

Ing. Slavomír BEBJAK

Autoreferát dizertačnej práce

**ANALÝZA BEZPEČNOSTI PLYNOM CHLADENÝCH REAKTOROV
IV. GENERÁCIE**

na získanie akademického titulu: philosophiae doctor, PhD.

v doktorandskom študijnom programe: jadrová energetika

študijnom odbore: elektrotechnika

Forma štúdia: externá

Miesto a dátum: Bratislava 2024

Dizertačná práca bola vypracovaná na: Slovenská technická univerzita v Bratislave
 Fakulta elektrotechniky a informatiky
 Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva
 Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Predkladateľ: Ing. Slavomír Bebjak
 Slovenská technická univerzita v Bratislave
 Fakulta elektrotechniky a informatiky
 Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva
 Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: prof. Ing. Vladimír Slugeň, DrSc.
 Slovenská technická univerzita v Bratislave
 Fakulta elektrotechniky a informatiky
 Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva
 Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: prof. Ing. Róbert Olšiak, PhD.
 Slovenská technická univerzita v Bratislave
 Strojnícka fakulta
 Ústav energetických strojov a zariadení
 Nám. Slobody 17, 812 31 Bratislava

Ing. Marta Žiaková, CSc.
 Úrad jadrového dozoru SR
 Bajkalská 1467/27, 820 07 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať na: dňa 21.08.2024 o 10:45 hod
 Slovenská technická univerzita v Bratislave
 Fakulta elektrotechniky a informatiky
 Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva
 Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava
 Miestnosť:

prof. Ing. Vladimír Kutiš, PhD.
 Dekan FEI STU

OBSAH

1	Motivácia.....	4
2	Ciele dizertačnej práce.....	4
3	Stručný prehľad súčasného stavu problematiky	5
4	Bezpečnostné analýzy demonštrátora ALLEGRO.....	8
4.1	Validácia výpočtových modelov RELAP5 a CATHARE2	8
4.2	Termohydraulický benchmark – demonštrátor ALLEGRO	9
4.3	Overenie nominálnych parametrov demonštrátora ALLEGRO na hélionej slučke STU.....	18
5	Dosiahnuté výsledky a prínosy pre rozvoj vednej disciplíny	25
6	Zoznam použitej literatúry.....	27
7	Publikačná činnosť autora	28
8	Summary.....	30

1 Motivácia

Bezpečnosť a spoľahlivosť sú základné priority vo vývoji a prevádzke všetkých jadrove energetických systémov. Aj plynom chladené reaktory (GFR) musia byť navrhnuté tak, aby počas normálnej prevádzky, ako aj pri prechodových procesoch, boli bezpečnostné limity a kritériá prijateľnosti nastavené tak, že budú predchádzať nehodám a abnormálne udalosti neprerastú do vážnych nehôd. Všetky systémy IV. generácie budú čeliť novým výzvam v otázkach bezpečnosti počas prevádzky pri vysokých teplotách, aby bol zabezpečený odvod tepla z aktívnej zóny reaktora aj v prípade abnormálnych udalostí.

Nevyhnutným krokom vo vývoji komerčného reaktora založeného na technológii GFR je zriadenie experimentálneho demonštračného reaktora na kvalifikáciu paliva a na overenie bezpečnostných systémov špecifických pre GFR. Navrhovaným demonštračným reaktorom pre referenčný koncept GIF GFR bude ALLEGRO. Je to nízkoenergetický reaktor (50 - 150 MW_t) so schopnosťou prevádzky s rôznymi konfiguráciami aktívnej zóny, počnúc MOX palivom s oceľovým pokrytím a následne keramickým palivom, pri ktorom sa bude dosahovať vyššia výstupná teplota.

Počas mojej doterajšej odbornej praxe som sa zaoberal najmä bezpečnostnými analýzami existujúcich jadrových elektrární. V posledných rokoch som sa však zapojil aj do aktivít, súvisiacich s vývojom reaktorov novej generácie, špeciálne referenčný koncept plynom chladeného reaktora GFR. V rámci medzinárodného konzorcia V4G4 Centre of Excellence je vyvíjané koordinované úsilie o získanie národných aj medzinárodných grantov na pokračovanie výskumu a vývoja v tejto oblasti.

Aj tieto skutočnosti ma viedli k rozhodnutiu venovať sa tejto problematike v rámci môjho odborného rastu a v rámci dizertačnej práce. Niekoľko ročné skúsenosti s výpočtovými kódmi a modelovaním komplexných termohydraulických systémov jadrových zariadení, aplikujem v rámci dizertačnej práce pri aktualizácii modelov demonštrátora ALLEGRO podľa najnovších dát, reflektujúcich aktuálny stav vývoja demonštrátora, a taktiež pri vývoji termohydraulického modelu experimentálnej héliovej slučky, ktorý je validovaný na základe nameraných dát počas experimentálneho programu.

2 Ciele dizertačnej práce

Hlavným cieľom dizertačnej práce je prispieť k zvýšeniu bezpečnosti plynom chladených reaktorov formou pokročilých bezpečnostných analýz. Popri analýze súčasného stavu boli ciele dizertačnej práce rozdelené do troch na seba nadväzujúcich celkov, ktoré pozostávajú z nasledovných bodov:

- Aktualizácia existujúcich modelov podľa aktuálneho stavu vývoja demonštrátora ALLEGRO
 - model pre výpočtový kód RELAP5-3D
 - model pre výpočtový kód CATHARE2
- Vytvorenie TH modelu héliovej slučky STU
 - model pre výpočtový kód RELAP5-3D
 - validácia TH modelu héliovej slučky na základe nameraných dát počas experimentov
- Rozšírenie validácie (kvalifikácie) výpočtového modelu demonštrátora ALLEGRO o dáta získané z experimentálnych meraní na héliovej slučke
 - kvalifikácia stacionárneho stavu

3 Stručný prehľad súčasného stavu problematiky

Jadrová energetika dosiahla najväčší rozmach koncom 70-tych rokov a v 80-tych rokoch 20-tého storočia, kedy bolo uvedených do prevádzky najviac jadrových reaktorov. Po tomto období sa výstavba nových jadrových reaktorov výrazne znížila, z čoho vyplýva alarmujúca skutočnosť, že v súčasnosti je 75 % prevádzkovaných reaktorov vo svete starších ako 25 rokov a viac ako polovica starších ako 30 rokov. Pri postupnom vyradovaní dosluhujúcich jadrových reaktorov vznikne potreba nahradiť ich výkony [1], [2].

Kým komerčný pohľad bol určujúci pre vývoj reaktorov GEN III, resp. GEN III+, pred reaktormi GEN IV stoja nové fyzikálne i technologické výzvy. Hlavné ciele reaktorov IV. generácie môžeme rozdeliť na štyri základné oblasti a to bezpečnosť a spoľahlivosť, fyzická ochrana a odolnosť voči šíreniu rádioaktívnych látok, ekonomickosť prevádzky a trvalo udržateľný rozvoj.

Bezpečnosť a spoľahlivosť sú vo všeobecnosti najvyššie priority pri vývoji a samotnej prevádzke jadrovoenergetických zariadení. Prevádzka jadrovoenergetických zariadení v projektoch IV. generácie disponuje veľmi nízkou pravdepodobnosťou vnútorného i vonkajšieho poškodenia. Jadrové energetické systémy štvrtej generácie sú založené na inherentnej a pasívnej bezpečnosti, fungujúcej na fyzikálnych zákonoch a vlastnostiach, teda nie na ľudských opatreniach, čím sa znižuje riziko vzniku havárie. Prvky pasívnej bezpečnosti majú za úlohu minimalizovať následky prípadnej havárie a spolu s kontajnementom zabrániť úniku štiepných produktov do okolitého prostredia [1].

