

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY
ÚSTAV AUTOMOBILOVEJ MECHATRONIKY**

Ing. Jakub Jakubec

Autoreferát dizertačnej práce

TERMOHYDRAULIKA PALIVOVEJ KAZETY JADROVÉHO REAKTORA VVER 440

**na získanie akademického titulu:
v doktorandskom študijnom programe:
miesto a dátum:**

doktor (philosophiae doctor, PhD.)
Elektroenergetika
Bratislava, december 2016

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave automobilovej mechatroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave.

Predkladateľ:

Ing. Jakub Jakubec

Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Fakulta elektrotechniky a informatiky,
Ústav automobilovej mechatroniky,
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ:

doc. Ing. Vladimír Kutiš, PhD.

Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Fakulta elektrotechniky a informatiky,
Ústav automobilovej mechatroniky,
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti:

Ing. Zoltán Kovács, CSc.

RELKO, spol. s. r.o.
Račianska 75, P.O. BOX 95 830 08 Bratislava

prof. Ing. Milan Žmindák, CSc.

Žilinská univerzita v Žiline,
Strojnícka fakulta
Katedra aplikovanej mechaniky,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa konáo.....hod.
pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v študijnom programe Elektroenergetika
na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, Ilkovičova 3, 812 19,
Bratislava.

.....
prof. Dr. Ing. Miloš Oravec
dekan fakulty

Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Fakulta elektrotechniky a informatiky,
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Obsah

Úvod	4
1 Súčasný stav problematiky	5
2 Ciele dizertačnej práce	6
3 Metodika riešenia CFD úloh	7
4 Termohydraulické analýzy	9
4.1 Analýzy sub-model palivového zväzku	9
4.2 Analýzy palivovej kazety	10
4.2.1 Validácia a verifikácia	10
4.2.2 Vplyvové analýzy	12
4.3 Analýzy palivovej kazety a jej okolia	16
5 Prínosy dizertačnej práce pre prax	20
Záver	21
Použitá literatúra	23
Vybraná publikačná činnosť	24

Úvod

Moderná spoločnosť by nemohla existovať bez spoľahlivej, ekologickej a cenovo dostupnej dodávky elektrickej energie. Elektrická energia je základným predpokladom pre ekonomický a sociálny rozvoj, zdravotníctvo, vzdelávanie a ďalšie aspekty ľudského života. Ekonomiky, ktoré nedokážu alternatívnymi zdrojmi pokryť spotrebu elektrickej energie, sa v súčasnosti javí ako výhodný spôsob výroby elektrickej energie z uhlia a uránu. Napriek nedostatkom jadrová energetika v súčasnosti patrí k najefektívnejším a najekologickejším zdrojom s prihliadnutím na ekonomiku a stálosť produkcie elektrickej energie. Pre výrobu elektriny sa jadrová energia využíva v 31 krajinách a tvorí v súčasnosti 12% zo všetkých zdrojov elektrickej energie vo svete [1]. Jadrová energetika má v slovenskej energetike významné postavenie. Podiel vyrobenej elektrickej energie z jadrových elektrární v roku 2014 bol 56,9% z celkovo vyrobenej elektrickej energie [2]. Bloky VVER 440 boli vyprojektované pre prevádzku v základnom zaťažení a ich využitie na pokrývanie premenlivej časti diagramu zaťaženia by malo byť len v prípade nevyhnutnosti, po vyčerpaní ostatných možností v sústave. Súčasný svetový trend najmä pre reaktory typu VVER 440 je zvyšovanie projektovaného tepelného výkonu a predĺženie životnosti.

Úspešné využitie jadrového reaktora ako ekonomického zdroja energie je podmienené stálym odvodom tepla z aktívnej zóny a s premenou uvoľneného tepla na elektrickú energiu. Keďže teoreticky neexistuje horná hranica obmedzujúca výkon reaktora, ktorý dosiahol nadkritický stav, je to práve systém odvodu tepla, ktorý rozhoduje o tak dôležitých parametroch ako je maximálny prípustný tepelný výkon reaktora. V rámci bezpečnostných rozborov sa uplatňujú najmä experimentálne zariadenia a výpočtové modely, pomocou ktorých je možné vyšetřovať nielen prevádzkové stavy jadrového zariadenia a jeho častí, ale hlavne stavy, ktoré môžu viesť alebo priamo vedú k havarijným stavom, prípadne riešiť optimalizáciu daných jadrových zariadení. Hlavná výhoda experimentálnych zariadení a výpočtových modelov je možnosť skúmať extrémne stavy a deje ktoré by mohli priamo viesť k poškodeniu alebo až k zničeniu sledovaného zariadenia. Týmto spôsobom je možné optimalizovať cieľové zariadenie a znížiť prípadné riziká, ktoré môžu viesť až k havarijným stavom.

Termohydraulické analýzy aktívnej zóny predstavujú teoretický základ pre riešenie mnohých problémov spojených s projektovaním, výstavbou, prevádzkou jadrového reaktora a v súčasnej dobe najmä s modernizáciou a zvyšovaním bezpečnosti blokov. Pod pojmom modernizácia môžeme rozumieť najmä využitie existujúcich výkonových rezerv jadrového zariadenia (zvyšovanie projektovaného tepelného výkonu) a predĺženie životnosti blokov.

1 Súčasný stav problematiky

V súčasnej dobe sa na Slovensku nachádzajú v prevádzke dve jadrové elektrárne - Atómová elektrárň Jaslovské Bohunice (EBO), bloky Bohunice-1(odstavený v roku 2006) a Bohunice-2 (odstavený 2008), Bohunice-3 a Bohunice-4 (plánované odstavenie v roku 2025), a Atómová elektrárň Mochovce (EMO), 1. a 2. blok v prevádzke, 3. a 4. v procese dostavby. V oboch elektrárňach sa nachádzajú jadrové reaktory typu VVER-440. V odstavených blokoch EBO sa nachádzali staršie typy VVER-440/V230, vo zvyšných blokoch sú v prevádzke novšie typy reaktora VVER-440/V213. Takisto v ostatných krajinách bývalého východného bloku je v prevádzke viacero JE s reaktorom typu VVER-440/V213, celkovo je teda v štátoch Európy stále v prevádzke 16 blokov typu VVER-440/V213 [3].

Napriek pomerne vysokému počtu typov reaktora VVER-440 vo svete, nie sú dostupné príspevky, ktoré by sa zaoberali riešením termohydraulických problémov, ktoré sú definované pre komplexnú palivovú kazetu jadrového reaktora VVER-440. Dostupné sú len publikácie a experimenty zaoberajúce sa len vybranými časťami, alebo len výrazne zjednodušené modely.

Ďalší dôvod prečo má zmysel riešiť otázku termohydrauliky palivovej kazety je súčasný trend zvyšovania výkonu jadrových reaktorov a stanovenie maximálneho tepelného výkonu. Dôležitou úlohou je teda stanovenie neurčitosti merania teploty chladiva termočlánkom na ktorú môžu mať vplyv viaceré faktory ako napríklad prúdenie chladiva cez bypass.

Na základe analýzy súčasného stavu problematiky vzniká potreba vytvorenia modelov komplexnej palivovej kazety, prípadne palivovej kazety a jej blízkeho okolia, ktoré budú schopné detailne popísať prúdenie chladiva a kvantifikovať mieru vplyvov, ako napr. prúdenie chladiva cez medzikazetový priestor na neurčitosť merania teploty chladiva na výstupe z palivovej kazety.

