



## Technická správa

# Predprevádzková bezpečnostná správa

## Kapitola 6.1.4 Termo-hydraulický projekt

**Stavba:** Dostavba 3. a 4. blok JE Mochovce, stavenisko: Jadrová časť  
**Construction:** 3&4 Unit NPP Mochovce Completion, site: Nuclear Island  
**Stavebník:** Slovenské elektrárne, a.s., Bratislava, 3. a 4. blok JE Mochovce  
**Constructor:** Slovenské elektrárne, a.s., Bratislava, 3&4 Unit NPP Mochovce

		LC							
SE Rev	Date / Dátum	IS	Supervision Outcome / Stav schválenia	Supervised by / Overil		Checked by / Kontroloval	Approved by / Schválil		
			Language / Jazyk	S	Safety Class / Bezpečnostná trieda	N/N	SEC. INDEX / INDEX utajenia	Company use/P	
			Submitted to Client to / Predložené odberateľovi na:	Approval / Schválenie	X	Information Only / Len na informáciu			
			<small>The SE a.s. approval refers to the contract clauses only. All design responsibilities are charged to the Contractor / Schválenie SE a.s. sa vzťahuje iba na zmluvné náležitosti. Za vypracovanie projektu nesie dodávateľ plnú zodpovednosť.</small>						
EPS No / Číslo EPS: PNM34365000		Revisoin index / Index revízie: 07		Size / Veľkosť	Activity Code / Aktivita	Type / Subtype Typ / Podtyp	Discipline / Profesia	Plant Unit / Blok elektrárne	
File name / Názov súboru:	SE doc. Code / SE číslo dokumentu: PNM34361030			A4	6.01	RS	Z	8	
 * P N M 3 4 3 6 1 0 3 0 0 7 *				Sheet / List	Of / z		Plant System / Systém elektrárne	Component / Komponent	
				1	42				

SE Contract No. / Číslo zmluvy SE: 4600003952				VUJE Contract No. / číslo zmluvy VUJE: 1719/00/09			
Part name / Označenie časti: PNM3436103007_S_C00_V				Issued on / Vydané dňa: 26.07.2019			
Kód citlivosti <sup>1)</sup> / Sensitivity code <sup>1)</sup>	3	Name / Meno	Organization / Organizácia	Dept. / Útvar	Date / Dátum	Signature / Podpis	
Author / Vypracoval:	•	•	• VUJE, a.s.	• 0620	• 26.07.2019	•	
Co-author / Spolupracoval:	•	•	•	•	•	•	
Checked by / Kontroloval:	•	•	• VUJE, a.s.	• 0220	• 26.07.2019	•	
Verified by / Overil:	•	•	• VUJE, a.s.	• 0720	• 26.07.2019	•	
Approved by / Schválil:	•	•	• VUJE, a.s.	• 1703	• 26.07.2019	•	

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

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

## Revision record / Záznam o revízii

<b>Identification /</b> <b>Identifikácia</b> (part/page/chapter/ member/section) (časť/strana/kapitola/ článok/odstavec)	<b>Brief description of modification /</b> <b>Stručná charakteristika úpravy</b> (description of modification and manner of implementation) (popis úpravy a spôsobu zapracovanie)	<b>Reason of modification /</b> <b>Dôvod úpravy</b> (author company, number of comments or other stimulation, name of author, comment document No.) (firma autora a číslo pripomienky, resp. iný podnet, meno autora, č. dokumentu pripomienok)
• Celý dokument	• Zapracovanie pripomienok ÚJD podľa Aarhuského výboru	• V súlade s dokumentom PNM34482979
• Celý dokument	• Zapracovanie pripomienok SE	• Comment sheet MO34-CS-N012-20190723-001
•	•	•
•	•	•
•	•	•
•	•	•
•	•	•
•	•	•
•	•	•

# 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 06.01.04 Termo-hydraulický projekt	• PNM3436103007_S_C00_V	• 07
2.	• Kapitola 06.01.04 Termo-hydraulický projekt	• PNM3436103007_S_C01_V	• 07
3.	•	•	•
4.	•	•	•
5.	•	•	•
6.	•	•	•
7.	•	•	•
8.	•	•	•
9.	•	•	•
10.	•	•	•
11.	•	•	•

**OBSAH**

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A OZNAČENÍ.....	5
ÚVOD.....	6
6.1.4 Tepelný a hydraulický projekt.....	7
6.1.4.1 Vstupné údaje .....	7
6.1.4.2 Popis T-H projektu AZ reaktora.....	14
6.1.4.3 Popis T-H charakteristík systému chladenia AZ reaktora v stacionárnych režimoch .....	19
6.1.4.4 Popis T-H výpočtov a výpočtových programov .....	21
6.1.4.5 Analýza výsledkov T-H výpočtov.....	33
6.1.4.6 Skúšky a previerky T-H charakteristík I.O. a častí II.O. ....	36
6.1.4.7 Rozloženie teploty chladiva na výstupe zo zväzkov pracovných kaziet a ich vplyv na meranie teploty .....	38
LITERATÚRA .....	40
ZOZNAM OBRÁZKOV.....	41
ZOZNAM TABULIEK .....	42

**ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A OZNAČENÍ**

AZ	Aktívna zóna
EMO1	1. blok elektrárne Mochovce
HČČ	Hlavné cirkulačné čerpadlo
HRK	Havarijno-regulačno-kompenzačná kazeta
HUA	Hlavná uzatváracia armatúra
JE	Jadrová elektráreň
KHO	Koeficient hydraulického odporu
MO34	3. a 4. blok JE Mochovce
NFCH	Neutrónovo-fyzikálne charakteristiky
PG	Parogenerátor
PK	Palivová kazeta
PpBS	Predprevádzková bezpečnostná správa
PBS	Predbežná bezpečnostná správa
PUČOK-1	Výpočtový kód
STAR-1	Výpočtový kód
SVRK	Systém vnútroreaktorového monitorovania
VVER-440	Tlakovodný energetický reaktor
Kq	koeficient nerovnomernosti výkonu kaziet
Kr	koeficient nerovnomernosti výkonu palivových prútikov aktívnej zóny
Ko	koeficient nerovnomernosti rozloženia lineárneho výkonu v palivových prútikoch
Kz	koeficient nerovnomernosti vývinu energie po výške palivovej kazety
Kv	koeficient nerovnomernosti vývinu energie v objeme aktívnej zóny

## ÚVOD

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

Rozsah a obsah kapitoly zodpovedá požiadavkám Bezpečnostného návodu BNS I.1.2/2014 „Rozsah a obsah bezpečnostnej správy“, časť 6.6.1.4 Termicko-hydraulický projekt [II.1]. Bližšie požiadavky na kapitolu PpBS „Termo-hydraulický projekt“ definuje Bezpečnostný návod BNS I.6.2/2013 „Požiadavky na opis reaktora a jeho projektovej bázy v bezpečnostnej správe“ [II.2].

Opis projektu termicko-hydraulických vlastností a správania sa aktívnej zóny zahrňuje [II.1]:

- a) opis termicko-hydraulických požiadaviek na projekt aktívnej zóny a súvisiacich konštrukcií jadrového reaktora ako aj požiadavky prepojenia s termo-hydraulickým projektom chladiaceho systému jadrového reaktora;
- b) hydraulické a termicko-hydraulické charakteristiky palivových článkov, aktívnej zóny reaktora a primárneho okruhu;
- c) opis analytických nástrojov, metód a výpočtových programov (spolu s informáciou o overení, potvrdení a neurčitostiach) použitých na výpočet termicko-hydraulických vlastností aktívnej zóny reaktora;
- d) projektové ohraničenia na teplotu jadrového paliva a pokrytia palivových prútikov, rezervu do krízy prestupu tepla;
- e) rozloženie prúdenia chladiva, tokov tepelnej energie, tlaku a teplôt so špecifikovaním projektových ohraničení;
- f) ohraničenie bezpečnej prevádzky jadrového reaktora a porovnanie projektových ohraničení s výpočtovými hodnotami.

## 6.1.4 Tepelný a hydraulický projekt

### 6.1.4.1 Vstupné údaje

#### 6.1.4.1.1 Prístup k riešeniu, projektové základy a výpočtová analýza

Základnou požiadavkou pre termo-hydraulickú časť projektu je zdôvodnenie tepelných a hydraulických podmienok, zabezpečujúcich spoľahlivé chladenie aktívnej zóny reaktora v stacionárnom režime normálnej prevádzky bez prevýšenia prevádzkovej limity poškodenia palivových prútikov.

Požiadavky spoľahlivého chladenia aktívnej zóny reaktora sa konkretizujú v projekte formou projektových limitov, previerka a zabezpečenie ktorých je základným cieľom výpočtovo-experimentálneho preukázania v časti termo-hydrauliky.

Projektové limity a podmienky prevádzkovania PK a palivových častí kaziet HRK sú uvedené v podkapitolách 6.1.4.2 a 6.1.4.3.

Tento termo-hydraulický projekt je vypracovaný pre dostavované bloky MO34 pre normálnu prevádzku na nominálnom výkone (typ V-213) 1375 MW<sub>t</sub>, pri zdôvodnení spúšťania blokov, s postupným zavádzaním palivového cyklu s palivom druhej generácie s vyšším stredným obohatením.

Termo-hydraulický projekt je vypracovaný na základe výpočtovej analýzy s použitím ruských programov (atestovaných v GosAtomNadzor Ruskej federácie) "STAR-1" a „PUČOK-1000“, ktorých metodické princípy sú uvedené v kapitole 6.1.4.4. Vstupné údaje sú pripravené na základe údajov technického projektu reaktorového zariadenia V-213 s použitím skúseností prevádzky analogických typov reaktorových zariadení.

Na základe toho, že bloky MO34 sú uvádzané do prevádzky ako nové a nie sú známe reálne individuálne termo-hydraulické charakteristiky reaktora a primárneho okruhu týchto blokov (získané na základe zmeraných termo-hydraulických parametrov) sa predpokladá, že termo-hydraulické charakteristiky 3. a 4. bloku sú identické (ako základ sa berie prietok chladiva 3. bloku).

V analýze sa skúma prvá (spúšťacia), druhá (prvá prechodová) ako najproblematickejšie z hľadiska neutrónovo - fyzikálnych charakteristík a štrnásť stacionárna palivová záťažka. Neutrónovo - fyzikálne charakteristiky sú používané v súlade s ich výpočtom. Výsledky neutrónovo-fyzikálnych výpočtov sú uvedené v podkapitole 6.1.3.

Pre preukázanie teplototechnickej spoľahlivosti aktívnej zóny reaktora sa analyzujú režimy prevádzky reaktora pri nominálnych parametroch a pri najhoršej, z hľadiska chladenia aktívnej zóny, kombinácii odchýlok parametrov, podmienených činnosťou systémov kontroly a regulácie (výkon reaktora, tlak v primárnom okruhu, prietok a teplota chladiva na vstupe do reaktora). Okrem toho pre druhú a štrnástu palivovú záťažku je predstavený variant s konzervatívnymi neutrónovo-fyzikálnymi charakteristikami PK, s najhoršou kombináciou odchýlok parametrov prevádzky reaktora a pri minimálnom projektovom prietoku chladiva cez reaktor.

Výpočtové varianty sa definujú nasledujúcimi základnými parametrami a režimami prevádzky reaktorového zariadenia:

- tepelný výkon reaktora,
- tlak chladiva v primárnom okruhu,

- teplota chladiva na vstupe do reaktora,
- prietok chladiva cez reaktor.

Nominálne parametre prevádzky reaktorového zariadenia sú nasledovné:

- tepelný výkon reaktora,  $N_{nom} = 1375 \text{ MW}_t$ ,
- tlak chladiva na výstupe z aktívnej zóny reaktora  $P_{PO}$  [MPa],
- teplota chladiva na vstupe do reaktora,  $t_{vst}$  [°C],
- prietok chladiva cez reaktor,  $Gr_e$  [ $\text{m}^3/\text{hod}$ ],
- frekvencia napájacej siete HCČ,  $f_{HCČ}$  [Hz].

Základné termo-hydraulické charakteristiky aktívnej zóny, reaktora a primárneho okruhu sú uvedené v častiach 6.1.4.2 a 6.1.4.3.

Okrem nominálnych parametrov prevádzky reaktorového zariadenia, pre preukázanie spoľahlivosti chladenia aktívnej zóny, sa posudzuje nasledovná najhoršia kombinácia odchýlok parametrov (podľa podmienok chladenia aktívnej zóny), podmienená činnosťou systému kontroly a riadenia:

- tepelný výkon reaktora,  $N$  [ $\text{MW}_t$ ] (zahrňuje presnosť určenia a udržiavania výkonu reaktora),
- tlak chladiva na výstupe z aktívnej zóny reaktora,  $P_{PO}$  [MPa] (zahrňuje presnosť určenia a udržiavania tlaku primárneho okruhu),
- teplota chladiva na vstupe do reaktora,  $T_{VST}$  [°C],
- definovaný prietok chladiva cez reaktor [ $\text{m}^3/\text{hod}$ ].

Hodnoty nominálneho a minimálneho prietoku chladiva cez reaktor, hodnota nominálnej teploty chladiva na vstupe do reaktora sú prijaté po odsúhlasení objednávateľom. Zdôvodnenie výberu hodnôt nominálneho a minimálneho prietoku chladiva cez reaktor je podrobnejšie je popísane v časti 6.1.4.3 tejto kapitoly.

Základný režim práce reaktora - režim práce so šiestimi HCČ, ktorý v súlade s podmienkami prevádzky sa prejaví ako najviac zaťažovaný, v porovnaní s režimom s menším počtom pracujúcich HCČ (projektové limity paliva sú rovnaké, ale relatívne zníženie výkonu je väčšie ako, relatívne zníženie prietoku chladiva cez reaktor - vid' Tab. č. 6.1.4.1.1-1). V dôsledku toho sa režimy s neúplným počtom HCČ v predmetnom dokumente neuvádzajú.