Súčasný trend nárastu dopytu po elektrickej energii (priemysel, elektromobilita,...) je potrebné pokryť zdrojmi, ktoré nemajú zásadný vplyv na životné prostredie (uhlíková stopa CO₂). S nástupom neregulovaných trhov s elektrickou energiou sa musia reaktory IV. generácie prispôbiť a ponúkať okrem výroby elektrickej energie aj sekundárne produkty ako výroba vodíka, produkciu tepla na priemyselné využitie, odsolovanie morskej vody a podobne [1].

V rámci vývojovej línie reaktorov IV. generácie bolo predstavených niekoľko konceptov štiepných reaktorov, ako aj koncept fúzneho energetického reaktora. Krajiny, ktoré plánujú rozvíjať jadrovú energetiku na zabezpečenie svojich energetických potrieb a trvalo udržateľného rozvoja vytvorili koncom 20. storočia Medzinárodné Fórum Generácie IV. (GIF) a začali výskum a vývoj jadrovoenergetických systémov IV. generácie a vzájomnú spoluprácu v tejto oblasti výskumu a vývoja. Úlohou reaktorov IV. generácie je v zmysle GIF zabezpečiť výrobu elektrickej energie, keď budú súčasné jadrové elektrárne na konci projektovanej životnosti [1].

Systémy vybrané v rámci GIF sa vyznačujú vysokou energetickou účinnosťou, schopnosťou transmutácie aktinoidov (premena množivého materiálu na štiepateľný materiál), v prípade vysokoteplotných reaktorov aj na produkciu tepla pre priemysel. Tieto vlastnosti prispievajú k lepšiemu využívaniu súčasných energetických zdrojov [3].

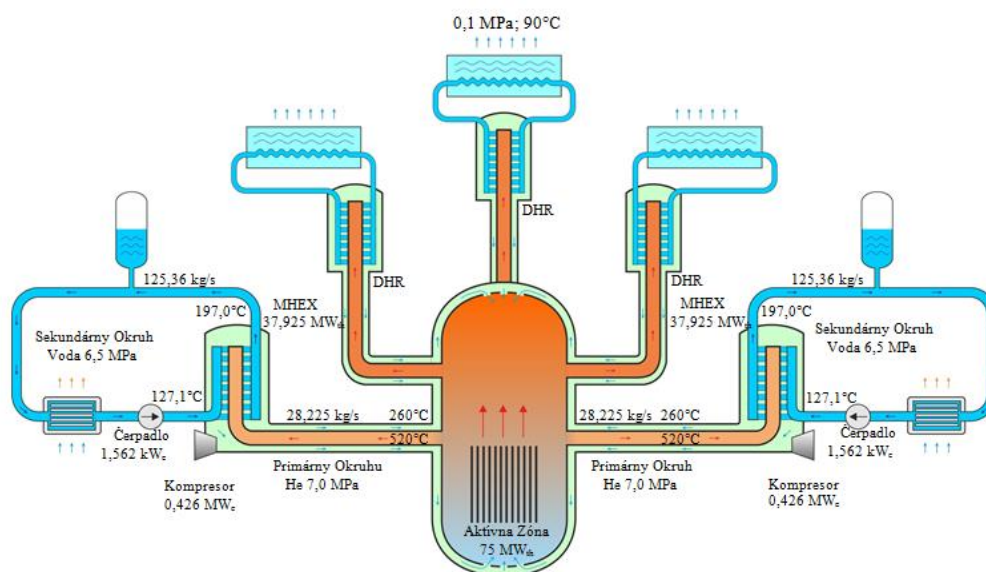
Na základe naplnenia cieľov stanovených na medzinárodnom fóre Gen IV. sa stanovilo 6 hlavných konceptov, ktoré sa plánujú ďalej rozvíjať. Stručný prehľad je v nasledovnej tabuľke [1]:

Tab. 1: Stručný prehľad vlastností jednotlivých konceptov reaktorov IV. generácie

Návrh	Spektrum neutrónov	Chladivo	Teplota chladiva na výstupe (°C)	Palivový cyklus	Elektrický výkon (MW _e)
VHTR	tepelné	hélium	900-1000	otvorený	250-300, 30-150
SFR	rýchle	sodík	550	uzavretý	300-1500, 1000-2000
SCWR	tepelné/rýchle	voda	510-625	otvorený/uzavretý	300-700, 1000-1500
GFR	rýchle	hélium	850	uzavretý	1200, 20-180
LFR	rýchle	olovo	480-800	uzavretý	300-1200, 600-1000
MSR	tepelné/nadtepelné	fluoridové soli	700-800	uzavretý	1000

Spomedzi vybraných šiestich konceptov reaktorov IV. generácie, je dizertačná práca zameraná na plynom chladený rýchly reaktor GFR a jeho demonštrátor ALLEGRO. Úlohou demonštrátora ALLEGRO je overiť technológiu hélia chladených rýchlych reaktorov a otestovať nové materiály palivových kaziet aktívnej zóny pre reaktor s tepelným výkonom 2400 MW_t, ktorý je určený na komerčnú výrobu elektrickej energie [4].

Aktuálny koncept ALLEGRO sa skladá z dvoch základných okruhov. Primárny okruh zabezpečuje prenos tepla, generovaného v aktívnej zóne reaktora do sekundárneho okruhu. Skladá sa z dvoch identických slučiek [5].



Obr. 1: Koncept demonštrátora ALLEGRO

Súčasný dizajn demonštrátora ALLEGRO je navrhovaný iba na produkciu tepla, bez premeny energie (bez produkcie elektrickej energie). Navrhovaný tepelný výkon reaktora je 75 MW_t. Teplo generované v aktívnej zóne je odvádzané z primárneho okruhu do sekundárneho okruhu prostredníctvom hlavných tepelných výmenníkov. Médium v cirkulačných slučkách je hélium. Teplota hélia na vstupe/výstupe je uvažovaná 260/530°C. Ako palivo sa uvažuje použitie MOX paliva – zmes oxidu uránu a plutónia [5].

V sekundárnom okruhu je ako chladiace médium uvažované voda. Na odvod tepla, generovaného v primárnom okruhu sú uvažované slučky, ktoré sú spojené s hlavnými tepelnými výmenníkmi [5].

Teplo zo sekundárneho okruhu je odvádzané cez chladič do atmosféry, ako konečný odvod tepla. Odvod zvyškového tepla (aj počas núdzovej a havarijnej prevádzky) je zabezpečený 3 nezávislými DHR slučkami (3 x 100%), pracujúcimi v režime nútenej cirkulácie, a teoreticky, počas niektorých situácií, v režime prirodzenej cirkulácie [5].

Na preukázanie dosiahnutého stavu bezpečnosti a spoľahlivosti slúžia bezpečnostné analýzy. Tie sú spravidla vykonávané integrálnymi výpočtovými programami, preto musia byť schopné simulovať všetky prevádzkové režimy s primerane nízkymi neistotami, aby výsledky bezpečnostných analýz poskytovali požadovanú presnosť.