2 Ciele dizertačnej práce

Cieľom dizertačnej práce je prispieť k riešeniu problematiky termohydrauliky palivovej kazety jadrového reaktora VVER 440 konkrétne kvantifikovaním miery vplyvu možných faktorov spôsobujúcich nepresnosti merania teploty chladiva na výstupe z palivovej kazety. S prihliadnutím na vykonanú analýzu súčasného stavu problematiky sa v dizertačnej práci predpokladá splnenie nasledovných cieľov:

1. Vytvorenie CFD modelu palivovej kazety:
 - komplexný CFD model zahrnujúci model palivovej kazety a model chladiva - tento model bude použitý pri analýzach bez uvažovania prúdenia cez bypass,
 - rozšírený model o medzikazetový priestor spolu s príslušnými časťami susedných palivových kaziet - tento model bude použitý pri analýzach s uvažovaním prúdenia cez bypass.
2. Citlivostné analýzy vplyvu kvality siete a turbulentných modelov:
 - optimalizácia kvality siete z hľadiska presnosti a dĺžky trvania výpočtov,
 - sledovanie porovnávacej veličiny y^+ , ktorá sleduje kvalitu siete v oblasti medznej vrstvy pre vybrané turbulentné modely,
 - porovnávacie výpočty pre jednotlivé typy turbulentných modelov a ich vzájomné porovnanie.
3. Validácia a verifikácia CFD modelu palivovej kazety:
 - validácia CFD modelu z hľadiska relevantnosti fyzikálnych procesov, ktoré sa uplatňujú pri prúdení na základe ruského experimentu,
 - verifikácia výpočtového modelu z hľadiska konvergenencie výpočtu.
4. Termohydraulické analýzy:
 - vplyv prúdenia chladiva v centrálnej rúrke – cieľom bude ohodnotiť vplyv chladiva vystupujúceho z centrálnej rúrky na teplotu chladiva meranú termočlánkom,
 - vplyv polohy ochrannej mriežky - cieľom bude ohodnotiť vplyv polohy ochrannej mriežky na teplotu chladiva meranú termočlánkom,
 - vplyv prúdenia chladiva z medzikazetového priestoru na výstupnú teplotu - cieľom bude ohodnotiť vplyv bypassu na teplotu chladiva meranú termočlánkom.

3 Metodika riešenia CFD úloh

Počas prevádzky JR sa okrem meraní jednotlivých parametrov zariadení vo veľkej miere využívajú práve numerické výpočtové kódy, pomocou ktorých je možné relatívne presne určiť požadované parametre celého systému, alebo detailne skúmať správanie sa jednotlivých častí systému. Z hľadiska analyzovania rôznych záujmových oblastí jadrovej elektrárne je možné termohydraulické analýzy rozdeliť na dve veľké časti:

- Systémové analýzy,
- CFD (Computational Fluid Dynamics) analýzy.

Pod pojmom systémové analýzy sa rozumejú analýzy vykonávané systémovými kódmi, ako sú RELAP, ATHLET a pod. a ich cieľom je vyšetrovať daný systém ako celok, t.j. dôraz sa nekladie na detailné vyšetrovanie charakteru prúdenia, ale na funkcionality systému a vzájomné väzby medzi jednotlivými systémami. Na tento účel nie je výhodné pracovať s Navier-Stokesovými rovnicami v tvare, ako boli odvodené v predchádzajúcich častiach, ale je potrebné dané rovnice zjednodušiť na tzv. 1D rovnice, pričom takto vytvorené rovnice sa najčastejšie riešia pomocou rôznych metód konečných diferencií. Teda systémové kódy modelujú prúdenie ako 1D, ale samozrejme obsahujú aj moduly, ktoré umožňujú určitým spôsobom modelovať premiešanie tekutiny, var alebo kondenzáciu tekutiny ale aj prestup tepla cez stenu. Primárny účel systémových analýz spočíva v modelovaní prechodových dejov, ktoré môžu v jadrovej elektrárni nastať a to či už ako súčasť bežnej prevádzky alebo ako dôsledok nehody. Najčastejšie sa vyšetrojú tzv. LOCA udalosti, ktoré vedú k rýchlym zmenám tlaku v primárnom systéme, čo má za následok var kvapaliny a následne zhoršenie parametrov prestupu tepla z palivových prútikov do chladiva. Súčasťou takýchto kódov býva aj radiacia logika, ktorá umožňuje modelovať odozvu jednotlivých bezpečnostných systémov na zmenu jednotlivých radiacích parametrov.

Pod pojmom CFD (počítačová dynamika tekutín) analýzy sa rozumejú analýzy, ktoré sa snažia čo možno najvernejšie a najdetailnejšie namodelovať prúdenie vo vyšetrovanom systéme, pričom pri CFD analýzach sa vychádza z 3D geometrických modelov. CFD analýzy je možné použiť tak na riešenie problémov prúdenia v ustálených režimoch ako aj v prechodových režimoch, pričom umožňuje riešiť jednofázové ako aj dvojfázové prúdenie. Keďže vyšetrovaná oblasť sa modeluje ako 3D oblasť, je nevyhnutné použiť vhodnú numerickú metódu na riešenie vzniknutých diferenciálnych rovníc. Medzi najčastejšie používané numerické metódy v oblasti CFD patria:

- Metóda konečných objemov,
- Metóda konečných prvkov,
- Metóda konečných diferencií.

V súčasnosti metóda konečných objemov predstavuje najširšie využívanú metódu využívanú pri modelovaní termohydraulických pomerov pomocou CFD.

Pri týchto analýzach sa vychádza z Navier-Stokesových rovníc [4], ale nie je možné pracovať priamo s týmito rovnicami a to z dôvodu turbulentnosti prúdenia, ktoré výrazne komplikuje spôsob riešenia týchto rovníc. Z tohto dôvodu sú vytvorené tzv. turbulentné modely, jedná sa v podstate o matematicko-empirické formulácie umožňujúce numerické riešenie turbulentného prúdenia. Pri voľbe modelu turbulentného prúdenia treba zohľadniť fyzikálne vlastnosti a špecifiká analyzovaného prúdenia, vlastné alebo sprostredkované skúsenosti s využívaním modelu v rovnakej alebo blízkej skupine úloh, potrebnú mieru presnosti výsledkov spolu s časom a hardvérom, ktorý je k dispozícii. No a v neposlednej miere poznať možnosti a

obmedzenia zvoleného modelu spolu s vedomosťami o správnej voľbe jeho vstupných parametrov.

Počítačová dynamika tekutín, alebo CFD, je postup pre výpočet simulácie prúdenia, ktorý umožňuje modelovanie prúdenia, zdieľania tepla a hmoty. Výhodou CFD metódy je vytvorenie virtuálneho prototypu systému, ktorý je možné sledovať v čase a postupne analyzovať odozvu na rôzne podnety. Všeobecne CFD je užitočné pri riešení širokej škály aplikácií. Využíva sa k simulácii prúdenia okolo vozidiel, lietadiel, rôznych prúdení napr. v motoroch. Ďalšou možnosťou je využitie CFD v biomechanike, kde nachádza uplatnenie pri simulácii rôznych obehových a respiračných systémov. Za rozmachom CFD analýz stojí ich efektívnosť z finančného hľadiska t.j. náklady na modelové testovanie sú omnoho nižšie ako náklady na experiment.

Pri tvorbe CFD modelov sa používa postup, ktorý sa skladá z nasledujúcich krokov:

1. Vytvorenie 3D geometrického modelu chladiča - tvorba 3D geometrických modelov chladiča v analyzovaných komponentoch obsahuje nasledovné podkroky:
 - vytvorenie 3D geometrického modelu analyzovaného komponentu - je potrebné vytvoriť geometrický model analyzovaného komponentu z dostupnej výkresovej dokumentácie,
 - zjednodušenie geometrie niektorých komponentov - geometrické časti, ktoré sú tvarovo komplikované ale z pohľadu prúdenia nehrajú dôležitú úlohu, je potrebné zjednodušiť, čím sa výrazne ušetrí čas na prípravu a tvorbu výpočtovej siete,
 - vytvorenie geometrického negatívu zo zjednodušených modelov jednotlivých komponentov - pri vytváraní negatívneho objemu komponentov sa vychádza zo zjednodušenej geometrie, negatívny objem v jednotlivých komponentoch predstavuje objem chladiča, t.j. objem skúmanej oblasti, ktorá sa následne musí diskretizovať (vytvoriť výpočtovú sieť).
2. Tvorba výpočtovej siete - pri tvorbe výpočtovej siete sa vychádza z objemu chladiča v jednotlivých komponentoch (krok 1), objem chladiča je rozdelený na menšie celky, ktoré sú sieťované samostatne.
3. Definovanie CFD analýzy - predstavuje fyzikálne nastavenie parametrov analýzy a skladá sa z nasledovných podkrokov:
 - spojenie jednotlivých sietí menších celkov (krok 2) - týmto podkrokom sa vytvára výpočtová sieť skúmanej oblasti,
 - definovanie materiálových vlastností skúmanej oblasti - CFD umožňuje okrem modelovania tekutín, t.j. kvapalín a plynov modelovať aj tuhé látky - modelovanie prestupu tepla cez stenu, ale aj tzv. porózne materiály - tekutina preteká cez tvarovo komplikovanú "poróznu" oblasť, pričom každý z materiálových modelov požaduje rozdielne vstupné parametre,
 - definovanie turbulentných modelov a parametrov fyzikálnych modelov - umožňuje detailne nastaviť parametre fyzikálnych modelov použitých pri simulácii a výber vhodného turbulentného modelu,
 - definovanie okrajových podmienok a tepelnej záťaže - na jednoznačné definovanie úlohy je potrebné zadefinovať podmienky na jednotlivých vonkajších plochách vyšetrovanej oblasti ako aj stanovenie zdrojov tepla.
4. CFD Simulácia - tento krok predstavuje nastavenie konvergenčných kritérií iteračného výpočtu a samotný numerický výpočet Navier-Stokesových rovníc na vyšetrovanej oblasti s danými okrajovými podmienkami a s daným nastavením parametrov fyzikálnych modelov a pre daný turbulentný model.
5. Dosahtnuté výsledky - tento krok predstavuje grafické zobrazenie analyzovaných fyzikálnych veličín, ako sú najmä rýchlosti, teploty, tepelné toky a pod., ako aj ich zhodnotenie.