**Tab. č. 6.1.4.1.1-1 Výkon reaktora a prietok chladiva cez reaktor pri prevádzke s neúplným počtom HCČ**

Názov parametra	Počet pracujúcich HCČ						
	6	5		4		3	
	-	HUA otvorená	HUA zatvorená	HUA otvorená	HUA zatvorená	HUA otvorená	HUA zatvorená
Dovolený tepelný výkon, $\text{MW}_t$	1375,0	-		-		-	
Prietok chladiva cez slučky s pracujúcimi HCČ, $\text{m}^3/\text{hod}$	42600	-	-	-	-	-	-



### 6.1.4.1.2 Súčasti primárneho okruhu

#### 6.1.4.1.2.1 Geometrické a hydraulické charakteristiky

Základné súčasti primárneho okruhu sú: reaktor, hlavné cirkulačné potrubia slučiek, parogenerátory, hlavné cirkulačné čerpadlá, hlavné uzatváracie armatúry.

Okruh cirkulácie chladiva je nasledujúci: vstup do reaktora, zostupná časť (po vstup do aktívnej zóny), aktívna zóna, výstupná časť (od výstupu z aktívnej zóny po výstup z reaktora), výstup z reaktora, horúca vetva slučky (spolu s HUA), parogenerátor, studená vetva slučky (spolu s HUA), HCČ.

Výškové kóty úsekov cirkulačného okruhu chladiva boli brané v súlade s projektovou dokumentáciou.

Koeficienty hydraulického odporu úsekov cirkulačného okruhu chladiva zahrňujú nasledovné časti:

- horúca vetva slučky - od výstupného nátrubku reaktora po vstupný nátrubok kolektora PG (miestny a trenie);
- PG - od vstupného nátrubku kolektora do výstupného nátrubku kolektora (miestny a trenie);
- studená vetva slučky - od výstupného nátrubku kolektora PG po vstupný nátrubok reaktora (miestny a trenie);
- vstupný nátrubok reaktora;
- zostupný úsek - od vstupného nátrubku reaktora po objem chladiva v dne šachty reaktora (miestny a trenie);
- aktívna zóna (škrtiaca clona, PK, palivové časti kaziet HRK, absorpčný nadstavec, kanál kaziet HRK);
- výstupný úsek - od výstupu z pracovných kaziet aktívnej zóny po výstupný nátrubok reaktora;
- výstupný nátrubok.

#### 6.1.4.1.2.2 Výtlačná charakteristika HCČ

Cirkulácia chladiva cez primárny okruh sa zabezpečuje HCČ-317, ktoré sú umiestnené v studených vetvách cirkulačných slučiek.

V programe "STAR-1" sa výtlačná charakteristika HCČ pri frekvencii v elektrickej napájacej sieti 50 Hz zadáva v nasledujúcej analytickej forme:

$$\Delta P_j = (A_j + B_j \cdot G_j + C_j \cdot G_j^2) \cdot \rho_j$$

kde:

- j je číslo HCČ od 1 do 6,
- $\Delta P$  je výtlačok HCČ [MPa],
- A, B, C sú koeficienty polynómu charakteristiky HCČ,
- G je prietok chladiva [m<sup>3</sup>/hod],
- $\rho$  je hustota chladiva [kg/m<sup>3</sup>].

Algoritmus programu "STAR-1" je urobený tak, že koeficienty polynómu sa určujú programom podľa zadaných počiatočných hodnôt veličín prietoku a výtlačku podľa výtlačnej charakteristiky HCČ.

Pri frekvencii napájacej siete HCČ odlišnej od nominálnej hodnoty, sa výtlačná charakteristika HCČ prepočítava na novú frekvenciu a zadáva sa v analytickej forme, ale s inými koeficientom A. Výtlačná charakteristika HCČ, pri zmene frekvencie elektrickej siete, sa prepočítava podľa nasledujúcich závislostí:

$$G = G_{nom} \cdot \frac{f}{f_{nom}},$$

$$\Delta P = \Delta P_{nom} \cdot \left( \frac{f}{f_{nom}} \right)^2.$$

kde:

- $f$  je skutočná frekvencia [Hz],
- $f_{nom}$  je nominálna frekvencia 50 Hz.

V metodike výpočtu podľa programu "STAR-1" je brané, že sa chladivo v zostupnom úseku reaktora do vstupu do aktívnej zóny úplne premiešava.

Výkon motorov HCČ, dodávaný do primárneho okruhu pri ich práci, sa vo výpočte nezohľadňuje, pretože jeho veličina je porovnateľná s tepelnými stratami zo zariadení primárneho okruhu, aj vrátane strát tepla, odvádzaného odpúšťaním primárneho okruhu a medziokruhom chladenia pohonov kaziet HRK, čo sa potvrdzuje bilančnými skúškami pri spúšťaní blokov. Nezohľadnenie daného rozdielu prakticky nemá vplyv na výsledky termo-hydraulického výpočtu.

Pohon HCČ je zabezpečovaný asynchrónnym elektromotorom. Pri určovaní prietokov chladiva cez jednotlivé HCČ pri nenominálnej frekvencii elektrickej siete, v prevádzkových režimoch blízkych menovitým parametrom čerpadla (práca 3 až 6 HCČ), je uvažovaná priama úmera medzi zmenou prietoku chladiva v HCČ a zmenou frekvencie elektrickej siete.

#### 6.1.4.1.2.3 Reaktor a jeho vnútorná časť

Aktívna zóna reaktora sa skladá z 312 pracovných kaziet a 37 palivových častí havarijných, kompenzačných a regulačných kaziet.

Geometrické charakteristiky PK a palivových častí HRK kaziet sú uvedené v kapitole PpBS 6.1.1. AZ reaktora bude zavezená kazetami druhej generácie. V prvej zavážke do AZ budú zavezené neprofilované kazety. Následne budú v ďalších kampaniach postupne zavázané profilované PK s vyšším stredným obohatením.

Prvá palivová zavážka MO34 bude pozostávať z definovaných typov kaziet.

Druhá palivová zavážka (prvá prechodová) AZ reaktora MO34 bude pozostávať z definovaných typov kaziet.

Stacionárna palivová zavážka (14.) AZ reaktora MO34 bude pozostávať z definovaných typov kaziet.

Hlavica PK sa fixuje dolnou doskou bloku ochranných rúr, čím sa zabezpečuje rovnaká medzera medzi obalovými rúrami PK a palivových častí HRK.

Chladivo, ktoré postupuje do reaktora z cirkulačných slučiek, prechádza cez zostupný úsek medzi šachtou a nádobou a postupuje do dna šachty (dolná zmiešavacia komora) cez otvory v eliptickom dne šachty. V eliptickom dne sa chladivo delí medzi PK a palivové časti kaziet HRK.

Chladivo prichádzajúce k chladeniu PK prechádza cez škrtiacu clonu, umiestnenú v hornej doske dna šachty a ďalej prechádza pätkou PK, časť chladiva odchádza do medzikazetového priestoru cez dolné perforácie obalovej rúry PK, ale hlavná časť prechádza cez zväzok palivových prútikov PK. V hlavici PK sa hlavný prúd chladiva, ktorý prešiel zväzkom palivových prútikov zmiešava s chladivom prichádzajúcim z medzikazetového priestoru cez horné perforácie obalovej rúry PK a postupuje do objemu bloku ochranných rúr.

Chladivo, postupujúce na chladenie zväzku palivových prútikov palivovej časti HRK, prechádza cez vstupné otvory ochranných rúr HRK, ďalej časť cez labyrintové tesnenie dosky koša AZ postupuje do medzikazetového priestoru a hlavný prúd chladiva prechádza cez zväzok palivových prútikov palivovej časti HRK.

Z medzikazetového priestoru prechádza nepatrná časť chladiva medzi tvarovaným plechom a košom AZ a medzi košom AZ a šachtou reaktora a jeho základná časť prechádza medzi obalovými rúrami PK a palivových častí HRK. Z medzikazetového priestoru chladivo prechádza do objemu bloku ochranných rúr cez hornú perforáciu pracovných kaziet a tiež cez perforáciu ochranných rúr, predtým sa premieša s chladivom, ktoré prešlo cez zväzok palivových prútikov palivových častí HRK. Z objemu bloku ochranných rúr (horná zmiešavacia komora) všetko chladivo, prejdúc cez perforáciu šachty, postupuje do cirkulačných slučiek.

Používané hodnoty KHO vnútroreaktorovej trasy pohybu chladiva v reaktore, PK a palivových častí kaziet HRK, sú získané na základe skúšok makiet pracovných kaziet a palivových častí kaziet HRK, počas skúšobnej prevádzky na blokoch JE.

#### 6.1.4.1.3 Ohraničenia bezpečnej prevádzky reaktora

Kritériom spoľahlivého chladenia aktívnej zóny reaktora v normálnych podmienkach prevádzky je neprítomnosť krízy odvodu tepla v "horúcom" bode aktívnej zóny, ktorá sa preveruje v súlade s podkapitolou 6.1.4.2.

V súlade s projektovými limitami a s prevádzkovými inštrukciami dodávaného súboru kaziet (podkapitola 6.1.1 a 6.1.3), v procese prevádzky reaktora, musia byť splnené nasledujúce ohraničenia, zabezpečujúce splnenie základného kritéria spoľahlivého chladenia aktívnej zóny reaktora:

- stredná teplota chladiva na vstupe do reaktora musí byť v definovaných hraniciach [°C];
- prietok chladiva cez zväzok palivových prútikov pracovnej kazety a palivovej časti kazety HRK s nadstavcom pri šiestich pracujúcich HCČ pri prevádzke na tepelnom výkone reaktora 1375 MW musí byť v definovanom rozpätí [m<sup>3</sup>/hod];
- prietok chladiva cez reaktor pri prevádzke na nominálnom výkone v definovanom rozsahu [m<sup>3</sup>/hod];
- maximálny lineárny výkon palivového prútika [W/cm];
- maximálna teplota paliva musí byť menšia ako teplota tavenia, ktorá je určovaná so zohľadnením vyhorenia;
- maximálna teplota vonkajšieho povrchu pokrytia palivového prútika [°C].

Možné chyby určenia ohrevu chladiva v prúde chladiva sa zohľadňujú osobitným koeficientom K. Tento koeficient zahŕňa  $K_{inz}^{prút}$  a berie v úvahu odchýlky nerovnomernosti prietoku chladiva.

Inžinierske koeficienty rezervy  $K_{inz}^{\Delta t}$  pre rôzne hodnoty  $K_v$  a  $K_q$ , sú vypočítané v príslušnom dokumente.

Pre splnenie limit pre maximálny prevádzkový výkon palivových prútikov pracovnej kazety a palivovej časti kazety HRK musia byť splnené definované ohraničenia koeficientov nerovnomernosti:  $K_{o_{max}}$ ,  $K_{r_{max}}$  a maximálny prevádzkový výkon zaťaženej kazety ( $Q_{kaz}^{max}$ ) s definovaným  $K_q$ . Koeficient nerovnomernosti  $K_q$  súvisiaci s výkonom palivovej kazety nie je limitujúcim parametrom a má len informatívny charakter, no absolútny výkon kazety vyjadrený týmto parametrom ovplyvňuje teplotu chladiva na výstupe z palivovej kazety.

#### 6.1.4.1.4 Prestup tepla v medzere medzi palivom a pokrytím palivového prútika

Zdôvodnenie prevádzkyschopnosti palivových prútikov s obsahom U a U+Gd v stacionárnych a prechodových režimoch prevádzky a taktiež analýza bezpečného správania U a U+Gd palivových prútikov pri projektových haváriách pre MO34 je uvedené v príslušnom dokumente.

Teplotný spád v medzere palivo-pokrytie sa vyhodnocuje ako:

$$\Delta T = P / \alpha,$$

kde:

P - výkon, W/m<sup>2</sup>;

$\alpha$  - koeficient prestupu tepla od paliva k pokrytiu, W/(m<sup>2</sup>·K).

Koeficient prestupu tepla od paliva k pokrytiu sa vypočíta s použitím klasického modelu vedenia medzery Rosa-Stouta a predpokladá sa, že pozostáva z troch zložiek:

- vodivosť plynovej zmesi v medzere  $\alpha_g$ , W/(m<sup>2</sup>·K);
- kontaktná zložka  $\alpha_c$ , W/(m<sup>2</sup>·K);
- žiarenia  $\alpha_r$ , W/(m<sup>2</sup>·K).

Vodivosť plynovej zmesi, W/(m<sup>2</sup>·K):

$$\alpha_g = \frac{\lambda_m}{c \cdot (R_f + R_c) + g + \delta}, \quad (6.1.4.1.4-1)$$

kde:

$\lambda_m$  - vodivosť plynovej zmesi, W/(m·K);

$\delta$  - veľkosť medzery, m;

g - suma dĺžok teplotných skokov pri povrchu paliva a pokrytia pri neplnom objeme (neúplná výmena energie molekúl plynu a tvrdého povrchu), m;

$R_c, R_f$  - drsnosť povrchu paliva a pokrytia, v tvare strednej aritmetickej odchýlky profilu;

c - empirická konštanta.

Kontaktná zložka vodivosti sa zohľadňuje pomocou vzťahu:

$$\alpha_c = a_1 \cdot \bar{\lambda} \cdot \bar{R} \cdot \left( \frac{P_c}{\bar{R}^2 \cdot H} \right)^m, \quad (6.1.4.1.4-2)$$

kde:

- H - minimálna tvrdosť dotýkajúcich sa telies, Pa;  
 $a_1, m$  - empirické konštanty;  
 $P_c$  - kontaktný tlak, Pa;  
 $\bar{\lambda}$  - stredná hodnota tepelnej vodivosti  $UO_2$  a pokrytia  $W/(m \cdot K)$ ;  
 $R$  - stredná hodnota drsnosti dotýkajúcich sa telies, m.

$$\bar{\lambda} = \frac{2 \cdot \lambda_f \cdot \lambda_c}{\lambda_f + \lambda_c} \quad (6.1.4.1.4-3)$$

$$\bar{R} = \sqrt{\frac{R_f^2 + R_c^2}{2}} \quad (6.1.4.1.4-4)$$

Pre žiarenie platí nasledujúci vzťah:

$$\alpha_r = \sigma \cdot F \cdot \frac{T_f^4 - T_c^4}{T_f - T_c}, \quad (6.1.4.1.4-5)$$

kde je:

- $\sigma$  - Stefan-Bolzmannova konštanta,  $W/(m^2 K^4)$ ;  
 $T_f, T_c$  - teplota vonkajšieho povrchu paliva a trútorného povrchu pokrytia, K;  
 $F$  - charakteristika vyžarovacej schopnosti povrchov.

$$F = \left( \frac{1}{e_f} + \frac{1}{e_c} - 1 \right)^{-1} \quad (6.1.4.1.4-6)$$

$e_f, e_c$  - koeficient žiarenia povrchu paliva a pokrytia.