Súčasný stav poznania problematiky demonštrátora ALLEGRO, ako aj špecifikácia otvorených otázok a nevyriešených problémov sa odzrkadľuje aj vo výsledkoch bezpečnostných analýz, ktoré boli doposiaľ vykonané. Súčasná požiadavka vykonávať simulácie havarijných stavov plynom chladených systémov neboli kódmi pokryté. V posledných dvoch dekádach boli do výpočtových kódov doplnené vlastnosti a moduly umožňujúce predpovedanie správania sa aj plynom chladených reaktorov. Príkladom je najnovšia verzia kódu CATHARE2 vyvíjaného v inštitúte CEA vo Francúzku obsahujúca moduly pre modelovanie prúdenia hélia, turbín, turbogenerátorov, tepelných výmenníkov plyn-voda a podobne. Veľká pozornosť bola venovaná aj validácii kódu na základe porovnávania výpočtov a experimentálnych dát pochádzajúcich z héliových slučiek, prípadne plnorozmerových zariadení ako napr. EVO-II Oberhausen v Nemecku [6].

4 Bezpečnostné analýzy demonštrátora ALLEGRO

Aby bolo možné vykonávať analýzy bezpečnosti s vysokou presnosťou, bolo potrebné vytvoriť výpočtové modely, ktorými bude možné simulovať stacionárne a prechodové podmienky demonštrátora ALLEGRO. Za účelom preukázania kvality bezpečnostných analýz sú v tejto kapitole zhrnuté výsledky validácie výpočtových modelov, ktorými sú vykonávané bezpečnostné analýzy, ďalej popis a výsledky termohydraulického benchmarku - úlohy, v rámci ktorej boli analyzované a porovnávané výsledky termohydraulických analýz dvoch prechodových procesov a taktiež sú prezentované aj výsledky experimentálnych meraní na hélíovej slučke STU, ktorá slúži na overenie prirodzenej cirkulácie hélia pri rôznych prevádzkových režimoch.

4.1 Validácia výpočtových modelov RELAP5 a CATHARE2

Jednou z nich je aj validácia výpočtových modelov, ktorá bola vykonaná v rámci projektu Výskumné centrum ALLEGRO (ITMS číslo projektu: 26220220198), aktivita 2.1 – Aplikovaný výskum a vývoj v oblasti nových materiálov a technológií v roku 2015 [6].

V rámci tejto úlohy bolo vykonané porovnanie výsledkov výpočtov rovnakej iniciačnej udalosti medzi dvoma kódmi, tzv. porovnanie kód - kód. Pri porovnávaní výsledkov výpočtov boli využité skúsenosti z validácie a verifikácie modelov, pričom boli použité niektoré časti metodiky uvedenej v [7]. Predovšetkým sa jedná o verifikáciu stacionárneho stavu výpočtu a porovnávanie výpočtov na základe hodnotenia kvalitatívnej schopnosti kódov a modelov predpovedať očakávané termohydraulické javy, v metodike označované ako relevantné termohydraulické aspekty (RTA). Po identifikácii RTA boli vybrané také parametre, ktoré čo najpresnejšie reprezentujú a popisujú preverovaný jav a tieto parametre boli navzájom porovnané v tabuľke. Okrem toho bolo vykonané aj porovnanie priebehov vybraných parametrov a hodnotenie schopnosti predpovedania relevantných javov oboch použitých modelov [6].

Ďalej boli identifikované rozdiely v spôsobe modelovania, ktoré ďalej slúžili ako základ pre vysvetlenie rozdielnych priebehov porovnávaných parametrov. Súčasťou validácie bolo tiež porovnanie nastavenia stacionárneho stavu modelov, ktoré môže vplývať na priebeh výpočtov a pomáha vysvetliť rozdiely v priebehoch porovnávaných parametrov [6].

Na analýzu prechodových procesov v rámci tejto správy boli použité výpočtové programy RELAP5 a CATHARE2. Pre každý výpočtový program bol vyvinutý výpočtový model (vstupný súbor), ktorým je možné analyzovať správanie sa systému ALLEGRO [6]. Detailný popis výpočtových programov RELAP5 a CATHARE2, použitých na termohydraulické analýzy, popis výpočtových modelov, ako aj nodalizačná schéma reaktora ALLEGRO pre tieto výpočtové kódy, je uvedený v [4].

Boli analyzované štyri varianty, dva varianty so stratou chladiva (LOCA “3 inch” a LOCA “10 inch”) a dva varianty s úplnou stratou elektrického napájania bloku (rozdielny počet slučiek DHR). Roztrhnutie potrubia tvoriaci tlakový celok s primárnym okruhom (LOCA) vedie k havárii s únikom chladiva z I.O. do guard vessel. Spoločným znakom tejto iniciačnej udalosti je pokles tlaku v primárnom okruhu, rast tlaku a teploty v guard vessel, znižovanie množstva chladiva v primárnom okruhu a v reaktore, rast teploty pokrytia palivových prútikov. Iniciačná udalosť „Total Blackout” predpokladá úplnú stratu elektrického napájania. Táto udalosť je charakteristická úplnou stratou elektrického napájania všetkých napájaných systémov počas prevádzky na nominálnom výkone. To znamená, že všetky typy núdzových zdrojov napájania (diesellové motory a batérie) sa neuvažujú. Detailný popis analyzovaných iniciačných udalostí, ako aj počiatkové a okrajové podmienky analyzovaných scenárov sú uvedené v [6].

Cieľom validácie výpočtových modelov bolo zhodnotenie schopností výpočtových kódov CATHARE2 a RELAP5 a modelov demonštrátora ALLEGRO vytvorených pre tieto kódy predpovedať očakávané fenomény ako odozvy na vybrané iniciačné udalosti. Pre účely tohto hodnotenia bol použitý existujúci model ALLEGRO pre výpočtový kód CATHARE2 v25_3 mod4.1, ktorý bol vyvinutý v inštitúte CEA Francúzsko. Ďalším kódom použitým pre účely validačnej správy bol RELAP5 mod3.3, pre ktorý bol vyvinutý nový model demonštrátora ALLEGRO. Základ pre vývoj oboch modelov bol projekt demonštrátora ALLEGRO CEA z roku 2009 [6].

Proces validácie a verifikácie pozostával z viacerých krokov, ktorých cieľom bolo preveriť konzistentnosť modelov z hľadiska správnosti použitých vstupných dát, aplikovaných modelov, počiatočných a okrajových podmienok výpočtov [6].

Výsledky výpočtov stacionárneho stavu modelov ALLEGRO pre výpočtové kódy RELAP5 a CATHARE2 a vyhodnotenie odchýlok od nominálnych parametrov ukázali dobrú zhodu s projektovými hodnotami pre nominálny stav zariadenia. Porovnanie priebehov vybraných parametrov analyzovaných prechodových procesov modelmi ALLEGRO a porovnanie relevantných termohydraulických aspektov ukázalo, že oba kódy predpovedajú očakávané fyzikálne javy v kvalitatívnej zhode a kvantitatívne rozdiely je možné eliminovať korekciou identifikovaných odchýlok v porovnávaných modeloch [6].

4.2 Termohydraulický benchmark – demonštrátor ALLEGRO

Termohydraulický benchmark – porovnanie výpočtových modelov demonštrátora ALLEGRO pre RELAP, CATHARE a MELCOR je výsledkom spoločného úsilia združenia V4G4, ktoré sa podieľa na vývoji demonštrátora ALLEGRO. Termohydraulický benchmark bol vypracovaný v rámci európskeho projektu VINCO (Visegrad Initiative for Nuclear COoperation) v roku 2017. Časť výsledkov termohydraulického benchmarku bola publikovaná v zborníku Nuclear Engineering and Design v roku 2019 [4].

Termohydraulický benchmark prebiehal v niekoľkých krokoch. Prvá fáza spočívala vo vytvorení komplexnej databázy, v ktorej sú zosumarizované všetky dostupné referenčné dáta demonštrátora ALLEGRO. Databázu je možné použiť pre široké spektrum termohydraulických, termomechanických a neutrónových analýz [4].