Pri CFD simuláciách sú veľmi dôležité dva pojmy, ktoré definujú kvalitatívne posúdenie výpočtových CFD modelov:

- Validácia - cieľom validácie je posúdiť zvolené modely na základe porovnania s nezávislým fyzikálnym experimentom, validácia nám má dať odpoveď pri porovnaní s experimentom, či riešime správne rovnice, t.j. či model zachytáva všetky potrebné fyzikálne javy, ktoré v realite daný experiment vykazuje,
- Verifikácia - cieľom verifikácie je posúdiť zvolené modely na základe porovnania s rôznymi inými matematickými modelmi daného deja resp. s iným spôsobom riešenia toho istého deja, verifikácia nám dá odpoveď na otázku, či riešime rovnice správne, t.j. či model dané matematické rovnice rieši správne.

4 Termohydraulické analýzy

Publikované termohydraulické analýzy možno rozdeliť podľa skúmanej oblasti do nasledovných častí:

- sub-model palivového zväzku:
 - parametrická štúdia vplyvu kvality siete,
 - štúdia vplyvu turbulentných modelov.
- palivová kazeta:
 - validácia a verifikácia,
 - vplyv polohy ochrannej mriežky,
 - vplyv prúdenia chladiva v centrálnej rúrke,
 - vplyv prúdenia chladiva cez bypass,
 - vplyv výkonu PK,
 - vplyv množstva a teploty chladiva vstupujúceho do PK.
- palivová kazeta a jej blízke okolie:
 - zmena výkonu periférnych PK,
 - zmena výkonu zostavy PK.

V rámci dizertačnej práce bol vytvorený presný 3D geometrický model palivovej kazety, ktorý slúžil ako základ pri tvorbe uvedených CFD modelov.

4.1 Analýzy sub-modelu palivového zväzku

Cieľ analýz sub-modelu palivového zväzku bol efektívne určiť vhodné parametre siete pre diskretizáciu celej oblasti palivovej kazety a vhodný turbulentný model pre termohydraulické analýzy palivovej kazety.

V rámci analýz boli sledované 4 typy siete (220-710tis. elementov) a 4 turbulentné modely (BSL, k- ϵ , SSG, SST). Výpočet bol realizovaný na lokálnom výpočtovom stroji, kde na výpočet bolo potrebných 6 CPU, 0,6-2GB RAM a zhruba 10-20min. výpočtu v závislosti od typu siete, turbulentného modelu a konvergenencie výpočtu. V tejto časti bolo riešených 16 analýz.

Okrajové podmienky:

- Hybnosť = $8100 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-2}$.
- Referenčný tlak = 12,22 MPa,
- Teplota = 280°C (isothermal),
- Turbulentný model : BSL, k- ϵ , SSG, SST.

Vo všetkých analýzach boli sledované hodnoty Re (turbulentnosť), y^+ (kvalita siete), stredná a maximálna rýchlosť prúdenia v kanále.

Na základe porovnávania výsledkov z analýz, rešerše a dostupnej literatúry [5],[6],[7] bol ako referenčný turbulentný model zvolený turbulentný model SST.

Výsledkom z tejto časti analýz sú optimálne parametre siete a vhodný turbulentný model, ktoré zabezpečia korektné modelovanie prúdenia v sledovanej oblasti, v palivovej kazete. Využitím zvolených parametrov siete bolo možné vysietovať celú oblasť palivovej kazety, kde celkový počet elementov dosiahol hodnotu cca. 65mil. elementov a cca. 70mil. uzlových bodov. Je treba zdôrazniť, že takto vytvorená sieť neobsahuje takmer žiadne zjednodušenia, ktoré by mohli ovplyvniť tok chladiva.

4.2 Analýzy palivovej kazety

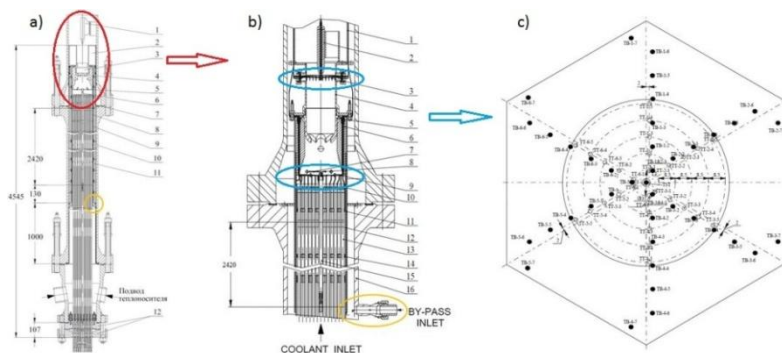
Táto časť analýz sa venuje termohydraulike jednej palivovej kazety a možno ju rozdeliť na dve pod-časti, ktoré sa zaoberajú validáciou a verifikáciou vytvoreného CFD modelu na základe experimentu a na parametrické štúdie možných vplyvov na neurčitost' merania teploty chladiva na výstupe z PK termočlánkom.

Jednotlivé analýzy boli riešené na výpočtovom clustry HPC STUBA [8]. Na výpočet bolo použitých 96 CPU a samotný výpočet potreboval 170GB pamäte RAM. Celkový výpočtový čas potrebný pre výpočet CFD modelu zostavy PK jednej analýzy v závislosti od okrajových podmienok a konvergencie výpočtu sa pohyboval v rozmedzí 20 až 40 hodín

4.2.1 Validácia a verifikácia

Cieľ tejto kapitoly je verifikovať a validovať vytvorený CFD model, preukázať korektnosť použitého CFD kódu, jeho použiteľnosť pre termohydraulické analýzy zvoleného modelu a korektnosť výsledkov, ktoré môžu byť považované za dôveryhodné v rámci zvolených okrajových podmienok výpočtov.

Základ verifikácie CFD kódu spočíva v identifikovaní a kvantifikovaní chýb matematického opisu fyzikálnych dejov, jeho riešenia a ich vplyv na výsledky. Vierohodnosť kódu sa skúma porovnávaním výsledkov s veľmi presnými analytickými a numerickými riešeniami. (tzv. benchmarkové úlohy). Nakoľko je použitý výpočtový CFD kód ANSYS CFX komerčný a neustále podlieha verifikácií možno ho na základe verifikačného manuálu [9] považovať za verifikovaný. Navyiac analýzy ktoré boli realizované v rámci kapitoly 1 môžeme považovať za súčasť procesu verifikácie. Cieľ validácie je posúdiť ako presne výsledky použitého numerického kódu korelujú s experimentálnymi údajmi. V rámci validácie numerického modelu sú okrem prevádzkových údajov veľmi dôležité merania na experimentálnych zariadeniach. Práve takéto experimentálne zariadenie na meranie termohydraulických parametrov PK je zostrojené v Kurčatovom inštitúte [10]. Zostavený skúšobný stand pozostáva z fyzikálneho modelu PK, kde klasické palivové prútky boli nahradené elektrickými odporovými prútkami. Súčasťou experimentálnej PK je aj dodatočná obálka okolo šesťhrannej obálky PK, ktorej cieľom je umožniť prúdenie chladiva v medzikazetovom priestore, jeho ohriatie od obálky PK a vstup tohto chladiva cez 12 otvorov vo vrchnej časti obálky PK priamo do PK tak, ako je to v realnej PK počas prevádzky v JR, tzv. medzikazetové prúdenie – bypass, vid'. Obr. 4.1-b.