Ako vidieť z uvedených vzťahov, koeficient prestupu tepla závisí od celého radu parametrov takých ako: šírka medzery alebo kontaktný tlak, teplota, zloženie a tlak plynovej zmesi, stav dotýkajúcich sa povrchov. Všetky tieto charakteristiky závisia ako od vyhorenia, tak aj od špecifického (merného) výkonu.

#### 6.1.4.2 Popis T-H projektu AZ reaktora

##### 6.1.4.2.1 Porovnanie základných T-H charakteristík

V súčasnej dobe už v Rusku nezostal blok s reaktorom V-213, ktorý pracuje na nominálnom výkone 1375 MW<sub>t</sub>. Okrem toho v súčasnej dobe sú profilované kazety s vyšším stredným obohatením využívané na 4. bloku Kolskej JE a na EMO1, ktoré sú prevádzkované na výkone 1471 MW<sub>t</sub>. V súvislosti s tým nie je možné porovnanie termo-hydraulických charakteristík v plnom rozsahu (zahrňujúc ohrev na výstupe z pracovných kaziet). Je možné porovnať základné termo-hydraulické charakteristiky prevádzky blokov MO34 spolu s EMO1, a taktiež s 2. blokom Rovenskej JE (Ukrajina) prevádzkovaným na nominálnom výkone 1375 MW<sub>t</sub>.

Výsledky porovnania ukazujú, že základné termo-hydraulické charakteristiky porovnávaných blokov sú navzájom blízke. Rozdielnosť ohrevu chladiva na reaktore je podmienená rozdielnym výkonom porovnávaných blokov a presnosťou ich stanovenia.

##### 6.1.4.2.2 Rozloženie vývinu energie, prietoku a teploty chladiva v AZ reaktora a v bunkách pracovných kaziet

Termo-hydraulické charakteristiky aktívnej zóny reaktora sú určené pre 1., 2. a 14. palivovú záťaž MO34, vychádzajúc z analýzy neutrónovo - fyzikálnych a hydraulických charakteristík (podľa podmienok energetického zaťaženia a chladenia zväzku palivových prútikov).

Boli posúdené stacionárne režimy prevádzky reaktora s nominálnymi parametrami, tak aj pri najhoršej kombinácii odchýlok parametrov prevádzky reaktora (z hľadiska chladenia aktívnej zóny), podmienenej činnosťou systémov kontroly a riadenia (výkon reaktora, prietok a tlak chladiva, teplota chladiva na vstupe do reaktora).

Z pohľadu rezerv do krízy prestupu tepla, kombinácia osovej nerovnomernosti vývinu energie s maximom, posunutým k výstupu z aktívnej zóny, spolu s koeficientom nerovnomernosti po palivových prútikoch v aktívnej zóne je najkonzervatívnejšou kombináciou pre analýzu rezerv pre koeficienty krízy prestupu tepla.

Vstupné údaje z neutrónovo-fyzikálnych charakteristík pre výpočet stacionárnych režimov prevádzky reaktora boli prijaté v súlade s kapitolou 6.1.3.

Výpočet lokálnych parametrov chladiva v bunkách PK a koeficientov rezerv do krízy prestupu tepla sa vykonával programom "PUČOK-1000".

Vstupnými údajmi pre parametre chladiva na vstupe do PK boli výsledky výpočtu programu "STAR-1".

##### 6.1.4.2.3 Termo-hydraulické charakteristiky maximálne zaťaženej bunky zväzku palivových prútikov (horúceho kanála)

Pod pojmom horúci kanál je chápaný maximálne zaťažený subkanál, teda výpočtový subkanál s maximálnou teplotou.

Výpočet teplohydraulických charakteristík maximálne zaťaženej bunky zväzku palivových prútikov sa vykonával atestovaným programom "PUČOK-1000", v ktorom je realizovaná metóda bunkovej analýzy

teplohdraulických charakteristík vo zväzku a určenie kritického tepelného toku a rezervy do krízy odvodu tepla na základe lokálnych parametrov.

Posudzovali sa pracovné kazety, ktoré sú najzaťaženejšie z celého spektra PK.

V tomto, a vo všetkých posudzovaných režimoch, je chladivo nedohriate do teploty sýtosti  $t_s$  a koeficient rezervy do krízy odvodu tepla značne prevyšuje 1,0.

#### **6.1.4.2.4 Rozloženie teplôt chladiva na výstupe z palivových kaziet aktívnej zóny, a tiež rozloženie teplôt chladiva na výstupe z buniek z maximálne zaťaženej pracovnej kazety a pracovnej kazety s maximálnym výkonom, pri práci reaktora na nominálnych parametroch**

Teplota chladiva na výstupe z pracovných kaziet je meraná termočlánkami umiestnenými nad hlavicou pracovnej kazety v spodnej časti bloku ochranných rúr vo vzdialenosti 150 mm od hlavice pracovnej kazety.

Sledujú sa maximálne tepelne zaťažené kazety.

#### **6.1.4.2.5 Výsledky výpočtu strednej teploty chladiva na výstupe zo zväzku palivových prútikov maximálne zaťažených a s maximálnym lineárnym výkonom pracovných kaziet, v ktorých pri práci reaktora na nominálnych parametroch teplota chladiva na výstupe z maximálne zaťaženej bunky dosahuje teplotu nasýtenia**

Posudzovaná bola PK s maximálnou hodnotou  $K_o$  a  $K_r$  a PK s maximálnym relatívnym výkonom  $K_q$ .

Z výsledku výpočtov vyplýva, že pri práci reaktora na nominálnych parametroch, teplota na výstupe z najzaťaženejšieho zväzku palivových prútov nedosahuje teploty sýtosti a má značnú rezervu do  $t_s$ .

Hmotnostné rýchlosti chladiva na vstupe do zväzku sú úmerné prierezu buniek.

#### **6.1.4.2.6 Obsah pary v chladive**

Výsledky výpočtu teplohdraulických charakteristík aktívnej zóny reaktora v stacionárnych režimoch prevádzky reaktora pri práci šiestich HCC ukazujú, že vo všetkých preskúmaných variantoch chladivo na výstupe zo zväzku palivových prútikov PK je nedohriate do teploty sýtosti. Pri prevádzke reaktora na nominálnych parametroch a pri najhoršej kombinácii parametrov je prúdiace chladivo na výstupe z maximálne zaťaženej bunky PK tiež nedohriate do teploty sýtosti.

Výkon a lineárny výkon palivových prútikov v najviac zaťažených kazetách nepresiahne stanovené hranice spolu s uvažovaním inžinierskych koeficientov rezerv.

#### **6.1.4.2.7 Koeficient rezervy do krízy odvodu tepla**

Spoľahlivé chladenie aktívnej zóny reaktora v prevádzkových stacionárnych režimoch je zabezpečené výberom odpovedajúceho ohraničenia pre teplotný tok z pokrytia palivového prútika do prúdu chladiva, ktorý nesmie prevyšovať kritický tepelný tok v najviac teplotne zaťaženom bode aktívnej zóny.

#### **6.1.4.2.8 Teplota vonkajšieho povrchu pokrytia palivového prútika a paliva**

Maximálna teplota paliva v stacionárnych režimoch prevádzky reaktora nemá prevýšiť teplotu tavenia paliva (6.6.1.1.3.5.1.3.1) v súlade s príslušným dokumentom.

Teplota pokrytia nemá prekročiť definovanú hodnotu.

Teplota pokrytia nemôže prekročiť definovanú hodnotu v stacionárnom režime normálnej prevádzky. To sa objasňuje tým, že pri maximálnom lineárnom výkone pri teplote chladiva blízko teplote sýtosti  $T_s$  sa bude teplota vonkajšieho povrchu pokrytia nachádzať v definovanom rozsahu - vychádzajúc z výpočtov koeficientov prestupu tepla pre uvedené podmienky chladenia paliva podľa doposiaľ známym vzťahom.

#### **6.1.4.2.9 Výpočtový výkon pracovnej kazety, výkon palivového prútika a lineárny tepelný tok**

Výpočtový výkon PK sa určuje v súlade s kapitolou 6.1.4.4.3..

Maximálny prevádzkový výkon palivového prútika sa určuje v súlade s kapitolou 6.1.4.4.3.

Maximálny lineárny tepelný tok jeurčovaný ako súčin stredného lineárneho tepelného toku v aktívnej zóne a koeficientu nerovnomernosti tepelného toku.

#### **6.1.4.2.10 Tlakové straty chladiva na aktívnej zóne reaktora a hydraulický odpor**

Hydraulický odpor aktívnej zóny, PK a palivových častí HRK kaziet v posudzovaných stacionárnych režimoch prevádzky reaktora je uvedený v príslušných tabuľkách predprevádzkovej bezpečnostnej správy.

#### **6.1.4.2.11 Neurčitosti vo výpočtoch, včítane prietokov chladiva cez palivové zväzky**

##### **6.1.4.2.11.1 Neurčitosť stanovenia teploty paliva a pokrytia palivového prútika**

Neurčitosť určenia maximálnej teploty paliva závisí od určenia neurčitostí : vodivosti plynovej medzery, tepelnej vodivosti paliva, maxima lineárneho tepelného toku, súčiniteľa odvodu tepla od palivových tabletiiek k pokrytiu. Neurčitosť v určení vodivosti plynovej medzery a tepelnej vodivosti paliva sa zohľadňuje v metodike teplotného výpočtu palivového prútika. Neurčitosti v lineárnom tepelnom toku, rozložení vývinu energie, podmienené chybami výpočtov a technológiou výroby (hustota tabletiiek, obohatenie, rozmery a iné faktory) sa zohľadňujú zavedením inžinierskeho koeficientu pre lineárny tepelný tok (kapitola 6.1.4.1.3).

Neurčitosť určenia teploty pokrytia palivového prútika závisí od neurčitosti analytických metód výpočtu lokálnych podmienok chladenia maximálne zaťaženého palivového prútika a nemá vplyv na teplotný režim pokrytia palivového prútika, pretože koeficient odvodu tepla z palivového prútika do chladiva zostáva bez zmeny.

##### **6.1.4.2.11.2 Neurčitosti pri výpočte koeficientu rezervy do krízy odvodu tepla**

Neurčitosti pri výpočte minimálneho koeficientu rezervy do krízy odvodu tepla sa delia na:

- neurčitosti vstupných dát pri výpočte teplohydraulických charakteristík aktívnej zóny. Sem patria geometrické charakteristiky, rozloženie vývinu energie, rozloženie teploty a prietoku chladiva na vstupe do aktívnej zóny, koeficienty hydraulického odporu dištančných mriežok a trenia, podiel energie uvoľňovanej v palive;
- neurčitosť metodiky výpočtu lokálnych teplohydraulických parametrov v maximálne zaťažených bunkách kaziet;
- neurčitosť vzťahu pre výpočet kritického tepelného toku.

V ďalšom je uvedený rozbor vyššie uvedených faktorov.

Neurčitosti vstupných dát :



- neurčitosti geometrických rozmerov aktívnej zóny, ako výsledok odchýlok pri výrobe, sa zohľadňujú v inžinierskych koeficientoch pre tepelný tok a pre ohrev chladiva pri hodnotení rezervy do krízy odvodu tepla;
- neurčitosť v rozložení vývinu energie sa zohľadňuje v inžinierskom koeficiente pre tepelný tok;
- neurčitosť nerovnomernosti rozloženia prietokov na vstupe do aktívnej zóny sa zohľadňuje v inžinierskom koeficiente pre ohrev chladiva;
- neurčitosť určenia teploty chladiva na vstupe do aktívnej zóny sa zohľadňuje pri výpočte režimu s odchýlkou parametrov;
- neurčitosti koeficientov hydraulického odporu dištančných mriežok a trenia vo zväzku prútikov sa určujú na základe štatistickej analýzy a experimentálnych údajov z hydraulických premývk kaziet a zohľadňujú sa pri určovaní odchýlok prietoku chladiva v primárnom okruhu ako aj v jednotlivých kanáloch aktívnej zóny inžinierskym koeficientom pre ohrev;
- neurčitosť určenia ohrevu chladiva v bunke pracovnej kazety pre spúšťané bloky (prietok chladiva cez reaktor nie je určovaný z výsledkov merania tepelných bilancií) s uvažovaním neurčitosti určenia prietoku chladiva cez reaktor (bod 6.1.4.1) je rovná 6,1 % s definovanou vierohodnou pravdepodobnosťou. Pri stanovovaní teploty chladiva na výstupe z bunky pracovnej kazety je nevyhnutné uviesť neurčitosť určenia teploty chladiva na vstupe do reaktora .
- vo výpočtoch rezervy do krízy odvodu tepla a teploty paliva sa konzervatívne predpokladá, že všetka energia sa uvoľňuje v palivových tabletkách.

Číselné hodnoty používaných inžinierskych koeficientov rezerv sú uvedené v bode 6.1.4.1.3.

Výpočet koeficientu rezervy do krízy odvodu tepla sa vykonáva podľa atestovaného programu. V uvedenom programe je realizovaná pobunková metóda analýzy teplohydraulických charakteristík a určenie rezervy do krízy odvodu tepla na základe lokálnych parametrov.

#### **6.1.4.2.11.3 Chyby výpočtu základných termo-hydraulických charakteristík reaktora a aktívnej zóny**

Vstupnými údajmi pre výpočet termo-hydraulických charakteristík reaktora a aktívnej zóny pre prevádzkované bloky sú výsledky merania tepelných bilancií prevádzkovaného bloku, na základe ktorých sa určuje prietok chladiva cez reaktor.