V druhej fáze bolo špecifikované zadanie TH benchmarku. Toto zadanie detailne popisuje jednotlivé parametre, ako napríklad horúci kanál, voľné objemy jednotlivých komponentov, počiatočné a okrajové podmienky (tlak, teplota, prietok,...), aby sa eliminoval nesúlad pri vytváraní modelov [4].

V tretej fáze sa vytvárali TH modely pre jednotlivé výpočtové kódy. Pre RELAP bol vytvorený nový výpočtový model (VUJE), v Českej republike (UJV) bol pre MELCOR vytvorený taktiež nový model. Model ALLEGRO pre výpočtový kód CATHARE bol vytvorený v roku 2009 vo Francúzsku (CEA), niektoré časti modelu však bolo potrebné premodelovať podľa aktuálnych dát z databázy [4].

V ďalšej fáze bol vykonaný výpočet stacionárneho stavu, kde sa porovnali dosiahnuté výsledky jednotlivými kódmi a identifikovali sa nezrovnalosti v modeloch, ktoré boli následne eliminované. Navyše bola vykonaná kvalifikácia stacionárneho stavu použitím metodiky vyvinutej na University of Pisa v Taliansku (FFTBM) [4].

Posledným, piatym krokom bola samotná analýza dvoch prechodových procesov – analýza so stratou chladiva (LOCA 3 inch) a analýza so stratou vonkajšieho napájania (SBO). Všetci účastníci benchmarku vykonali analýzu oboch variantov a výsledky boli kvalitatívne (schopnosť modelu predpovedať fenomenológiu analyzovaného procesu) a kvantitatívne (zdôvodnenie dosiahnutých rozdielov jednotlivých modelov) porovnané [4].

Kvalifikácia stacionárneho stavu

Účelom TH benchmarku je porovnať schopnosti rôznych kódov a modelov demonštrátora ALLEGRO predpovedanie špecifikovaných prechodových javov. Na dosiahnutie tohto cieľa je nevyhnutným predpokladom porovnávať modely, ktorých podmienky v ustálenom stave zodpovedajú vopred definovaným kritériám prijateľnosti.

Základom kvalifikácie nodalizácie je porovnanie vybraných parametrov z výpočtu ustáleného stavu s príslušným parametrom z referenčného súboru údajov (napr. databázy). Súbor hodnotených parametrov je definovaný metodikou [8] a pokrýva všetky dôležité aspekty nodalizácie, ktoré môžu potenciálne ovplyvniť výsledky výpočtov.

Metodika nielen porovnáva nodalizačné charakteristiky s referenčnými údajmi, ale navyše špecifikuje akceptovateľnú chybu (kritérium akceptovateľnosti) vymedzujúcu akceptovateľný rozsah hodnoteného vypočítaného parametra. Chyba je definovaná ako pomer medzi referenčnou a vypočítanou hodnotou podľa nasledujúceho vzorca:

$$Error = \frac{|(reference\ value \pm accuracy) - calculated\ value|}{(reference\ value \pm accuracy)}$$

Do výpočtu chyby je zahrnutá aj presnosť merania, keďže metodiku je možné použiť aj na kvalifikáciu experimentálnych zariadení. Termín „presnosť“ sa zvyčajne vzťahuje na hodnoty pochádzajúce z meracieho zariadenia. V tejto fáze projektu ALLEGRO sú hodnoty presnosti neznáme a boli zvolené podľa technického úsudku na základe predchádzajúcich skúseností s doteraz vykonanými benchmarkovými analýzami pre iné experimentálne zariadenia.

Nasledujúce tabuľky obsahujú porovnanie parametrov ustáleného stavu s referenčnými údajmi. Porovnanie zahŕňa vypočítané chyby [%] vzhľadom na referenčné hodnoty a objektívny úsudok - Judgement (J.), označujúci buď zhodu (E-Excellent) alebo nezhodu (U-Unqualified) podľa kritérií uvedených v predchádzajúcej tabuľke.

Tab. 2: Porovnanie nominálnych počiatkových podmienok s referenčnými hodnotami a vyhodnotenie prijateľnej chyby [9]

Parameter	Jednotka	Ref. hodnota	VUJE			CATHARE2		
			R-3D	Chyba [%]	J.	R-3D	Chyba [%]	J.
Nominálne počiatkové podmienky								
Výkon AZ	MWt	75,0	75,00	0,00	E	75,00	0,00	E
Tlak na vstupe do AZ	MPa	7,0	7,00	0,00	E	7,00	0,00	E
Teplota na vstupe do AZ	°C	260,0	261,72	0,16	E	259,08	0,00	E
Teplota na výstupe z AZ	°C	516,0	515,92	0,00	E	514,89	0,00	E
Prietok chladiva na vstupe do AZ	kg/s	56,45	56,41	0,00	E	56,46	0,00	E
Prietok chladiva cez palivovú kazetu (vážený)	kg/s	0,662	0,662	0,00	E	0,662	0,00	E
Prietok cez by-pass	kg/s	2,823	2,822	0,00	E	2,823	0,00	E
Počiatková rýchlosť hlavného dúchadla	rpm	3919,0	3919,00	0,00	E	3885,10	0,37	E
Prietok NV cez MHX1	kg/s	125,36	126,00	0,00	E	125,55	0,00	E
Prietok NV cez MHX2	kg/s	125,36	126,00	0,00	E	125,32	0,00	E
Teplota na vstupe do MHX1	°C	127,1	127,10	0,00	E	127,60	0,00	E
Teplota na vstupe do MHX2	°C	127,1	127,10	0,00	E	127,68	0,00	E
Teplota na výstupe z MHX1	°C	197,0	196,05	0,00	E	197,28	0,00	E
Teplota na výstupe z MHX2	°C	197,0	196,05	0,00	E	197,46	0,00	E
Tlak na výstupe z MHX1	MPa	6,5	6,50	0,00	E	6,50	0,00	E
Tlak na výstupe z MHX2	MPa	6,5	6,50	0,00	E	6,50	0,00	E
Počiatkový tlak v ochrannej nádobe	MPa	0,1	0,10	0,00	E	0,10	0,00	E
Počiatková teplota v ochrannej nádobe	°C	50	50,00	0,00	E	50,00	0,00	E
Počiatkový tlak v N ₂ zásobníkoch	MPa	6,5	6,50	0,00	E	6,50	0,00	E
Počiatkový tlak v DHR systéme	MPa	1,0	1,00	0,00	E	1,00	0,00	E

Tab. 3: Porovnanie parametrov ustáleného stavu s referenčnými hodnotami a vyhodnotenie prípustnej chyby [9]

