3. a 4. bloku JE "Mochovce" pri nominálnom tepelnom výkone aktívnej zóny reaktora".
- [III.48] Reaktor. Inštrukcia pre zaobchádzanie s čerstvým palivom.
- [III.49] Metóda a spôsob kontroly, kritéria hodnotenia poškodenia povrchov pracovných a regulačných kaziet VVER-440 počas prevádzky. Inštrukcia.
- [III.50] Nadstavec reaktora VVER-440. Inštrukcia na meranie opotrebovaných povrchov, U213-I-1731, OKB Gidropress, 1989.
- [III.51] Brik A.N., "Vstupné údaje pre zdôvodnenie prevádzkyschopnosti palivových prútikov a palivových prútikov s Gd v režimoch sledovania zaťaženia siete reaktorov 3. a 4. bloku JE "Mochovce" pri nominálnom tepelnom výkone aktívnej zóny reaktora".
- [III.52] Sanitárne pravidlá projektovania a prevádzky atómových elektrární (SP AS-99), SP-2.6.1.27-2000. Moskva, Minzdrav RF, 2000

- [III.53] Umiestnenie atómových elektrární. Základné kritériá a požiadavky na zaistenie bezpečnosti. PNAE G-03-33-93, Moskva, GAN RF, 1993
- [III.54] Gagarinskij A. A., Solovjova E.F., a ost. "Príprava tabuľky maximálnych a minimálnych hodnôt neutrónovo-fyzikálnych parametrov pre 3. a 4. blok JE "Mochovce" s novým palivom so stredným obohatením".
- [III.55] Brik A.N. "Zdôvodnenie existujúcich vybraných medzí a podmienok pre prevádzku 3. a 4. bloku JE "Mochovce" na nominálnom výkone".
- [III.56] 6TPP153 Prevádzkový predpis pre zavážací stroj
- [III.57] Chapter 06.04.01 Emergency core cooling system
- [III.58] Chapter 06.01.06 Reactivity control systems design outlined

vůje

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 6.1.1.2-1 Závislosť teploty tavenia UO ₂ od vyhorenia	18
Obr. 6.1.1.2-2 Závislosť objemového napúchania dioxidu uránu od vyhorenia	19
Obr. 6.1.1.7-1 Histogram rozloženia odchýlok výpočtových hodnôt od experimentálnych pre celý výber (7	765
bodov)	50
Obr. 6.1.1.7-2 Určenie dôveryhodnej pravdepodobnosti a hraníc dôveryhodného intervalu	55
Obr. 6.1.1.7-3 Sledované profily tepelného toku po dĺžke zväzku	57
Obr. 6.1.1.7-4 Porovnanie kritických tepelných tokov OKB "Gidropress" pri nerovnomernom vývine energi	ie
po dĺžke s výpočtom podľa vzorca (6.1.1.7-16)	58

vůje

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 6.1.1.2-1 Chemické zloženie ocelí (hmotnostné percentá)1	13
Tab. 6.1.1.2-2 Chemické zloženie zliatiny E1101	14
Tab. 6.1.1.2-3 Mechanické vlastnosti rúrky v súlade s normatívnymi požiadavkami1	14
Tab. 6.1.1.2-4 Mechanické vlastnosti rúrky pri priečnom ťahu1	15
Tab. 6.1.1.2-5 Mechanické vlastnosti materiálu rúrky pri pozdĺžnom ťahu1	15
Tab. 6.1.1.2-6 Fyzikálne vlastnosti materiálu rúrok	15
Tab. 6.1.1.2-7 Mechanické vlastnosti materiálu pokrytia palivových prútikov po ožarovaní1	16
Tab. 6.1.1.2-8 Mechanické vlastnosti kruhových vzoriek zo zliatiny E1251	17
Tab. 6.1.1.2-9 Chemické zloženie korózne odolnej bórovej ocele1	19
Tab. 6.1.1.2-10 Chemické zloženie materiálu hafniových doštičiek	20
Tab. 6.1.1.2-11 Fyzikálno-mechanické vlastnosti hafnia	20
Tab. 6.1.1.4-1 Projektové kritériá spoľahlivosti prevádzky palivových prútikov	30
Tab. 6.1.1.4-2 Projektové kritériá bezpečnosti palivových prútikov a palivových článkov	31
Tab. 6.1.1.7-1 Príspevok rôznych faktorov k celkovej chybe korelácie pre zväzky prútikov (v percentách)	
v súlade s L. Tongom [I.20]5	50
Tab. 6.1.1.7-2 Štatistické charakteristiky zväzkov5	51
Tab. 6.1.1.7-3 Počiatočné údaje pre odhadnú analýzu zväzkov5	52