Získaný prietok chladiva cez reaktor sa zadáva v počiatočnom výpočtovom variante programu „STAR-1“.

V tomto termo-hydraulickom projekte nie je hodnota prietoku chladiva cez reaktor známa pretože bloky, ktoré sa uvádzajú do prevádzky sú nové a meranie tepelných bilancií pre ne neexistuje.

Pre bloky novo uvádzané do prevádzky sa táto chyba stanovuje na základe projektových údajov KHO primárneho okruhu (neurčitosť hodnoty KHO) a hydraulických charakteristík HCČ (hodnota chyby tlakového spádu na HCČ v sprievodnej technickej dokumentácii).

Na základe výtlačných charakteristík a vypočítaných hodnôt KHO primárneho okruhu s uvážením skúšok spúšťania podobných blokov bol stanovený nominálny prietok chladiva cez reaktor 42870 m<sup>3</sup>/hod (viď podkapitolu 6.1.4.3.1).

Teplota chladiva na vstupe do reaktora v nominálnom režime sa uvažuje 268°C pričom jej chyba bude určená veľkosťou chyby určenej pri spúšťaní.

Chyba výpočtu základných termo-hydraulických charakteristík závisí od jednotlivých chýb parametrov prvkov vnútorných častí reaktora, ktoré sú navzájom nezávislé (koeficienty hydraulického odporu prvkov vnútorných častí reaktora, vstupné údaje určenia chýb parametrov chladiva).

Vypočítavané termo-hydraulické charakteristiky sú funkciou niekoľkých nezávislých argumentov.

Nie všetky čiastkové chyby použitých nezávislých argumentov hrajú rovnakú úlohu vo formovaní konečného výsledku.

Používajúc kritérium bezvýznamných chýb, boli získané nasledujúce chyby výpočtu prietokových charakteristík s vierohodnou pravdepodobnosťou 95 %.

- prietok chladiva cez zväzok palivových prútikov PK -  $\begin{matrix} +1,3\% \\ -1,7\% \end{matrix}$ ,
- prietok chladiva cez zväzok palivových prútikov palivových častí kaziet HRK -  $\pm 2,4\%$ ,
- koeficient obtoku chladiva mimo zväzkov palivových prútikov aktívnej zóny -  $\pm 24\%$ .

#### **6.1.4.2.12 Deformácia rozloženia výkonu**

##### **6.1.4.2.12.1 Stacionárna poloha pracovnej skupiny**

Stacionárny palivový cyklus s čerstvými kazetami druhej generácie (profilované kazety s UGP) je naprojektovaný tak, že koeficienty nerovnomernosti vývinu energie v pracovnom stave pri hornej polohe pracovnej skupiny ( $H_6=250$  cm) sú blízke k minimálnym hodnotám. Napriek tomu, pre zachovanie možnosti operatívnej regulácie je výpočtová poloha šiestej skupiny v procese bórovej kampane zvolená ako definovaná hodnota.

##### **6.1.4.2.12.2 Pád jednej regulačnej kazety**

Pri páde regulačného orgánu sa palivová časť kazety HRK dostáva pod aktívnu zónu a na jej miesto sa presúva absorpčný nadstavec, ktorý je silným absorbátorom typu „neutrónová pasca“. Zasunutý absorbátor spôsobuje zníženie výkonu vo všetkých bodoch aktívnej zóny, ale najväčšie zníženie výkonu nastáva v oblasti okolo zasunutého absorbátora. Zasunutie absorbátora spôsobuje deformáciu poľa vývinu energie v aktívnej zóne a vedie k zvýšeniu koeficientov nerovnomernosti vývinu energie ( $K_0$  a  $K_r$ ), ale v menšej miere, ako je prebiehajúce zníženie výkonu. Toto je potvrdené výsledkami výpočtu, ktoré boli vykonané pri zavádzaní profilovaného paliva s definovaným obohatením pre JE Mochovce a JE Bohunice.

Pád jednej regulačnej kazety a z nej vyplývajúce deformácie rozloženia výkonu nie sú problematické z hľadiska odvodu tepla a spoľahlivého chladenia palivových prútikov.

### 6.1.4.3 Popis T-H charakteristík systému chladenia AZ reaktora v stacionárnych režimoch

#### 6.1.4.3.1 Rozloženie tlaku, teploty a prietoku chladiva v cirkulačných slučkách primárneho okruhu

Chladenie aktívnej zóny reaktora sa vykonáva cirkuláciou chladiva v uzavretom okruhu. Teplo aktívnej zóny reaktora sa prenáša chladivom cez cirkulačné slučky do parogenerátorov pre výrobu pary, postupujúcej do turbogenerátorov.

Cirkulácia chladiva v primárnom okruhu je nasledovná : vstupný nátrubok reaktora - zostupná časť reaktora po vstup do aktívnej zóny - aktívna zóna - výstupná časť reaktora (od výstupu z aktívnej zóny po výstup z reaktora) - výstupný nátrubok reaktora - „horúca vetva“ cirkulačného okruhu s hlavnou uzatváracou armatúrou - parogenerátor - „studená vetva“ cirkulačného okruhu s hlavnou uzatváracou armatúrou a hlavným cirkulačným čerpadlom.

Vo výpočte teplohydraulických charakteristík reaktora a primárneho okruhu sa cirkulačné slučky so svojimi konštrukčnými a hydraulickými charakteristikami považujú za identické.

Základné teplohydraulické charakteristiky reaktora a primárneho okruhu boli počítané atestovaným programom "STAR-1".

Pri zdôvodnení spoľahlivosti chladenia aktívnej zóny reaktora sú, po dohode so zákazníkom, hodnoty prietoku chladiva cez reaktor a teploty chladiva na vstupe do reaktora (v stacionárnych režimoch prevádzky reaktora) brané ako vstupné údaje.

Bloky MO34 budú novo spúšťané, preto bolo dodatočne urobené vyhodnotenie očakávaného prietoku chladiva cez reaktor, pričom sa vychádzalo z charakteristík HCČ-317 uvedených v príslušnom dokumente. S ohľadom na tieto uvedené charakteristiky a projektové hodnoty KHO reaktora a primárneho okruhu bol programom „STAR-1“ uskutočnený výpočet prietokov chladiva v cirkulačných slučkách, ako aj celkový sumárny prietok chladiva cez reaktor pri nominálnom režime prevádzky RZ.

Z výsledkov výpočtov prietokov chladiva vyplýva, že celkový sumárny prietok chladiva je vyšší, než je hodnota zadaná termohydraulickým projektom, pre zabezpečenie spoľahlivého chladenia aktívnej zóny.

Takže, získané hodnoty prietokov chladiva (podľa charakteristík HCČ), dokazujú, že zákazníkom zadané projektové hodnoty prietokov požadované pre spoľahlivú prevádzku (nominálna a minimálna hodnota súčasne), boli zvolené konzervatívne.

#### 6.1.4.3.2 Rozloženie tlaku, teploty a prietoku chladiva v reaktore

Výpočty termo-hydraulických charakteristík reaktora v 1., 2. a 14. palivovej zavážke pri nominálnych parametroch prevádzky reaktora a pri najhoršej kombinácii odchýlok parametrov, z hľadiska chladenia aktívnej zóny (pri práci šiestich HCČ), boli uskutočnené programom „STAR-1“.

#### 6.1.4.3.3 Rozloženie prietoku chladiva medzi palivovými zväzkami vo všetkých palivových zavážkach, vrátane stacionárnej pri nominálnom režime práci reaktora

Rozloženie prietoku chladiva cez zväzky pracovných kaziet a HRK bolo spracované v 60°symetrii pre stacionárny režim prevádzky reaktora v nominálnom stacionárnom režime prevádzky reaktora pre 1, 2. a 14. palivovú zavážku.

#### 6.1.4.3.4 Ocenenie vplyvu tlaku chladiva na bezpečnosť a limitné hodnoty ohraničujúcich parametrov

Jedným zo základných požiadaviek projektu RZ je požiadavka na spoľahlivé chladenie aktívnej zóny v ustálenom stave normálnej prevádzky bez prekročenia prevádzkových obmedzení poškodenia paliva.

Aby sa vylúčila možnosť poškodenia paliva vyššími hodnotami než sú uvedené v technickom projekte pre stacionárny režim normálnej prevádzky, je nutné splniť podmienku neprítomnosti krízy výmeny tepla z povrchu palivového prútika v ľubovoľnom bode aktívnej zóny. Najviac energeticky namáhaným miestom v aktívnej zóne je tzv. „horúci“ bod (je to bod v ktorom má lokálny špecifický tepelný tok z povrchu palivového prútika maximálnu hodnotu).

Takže, kritériom úspešného ochladzovania paliva je neprítomnosť krízy výmeny tepla v „horúcom“ bode aktívnej zóny, v dôsledku čoho je vylúčené poškodenie palivového prútika v stacionárnom režime normálnej prevádzky.

Pre danú zostavu komplexu kaziet, sú dané nasledovné projektové limity a ohraničenia, v rámci ktorých prevádzkovanie RZ zabezpečuje splnenie kritéria spoľahlivého chladenia aktívnej zóny reaktora :

- stredná teplota chladiva na vstupe do reaktora musí byť v definovanom rozmedzí [°C];
- minimálny prietok chladiva cez zväzok palivových prútikov pracovnej kazety a palivovej časti kazety HRK pri práci šiestich HCČ a nominálnom tepelnom výkone reaktora 1375 MW<sub>t</sub> musí byť vyšší než definovaná hodnota [m<sup>3</sup>/h];
- prietok chladiva cez reaktor pri práci na nominálnom výkone musí byť v definovanom rozmedzí [m<sup>3</sup>/h];
- maximálny lineárny tepelný tok z povrchu palivového prútika nesmie prevýšiť limitnú hodnotu [MW<sub>t</sub>] počas celej doby prevádzkovania;
- maximálny prevádzkový výkon palivového prútika pracovnej kazety a palivovej časti kazety HRK nesmie byť vyšší než je limitná hodnota [kW<sub>t</sub>].

Odchýlka tlaku chladiva primárneho okruhu od nominálnej hodnoty vplýva na hodnotu kritického tepelného toku, ako aj na hodnotu kritéria spoľahlivého chladenia paliva. Pri zápornej odchýlke tlaku chladiva v aktívnej zóne, sa hodnota kritického tepelného toku znižuje a v dôsledku toho sa znižuje i pomer kritického tepelného toku k lokálnemu (lokálny tepelný tok zostane nezmenený).

Takže, zníženie tlaku chladiva na výstupe z aktívnej zóny na zápornú stranu vplýva na hodnotu rezervy pre krízu odvodu tepla.

#### 6.1.4.4 Popis T-H výpočtov a výpočtových programov

##### 6.1.4.4.1 Koeficienty nerovnomernosti rozloženia vývinu energie

Aktívna zóna reaktora sa analyzuje ako súbor radu skupín paralelne zapojených kanálov, do ktorých sú umiestnené PK a palivové časti kaziet HRK s individuálnym vývinom energie, konštrukčnými a hydraulickými charakteristikami, majúcich spoločnú rozdeľujúcu a zbernú komoru chladiva.

V súvislosti s prijatím jednorozmerného modelu prúdenia chladiva v kanáloch, sa nerovnomernosti teploty a relatívnej entalpie chladiva, tepelného toku v kanáloch zohľadňujú pomocou koeficientov nerovnomernosti.

Rozloženie výkonu v aktívnej zóne sa určuje na základe stredného tepelného toku z palivového prútika a koeficientov nerovnomernosti vývinu energie.

Hlavná časť výkonu sa generuje v palivových tabletkách palivových prútikov a nevelká časť - v pokrytí palivových prútikov a v okolitom moderátore.

Vo výpočtoch sa konzervatívne uvažuje, že všetok tepelný výkon je generovaný v tabletkách palivových prútikov. Stredný tepelný tok z palivového prútika sa určuje podielom sumárneho výkonu aktívnej zóny a celkového teplotymenného povrchu (v horúcom stave).

Vplyv rôznych náhodných faktorov na lokálne tepelné toky a na ohrev chladiva v najhorúcejšom kanáli (bunke) sa zohľadňuje príslušnými inžinierskymi koeficientmi pre tepelný tok a pre ohrev chladiva.

Koeficient nerovnomernosti výkonu palivových prútikov aktívnej zóny je pomerom výkonu daného palivového prútika a stredného výkonu palivového prútika v aktívnej zóne. Maximálny koeficient nerovnomernosti výkonu palivového prútika je pomerom najväčšieho výkonu palivového prútika a stredného výkonu palivového prútika v aktívnej zóne. Na rozloženie vývinu energie má vplyv poloha nastavcov, úroveň výkonu, vyhorenie paliva, atď.

Koeficient nerovnomernosti vývinu energie po výške palivového prútika je pomerom lokálneho výkonu palivového prútika na jednotku dĺžky k strednému výkonu toho istého palivového prútika na jednotku dĺžky. Maximálny koeficient nerovnomernosti vývinu energie po výške palivového prútika je pomerom maximálneho lokálneho výkonu palivového prútika na jednotku dĺžky k strednému výkonu toho istého palivového prútika na jednotku dĺžky. Rozloženie vývinu energie po výške má vplyv na rezervu do krízy odvodu tepla. Pri posunutí maxima rozloženia vývinu energie po výške k výstupu z aktívnej zóny sa znižuje hodnota koeficientu rezervy do krízy odvodu tepla. Maximálna hodnota teploty paliva závisí od veľkosti lineárneho tepelného toku a prakticky nezávisí od umiestnenia maxima vývinu energie po výške.

Koeficient nerovnomernosti rozloženia lineárneho výkonu v palivových prútikoch (jadrový koeficient) je pomerom lokálneho výkonu palivového prútika na jednotku dĺžky k strednému výkonu palivového prútika na jednotku dĺžky v aktívnej zóne

Koeficient nerovnomernosti tepelného toku je pomerom maximálneho možného lokálneho tepelného toku z povrchu palivového prútika k strednému tepelnému toku z palivového prútika v aktívnej zóne.