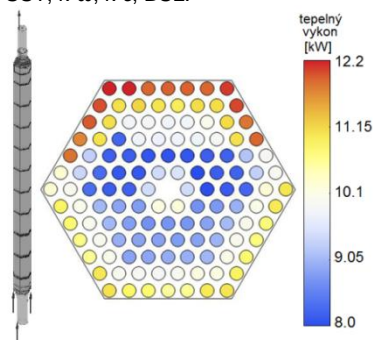


Obr. 4.1 Fyzikálny model palivovej kazety s naznačenými polohami termočlánkov [42]

Samotný fyzikálny model PK je určený hlavne na skúmanie homogenizácie teploty chladiva v hornej časti PK v závislosti od okrajových podmienok a z tohto dôvodu sa mierne odlišuje od reálnej PK a to v spodnej časti, kde nie je ukončenie PK realizované pätkou. Vo vrchnej časti, kde v rovine štandardného termočlánku, ktorý býva umiestnený v oblasti výstupu chladiva z PK vo fixátore BOR, je oproti reálnej PK umiestnených ďalších 30 termočlánkov. Takisto v rovine ukončenia palivových prútokov je umiestnených experimentálnych 39 termočlánkov a jeden doplnkový termočlánok je umiestnený aj v oblasti výstupu chladiva z centrálnej rúrky vid'. Obr. 4.1-b,c.

Na realizáciu validačných výpočtov PK bol z ruského experimentu použitý stav, ktorý je definovaný týmito parametrami [10]:

- Hmotnostný tok chladiva na vstupe: 10,88 kg/s,
- Teplota chladiva na vstupe: 195,6 °C,
- Tlak chladiva na výstupe: 9,16 MPa,
- Hmotnostný tok chladiva cez bypass: 0,52 kg/s,
- Teplota chladiva na vstupe do bypassu: 195,6 °C,
- Celkový tepelný výkon v prútokoch: 1242 kW,
- Tepelný výkon na každom prútku predpísaný individuálne (Obr. 4.2),
- Turbulentné modely: SST, k- ω , k- ϵ , BSL.

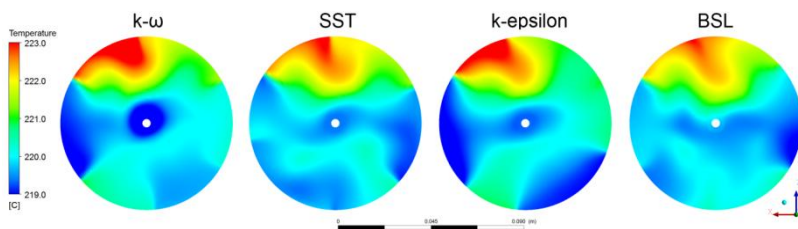


Obr. 4.2 Okrajové podmienky (vľavo) a predpísaný tepelný výkon definovaný na základe ruského experimentu pre jednotlivé prútky (vpravo)

Číselné porovnanie dosiahnutých teplôt v chladive z experimentálnych meraní a pomocou CFD simulácie pri použití rôznych turbulentných modelov je zobrazené v Tab. 4.1. V prípade CFD simulácií boli teploty chladiva na výstupe z PK a z centrálnej rúrky brané ako váhované priemerné teploty chladiva cez prierezovú plochu a teplota termočlánku bola priemerná teplota na vnútornej ploche puzdra termočlánku.

Tab. 4.1 Monitorované body experimentu a simulácie

		výstup z PK [°C]	termočlánok [°C]	centrálna rúrka [°C]
experiment		220,00	219,70	207,20
turbulentné modely	SST	220,37	219,81	207,63
	k- ω	220,38	219,04	207,39
	BSL	220,37	220,12	207,08
	k- ϵ	220,38	219,74	207,90



Obr. 4.3 Rozloženie teplotného poľa v rovine štandardného termočlánku pre použité turbulentné modely

Porovnaním rozloženia teplotného poľa v rovine štandardného termočlánku pre jednotlivé turbulentné modely je možné stanoviť, že turbulentné modely SST a BSL modely poskytujú kvalitatívne podobné výsledky, výsledky získané využitím modelu k- ω sa k predchádzajúcim dvom blížia a výsledky získané použitím turbulentného modelu k- ϵ majú relatívne odlišný charakter. Vo všetkých štyroch analýzach dosiahla nehomogenita teploty chladiva na výstupe, teda rozdiel maximálnej a minimálnej teploty chladiva 4 °C.

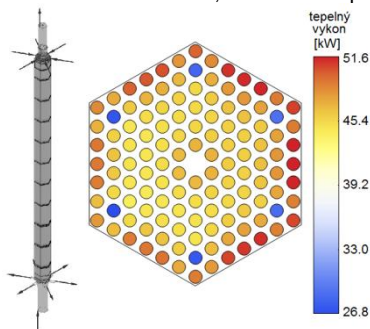
Na základe doterajších analýz je možné použiť CFD model PK považovať za verifikovaný aj validovaný a je možné ho použiť na ďalšie simulácie. Pre ďalšie analýzy bol ako najvhodnejší zvolený turbulentný model SST.

4.2.2 Vplyvové analýzy

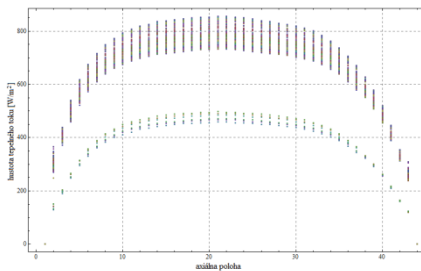
Hlavný cieľ vplyvových termohydraulických analýz je kvantifikovať mieru vplyvu jednotlivých možných faktorov, ktoré môžu spôsobovať nekorektné meranie teploty chladiva na výstupe z PK v dôsledku nedokonalnej teplotnej homogenizácie chladiva v PK. V rámci autoreferátu budú uvedené len výsledky z parametrickej štúdie vplyvu bypassu. Ostatným uvedeným analýzám (viď kapitola 4) sa podrobne venuje samostatná dizertačná práca.

Parametrická štúdia vplyvu rôzneho hmotnostného toku cez bypass bola realizovaná pri nasledovných okrajových a výkonových podmienkach:

- Vstupná teplota chladiva: 268 °C,
- Vstupný hmotnostný tok chladiva: 24,37 kg/s,
- Tlak na výstupe z PK: 12,25 MPa,
- Výkon PK je na základe meraných dát z 2. bloku EMO z dňa 20.1.2012 a je platný PK 08-45 (Obr. 4.4, Obr. 4.5),
- Výkon definovaný pre každý prútik samostatne v 42 axiálnych pozíciách (Obr. 4.5)
- Celkový tepelný výkon: 5,77 MW (veľmi výkonná PK),
- Teplota bypassu na vstupe do PK (hlavica) sa uvažuje na úrovni 278 °C (t.j. vstupná teplota do PK + 10 °C),
- Hmotnostný tok chladiva cez bypass sa uvažuje zvlášť v pätke a zvlášť v hlavici PK:
 - pätká PK: hmotnostný tok chladiva, ktoré odchádza z PK do medzikazetového priestoru cez 12 otvorov v spodnej časti obalovej rúry sa pohybuje v rozmedzí od 0% až po hodnotu 4% (z celkového vstupného hmotnostného toku do PK),
 - hlavica PK: hmotnostný tok chladiva, ktoré sa vracia do PK z medzikazetového priestoru cez 12 otvorov vo vrchnej časti obalovej rúry sa pohybuje v rozmedzí od 0% po hodnotu 5% (z celkového vstupného hmotnostného toku do PK), t.j. sú uvažované prípady, kedy do PK sa z medzikazetového priestoru vracia menej chladiva, rovnaké množstvo chladiva a viac chladiva, ako do tohto priestoru odchádzalo cez otvory v pätke PK.