Parameter	Jednotka	Ref. hodnota	VUJE R-3D	Chyba [%]	J.	VUJE CATHARE2	Chyba [%]	J.
Tlaková strata v primárnom okruhu								
Aktívna zóna	kPa	84,0	84,3	0,00	E	84,79	0,44	E
MHX (strana He)	kPa	20,0	20,2	0,50	E	16,47	17,24	U
Hlavné dúchadlo	kPa	104,0	104,93	0,39	E	102,92	0,55	E
Tlaková strata v sekundárnom okruhu								
Potrubný systém	kPa	5,79	4,1	28,83	U	5,4	6,08	E
MHX (strana vody)	kPa	11,61	12	2,84	E	28,5	143,96	U
Výmenník H ₂ O-vzduch	kPa	124,21	126,7	1,50	E	108,3	12,37	U
Čerpadlá	kPa	141,61	142,8	0,34	E	142,2	0,00	E
Teplo výmenné plochy								
MHX (strana vody)	m ²	121,02	137,25	13,41	U	128,7	6,35	E
HX voda-vzduch (strana vody)	m ²	298,49	298,50	0,00	E	8925,19	2890,0	U
HX voda-vzduch (strana vzduchu)	m ²	16134,5	16612,33	2,96	E	15065,0	6,63	E
DHR HX (strana He)	m ²	80,14	80,14	0,00	E	78,4	2,16	E
DHR HX (strana bazéna)	m ²	161,2	161,20	0,00	E	161,2	0,00	E
Aktívna časť palivových prútikov	m ²	242,25	242,25	0,00	E	242,3	0,00	E
Výšky								
Výška medzi hornou časťou He-H ₂ O DHR HX a spodnou časťou bazéna DHR HX	m	27	27,1	0,37	E	27,1	0,37	E
Hmotnosti častí aktívnej zóny								
Obaly palivovej kazety	kg	1500	1499,98	0,00	E	1500,0	0,00	E
Kazety radiálneho reflektora	kg	33430	33431,7	0,01	E	33429,5	0,00	E
Kazety radiálneho tienenia	kg	12950	12966,9	0,13	E	12945,9	0,03	E

Identifikácia odchýlok v TH modeloch

V modeli CATHARE2 sú pozorované rozdiely v predikcii tlakovej straty na sekundárnej strane hlavného tepelného výmenníka. Táto nekonzistentnosť je spôsobená jednoduchosťou modelu U-rúr, ktorý používa iba jeden vertikálny kanál namiesto použitia dvoch kanálov reprezentujúcich súprúdu a protiprúdu časť zväzku U-rúr. To vedie k nadhodnoteniu tlakovej straty v dôsledku hydrostatického tlaku vody vo zvislom kanáli.

V modeli CATHARE2 je nárast tlaku na hlavnom dúchadle podhodnotený. Udržanie požadovaného tlakového rozdielu aktívnej zóny vedie k podhodnoteniu tlakovej straty hlavného výmenníka tepla. To môže ovplyvniť distribúciu tepla počas udalostí LOCA v primárnom okruhu.

Tlakový rozdiel v modeli CATHARE2 je mierne mimo prípustného rozsahu s malým vplyvom na prechodové javy. Vyššie uvedené nezrovnalosti v modeli CATHARE2 môžu viesť k rozdielom v správaní sekundárnej strany pri analýze prechodového procesu LOCA a LOFA.

Veľký rozdiel je pozorovaný v prípade výmenníka tepla voda/vzduch. V skutočnom výmenníku tepla voda/vzduch sú navrhnuté nerezové rúrky s hliníkovým rebrovaním. Teplovýmenná plocha na strane vody (vo vnútri rúrok) je oveľa menšia ako teplovýmenná plocha na strane vzduchu.

Definovanie úlohy TH benchmarku

Úloha 1 – Havária so stratou chladiva (LOCA)

Udalosť typu LOCA, kedy dochádza ku strate chladiva, bola vybraná s cieľom overenia javov, kedy dochádza ku strate chladiva a poklesu tlaku v reaktore a primárnom okruhu a odvod zvyškového tepla je zabezpečený núteným obehom cez primárny, sekundárny a terciárny systém do atmosféry. Cieľom bolo preukázať schopnosť demonštrátora ALLEGRO odolávať a zmiernovať (pomocou automatických systémov) následky havárie s poklesom tlaku a výrazným znížením hustoty chladiaceho plynu [10].

Iniciačná udalosť: Havária so stratou chladiva (LOCA)

Umiestnenie únikového otvoru: slučka č.1 s únikom chladiva do ochrannej obálky

Veľkosť únikového otvoru: 76,2 mm (3 inch)

Čas vytvorenia únikového otvoru: 0,1 s

Počiatkové a okrajové podmienky: nominálne, bez uvažovania neistoty hlavných parametrov



Obr. 2: Grafické zobrazenie únikového otvoru

Očakávané javy ako odozva na iniciačnú udalosť:

- výkonová odozva aktívnej zóny na rýchle odtlakovanie primárneho okruhu v dôsledku kladného spätnoväzobného efektu reaktivity v závislosti od rýchleho poklesu hustoty chladiva.
- zníženie tlaku a teploty v primárnom okruhu
- nárast tlaku a teploty v ochrannej obálke (guard vessel)
- nárast teploty pokrytia palivových prútikov

Analyzovaným prechodovým procesom je odozva na okamžité pretrhnutie primárneho potrubia s veľkosťou únikového otvoru 3 inch (76,2 mm) na studenej vetve č.1 s výtokom hélia do ochrannej nádoby. Neboli uvažované žiadne ďalšie poruchy bezpečnostných alebo riadiacich systémov nad rámec iniciačnej udalosti.

Fenomenológia scenára je charakterizovaná veľmi rýchlym odtakovaním primárneho okruhu, čo vedie k zníženiu hustoty hélia. Tlak poklesne zo 7,0 MPa na menej ako 0,5 MPa za menej ako 3 minúty. V dôsledku toho sa hmotnostný prietok cez aktívnu zónu znižuje a zhoršuje sa prenos tepla z pokrytia paliva do chladiva.

Rýchly pokles hustoty hélia má pozitívny spätnoväzobný koeficient reaktivity. Tento efekt je silnejší ako negatívna spätná väzba reaktivity od zvyšovania teploty paliva a chladiva. Preto dochádza v intervale medzi vznikom únikového otvoru a zasunutím riadiacich tyčí do aktívnej zóny ku prudkému nárastu výkonu aktívnej zóny. Umiestnenie únikového otvoru má významný vplyv na zníženie prietoku chladiva cez aktívnu zónu v dôsledku lokalizácie únikového otvoru na studenej vetve, pretože chladivo uniká do ochrannej nádoby zo strany tlakovej nádoby, a tiež zo strany tepelného výmenníka.

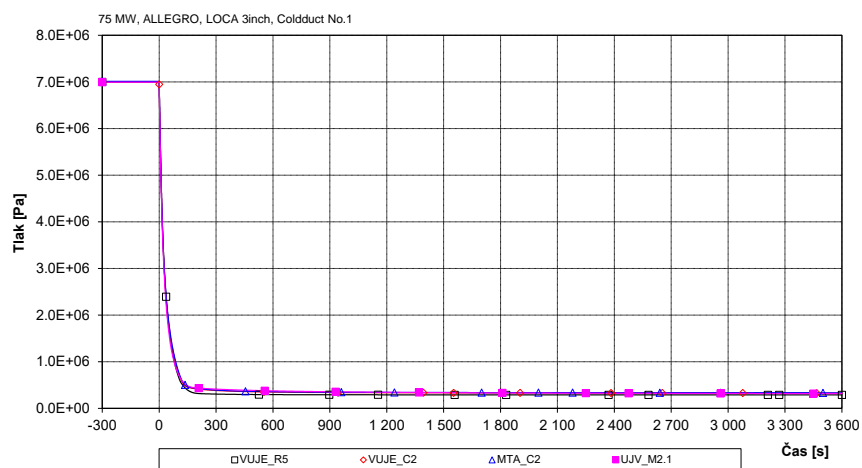
Oba javy (pozitívny koeficient spätnej väzby a pokles prietoku) vedú k zvýšeniu pomeru výkonu k hmotnosti chladiva, zhoršuje sa prestup tepla z pokrytia do chladiva a zvyšuje sa teplota pokrytia paliva.