Hodnota koeficientu nerovnomernosti tepelného toku sa určuje ako súčin jadrového koeficienta a inžinierskeho koeficientu rezervy pre lineárny výkon palivového prútika.

Inžiniersky koeficient rezervy pre lineárny výkon palivového prútika (pre tepelný tok) zahrňuje rôzne náhodné faktory, ktoré môžu mať vplyv na maximálnu hodnotu tepelného toku, a konkrétne: odchýlky parametrov a charakteristík od nominálnych hodnôt v medziach dovolených tolerancií (geometria, obohatenie, hmotnosť a hustota paliva a iné), odchýlky určenia rozloženia vývinu energie.

Inžiniersky koeficient rezervy pre ohrev chladiva v horúcom kanáli zohľadňuje (pri určovaní rezerv do krízy odvodu tepla) vplyv na ohrev chladiva rôznych náhodných faktorov (odchýlky geometrie bunky, obohatenia, hmotnosti a hustoty paliva; nepresnosti určenia rozloženia vývinu energie a tiež rozdelenia prietokov chladiva do kaziet a vo vnútri zväzku palivových prútikov).

Hodnoty koeficientov nerovnomernosti rozloženia vývinu energie sú brané v súlade s bodom 6.1.4.1.3.

#### 6.1.4.4.2 Koeficient rezervy do krízy odvodu tepla

Nepřítomnosť krízy odvodu tepla z povrchu palivového prútika sa preveruje s použitím atestovaného programu "PUČOK-1000" podľa hodnoty pomeru kritického tepelného toku a skutočného tepelného toku. Hodnoty kritických tepelných tokov sa počítajú pre lokálne podmienky chladenia zväzku palivových prútikov pomocou vzťahu OKB "Gidropress", získaného na základe experimentálnych údajov pre zväzky tyčí pri geometrických a režimových parametroch aktívnej zóny reaktora VVER-440 so zohľadnením vplyvu osovej nerovnomernosti vývinu energie.

Kritický tepelný tok pre zväzky palivových prútikov s nerovnomerným profilom vývinu energie po dĺžke sa počíta podľa nasledovnej metodiky:

$$q_{\text{krit}}^{\text{nerov}} = q_{\text{krit}}^{\text{rov}} \cdot F, \quad (6.1.4.4.2-1)$$

kde:  $F$  - faktor formy;

$$F = [f(z)]^n, \quad (6.1.4.4.2-2)$$

$f(z)$  – funkcia vplyvu;

$$f(z) = \frac{\int_{l_1}^{l_{\text{krit}}} q(z) dz}{q_{\text{lok}}(z)(l_{\text{krit}} - l_1)}, \quad (6.1.4.4.2-3)$$

$$n = 3,79 - 19,61 \frac{P}{P_{\text{krit}}} + 17,88 \cdot \left( \frac{P}{P_{\text{krit}}} \right)^2, \quad (6.1.4.4.2-4)$$

$(l_{\text{krit}} - l_1)$  - dĺžka relaxácie, rovná 0,72 m;

$P_{\text{krit}}$  - kritický tlak, MPa;

$q_{\text{lok}}(z)$  - lokálny teplotný tok vo výpočtovom bode.

Hodnota  $F$  je ohraničená zdola limitnou hodnotou 0,85.

Hodnota kritického tepelného toku pre rovnomerne ohrievané zväzky sa určuje podľa vzorca:

$$q_{\text{krit}}^{\text{rov}} = 0,795 \cdot (1 - x)^{-0,5+0,105P} (\rho\omega)^{-0,127+0,311(1-x)} \cdot (1 - 0,0185P), \quad (6.1.4.4.2-5)$$

- x - relatívna entalpia v bunke zväzku palivových prútikov;  
 $(\rho\omega)$  - hmotnostná rýchlosť,  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ;  
 P - tlak v priereze zväzku palivových prútikov na analyzovanej výške, MPa.

Korelácia (6.1.4.4.2-5) sa porovnávala s experimentmi, vykonanými na stende Škody (ČR) a na stende NVH v Maďarsku spolu s ruskými špecialistami. Bolo preukázané, že daná korelácia popisuje experimentálne údaje, získané na vyššie uvedeních stendoch.

Korelácia (6.1.4.4.2-1) popisuje experimentálne údaje so strednou kvadratickou odchýlkou  $\sigma = 6,9 \%$ .

Koeficient rezervy do krízy odvodu tepla sa počíta podľa nasledovného vzorca:

$$K_{\text{rez}} = \left[ \frac{(q_{\text{krit}}^{\text{nerov}} \cdot (1 - \delta))}{q_{\text{lok}}(z)} \right]_{\text{min v aktívnej zóne}} \quad (6.1.4.4.2-6)$$

kde:

$\delta$  - limitná relatívna odchýlka výpočtového pomeru pre kritický tepelný tok.

Spoľahlivé chladenie palivového prútika sa považuje za zabezpečené, ak  $K_{\text{rez}} > 1,0$ .

Pri určení koeficientu rezervy do krízy odvodu tepla je limitná relatívna odchýlka  $\delta = 2,0 \cdot \sigma / 100 = 0,138$ , čo zabezpečuje neprítomnosť krízy odvodu tepla s pravdepodobnosťou 95% pre vybraný objem experimentálnych bodov, pre ktoré je zdôvodnená korelácia pre kritický tepelný tok.

Odporúčania pre výpočet koeficientu rezervy do krízy odvodu tepla sú uvedené a zdôvodnené v podkapitole 6.1.1. Výpočet parametrov pre určenie  $q_{\text{krit}}$  sa vykonáva v súlade s kapitolou 6.1.4.4.7.

Hydraulický odpor kanála môže byť určený pre nasledovné režimy prúdenia:

- jednofázový režim prúdenia;
- režim prúdenia s povrchovým varom chladiva v priemere nedohriateho do teploty sýtosti;
- režim prúdenia s objemovým varom.

Lokálny špecifický tepelný tok z povrchu palivového prútika v danom bode aktívnej zóny sa určuje z tepelného výkonu reaktora, sumárnej dĺžky palivových prútikov v pracovnom stave a z koeficientov nerovnomernosti rozloženia vývinu energie so zohľadnením inžinierskeho koeficientu rezervy pre tepelný tok (v „horúcom“ bode má lokálny špecifický tepelný tok maximálnu hodnotu):

$$q_{\text{lok}}(z) = \frac{N_{\text{R}} \cdot K_{\text{q}} \cdot K_{\text{k}}}{n_{\text{kaz}} \cdot n_{\text{pal.pr}} \cdot H_{\text{AZ}}} \cdot K_{\text{z}}(z) \cdot K_{\text{inž}}^{\text{tabl}}, \quad (6.1.4.4.2-7)$$

kde:

$N_{\text{R}}$  - výkon reaktora, W;

$K_{\text{k}}$  - koeficient nerovnomernosti výkonu palivového prútika PK;

$n_{\text{kaz}}$  - počet kaziet v aktívnej zóne, ks;

$n_{\text{pal.pr}}$  - počet prútikov v kazete, ks;

$H_{\text{AZ}}$  - výška aktívnej zóny, m;

$K_{\text{q}}$  - relatívny výkon kazety;

$K_{\text{z}}(z)$  - relatívny výkon po výške v bode z od spodu aktívnej zóny;

$K_{inž}^{tabl}$  - inžiniersky koeficient rezervy pre lineárny výkon palivového prútika.

Informácie týkajúce sa monitorovania DNBR počas prevádzky sú uvedené k kapitole PpBS 06.05.05.04 - Systém vnútroreaktorovej kontroly.

#### **6.1.4.4.3 Výkon pracovnej kazety, výkon palivového prútika a lineárny tepelný tok a celková teplo výmenná plocha**

Výpočtový výkon PK sa určuje ako súčin stredného výpočtového výkonu PK a koeficientu nerovnomernosti výkonu kaziet  $K_q$ .

Koeficient nerovnomernosti relatívneho výkonu kazety  $K_q$  nie je limitujúcim parametrom, má iba informačný charakter, ale absolútny výkon kazety, vyjadrený pomocou neho, vplýva na hodnotu teploty chladiva na výstupe z palivového zväzku kazety, ktorá musí byť menšia než je teplota sýtosti.

Pri prevádzke paliva, by sa prípustné teploty chladiva na výstupe z kaziet mali riadiť dovolenými hodnotami ohrevu chladiva v kazetách, ktoré sú počítané stanovenou metodikou a sú uvedené v tabuľke dovolených prevádzkových stavoch reaktora (TDPSR).

Maximálny výpočtový výkon palivového prútika sa určuje ako súčin stredného výpočtového výkonu palivového prútika a koeficientu nerovnomernosti výkonu palivového prútika.

V súlade s výsledkami neutrónovo-fyzikálnych výpočtov relatívnych výkonov prútikov PK, sa maximálny prevádzkový výkon palivového prútika dosahuje v 2.palivovej záväzke v okamih kampane 0,0 efektívnych dní.

Skutočný výkon palivového prútika pri prevádzke nesmie prevýšiť maximálny prevádzkový výkon.

Maximálny lineárny tepelný tok sa určuje ako súčin stredného lineárneho tepelného toku v aktívnej zóne a koeficientu nerovnomernosti tepelného toku. Konzervatívne sa predpokladá, že všetok výkon aktívnej zóny sa generuje v tabletkách palivových prútikov. Stredný lineárny tepelný tok je rovný pomeru sumárneho výkonu aktívnej zóny a celkovej dĺžky palivovej časti palivových prútikov v horúcom stave.

Hodnota maximálneho lineárneho tepelného toku [W/cm] sa realizuje v 2. a 14. palivovej záväzke s konzervatívnymi NFCH.

Pri výpočte koeficientov rezervy do krízy odvodu tepla, sa konzervatívne, inžinierskymi koeficientmi rezervy, zohľadňujú nepresnosti výpočtu neutrónovo-fyzikálnych a teplohydraulických charakteristík aktívnej zóny reaktora.

Vo výpočtoch sa konzervatívne uvažuje, že celý tepelný výkon vzniká v tabletkách palivových prútikov. Stredný tepelný tok z palivových prútikov sa určuje delením celkového výkonu aktívnej zóny s celkovou teplovýmennou plochou (v horúcom stave).

#### **6.1.4.4.4 Rozloženie prúdu chladiva**

Chladivo, dostávajúc sa do reaktora cez vstupné nátrubky, prechádza cez zostupnú medzeru medzi nádobou reaktora a šachtou, ďalej cez perforáciu dna šachty prechádza do pracovných kaziet (cez škrtiace clony) a do palivových častí kaziet HRK (cez otvory tlmiačich rúr), obmýva zväzky palivových prútikov, odoberajúc vygenerované teplo a odvádza sa cez výstupné nátrubky.



Časť chladiva z pracovných kaziet, prejdúc pätkou a otvormi v dolnej perforácii obalu a tiež z palivových častí kaziet HRK, prejdúc labyrintovým tesnením, prechádza do medzikazetového priestoru a nezúčastňuje sa odvodu tepla zo zväzku palivových prútikov.

Časť prietoku chladiva z medzikazetového priestoru sa používa na chladenie vnútorných častí reaktora (tvarovaného plechu, koša AZ, šachty reaktora).

Chladivo, nachádzajúce sa pod celkovým tlakovým rozdielom v aktívnej zóne, sa rozdeľuje medzi PK a palivové časti kaziet HRK v súlade s ich hydraulickými odporami.

V nasledujúcom odstavci je uvedené rozloženie prietoku chladiva v aktívnej zóne (pre normálny režim prevádzky reaktora) podľa výpočtových uzlov cirkulačnej trasy (výpočtová schéma cirkulačnej trasy je uvedená v bode 6.1.4.4.7). Prietok chladiva cez trasu cirkulácie sa rozdeľuje nasledovne:

- $n_{PK}$  = počet pracovných kaziet v aktívnej zóne (312 ks),
- $n_{HRK}$  = počet HRK v aktívnej zóne (37 ks),

Prietok chladiva cez aktívnu zónu sa rovná:

- $G_{AZ} = n_{PK} G_{PK}^{str} + n_{HRK} G_{HRK}^{str} [m^3/hod]$ .

Celkový prietok chladiva cez reaktor sa rovná:

- $G_R = n_{PK} G_{PK}^{str} + n_{HRK} G_{HRK}^{str} + G_{perf} + G_{vyg} + G_{sch-k} = 42600 m^3/hod$ .

#### 6.1.4.4.5 Tlakové straty v AZ a hydraulické odpory

Tlakové straty v aktívnej zóne na úsekoch vnútroreaktorovej trasy v stacionárnych režimoch prevádzky sa vypočítavajú na základe projektových koeficientov hydraulických odporov, získaných na základe experimentálnych údajov, výsledkov spúšťacích prác a údajov príručiek. Výpočet koeficientov hydraulického odporu trenia sa vykonáva podľa metodiky uvedenej v príslušnom dokumente.

#### 6.1.4.4.6 Koeficienty odvodu tepla

Teplota povrchu pokrytia palivového prútika závisí od axiálneho a radiálneho rozloženia výkonu, teploty chladiva a súčiniteľa odvodu tepla z povrchu palivových prútikov.

Súčinitele odvodu tepla z povrchu palivových prútikov pre podmienky nútenej konvekcie chladiva, nedohriateho do teploty sýtosti a pre prípad bublinkového varu sa počítajú podľa vzťahov, uvedených v príslušnom dokumente.

#### 6.1.4.4.7 Popis výpočtových kódov

Výpočet rozloženia prietoku chladiva a entalpií po trase vo vnútri nádoby reaktora, v PK a v palivových častiach kaziet HRK v stacionárnych režimoch prevádzky sa vykonáva programom "STAR-1" atestovaným v GAN Ruska.

Výpočet koeficientov rezervy do krízy odvodu tepla a obsahov pary sa vykonáva programom "PUČOK-1000" atestovaným v GAN Ruska.

Teplohydraulické charakteristiky aktívnej zóny reaktora a primárneho okruhu sa určujú riešením nelineárnej sústavy rovníc pohybu a energie, ktorá spája všetky prvky zariadenia v trase pohybu chladiva.