Obr. 4.4 Radiálne rozloženie výkonu v palivových prútikoch

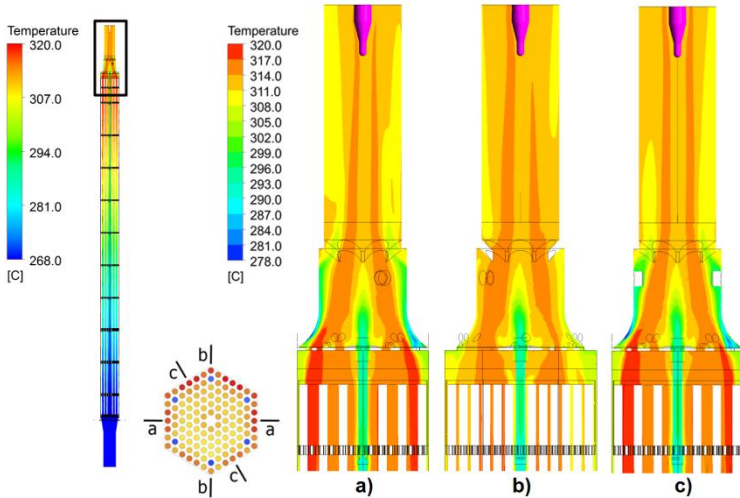


Obr. 4.5 Axiálny výkon palivových prútkov v definovaných polohách

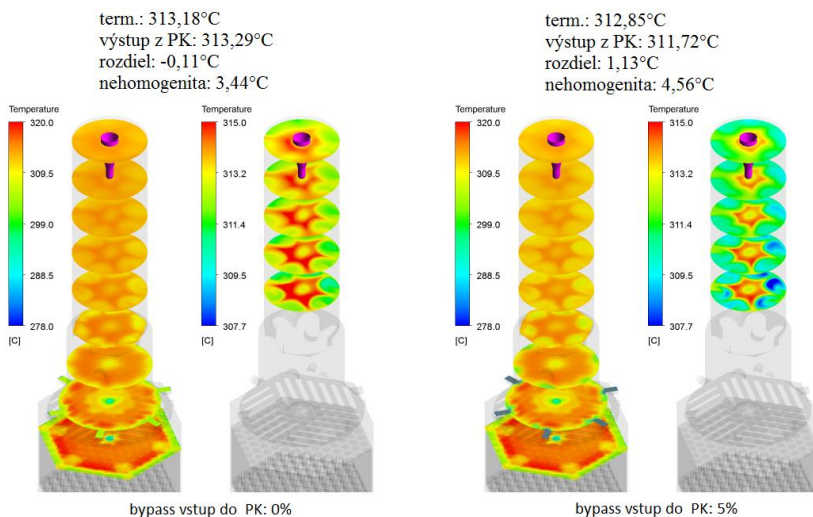
Dosiahnuté výsledky sú zobrazené v Tab. 4.2. Detailné zobrazenie teplotného poľa v okolí ochrannéj mriežky a fixačnej časti BOR-u na Obr. 4.6 je zobrazené pomocou kontúrového zobrazenia (ostrá hranica medzi jednotlivými farbami teplotnej škály) a to z dôvodu, aby bolo možné lepšie pozorovať charakter teplotného poľa v chladive. Detailné zobrazenie teplotného poľa (Obr. 4.6 – a, b, c) je zobrazené v troch rôznych rezových rovinách, pričom rozdiel medzi rezom a a c je v tom, že rez c je vedený cez manipulačné kolíky. Hlavný horúci prúd chladiva, ktorý vychádza z medziprútkového priestoru, je tlačný prúdom chladiva z medzikazetového priestoru cez vrchné otvory v obalovej rúre do stredu kanála záchytnéj časti BOR, čo spôsobí zvýšenie teploty meranej termočlánkom voči strednej váhovanej teplote chladiva na výstupe z PK. Tento efekt je veľmi dobre pozorovateľný na Obr. 4.7, ktorý porovnáva teplotnú homogenizáciu chladiva v výstupnej časti PK v dvoch prípadoch, kedy sa uvažuje bez prúdenia chladiva z bypassu do hlavice PK a s hmotnostným tokom bypassu 5%.

Tab. 4.2 Závislosť strednej teploty na výstupe a termočlánku od parametrov bypassu

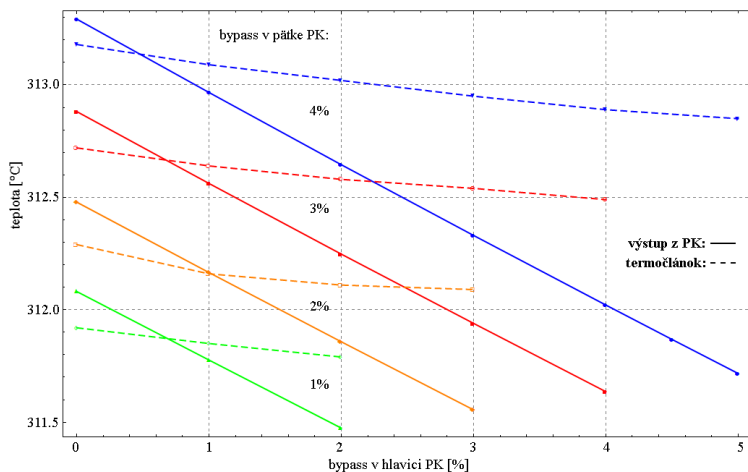
č.	hmotnostný tok cez bypass [%]		Stredná teplota [°C]		rozdiel termočlánok – chladiivo [°C]	Ohrev chladiiva v PK [°C]	tlakové straty v PK [kPa]
	pätká	hlavica	term.	výstup z PK			
1	0	0	311,57	311,69	-0,12	43,69	64,46
2	1	0	311,97	312,08	-0,11	44,08	62,74
3	1	1	311,85	311,78	0,07	43,78	63,67
4	1	2	311,79	311,47	0,32	43,47	64,26
5	2	0	312,29	312,48	-0,19	44,48	61,80
6	2	1	312,16	312,17	-0,01	44,17	62,35
7	2	2	312,11	311,86	0,25	43,86	62,95
8	2	3	312,09	311,56	0,53	43,56	63,51
9	3	0	312,72	312,88	-0,14	44,88	60,50
10	3	1	312,64	312,56	0,08	44,56	61,08
11	3	2	312,58	312,25	0,33	44,25	61,68
12	3	3	312,54	311,94	0,60	43,94	62,23
13	3	4	312,49	311,64	0,85	43,64	62,79
14	4	0	313,18	313,29	-0,11	45,29	59,26
15	4	1	313,09	312,97	0,12	44,97	59,72
16	4	2	313,02	312,65	0,37	44,65	60,32
17	4	3	312,95	312,33	0,61	44,33	60,91
18	4	4	312,89	312,02	0,87	44,02	61,49
19	4	5	312,85	311,72	1,13	43,72	62,12



Obr. 4.6 Rozloženie teplotného poľa v chladive: teplotné pole chladiiva v celej PK - vľavo, teplotné pole v chladiive vo výstupnej časti PK v troch rôznych rezových rovinách – vpravo



Obr. 4.7 Porovnanie teplotnej homogenizácie v chladiva vo výstupnej časti palivovej kazety v dôsledku vplyvu prúdenie chladiva z by-passu v dvoch rôznych teplotných mierkach pri uvažovaní 4% by-passu v päťke



Obr. 4.8 Závislosť teploty chladiva na výstupe z palivovej kazety a termočlánku od parametrov by-passu

Z pohľadu na Obr. 4.8 Závislosť teploty chladiva na výstupe z palivovej kazety a termočlánku od parametrov by-passu je zrejme, že funkcia teploty chladiva na výstupe z PK je lineárne závislá od zmeny hmotnostného toku by-passu vstupujúceho do hornej časti PK. Veľmi podobne sa správa aj teplota na termočlánku. Smernica funkcie teploty termočlánku od vstupujúceho hmotnostného toku by-passu do PK je výrazne menšia. Tento efekt je spôsobený vplyvom zvyšujúceho sa hmotnostného

toku bypassu na vstupe do PK stláčaním horúceho toku chladiva smerom k oši termočlánku, čím je zaznamenaný aj menší pokles teploty na termočlánku. Tento efekt je navyše ovplyvnený aj kovovým puzdrom v ktorom je samotný termočlánok osadený. Kovové puzdro sa v tomto prípade správa ako tepelná kapacita. Je nutné poznamenať, že správanie sa teploty chladiva na výstupe a teploty na termočlánku sa pri iných okrajových podmienkach parametrov bypassu môžu mierne odlišovať.