Z dôvodu nízkeho hmotnostného prietoku chladiva cez aktívnu zónu sa aktivuje signál na odstavenie reaktora (RTS č. 7 „Pomer výkonu k hmotnostnému prietoku > 130 %“) a zasúvaním tyčí do aktívnej zóny je reaktor odstavený. Signál RTS vypína taktiež motory oboch hlavných dúchadiel.

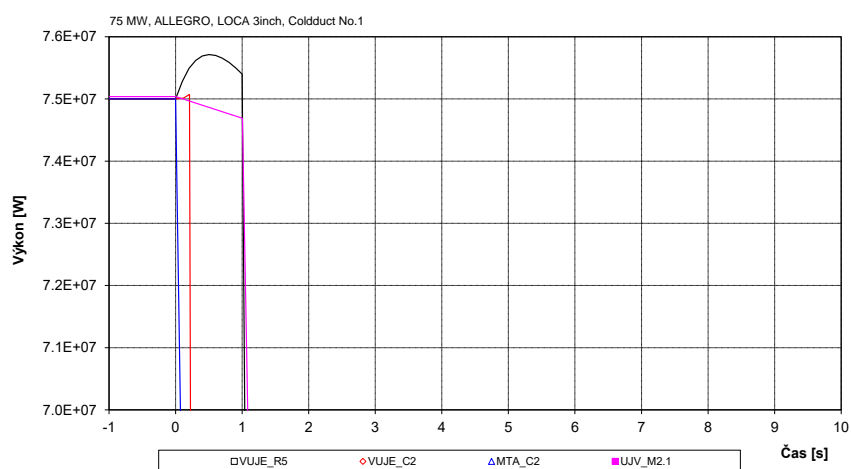
ESFAS signály č. 56 a 57 „Rýchlosť otáčania hlavného dúchadla \leq otáčky motora pony a zároveň SCRAM signál aktívny“ aktivujú a pripájajú pony motory k hlavným dúchadlám, čím nedochádza ku zastaveniu hlavných dúchadiel a rýchlosť otáčania je udržiavaná nominálnej hodnote.

Hélium unikajúce z primárneho okruhu zvyšuje tlak a teplotu v ochrannej nádobe. Po niekoľkých minútach sa tlak v reaktore a tlak vo vnútri ochrannej nádoby vyrovnajú, čím sa zastaví únik z primárneho okruhu do ochrannej nádoby. Unikajúce hélium sa ochladzuje na studených ocelových stenách ochrannej obálky a tlak vo vnútri po chvíli postupne klesá.

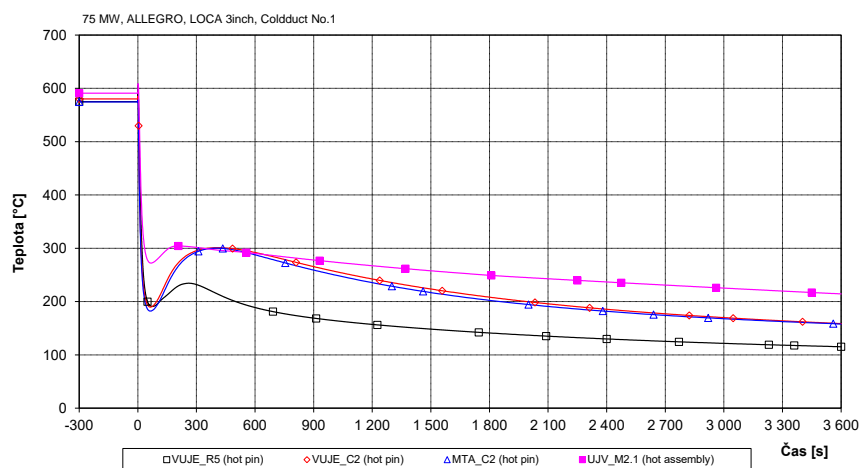
Zvyškový výkon aktívnej zóny je odvádzaný núteným obehom do sekundárneho okruhu cez hlavný tepelný výmenník a potom do atmosféry cez vzduchové chladiče. Výsledný protitlak v ochrannej nádobe zaisťuje dostatočnú hustotu hélia na odvádzanie tepla z aktívnej zóny v dlhodobom horizonte.



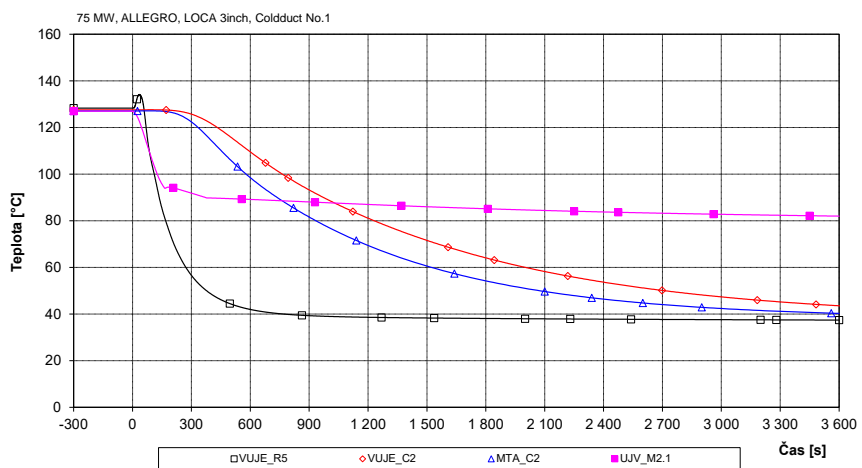
Obr. 3: Teplota na vstupe do aktívnej zóny



Obr. 4: Výkon aktívnej zóny



Obr. 5: Maximálna teplota pokrytia paliva



Obr. 6: Teplota na vstupe do tepelného výmenníka

Úloha 2 – Úplná strata napájania (blackout)

Udalosť typu úplná strata napájania bola vybraná s cieľom pokrytia fyzikálnych javov súvisiacich s podmienkami prirodzenej cirkulácie demonštrátora ALLEGRO, aby sa overila schopnosť bloku odvádzať zvyškový výkon z aktívnej zóny prostredníctvom systému DHR [10].

Iniciačná udalosť: Úplná strata napájania (SBO)

Počet systémov DHR dostupných pre prirodzenú cirkuláciu: 1

Počiatkové podmienky: nominálne, bez uvažovania neistoty hlavných parametrov

Okrajové podmienky: záložný zdroj elektrickej energie nie je k dispozícii, činnosť pony motorov hlavných dúchadiel na slučkách primárneho okruhu nie je uvažovaná, a k dispozícii sú iba záložné batérie pre činnosť ventilov, systém odstavenia reaktora a signály ESFAS.

Očakávané javy ako odozva na iniciačnú udalosť:

- zníženie rýchlosti otáčania dúchadiel slučky primárneho okruhu
- zníženie celkového prietoku chladiva cez reaktor
- zvýšenie výstupnej teploty aktívnej zóny v dôsledku nízkeho prietoku chladiva a zníženého prestupu tepla cez hlavné výmenníky tepla po izolácii slučiek primárneho okruhu
- spustenie prirodzenej cirkulácie v otvorenom okruhu DHR
- zníženie výstupnej teploty z aktívnej zóny po obnovení odvodu zvyškového výkonu z AZ

Analyzovaný prechodový proces je odozvou na úplnú stratu napájania (blackout) s využitím 1 DHR systému na odvod zvyškového tepla z AZ v režime prirodzenej konvekcie. Ako okrajová podmienka sa predpokladá, že dôjde ku zlyhaniu dvoch uzatváracích ventilov DHR slučiek. To znamená, že zvyškový výkon je odvádzaný iba jednou slučkou DHR v režime prirodzenej cirkulácie.