V programe "STAR-1" sa aktívna zóna posudzuje ako súbor radu skupín paralelne zapojených PK a palivových častí kaziet HRK s rovnakým, pre danú skupinu charakteristickým výkonom, majúcich spoločnú rozdeľujúcu a zbernú komoru chladiva. Rozdelenie aktívnej zóny na skupiny kaziet sa vykonáva v súlade s ich hydraulickými charakteristikami a s rozložením vývinu energie po priereze aktívnej zóny. Výpočet parametrov teplouvoľňujúcej časti kanála sa vykonáva po úsekoch, v hraniciach ktorých sa len málo mení veľkosť vývinu tepla. Prúdenie chladiva v kanále sa považuje za jednorozmerné, všetky parametre chladiva sa posudzujú ako funkcie súradníc pozdĺž osi kanála.

Nerovnomernosť rozloženia toku chladiva na vstupe do pracovných kaziet sa zohľadňuje inžinierskym koeficientom rezervy pre ohrev chladiva.

Program "STAR-1" umožňuje vykonávať:

- výpočet režimov prevádzky reaktorového zariadenia na rôznych úrovniach výkonu s rôznym počtom pripojených cirkulačných slučiek, vrátane režimov so spätným prúdením chladiva cez slučky s nepracujúcimi hlavnými cirkulačnými čerpadlami;
- výpočet teplohydraulických charakteristík kaziet aktívnej zóny v skupinách s rôznym výkonom a rôznou geometriou a hydraulikou;
- výpočet kritického tepelného toku a určenie minimálnej rezervy do krízy odvodu tepla pre každú skupinu kaziet.

Program umožňuje získať nasledujúce základné výsledky výpočtu:

- prietoky chladiva cez slučky s pracujúcimi a nepracujúcimi hlavnými cirkulačnými čerpadlami, sumárny prietok chladiva cez reaktor, rozloženie prietokov do rôznych kanálov v aktívnej zóne;
- rozloženie tlaku v trase pohybu chladiva a tlakové rozdiely na prvkoch aktívnej zóny, reaktora a úsekov primárneho okruhu;
- rozloženie teploty a entalpie chladiva v trase pohybu a úsekoch aktívnej zóny reaktora;
- teplohydraulické charakteristiky parogenerátorov;
- minimálne hodnoty pomeru kritického tepelného toku a skutočného tepelného toku v objeme aktívnej zóny reaktora, vypočítané podľa doporučení rôznych autorov (po v priereze homogénnych zväzkov palivových prútikov za neprítomnosti varu v kazetách).

Program "PUČOK-1000" umožňuje vykonávať výpočet rezerv do krízy odvodu tepla vo zväzkoch s teplouvoľňujúcimi prútikmi a neohrievanými časťami (rúry, prútiky), v stacionárnom režime pri zadanom výkone a rozložení vývinu energie po priereze a výške zväzku pre zadané parametre chladiva na vstupe (prietok, teplota a tlak vody nedohriatej do entalpie sýtosti).

V programe je realizovaná metóda bunkovej analýzy teplohydraulických charakteristík vo zväzku a určenie kritického tepelného toku a rezervy do krízy odvodu tepla na základe lokálnych parametrov. Rozloženie lokálnych parametrov chladiva (hmotnostnej rýchlosti, hustoty, entalpie) po priereze (po bunkách) a výške zväzku sa určuje riešením sústavy rovníc, ktoré zahrňujú pohybové rovnice, continuity, bilancie energie, ktoré sú písané pre toky chladiva v každej výpočtovej bunke na každom výpočtovom úseku po výške.

Výpočtová schéma delenia priečneho prierezu zväzku prútikov pracovnej kazety na výpočtové bunky je uvedená na Obr. č. 6.1.4.4.7-1.

Výpočtové bunky (subkanály) na seba navzájom pôsobia prostredníctvom prietokov a turbulentného premiešavania medzi bunkami.

Rozloženie prietokov chladiva a iných lokálnych parametrov vo výpočtových bunkách sa určuje z podmienky konštantného prietoku chladiva v ľubovoľnom priečnom priereze zväzku palivových prútikov, s uvážením rozdielov geometrických a hydraulických charakteristík buniek, rozloženia vývinu energie v bunkách v priečnom priereze zväzku palivových prútikov a rozloženia vývinu energie po výške.

Parametre chladiva v každom j-tom subkanále a v každom i-tom úseku rozloženia po výške sa určujú z riešenia systému pohybových rovníc, rovníc kontinuity a zachovania energie, ktoré pre každý počítaný výškový úsek predstavujú:

- rovnosť tlakových strát na subkanáloch

$$\Delta P_{ij} = \Delta P_{i1} \quad (6.1.4.4.7-1)$$

- rovnicu kontinuity

$$\sum_{j=1}^M G_{ij} = G_0, \quad (6.1.4.4.7-2)$$

kde:

$G_0$  - prietok chladiva cez zväzok palivových prútikov, kg/s

- rovnica hybnosti

$$\frac{\Delta P_{ij}}{\Delta Z} = \left( \frac{\lambda_{ij}}{d_{hj}} + \sigma_i \cdot \frac{\xi_j^{mre}}{\Delta Z} \right) \cdot \frac{(\rho_w)_{ij}^2}{2\rho_{ij}} \cdot [1 + (R\Psi - 1) \cdot B]_{ij} + \rho_{ij} \cdot g, \quad (6.1.4.4.7-3)$$

kde:

$\Delta Z$  - krok rozdelenia palivového prútika po výške, m;

$\lambda$  - súčiniteľ trenia;

$d_{hj}$  - hydraulický priemer subkanála, m;

$\xi^{mre}$  - koeficient hydraulického odporu dištančnej mriežky;

$\rho_w$  - hmotnostná rýchlosť, kg/(m<sup>2</sup>.s);

$R, \Psi$  - opravné súčinitele uvažujúce vplyv dvojfázovosti prúdenia chladiva a jeho ohrevu na hydraulický odpor

$B$  - koeficient uvažujúci vplyv ohrievaného obvodu palivového prútika na hydraulický odpor, obsah pár dvojfázového prúdenia;

$\sigma_i$  - funkcia, ktorá má hodnotu  $\sigma_i=1$ , ak i-tá časť má dištančnú mriežku,  $\sigma_i=0$  v opačnom prípade;

- rovnica zachovania energie

$$G_{ij} \cdot (\dot{i}_{ij}^{vyst} - \dot{i}_{ij}^{vs}) + \Delta G_{ij} \cdot \dot{i}_{ij} - \bar{q} \cdot K_j \cdot f_i \cdot P_{ohj} \cdot \Delta Z + \sum_{D_j} (g_{ij,m}^r \cdot (\dot{i}_{ij} - \dot{i}_{im})) - g_{ij}^k \cdot i = 0 \quad (6.1.4.4.7-4)$$

kde:

$$g_{ij}^k = \Delta G_{ij}$$

$$\Delta G_{ij} = G_{ij} - G_{i-1j}$$

$$\rho w_{ij} = \frac{G_{ij}}{F_j}$$

$$i = \bar{i}_{ij}, \text{ ak } \Delta G_{ij} < 0$$

$$\bar{i}_{ij} = (\dot{i}_{ij}^{vs} + \dot{i}_{ij}^{vyst})/2$$

$$i = \frac{\sum \bar{i}_{im}}{D_j}, \text{ ak } \Delta G_{ij} > 0$$

kde:

$D_j$  - počet (množstvo) subkanálov hraničiacich s j-tim subkanálom;

$m$  - prvok množstva subkanálov  $D_j$ ;

$K_j$  - koeficient nerovnomernosti uvoľňovania energie v palivovom prútku;

$f_i$  - koeficient nerovnomernosti uvoľňovania energie po výške zväzku;

$\bar{q}$  - stredná hodnota tepelného toku z palivového prútika vo zväzku, kW/m<sup>2</sup>;

$P_{ohj}$  - ohrievaný obvod palivového prútika, m;

$g_{i,j,m}^T$  - turbulentný hmotnostný prietok na i-tom úseku po výške zväzku medzi bunkami „j“ a „m“, kg/s;

$$\bar{i}_{im} = (\dot{i}_{im}^{vs} + \dot{i}_{im}^{vyst})/2$$

$$\dot{i}_{ij}^{vs} = \dot{i}^{vs}$$

$$\dot{i}_{ij}^{vyst} = \dot{i}_{(i-1),j}^{vyst}$$

Prijatie predpokladu o rovnakých tlakoch a tlakových stratách (rovnotlaké prúdenie chladiva) vo všetkých bunkách pre ľubovoľný výpočtový úsek po výške zväzku zabezpečuje maximálne (konzervatívne) prerozdelenie prietokov v bunkách v porovnaní s neúplným vyrovnaním tlakov po priereze, a má však za následok i konzervatívne ohodnotenie lokálnych parametrov (prietoky, ohrevy, entalpie) v najviac tepelne namáhaných subkanáloch a teda i odpovedajúce konzervatívne vyhodnotenie koeficientu rezervy do krízy odvodu tepla.

Zvolený spôsob výpočtu priečných konvektívnych prúdov chladiva vo zväzku zabezpečuje v najviac tepelne namáhaných bunkách zmenšenie prietoku chladiva, čo prispieva k ďalšej konzervatívnosti v porovnaní s možným priečnym „únikom“ prúdenia v týchto palivových prútkoch.

Úlohou je riešiť sústavu rovníc (6.1.4.4.7-1) - (6.1.4.4.7-4) vzhľadom k  $\dot{i}_{ij}^{vyst}$ ,  $(\rho w)_{ij}$ ,  $\Delta P_i$ .

Systém rovníc je doplnený zakódovanými vzťahmi pre výpočet hydraulických odporov vo zväzku palivových prútikov, kritického tepelného toku, turbulentného prenosu hmoty, teplofyzikálnych vlastností chladiva.

Turbulentný prenos hmoty  $g^T$  medzi vzájomne pôsobiacimi bunkami (napríklad, medzi bunkou „j“ a „m“) sa určuje podľa vzťahu :

$$g_{i,j,m}^T = \bar{\rho}_{i,j,m} \cdot \frac{1}{a_{j,m}} \cdot \bar{D}_{i,j,m} \cdot h_{j,m}, \quad (6.1.4.4.7-5)$$

kde:

$a_{j,m}$  - vzdialenosť medzi stredmi bunky „j“ a s ňou hraničiacou bunkou „m“, m;

$h_{j,m}$  - dĺžka čiary obvodu interakcie „j“ bunky a s ňou hraničiacou bunkou „m“, m;

$\bar{D}_{i,j,m}$  - koeficient turbulentnej difúzie sa určuje podľa vzťahu I :

$$\frac{\bar{D}_{i,j,m}}{\bar{W}_{i,j,m} \cdot \bar{d}_{i,j,m}} = K_T \cdot \bar{Re}_{i,j,m}^{-0,125}, \quad (6.1.4.4.7-6)$$

$$\bar{W}_{i,j,m} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{G_{ij}}{\rho_{ij} \cdot F_j} + \frac{G_{im}}{\rho_{im} \cdot F_m} \right), \quad (6.1.4.4.7-7)$$

$$\bar{Re}_{i,j,m} = \frac{\bar{W}_{i,j,m} \cdot \bar{d}_{i,j,m}}{v_{i,j,m}} \quad (6.1.4.4.7-8)$$

$$\bar{d}_{h,j,m} = \frac{1}{2} (d_{hj} + d_{hm}), \quad (6.1.4.4.7-9)$$

Pri výpočte sú používané stredné hodnoty parametrov pre bunky „j“ a „m“ :

$$\bar{\rho}_{i,j,m} = (\rho_{ij} + \rho_{im}) / 2 \quad (6.1.4.4.7-10)$$

Vplyv turbulentného premiešavania sa v danej metodike realizuje cestou zadania koeficientu  $K_T$ . Hodnota koeficientu  $K_T$  môže byť vybraná na základe experimentálnych údajov alebo podľa výsledkov verifikovaných výpočtov za podmienky najlepšieho súladu vypočítaných a experimentálnych údajov.

Na hraniciach vzájomne pôsobiacich buniek sa predpokladá rovnosť turbulentných prúdení :

$$g_{i,j,m}^T = g_{i,m,j}^T \quad (6.1.4.4.7-11)$$

Pre posudzovanú bunku sa uvažuje turbulentná výmena hmoty so všetkými skupinami buniek  $D_j$  ktoré vzájomne interagujú s danou „j“ bunkou.

Tlaková strata bunky pri pohybe chladiva v súlade s rovnicou (6.1.4.4.7-3) sa skladá zo strát hydraulickým trením, strát na miestnych odporoch (mriežkach) s uvažovaním dvojfázovosti, ohrevu a hydrostatických strát tlaku.