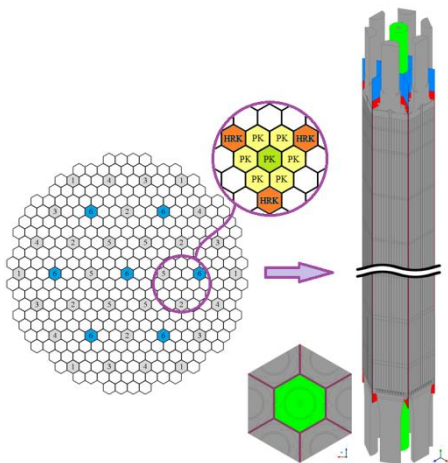
Z prezentovaných výsledkov parametrickej analýzy vplyvu bypassu vyplýva, že teplota termočlánku a teplota chladiva na výstupe z PK sa môžu navzájom líšiť. Pri určitých konfiguráciách bypassu, môže byť teplota termočlánku väčšia (napr. analýza č. 19), menšia (napr. analýza č. 5) alebo prakticky identická (analýza č. 6) v porovnaní so strednou teplotou chladiva na výstupe z PK. Je nutné uviesť, že toto správanie je odvodené pre analyzovaný výkonový stav PK s predpísaným rozložením tepelného výkonu v jednotlivých prútoch a pre inú výkonovú distribúciu môže mať iný priebeh. Z dosiahnutých výsledkov vyplýva, že stredná výstupná teplota chladiva je lineárne závislá na hmotnostnom toku chladiva, ktoré prúdi do PK v hlavici z medzikazetového priestoru pri všetkých uvažovaných hmotnostných tokoch chladiva, ktoré prúdi z PK v pätky do medzikazetového priestoru. Vplyv prúdenia chladiva cez bypass sa prejaví aj na tlakových stratách v PK a to ich znížením (viď Tab. 4.2) v závislosti od hmotnostného toku na vstupe a výstupe z bypassu.

Najdôležitejší záver z vplyvových analýz, ktoré sú publikované v dizertačnej práci je preukázaná nedokonalá homogenizácia chladiva vo výstupnej časti PK, ktorá za sa za určitých podmienok môže pomerne výrazne prejavíť ako rozdiel teploty chladiva meranej termočlánkom voči strednej teplote chladiva na výstupe z PK. Tieto rozdiely môžu za určitých prevádzkových ale najmä havarijných stavoch predstavovať riziko bezpečnosti jadrového reaktora.

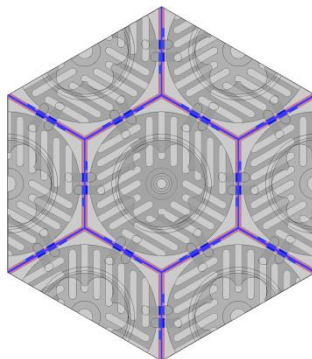
4.3 Analýzy palivovej kazety a jej okolia

Z doterajších uvedených analýz je zrejmé, že vplyvy spôsobujúce rozdiel teploty chladiva meranej termočlánkom voči strednej váhovanej teplote chladiva na výstupe z PK sú závislé od vstupných parametrov chladiva do PK a od samotného tepelného výkonu PK. Hlavný problém nastáva pri ich kvantifikácii, najmä pri parametroch bypass-u ako sú hmotnostné toky na vstupe a výstupe a teploty bypass-u na vstupe do hornej časti PK. Množstvo prúdiaceho chladiva v medzikazetovom priestore teda bypass a jeho spätné prerozdelenie pri vstupe do hornej časti PK je definované tlakovými pomermi jednotlivých PK v závislosti od tepelného výkonu. Nakoľko v prevádzkových podmienkach susedné PK spravidla majú rozdielny tepelný výkon je nereálne dostatočne presne len na základe vnútro reaktorových meraní vyčíslíť parametre bypassu pre jednotlivé PK a tak určiť mieru nepresnosti merania na základe vplyvu samotného bypass-u.

Na základe uvedeného problému bolo potrebné vytvoriť rozšírený model PK o jej blízke okolie tvorené šiestimi polovičnými PK a o medzikazetový priestor medzi nimi, viď Obr. 4.9 a Obr. 4.10. Takýmto modelom bude možné dostatočne presne určiť parametre bypass-u sledovanej centrálnej kazety na základe vstupných parametrov chladiva a výkonu jednotlivých PK v zostave.



Obr. 4.9 Poloha centrálnej palivovej kazety voči havarijnej a regulačnej kazete - v ľavo a model chladiča zostavy palivových kaziet - v pravo



Obr. 4.10 Pohľad na zostavu z hora zobrazujúci orientáciu ochranných mriežok a medzikazetový priestor

Aby bolo možné takto rozsiahlu a najmä komplexnú oblasť diskretizovať, bolo nutné pristúpiť, k určitým zjednodušeniam v oblasti periférnych PK. Konkrétne boli dištančné mriežky nahradené poróznym materiálom, ktorý po korektnom definovaní materiálových vlastností numericky simuluje zmenu rýchlostí prúdenia a tlakové straty v zvolených oblastiach.

Použitím uvedených zjednodušení bolo možné vytvoriť sieť, ktorá sa skladá z cca 126mil. elementov a cca. 132mil. uzlových bodov. Jednotlivé analýzy boli riešené na výpočtovom clustry HPC STUBA [8]. Na výpočet bolo použitých 96 CPU a samotný výpočet potreboval 230GB pamäte RAM. Celkový výpočtový čas potrebný pre výpočet CFD modelu zostavy PK jednej analýzy v závislosti od okrajových podmienok a konvergenie výpočtu trval viac ako 100 hodín.

V rámci termohydraulických analýz PK a jej okolia sa riešili dva typy analýz:

- Parametrická štúdia zmeny výkonu periférnych PK (ďalej v tejto kapitole označované ako pPK) v rozsahu 70-110% z centrálnej PK (ďalej v tejto kapitole označované ako cPK),
- Parametrická štúdia zmeny výkonu zostavy PK v rozsahu 40, 70, 100 a 110% z definovaného výkonu.

Pri nasledovných okrajových podmienkach:

- Vstupná teplota chladiča: 268 °C,
- Vstupný hmotnostný tok chladiča do centrálnej PK: 24,37 kg/s,
- Vstupný hmotnostný tok chladiča do jednotlivých periférnych PK: 12,185 kg/s (1/2 z centrálnej PK),
- Tlak na výstupe z PK: 12,25 MPa,
- Výkon centrálnej PK je definovaný na základe kapitoly 4.2.2,
- Výkony periférnych PK definovaný symetricky po 1/6 periférnej PK.

Dosiahnuté výsledky z oboch typov analýz sú zobrazené v Tab. 4.3 a Tab. 4.4.

Tab. 4.3 Výsledky parametrickej štúdie zmeny výkonu periférnych palivových kaziet

tepelný výkon pPK [%]		70	80	90	100	110	
tepelný výkon pPK [MW]		4,04	4,62	5,19	5,77	6,35	
teplota chladiva [°C]	výstup z cPK	312,04	311,99	311,94	311,91	311,88	
	max. na výstupe z cPK	314,62	314,59	314,57	314,56	314,54	
	min. na výstupe z cPK	309,63	309,63	309,65	309,65	309,68	
	termočlánok cPK	313,62	313,55	313,50	313,41	313,39	
	výstup z pPK	299,18	303,29	307,29	311,55	314,95	
	bypass na vstupe do cPK	19,82	20,47	21,24	22,08	22,61	
	výstup z CR cPK	294,55	294,47	294,44	294,39	294,37	
tlakové straty [kPa]	v cPK	59,34	59,61	59,95	60,61	60,92	
	v pPK	57,90	58,80	59,30	59,93	60,46	
hmotnostný tok chladiva [kg/s]	výstup z cPK	23,925	23,998	24,061	24,145	24,230	
	výstup z pPK	12,258	12,247	12,236	12,223	12,208	
	bypass	vstup do cPK	0,792	0,822	0,834	0,864	0,900
		vstup do pPK	1,044	1,038	1,032	1,020	1,002
		výstup z cPK	1,236	1,194	1,146	1,092	1,038
		výstup z pPK	0,746	0,858	0,870	0,894	0,918
	výstup z CR cPK	0,230	0,231	0,231	0,232	0,233	

Tab. 4.4 Výsledky parametrickej štúdie zmeny výkonu zostavy palivových kaziet

tepelný výkon jednotlivých PK [%]		40	70	100	110	
tepelný výkon jednotlivých PK [MW]		2,31	4,04	5,77	6,35	
teplota chladiva [°C]	výstup z cPK	286,57	299,60	311,91	315,44	
	max. na výstupe z cPK	287,73	301,52	314,56	318,15	
	min. na výstupe z cPK	285,54	297,91	309,65	312,93	
	termočlánok cPK	287,30	300,80	313,41	317,26	
	výstup z pPK	286,49	299,57	311,55	315,51	
	bypass na vstupe do cPK	9,20	15,73	22,08	23,74	
	výstup z CR cPK	278,95	286,83	294,39	296,85	
tlakové straty [kPa]	v cPK	56,79	58,65	60,61	61,26	
	v pPK	55,99	57,88	59,93	60,58	
hmotnostný tok chladiva [kg/s]	výstup z cPK	24,135	24,132	24,145	24,141	
	výstup z pPK	12,224	12,225	12,223	12,225	
	bypass	vstup do cPK	0,856	0,861	0,866	0,868
		vstup do pPK	0,993	1,002	1,021	1,031
		výstup z cPK	1,108	1,099	1,091	1,088
		výstup z pPK	0,874	0,883	0,895	0,899
	výstup z CR cPK	0,228	0,229	0,232	0,233	

Na základe prvej časti analýz je možné konštatovať, že teplotný charakter prúdenia chladiva cez hornú časť cPK sa v závislosti od zmeny výkonu pPK takmer nemení. Menia sa hlavne tlakové pomery ovplyvňujúce hmotnostné toky chladiva v PK, ktoré ovplyvňujú ohrev chladiva prúdiaceho cez oblasť palivových prútkov a medzikazetového priestoru. Tieto zmeny sa však kompenzujú v hornej časti cPK, kde dochádza k homogenizácii chladiva z oblasti PP a bypassu. Teplotný charakter chladiva v záchytnej časti BOR sa pri zmene výkonu pPK takmer nemení. Vďaka tomuto rozdiel teploty chladiva registrovanej termočlánkom cPK voči váhovanej strednej teplote chladiva na výstupe z cPK zostal pri zmene výkonu pPK takmer nezmenený.