Úplná strata napájania vedie k okamžitému výpadku hlavných dúchadiel, čerpadiel sekundárneho okruhu a chladičov. Záložný zdroj elektrickej energie (batérie) je dostupný iba pre činnosť signálov RTS a ESFAS, pohon uzatváracích ventilov hlavných slučiek a DHR slučiek a činnosť prístrojového vybavenia potrebného na prechod z bežného odvodu tepla na odvod tepla cez DHR v režime prirodzenej cirkulácie. Pony motory hlavných dúchadiel nie sú v prevádzke, čo neumožňuje odvádzanie zvyškového výkonu v nútenej cirkulácii.

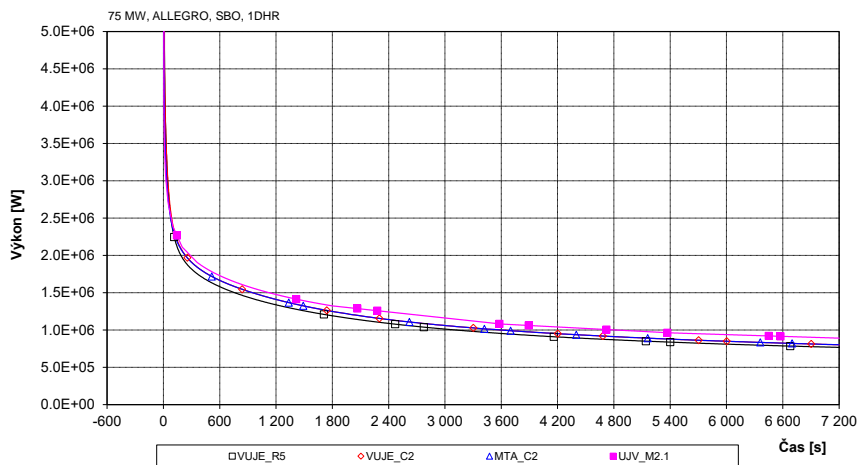
Akonáhle dôjde k strate dodávky elektrickej energie, prietok chladiva cez AZ rýchlo klesne, ale výkon aktívnej zóny je stále nominálny. Nižší hmotnostný prietok cez AZ nie je dostatočný na odvod nominálneho výkonu, dochádza k prehrievaniu pokrytia palivových prútikov, čo vedie k zvýšeniu výstupnej teploty z AZ.

Zníženie otáčok hlavného dúchadla aktivuje signál RTS na odstavenie reaktora, regulačné tyče sa zasunú do aktívnej zóny a výkon reaktora začne klesať, pričom do cca 3 minút dosiahne 2 MW. Pomer zvyškového výkonu k hmotnostnému prietoku chladiva klesá, chladenie aktívnej zóny je efektívnejšie, teplota pokrytia paliva a výstupná teplota aktívnej zóny klesajú. V prvých dvoch minútach analyzovanej iniciačnej udalosti je odvod zvyškového výkonu zabezpečený dobehom hlavných dúchadiel, čerpadiel a chladičov vzduchu. Po úplnom zastavení hlavných dúchadiel je chladenie aktívnej zóny nedostatočné a teplota v aktívnej zóne začína opäť stúpať.

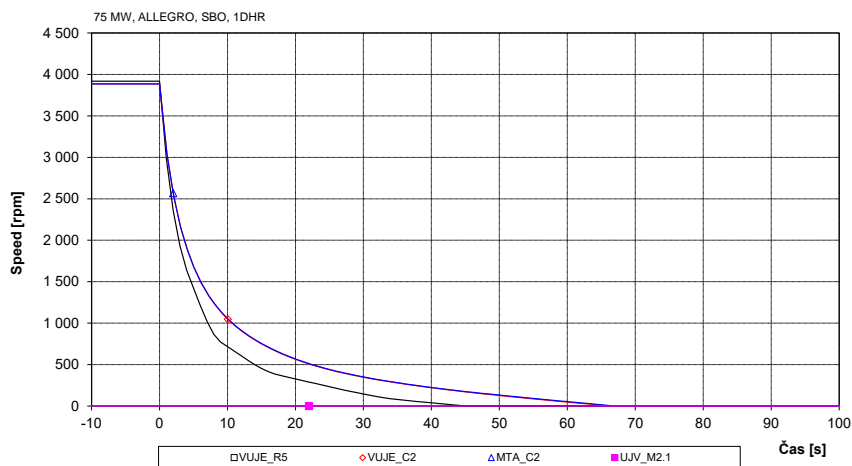
V dôsledku poklesu otáčok hlavných dúchadiel dochádza ku aktivácii signálov, ktoré spúšťajú pony motory hlavných dúchadiel. Keďže činnosť pony motorov sa neuvažuje, dochádza ku uzatvoreniu uzatváracích armatúr na hlavných cirkulačných slučkách, prietok cez AZ je dočasne zastavený a naštartuje prechodová

sekvencia pripojenia systému DHR č.1 (slučky DHR č. 2 a č. 3 zostanú zatvorené).

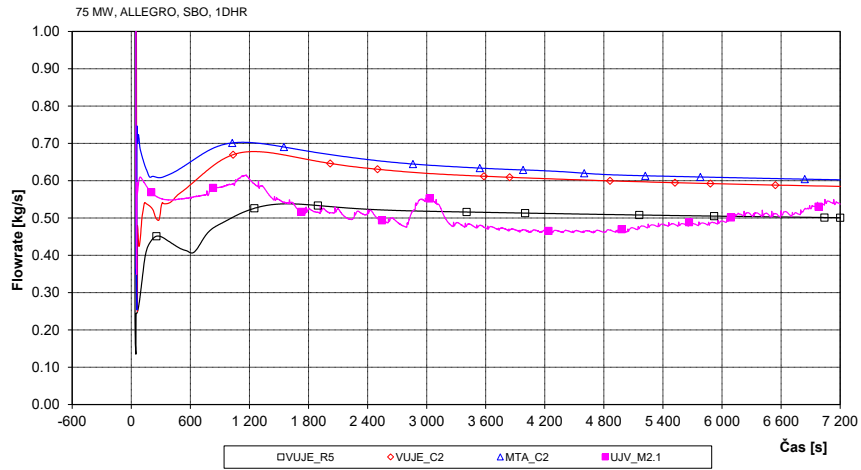
Po pripojení slučky DHR ku primárnemu okruhu nastáva prirodzená cirkulácia vo vyhradenej slučke DHR č. 1, hélium prúdi z výstupu aktívnej zóny do slučky DHR cez výmenník tepla He-voda a vracia sa cez dolnú zmiešavaciu komoru reaktora späť na vstup aktívnej zóny. Teplota v aktívnej zóne postupne klesá, pričom sa chladenie aktívnej zóny a odvod zvyškového tepla udržiava dlhodobo. Prenos tepla do sekundárneho a terciárneho okruhu je zastavený v dôsledku uzatvorenia hlavných uzatváracích armatúr na slučkách primárneho okruhu