Koeficient hydraulického odporu trením  $\lambda_{ij}$  v bunkách sa počíta zo vzťahu ( pri  $Re > 2000$  ) :

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{(1,82 \lg Re_{ij} - 1,64)^2} \quad (6.1.4.4.7-12)$$

Rýchlosť prúdenia v bunke :

$$W_{ij} = \frac{G_{ij}}{F_j \cdot \rho_{ij}} \quad (6.1.4.4.7-13)$$

Hydraulický priemer bunky :

$$d_{hj} = \frac{4F_j}{P_{omj}}, \quad (6.1.4.4.7-14)$$

kde :

$P_{omj}$  - omočený obvod j-tej bunky

Zvýšenie hydraulických strát v bunke pri prúdení zohrievaného dvojfázového média je zohľadňované súčasne koeficientami  $R$  a  $\Psi$ , v súlade s odporúčaním I:

$$R_{ij} = 1 + X_{ij} \cdot \left( \frac{\rho_{ij}^{tf}}{\rho''} - 1 \right), \quad (6.1.4.4.7-15)$$

$$\Psi_{ij} = \left[ 1 + X_{ij} \cdot \left( \frac{\mu'}{\mu''} - 1 \right) \right]^{-0,2 X_{ij}} \times$$

$$\times \left\{ 1 + 0,57 \cdot X_{ij}^{0,125} \cdot (1 - X_{ij})^2 \cdot \left[ \frac{1}{0,2 + Fr_{oij}^{0,5} \cdot \frac{\rho''}{\rho'}} - 5,2 \cdot X_{ij}^2 \right] \right\} \quad (6.1.4.4.7-16)$$

$Fr_{oij} = \frac{W_{oij}^2}{g \cdot d_{hj}}$  - Froudovo číslo, počítané z rýchlosti cirkulácie chladiva :

$$W_{oij} = \frac{G_{ij}}{\rho' \cdot F_j}$$

Hmotnostný obsah pary  $X'_{ij}$  v bunke sa určuje zo vzťahu :

$$X'_{ij} = \frac{i_{ij} - i_{ij}^{tf}}{i'' - i_{ij}^{tf}}, \quad (6.1.4.4.7-17)$$

Parameter  $X_{ij}$  sa určuje zo vzťahu :

$$X_{ij} = X'_{ij} \cdot B \quad (6.1.4.4.7-18)$$

Koeficient  $B$  zohľadňujúci vplyv ohrievaného obvodu  $P_{ohj}$  na veľkosť hmotnostného obsahu pary  $X_{ij}$  a objemového obsahu pary  $\varphi_{ij}$  sa vypočíta podľa vzťahu :

$$B = 1 - \left( 1 - \frac{P_{ohj}}{P_{omj}} \right) \left( 1 + 2 \frac{i_{ij} - i_{ij}^{\alpha}}{i' - i_{ij}^{\alpha}} \right) e^{-2 \frac{i_{ij} - i_{ij}^{\alpha}}{i' - i_{ij}^{\alpha}}} \quad (6.1.4.4.7-19)$$

Entalpia tekutej fázy parovodnej zmesi  $i_{ij}^{tf}$  sa určí zo vzťahu :

$$i_{ij}^{tf} = i' - (i_{ij} - i_{ij}^{\alpha}) \cdot e^{-2 \frac{i_{ij} - i_{ij}^{\alpha}}{\Delta i_{ij}^{\alpha}}} \quad (6.1.4.4.7-20)$$

Nedohrev tekutiny  $\Delta i_{ij}^{\alpha} = i' - i_{ij}^{\alpha}$ , pri ktorom začína prudký rast bublinek pary s možným odtrhnutím sa od povrchu ohrevu, sa určí zo vzťahu :

$$\frac{\Delta i_{ij}^a \cdot (\rho w)_{ij}}{q_{ij}} = 7,5 \cdot \left( \frac{q_{ij}}{r \cdot \rho''} \cdot \frac{d_{hj}}{v'} \right)^{0,08} \cdot \left( \frac{W_{oij} \cdot d_{hj}}{v'} \right)^{0,2}, \quad (6.1.4.4.7-21)$$

Koeficient rezervy do krízy výmeny tepla dostaneme zo vzťahu :

$$K_{rez} = \min \left[ \frac{q_j^{kr}}{q_j(z) \cdot K_{tab}^{inz}} \right], \quad (6.1.4.4.7-22)$$

kde :

min - sa vyberá zo všetkých počítaných buniek a zo všetkých výšok zväzku palivových prútikov;

$q_j^{kr}$  - kritický tepelný tok vypočítaný pre lokálne parametre v „j“ bunke podľa vzťahu OKB "Gidropress" (v súlade s metodikou podľa kapitoly 6.1.4.4.2),  $kW_T/m^2$ .

Pri výpočte  $q_j^{kr}$  sa použije hodnota entalpie v bunke určená s ohľadom na inžiniersky koeficient rezervy na ohrev chladiva v horúcom kanáli podľa vzťahu:

$$i_j(z) = i_{vs} + d i_j(z) \cdot K_{inz}^{\Delta t}, \quad (6.1.4.4.7-23)$$

kde :

$i_{vs}$  - entalpia na vstupe do aktívnej zóny, kJ/kg;

$d i_j(z)$  - prírastok entalpie chladiva v j-tej bunke do bodu „z“ po výške, získaná výpočtom lokálnych parametrov v súlade tepelnou a hmotnostnou bilanciou danej bunky, kJ/kg;

$q_j(z)$  - tepelný tok z palivových prútikov v j-tej bunke na danom výpočtovom úseku po výške „z“, určený zo vzťahu,  $kW_T/m^2$ :

$$q_j(z) = \bar{q} \cdot K_{rj} \cdot K_z, \quad (6.1.4.4.7-24)$$

kde :

$\bar{q}$  - stredný tepelný tok z povrchu palivových prútikov pre zadaný výpočtový výkon reaktora,  $kW_T/m^2$ ;

$K_{rj} = K_q \cdot K_{kj}$  - radiálny koeficient nerovnomernosti uvoľňovania energie z palivového prútika (relatívny výkon palivového prútika);

$K_q$  - koeficient nerovnomernosti relatívneho výkonu kaziet aktívnej zóny;

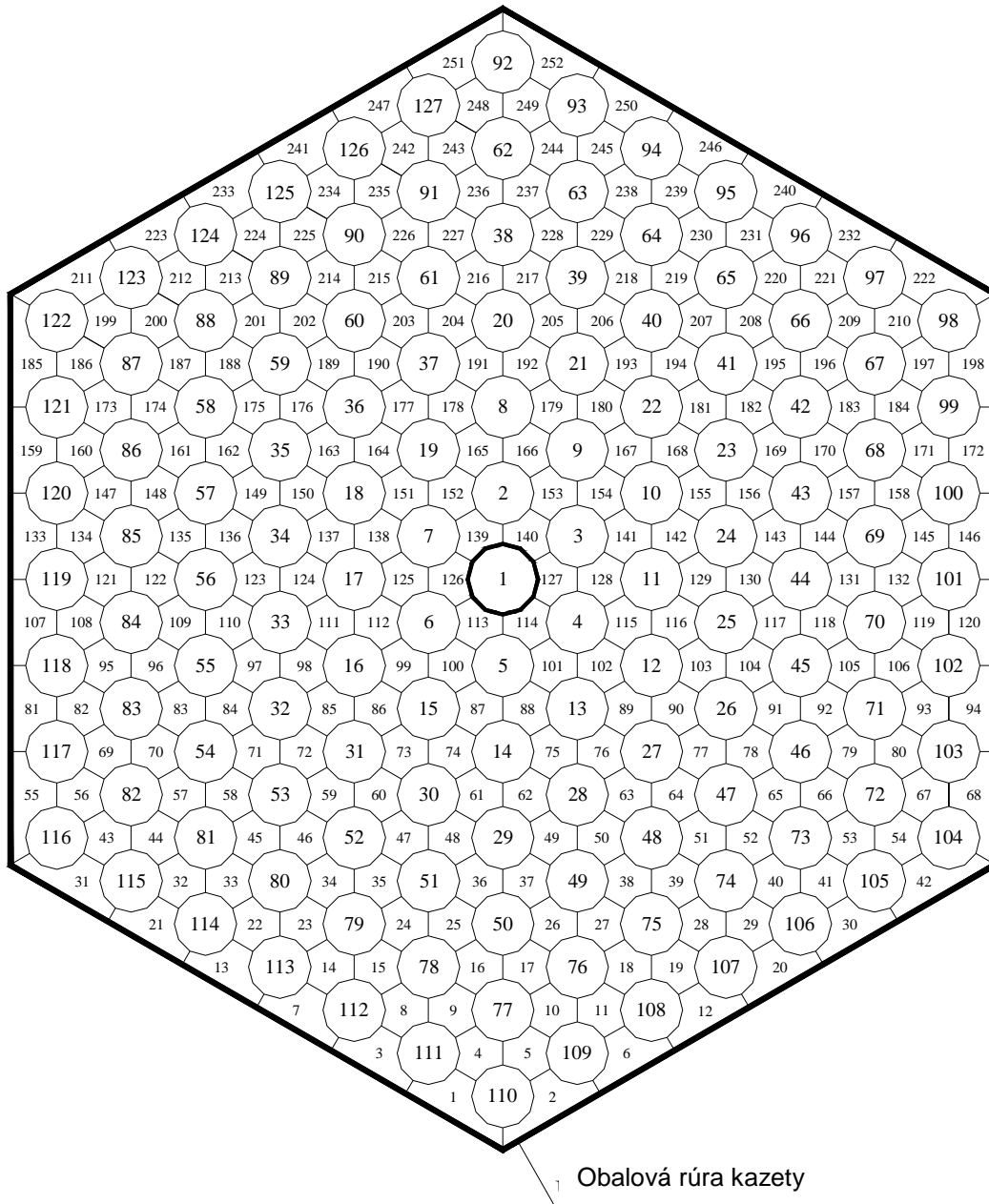
$K_{kj}$  - koeficient nerovnomernosti výkonu palivového prútika v priereze kazety;

$K_z$  - koeficient nerovnomernosti výkonu kazety po výške v bode „z“ od spodu AZ;

$K_{inz}^{tabl}$  - inžiniersky koeficient rezervy pre lineárny výkon palivového prútika;

$K_{inz}^{\Delta t}$  - inžiniersky koeficient rezervy pre ohrev chladiva v horúcom kanáli.

**Obr. č. 6.1.4.4.7-1 Výpočtová schéma rozdelenia prierehového prierezu zväzku palivových prútikov PK na výpočtové bunky (subkanály)**



1-252 - číslo bunky pracovnej kazety

 palivový prútik
  - centrálna rúrka



#### **6.1.4.5 Analýza výsledkov T-H výpočtov**

##### **6.1.4.5.1 Kritický tepelný tok**

Rezerva do krízy odvodu tepla sa určuje ako pomer kritického tepelného toku, vypočítaného pre miestne (lokálne) podmienky chladenia zväzku palivových prútikov a skutočného tepelného toku.

Hodnoty kritických tepelných tokov sa počítajú podľa vzťahu OKB "GIDROPRESS", ktorý bol získaný na základe výsledkov experimentálneho skúmania krízy odvodu tepla vo zväzkoch tyčí pre podmienky reaktora daného projektu.

Získané hodnoty koeficientov rezervy do krízy odvodu tepla v stacionárnych režimoch prevádzky reaktorového zariadenia pre prípad najhoršej kombinácie možných odchýlok základných parametrov od nominálnych hodnôt značne prevyšujú projektovú limitnú hodnotu, čo garantuje spoľahlivé chladenie palivových prútikov pracovných kaziet v posudzovaných podmienkach.

Minimálny koeficient rezervy do krízy odvodu tepla je vypočítaný v profilovaných PK druhej generácie vyššieho stredného obohatenia a v 14. palivovej zavážke pre najhoršiu kombináciu odchýlok parametrov prevádzky reaktora, konzervatívne NFCH, minimálny projektový prietok cez reaktor.

Vo všetkých ostatných analyzovaných variantoch práce reaktorového zariadenia v stacionárnom režime, má koeficient rezervy do krízy odvodu tepla oveľa vyššie hodnoty.

Výpočtová analýza rôznych priestorových rozložení vývinu energie v aktívnej zóne ukázala, že pre tepelné rezervy v aktívnej zóne je určujúca maximálna hodnota výkonu palivového prútika a jeho rozloženie po výške. Kombinácia osovej nerovnomernosti vývinu energie s maximom, posunutým k výstupu z aktívnej zóny, spolu s koeficientom nerovnomernosti po palivových prútikoch v aktívnej zóne je najkonzervatívnejšou kombináciou pre analýzu tepelných rezerv.

##### **6.1.4.5.2 Hydraulika AZ reaktora a prietoky chladiva**

Hydraulické charakteristiky aktívnej zóny a prvkov trasy vo vnútri nádoby boli zvolené na základe skúšok, vykonávaných na modeloch v stendových podmienkach a tiež aj v reaktorových podmienkach na hlavných blokoch s reaktormi daného typu.

Vplyv povrchového a objemového varu na tlakové straty vo zväzku palivových prútikov sa zohľadňujú prostredníctvom korekcií na dvojfázovosť a nehomogenitu prúdu chladiva.

Minimálny prietok chladiva cez reaktor je definovaný podľa projektu, čo je zdôvodnené v kapitole 6.1.4.3.1.

Minimálny prietok chladiva cez zväzok palivových prútikov PK a palivových častí kaziet HRK je vyšší ako minimálny projektový prietok chladiva.

##### **6.1.4.5.3 Teplotné podmienky práce AZ reaktora**

Pri výpočte teplotných podmienok práce palivových prútikov sa konzervatívne uvažuje, že všetka energia, ktorá sa uvoľňuje v palivových prútikoch, sa odoberie chladivom.

Analýza výsledkov výpočtových variant ukazuje, že maximálna teplota chladiva na výstupe zo zväzku palivových prútikov PK sa dosahuje v režimoch s najhoršou kombináciou odchýlok parametrov pri minimálnom prietoku chladiva cez reaktor.

Z výpočtových variant stacionárneho režimu práce reaktorového zariadenia s výpočtovými NFCH vyplýva, že maximálna teplota sa dosahuje v nasledovných kazetách:

- 1. zavážka, kazeta definovaného typu,  $T_{\text{eff}} = 200$  dní - 309,8 °C;
- 2. zavážka, kazeta definovaného typu,  $T_{\text{eff}} = 160$  dní - 314,7 °C;
- 14. zavážka, kazeta definovaného typu,  $T_{\text{eff}} = 200$  dní - 315,6 °C;

Chladivo (vo všetkých analyzovaných režimoch) sa nedohreje do teploty sýtosti na výstupe zo zväzku palivových prútikov PK.

Kritérium spoľahlivého chladenia aktívnej zóny vo všetkých analyzovaných stacionárnych režimoch za normálnych podmienok prevádzky je splnené, minimálny koeficient rezervy do krízy odvodu tepla značne prevyšuje hodnotu prijatú v projekte.

#### **6.1.4.5.4 Hydraulická stabilita prúdu chladiva**

Konstruktúra okruhu cirkulácie chladiva a hydraulické charakteristiky prvkov trasy sú také, že objavenie sa celo okruhovej pulzácie v stacionárnych režimoch prevádzky reaktorového zariadenia je vylúčené.