Druhá časť analýz ukazuje, že teplotné rozloženie chladiva v hornej časti cPK sa v závislosti od zmeny výkonu PK takmer nemení. Hlavný horúci prúd chladiva z oblasti palivových prútkov cPK je vytláčaný do stredu záchytnej časti BOR chladnejším chladivom z medzikazetového priestoru, čo môže spôsobovať zvýšenú teplotu termočlánku cPK. Pri rovnakej zmene výkonu jednotlivých PK nedochádza k zmenám v hmotnostných prietokoch chladiva cez jednotlivé PK ani cez medzikazetový priestor, pretože prípadný rozdiel tlakových strát vďaka rovnakej geometrii zostáva nezmenený. V maximálnej výkonovej konfigurácii, kedy bol pre každú PK definovaný tepelný výkon takmer 6,35MW dosiahol ohrev chladiva v medzikazetovom priestore teplotu 23,74°C. Rozdiel hmotnostného toku bypassu na výstupe a vstupe do cPK bol minimálny a jeho stredná hodnota dosiahla 4% z hmotnostného toku chladiva na vstupe do cPK teda 0,98 kg/s.

Ďalší veľmi dôležitý poznatok z tejto časti analýz sú parametre bypassu cPK, ako ohrev chladiva, ktorý sa pohyboval v rozmedzí od 19,8°C do 23,7°C a hmotnostné toky chladiva, ktoré sa pohybovali v rozmedzí cca. na výstupe 4-5% a na vstupe 3-4% z celkového hmotnostného toku chladiva na vstupe do cPK.

5 Prínosy dizertačnej práce pre prax

Predkladaná dizertačná práca komplexne hodnotí termohydrauliku palivovej kazety použitej v jadrovom reaktore VVER 440/213. Výsledky termohydraulických analýz palivovej kazety možno rozdeliť nasledovne:

- Vplyvové termohydraulické analýzy samostatnej palivovej kazety:
 - vplyv polohy ochrannnej mriežky,
 - parametrická štúdia vplyvu bypassu,
 - parametrická štúdia vplyvu výkonu,
 - parametrická štúdia vplyvu zmeny hmotnostného toku.
- Termohydraulické analýzy palivovej kazety a jej blízkeho okolia:
 - zmena výkonu periférnych palivových kaziet,
 - zmena výkonu zostavy palivových kaziet.

Vytvorený CFD model palivovej kazety, CFD model palivovej kazety a jej blízkeho okolia a výsledky analýz je možné využiť nielen v akademickej sfére, ale aj v praxi. Z praktického pohľadu je možné vytvorené modely a dosiahnuté výsledky v určitej forme využiť:

- V procese prevádzky jadrového reaktora VVER 440,
- V procese návrhu profilácie palivových kaziet,
- Pri návrhu a realizácii experimentálneho standu palivovej kazety.

Proces prevádzky jadrového reaktora: vytvorené modely a získané výsledky môžu slúžiť ako podporný materiál pri analyzovaní možnosti zvýšenia výkonu na prevádzkovaných blokoch. Tieto modely spolu s modelmi, ktoré sú schopné zachytiť krízu varu a spolu s výsledkami z experimentálnych meraní sú schopné pri zachovaní požadovanej miery bezpečnosti stanoviť limitné prevádzkové parametre.

Proces návrhu profilácie palivových kaziet: pri návrhu profilácie jadrového paliva v palivových kazetách je možné tieto modely v súčinnosti s neutronickými modelmi využiť na stanovenie vplyvu vyhorenia jadrového paliva na zmenu teplotného profilu chladiva v palivovej kazete, čo je možné spätne využiť v procese návrhu profilácie jadrového paliva.

Návrh a realizácia experimentálneho standu palivovej kazety: vytvorené CFD modely môžu slúžiť ako zdroj informácií pre korektné umiestnenie snímačov (termočlánky, tlakové snímače) v rámci meraní na experimentálnych slučkách. Rozšírený model palivovej kazety a jej blízkeho okolia môže tiež slúžiť ako podnet a zdroj informácií k návrhu a realizácii experimentálneho zariadenia, ktoré by zahŕňalo zostavu palivových kaziet spolu s medzikazetovým priestorom. Pomocou takéhoto standu by bolo možné sledovať termohydraulické pomery v centrálnej palivovej kazete v závislosti od rôzneho výkonu okolitých palivových kaziet.

Záver

Problematika odvodu tepla z aktívnej zóny jadrového reaktora je neoddeliteľnou súčasťou dlhodobej a bezpečnej prevádzky jadrovej elektrárne, či sa jedná o režimy normálnej prevádzky alebo o havarijne režimy. V prípade jadrovej elektrárne s tlakovodným jadrovým reaktorom typu VVER 440 je dôležité, aby počas normálnej prevádzky nedošlo k strate odvodu tepla z aktívnej zóny, čo by mohlo viesť k odstaveniu jadrového reaktora alebo až k jeho havárii. Pri dostatočnom hmotnostnom toku chladiva cez jednotlivé palivové kazety by takáto situácia nemala nastať. V prípade, že by došlo k zníženiu hmotnostného toku cez jednotlivé palivové kazety, alebo k úplnému zamedzeniu prietoku, mohlo by dôjsť k prehriatiu palivových prútikov, prípadne až k roztaveniu pokrytia a úniku štiepneho materiálu do primárneho okruhu. Aby sa zamedzilo takýmto javom počas prevádzky, je nutné neustále meranie teploty chladiva na výstupe z jednotlivých palivových kaziet. Meranie teploty chladiva na výstupe z palivových kaziet by malo byť čo najpresnejšie, čo napriek nedokonalému teplotnému premiešavaniu chladiva v hornej časti palivovej kazety môže spôsobovať určité nepresnosti merania nakoľko je teplota chladiva na výstupe z palivovej kazety meraná jediným termočlánkom umiestneným v oceleovom puzdre. Najmä v súčasnej dobe, kedy prebieha modernizácia blokov, teda zvyšovanie projektovaného tepelného výkonu a predlžovanie životnosti blokov je dôležitou úlohou stanoviť neurčitosti merania teploty chladiva na výstupe z palivové kazety termočlánkom.

Komplexnou analýzou súčasného stavu problematiky termohydrauliky jadrového reaktora VVER 440 s dôrazom na palivové kazety sa zistilo, že aj napriek pomerne veľkému počtu publikovaných analýz v tejto oblasti autori využívajú len čiastočné modely palivové kazety, alebo veľmi zjednodušené modely palivovej kazety. Je teda zrejmé, že v súčasnosti absentujú termohydraulické analýzy zaoberajúce sa kompletnou palivovou kazetou prípadne palivovou kazetou a jej okolím.

Predkladaná dizertačná práca sa preto zaoberá termohydraulickými analýzami komplexnej palivovej kazety jadrového reaktora VVER 440 a jej okolia. Výsledky práce možno rozdeliť nasledovne:

- Vytvorenie geometrického modelu zostavy palivovej kazety a jej okolia,
- Diskretizácia skúmanej oblasti,
- Validácia a verifikácia vytvorených CFD modelov,
- Termohydraulické analýzy palivovej kazety a jej okolia.

V prvej časti predkladanej práce boli na základe detailnej technickej dokumentácie vytvorené všetky konštrukčné časti palivovej kazety a záchytná časť bloku ochranných rúr, ktoré následným spojením tvoria presnú 3D geometriu palivovej kazety. Na základe tejto geometrie bol vytvorený tzv. negatív, nový geometrický model, ktorý predstavuje chladivo prúdiace cez palivovú kazetu. Vytvorený geometrický model palivovej kazety môže byť takisto využitý napr. pre pevnostné alebo termomechanické analýzy, kmitanie a skúmanie vlastných frekvencií alebo skúmanie únavy a životnosti materiálu. Nasledujúca časť sa venovala diskretizácii vytvoreného modelu chladiva. V rámci tejto časti boli realizované citlivostné analýzy zamerané na sledovanie vplyvu kvality siete a turbulentných modelov na charakter prúdenia vo vybranej oblasti tzv. subkanál, ktorý predstavoval časť chladiva z oblasti palivových prútikov. Na základe výsledkov z uvedených citlivostných analýz bol diskretizovaný celý model chladiva palivovej kazety, ktorý predstavuje výpočtovú sieť CFD modelu palivovej kazety. V rámci časti práce, ktorá sa venuje validácií a verifikácií, bola preukázaná korektnosť vytvoreného CFD modelu palivovej kazety

a použitého výpočtového kódu. Ďalej bolo preukázané, že výsledky z termohydraulických analýz môžu byť považované za dôveryhodné v rámci zvolených okrajových podmienok výpočtov na základe porovnávania výsledkov z experimentálnych meraní. Posledná, hlavná časť práce sa venuje samotným termohydraulickým analýzám palivovej kazety a je členená na vplyvové termohydraulické analýzy a na termohydraulické analýzy palivovej kazety a jej okolia. Prvá časť analýz skúma vplyvy zmeny polohy ochrannej mriežky a parametrické vplyvy zmien prúdenia chladiva cez bypass, zmeny tepelného výkonu a hmotnostného toku chladiva cez palivovú kazetu na prúdenie v samostatnej palivovej kazete. Druhá časť analýz sleduje vplyv zmeny výkonu centrálnej palivovej kazety a jej blízkeho okolia na prúdenie cez centrálnu palivovú kazetu. Pre túto časť práce musel byť CFD model palivovej kazety rozšírený o jej blízke okolie, teda o medzikazetový priestor a o okolité palivové kazety.

Hlavným prínosom práce sú vytvorené dva komplexné CFD modely. Model palivovej kazety a model palivovej kazety a jej blízkeho okolia, ktoré sú schopné podľa požiadavky riešiteľa zmenou okrajových podmienok veľmi presne popísať správanie sa toku chladiva prúdiaceho cez palivovú kazetu jadrového reaktora VVER 440, čo môže veľmi pomôcť v prevádzke pri určovaní miery bezpečnosti jadrového reaktora najmä čo sa týka korektného pohľadu na meranie výstupnej teploty chladiva termočlánkom z palivovej kazety voči skutočnej strednej teplote chladiva na výstupe z palivovej kazety. V rámci uvedených analýz bola tiež preukázaná nedokonalá teplotná homogenizácia chladiva v hornej časti palivovej kazety, čo za určitých podmienok vedie ku kladným, dokonca aj k záporným rozdielom teploty chladiva meranej termočlánkom voči váhovanej strednej teplote chladiva na výstupe z palivovej kazety. Ďalší veľký prínos bolo určenie parametrov prúdenia cez bypass palivovej kazety pre zvolené výkonové konfigurácie, čo sa ukázalo ako významný vplyv určujúci veľkosť rozdielu chladiva meranej termočlánkom voči váhovanej strednej teplote chladiva na výstupe z palivovej kazety.

Použitá literatúra

- [1] World Nuclear Association. (2015, Dec.) World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements. [Online]. <http://www.world-nuclear.org/info/Facts-and-Figures/World-Nuclear-Power-Reactors-and-Uranium-Requirements/>
- [2] SEPS, "Správa o výsledkoch monitorovania bezpečnosti dodávok elektriny," Ministerstvo Hospodárstva SR, bezpečnostná správa 2015.
- [3] IAEA, "Power Reactor Information System, The Database on Nuclear Power Reactor,".
- [4] Malalasekera W. Versteeg H., *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. London, 2007.
- [5] Walter Frei. (2013) COMSOL. [Online]. <https://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>
- [6] Bedžich Heřmanský, *Termo-mechanika jaderných reaktorů*. Praha, 1986.
- [7] Attila Aszodi Sandor Toth, "Analysis of mixing processes in VVER-440 rod bundle with rans method," Budapest University of Technology and Economics, Institute of Nuclear Techniques, Budapest, SK08ST037, 2010.
- [8] HPC-Team. (2013) CVT STU.
- [9] ANSYS, Inc, "ANSYS Fluid Dynamics Verification Manual," ANSYS, Inc, Canonsburg, Verification Manual ISO 9001:2008, 2013.
- [10] D.A. Oleksyuk L.L. Kobzar, "Experiments on simulation of coolant mixing in fuel assembly head and core exit channel of VVER-440 reactor," Kurchatov Institute, Moscow, 2006.

Vybraná publikačná činnosť

Vedecké práce v ostatných zahraničných časopisoch:

- PAULECH, Juraj - **JAKUBEC, Jakub** - GOGA, Vladimír - HRABOVSKÝ, Juraj - KUTIŠ, Vladimír - SEDLÁR, Tibor. Cooling of bundled overhead power lines. In *Bulletin of Applied Mechanics*. Vol. 11(38), (2015), s. 1-3. ISSN 1801-1217.

Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch:

- **JAKUBEC, Jakub** - PAULECH, Juraj - KUTIŠ, Vladimír - MOJTO, Emil - GOGA, Vladimír. Coupled CFD-Structural Analysis of Solar Panel Parking Spot. In *Transfer inovácií [elektronický zdroj]*. Č. 28 (2013), s.online, 39-40. ISSN 1337-7094.

Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách:

- **JAKUBEC, Jakub** - KUTIŠ, Vladimír - GÁLIK, Gabriel - PAULECH, Juraj. Coolant mixing processes simulations of nuclear reactor VVER 440 fuel assembly. In *23rd SVSFEM ANSYS Users' Group Meeting and Conference 2015 [elektronický zdroj]* : 10.-12.6.2015, Hustopeče, Česká republika. 1. vyd. Brno : SVS FEM, 2015, S. 63-69. ISBN 978-80-905525-2-4. V databáze: WOS.
- **JAKUBEC, Jakub** - KUTIŠ, Vladimír - GÁLIK, Gabriel - PAULECH, Juraj. CFD model for bypass study of VVER440 fuel assembly. In *Proceedings of 24th SVSFEM ANSYS Users' Group Meeting and Conference 2016 [elektronický zdroj]* : Dolní Morava, ČR, 1. - 3. 6. 2016. 1. vyd. Brno : SVS FEM, 2016, online, S. 10-14. ISBN 978-80-905525-3-1.
- KUTIŠ, Vladimír - **JAKUBEC, Jakub** - PAULECH, Juraj - GÁLIK, Gabriel. Coolant mass flow distribution at inlet fuel assembly nozzles of nuclear reactor VVER 440. In *Proceedings of 24th SVSFEM ANSYS Users' Group Meeting and Conference 2016 [elektronický zdroj]* : Dolní Morava, ČR, 1. - 3. 6. 2016. 1. vyd. Brno : SVS FEM, 2016, online, S. 147-153. ISBN 978-80-905525-3-1.
- PAULECH, Juraj - **JAKUBEC, Jakub** - KUTIŠ, Vladimír - MOJTO, Emil. Solar Panel for Parking Spot - Coupled CFD and Structural Study. In *21st SVS FEM ANSYS Users' Group Meeting and Conference 2013 [elektronický zdroj]* : Luhačovice, Czech Republic, 12.-14.6.2013. Brno : SVS FEM, 2013, s.online, [6] s. ISBN 978-80-905525-0-0.

Abstrakty príspevkov zo zahraničných konferencií:

- **JAKUBEC, Jakub** - KUTIŠ, Vladimír - PAULECH, Juraj - GÁLIK, Gabriel. Qualitative comparison of meshing approaches in CFD analyses of fuel assembly. In *Applied Mechanics 2015 [elektronický zdroj]* : Book of abstracts. 17th international scientific conference. Kutná Hora, Czech Republic. April 13-15, 2015. Praha : Česká technika - Nakladatelství ČVUT, 2015, CD-ROM, S. 29-30. ISBN 978-80-01-05708-7.