Toto sa dosahuje tým, že chladivo je nedohriate do teploty sýtosti v celom okruhu cirkulácie a hydraulické charakteristiky prvkov trasy cirkulácie (závislosť tlakových strát od prietoku) majú monotónny charakter. Okrem toho, výtlačná charakteristika hlavného cirkulačného čerpadla má tiež monotónny charakter v širokom rozsahu prietokov chladiva vzhľadom na pracovný bod.

Pulzácie parametrov, vznikajúce v prechodových režimoch pri rýchlych zmenách prietoku chladiva, tlaku alebo tepelného výkonu, zanikajú po odstránení poruchy, pretože okruh pracuje v stabilnej oblasti.

Vznik medzikanálovej pulzácie prúdu chladiva je tiež vylúčené, pretože chladivo je nedohriate do teploty sýtosti vo všetkých kanáloch aktívnej zóny a existuje doplnkové škrtenie na vstupe do pracovných kaziet. Skúsenosti z prevádzky reaktorového zariadenia s VVER-440/V-213 potvrdzujú stabilitu prietoku chladiva v stacionárnych režimoch prevádzky.

V projekte reaktorov VVER 440/V213 sú pre prevádzku a údržbu definované striktné požiadavky na chemické režimy chladiva. Evidencie záznamov z ich dlhodobej prevádzky potvrdzujú, že nebolo zistené žiadne usadzovanie relevantných nečistôt na palivových prútikoch a vnútorných častiach reaktora, ak boli tieto požiadavky na chemické prevádzkové režimy dodržiavané.

#### 6.1.4.5.5 Porovnanie projektových ohraničení s vypočítanými hodnotami

V Tab. č. 6.1.4.5.5-1 je uvedené porovnanie projektových ohraničení s výpočtovými hodnotami (sú uvedené maximálne výpočtové hodnoty teplohydraulických charakteristík stacionárneho režimu prevádzky reaktora s výpočtovými NFCH).

Tab. č. 6.1.4.5.5-1 Porovnanie projektových ohraničení s výpočtovými hodnotami

Názov parametra	Projektové ohraničenie	Výpočtová hodnota	
		Nominálny parameter RZ	Najhoršia kombinácia odchýlok parametrov RZ
Teplota chladiva na vstupe do reaktora, °C	265 – 270	268	270
Minimálny prietok chladiva cez reaktor, m <sup>3</sup> /hod	40000 – 44000	42600	41000
Prietok chladiva cez zväzok palivových prútikov PK druhej generácie, m <sup>3</sup> /hod	100 – 130	114,3 – 114,6	110,0 – 110,3
Prietok chladiva cez zväzok palivových prútikov palivovej časti HRK kaziet, m <sup>3</sup> /hod	100 – 130	125,2 – 125,7	120,2 – 121,1
Maximálny lineárny výkon palivového prútika (so zohľadnením $K_{inž}^{tabl}$ ), W/cm	-	-	-
Maximálny výkon palivového prútika (so zohľadnením $K_{inž}^{pal.pr.}$ ), kW	-	-	-

Výsledky porovnania uvedené v tabuľke ukazujú, že výpočtové hodnoty neprevyšujú projektové ohraničenia v stacionárnych režimoch prevádzky reaktora ako pri nominálnych parametroch prevádzky reaktora, tak aj pri najhoršej kombinácii ich odchýlok.

#### 6.1.4.6 Skúšky a previerky T-H charakteristík I.O. a častí II.O.

##### 6.1.4.6.1 Požiadavky na skúšky a previerky

Počas vykonávania spúšťacích prác a dosahovania výkonu sa vykonávajú skúšky podľa jednotlivých programov za účelom potvrdenia a spresnenia projektových termo-hydraulických charakteristík reaktorového zariadenia a podmienok prevádzky dodávaného paliva.

Výsledky skúšok majú preukázať, že termo-hydraulické charakteristiky a podmienky prevádzky dodávaného paliva nepresahujú projektom určené limity a požiadavky pre podmienky normálnej prevádzky reaktora, a nepresahujú projektom stanovených limitov a podmienok za podmienok dodávaného paliva.

V spojitosti s tým, nie sú potrebné špeciálne skúšky pre potvrdenie projektových termo-hydraulických charakteristík.

V každej palivovej zavážke je počas dosahovania výkonu potrebné vykonávať previerky súladu neutrónovo-fyzikálnych charakteristík aktívnej zóny (rozloženie vývinu energie v PK a po výške aktívnej zóny) s projektovými a tiež podmienok prevádzkovania dodávaného paliva (teploty chladiva na výstupe z PK a ohrevu chladiva v PK).

##### 6.1.4.6.2 Požiadavky na kontrolno-meracie prístroje

Pre vykonanie previerok nie sú potrebné špeciálne vypracované (neštandardné) systémy meraní.

Všetky previerky sa musia vykonávať s použitím štandardného systému kontrolno-meracích prístrojov a štandardným systémom vnútroreaktorovej kontroly.

Špeciálne požiadavky na presnosť systémov kontroly sa nestanovujú, musia zodpovedať projektovým.

##### 6.1.4.6.3 Tabuľka dovolených prevádzkových stavov reaktora a metodika jej výpočtu

###### 6.1.4.6.3.1 Projektové základy a prístup k rozpracovaniu

Projektom sú definované ohraničujúce parametre podľa neutrónovo-fyzikálnych a teplohydraulických charakteristík aktívnej zóny, ktoré určujú dovolenú úroveň tepelného výkonu reaktora v stacionárnom režime normálnej prevádzky pri rôznom počte pracujúcich HCČ.

Pre ohraničenie tepelného výkonu reaktora je určená nasledujúca zostava limitujúcich parametrov:

- tepelný výkon reaktora,
- lineárny výkon palivového prútika;
- výkon palivového prútika;
- teplota chladiva na vstupe do aktívnej zóny reaktora;
- prietok chladiva cez zväzok palivových prútikov PK a palivových častí kaziet HRK;
- prietok chladiva cez reaktor.

Vyššie uvedené limitujúce parametre je možné podmiennečne rozdeliť na nasledujúce tri skupiny:

- merané parametre;

- parametre, ktoré sa určujú v SVRK nepriamym spôsobom s použitím meraných a výpočtových parametrov;
- parametre, ktoré sa určujú predbežnými výpočtami.

K prvej skupine parametrov patria teplota chladiva na vstupe do aktívnej zóny reaktora a ohrev chladiva v reaktore.

K druhej skupine parametrov patrí tepelný výkon reaktora, výkon palivového prútika, lineárny výkon palivového prútika, prietok chladiva cez reaktor.

K tretej skupine parametrov patrí koeficient nerovnomernosti výkonu palivového prútika (používa sa pri výpočte lineárneho výkonu palivového prútika a berie sa podľa výsledkov neutróno-fyzikálnych výpočtov), prietok chladiva cez zväzok palivových prútikov PK a palivových častí kaziet HRK a prietok chladiva cez reaktor.

Základnými projektovými limitami, zabezpečujúcimi bezpečnosť prevádzkovania aktívnej zóny reaktora, je maximálny lineárny tepelný tok a maximálny výkon palivového prútika.

Tepelný výkon reaktora sa určuje prietokom chladiva cez reaktor a jeho ohrevom v aktívnej zóne. Pretože sa prietok chladiva cez reaktor určuje v čase dosahovania výkonu a v každom palivovom cykle je konštantný, tak ohraničujúcim parametrom pre tepelný výkon reaktora je ohrev v reaktore.

Vychádzajúc z projektového ohraničenia maximálneho výkonu palivového prútika, určujúcim parametrom preň je hodnota relatívneho výkonu palivového prútika, vychádzajúc z veličiny ktorého sa určuje hodnota ohraničujúceho parametra – ohrevu chladiva v PK.

Vychádzajúc z projektovej limity pre lineárny tepelný tok, je určené projektové ohraničenie pre celkový koeficient nerovnomernosti vývinu energie v aktívnej zóne reaktora.

Týmto spôsobom, použitie teploty chladiva na vstupe do aktívnej zóny reaktora, ohrevu chladiva v reaktore a PK ako ohraničujúcich parametrov, zabezpečuje nepresiahnutie projektových limit pre výkon palivového prútika a lineárneho tepelého toku v režimoch normálnej prevádzky.

#### **6.1.4.6.3.2 Metodika výpočtu tabuľky dovolených režimov prevádzky reaktora**

Prípustná teplota chladiva na vstupe do PK a palivových častí kaziet HRK v stacionárnom režime normálnej prevádzky je daná projektom a je teda konštantnou veličinou pri výpočte iných limitujúcich parametrov.

Hodnota limitného ohrevu chladiva ( $\Delta t_R^{dov}$ ) pri nominálnom výkone reaktora, sa stanoví ako funkcia dovoleného rozdielu entalpií chladiva na výstupe z reaktora a vstupe do reaktora.

Dovolený ohrev chladiva v centrálne pracujúcich kazetách ( $\Delta t_{R.k.}^{dov}$ ) sa určí ako funkcia dovoleného rozdielu entalpií chladiva na výstupe a vstupe pracovnej kazety.

Dovolený ohrev chladiva v periférnych pracovných kazetách sa určuje ako funkcia dovoleného rozdielu entalpií chladiva na výstupe a vstupe do periférnej pracovnej kazety.

Metodika stanovovania dovolených ohrevov a na jej základe zostavená tabuľka dovolených prevádzkových stavov reaktora sú detailne uvedené v I.

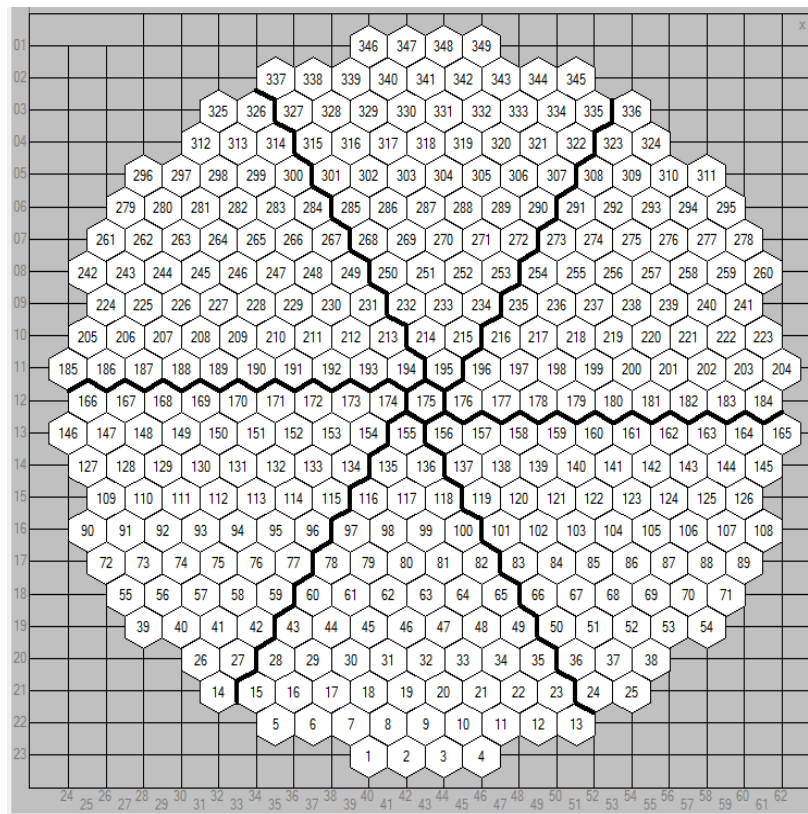
### 6.1.4.7 Rozloženie teploty chladiva na výstupe zo zväzkov pracovných kaziet a ich vplyv na meranie teploty

#### 6.1.4.7.1 Rozloženie teploty chladiva na výstupe zo zväzku palivových prútikov pracovných kaziet

Vybrané pracovné kazety majú meranie teplôt na výstupe, a pre ne sú vypočítané teploty na výstupe zo subkanálov a priemerné zmiešané teploty na výstupe zo zväzku palivových prútikov.

Na Obr. č. 6.1.4.7.1-1 je zobrazený kartogram číslovaní kaziet v 360-stupňovej symetrii aktívnej zóny. Číslovanie subkanálov je uvedené v kapitole 6.1.4.4.7.

**Obr. č. 6.1.4.7.1-1 Kartogram číslovaní kaziet v 360-stupňovej symetrii aktívnej zóny**



Uvedené výsledky výpočtu môžu byť použité pri spúšťaní blokov jadrovej elektrárne MO34 pre porovnávanie teploty chladiva na výstupe zo subkanálov vypočítané SVRK, s hodnotami vypočítanými podľa programu "PUČOK-1000".

#### 6.1.4.7.2 Vplyv rozloženia teploty chladiva na výstupe z pracovných kaziet na údaje z termočlánkov

V termohydraulickom projekte sa predpokladá, že teplota na výstupe z PK, zameraná termočlánkom, je rovná strednej teplote chladiva na výstupe zo zväzku palivových prútikov PK, pretože prichádza k jeho premiešavaniu pri prechode cez hornú dištančnú mriežku hlavice kazety.

Tento predpoklad potvrdzujú porovnania nameraných a vypočítaných stredných hodnôt teploty chladiva na výstupe z kaziet PK na prevádzkovaných blokoch, ktoré sú uvedené v príslušnom dokumente.

## LITERATÚRA

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

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

[II.1] Bezpečnostný návod ÚJD BNS I.1 2/2014 Rozsah a obsah bezpečnostnej správy

[II.2] Bezpečnostný návod ÚJD BNS I.6.2/2013 Požiadavky na opis reaktora a jeho projektovej bázy v bezpečnostnej správe



## ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. č. 6.1.4.4.7-1	Výpočtová schéma rozdelenia priečného prierezu zväzku palivových prútikov PK na výpočtové bunky (subkanály) .....	32
Obr. č. 6.1.4.7.1-1	Kartogram číslovania kaziet v 360-stupňovej symetrii aktívnej zóny .....	38

## ZOZNAM TABULIEK

Tab. č. 6.1.4.1.1-1	Výkon reaktora a prietok chaldaiva cez reaktor pri prevádzke s neúplným počtom HCČ .....	8
Tab. č. 6.1.4.5.5-1	Porovnanie projektových ohraničení s výpočtovými hodnotami.....	35