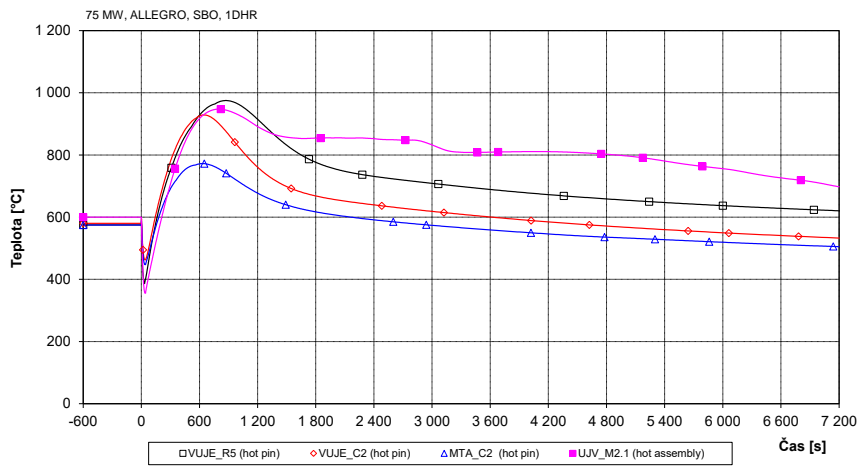
Obr. 7: Výkon aktívnej zóny



Obr. 8: Otáčky hlavného dúchadla č.1



Obr. 9: Prietok He cez AZ



Obr. 10: Maximálna teplota pokrytia paliva

Záver z TH Benchmarku

Cieľom benchmarkových úloh zameraných na analýzy plynom chladených reaktorov bolo vypracovanie komplexného súboru dát demonštrátora ALLEGRO pre TH analýzy a vývoj nových TH modelov pre výpočtové kódy, akými sú RELAP5-3D, CATHARE2, MELCOR. Vytvorené špecializované TH modely budú použité na ďalší výskum a projekčné aktivity súvisiace s vývojom demonštrátora GFR ALLEGRO.

Pri vytváraní databázy demonštrátora ALLEGRO bola využitá dostupná dokumentácia z predchádzajúcich projektov, alebo boli využité dáta z modelu ALLEGRO pre CATHARE2 vyvinutého CEA v roku 2009. Niektoré informácie, najmä tie, ktoré sa týkajú systémov a komponentov, ktoré sú k dispozícii len ako predkonceptný návrh (napr. mapy hlavného kompresora, homologické krivky čerpadiel sekundárneho okruhu, DHR systém,...), alebo ešte neboli navrhnuté, boli doplnené inžinierskym úsudkom.

Na zosúladenie kľúčových charakteristík demonštrátora ALLEGRO so zameraním na harmonizáciu globálnych objemov, teplovýmenných plôch, hmotnosti štruktúr v aktívnej zóne, tlakových strát pozdĺž slučiek systému ALLEGRO a kľúčové počiatkové podmienky stacionárneho stavu bola použitá časť kvalifikačného postupu vyvinutého na Univerzite v Pise [8]. Výstupom tejto aktivity bolo identifikovať rozdiely medzi modelmi a využiť tieto informácie na vysvetlenie rozdielov pozorovaných pri prechodových procesoch.

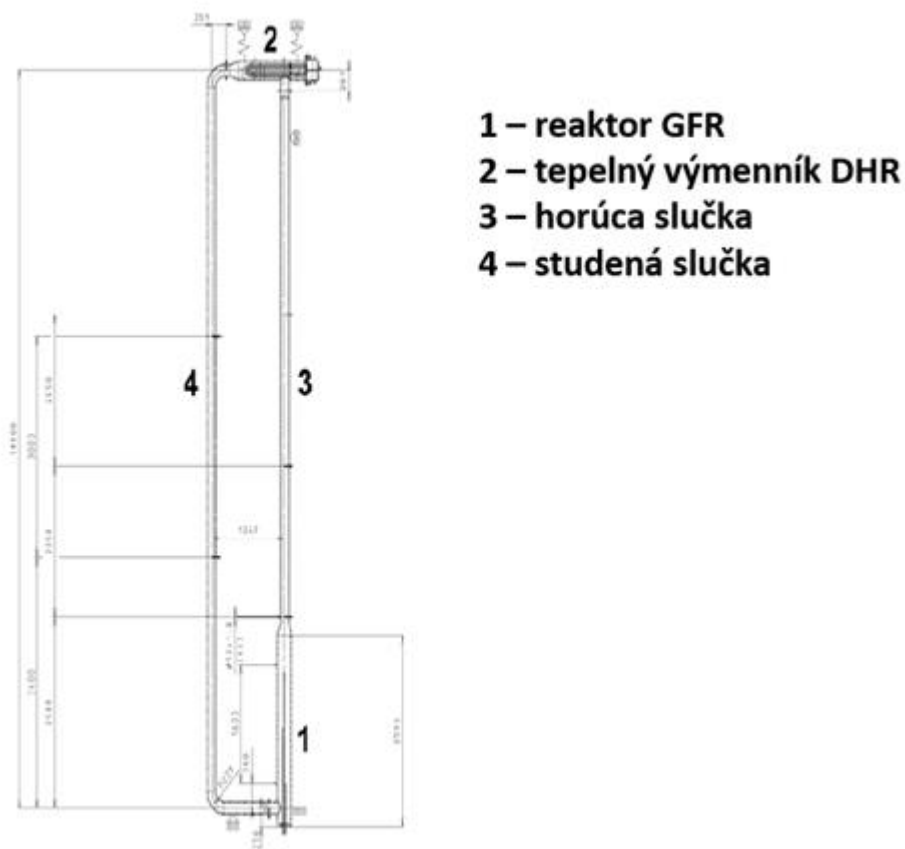
S vytvorenými modelmi demonštrátora ALLEGRO pre kódy CATHARE2, RELAP5-3D a MELCOR boli analyzované dva scenáre – havária so stratou chladiva (LOCA) a úplná strata napájania. Výsledky analýz boli porovnávané a hodnotené z kvalitatívneho hľadiska. Vyhodnotenie bolo zamerané na predikciu charakteristických javov pre dané iniciačné udalosti s dôrazom a vysvetlením pozorovaných rozdielov medzi jednotlivými modelmi.

Vo všeobecnosti možno povedať, že všetky modely predpovedali očakávané javy typické pre tento typ udalostí. Nezrovnalosti medzi modelmi sa týkali najmä rôznych modelov výmenníka tepla voda/vzduch. Model výmenníka voda-vzduch pre RELAP5-3D je oveľa efektívnejší ako model CATHARE2. To spôsobilo nezrovnalosti v predpovedi teploty napájajúcej vody hlavného tepelného výmenníka ovplyvňujúcej vstupnú (výstupnú) teplotu aktívnej zóny a teplotu pokrytia paliva. Rozdiel v teplote napájajúcej vody hlavného tepelného výmenníka bol pozorovaný v modeli MELCOR vo vzťahu k počiatkovej teplote chladiva. Predikcia MELCOR a RELAP5-3D vzhľadom na pokles teploty napájajúcej vody hlavného tepelného výmenníka bola v prvej fáze porovnateľná. Ďalší nesúlad bol pozorovaný v predpovedi teploty a tlaku ochrannej nádoby v modeli RELAP5-3D spojený s rozdielnym prestupom tepla

4.3 Overenie nominálnych parametrov demonštrátora ALLEGRO na hélionej slučke STU

Za účelom validácie termohydraulického modelu experimentálneho zariadenia použitím reálnych dát na meraných na zariadení je dôležité zamerať sa na vytvorenie zjednodušeného termohydraulického modelu experimentálneho zariadenia pre zvolený výpočtový program, s ohľadom na predpovedanie fenoménov experimentálneho zariadenia. Vytvorenie modelu (vstupného súboru) by mal čo najvernejšie reprodukovat' experimentálne zariadenie s ohľadom na formát vstupných dát, ktorý vyhovuje požiadavkám aplikovaného výpočtového programu.

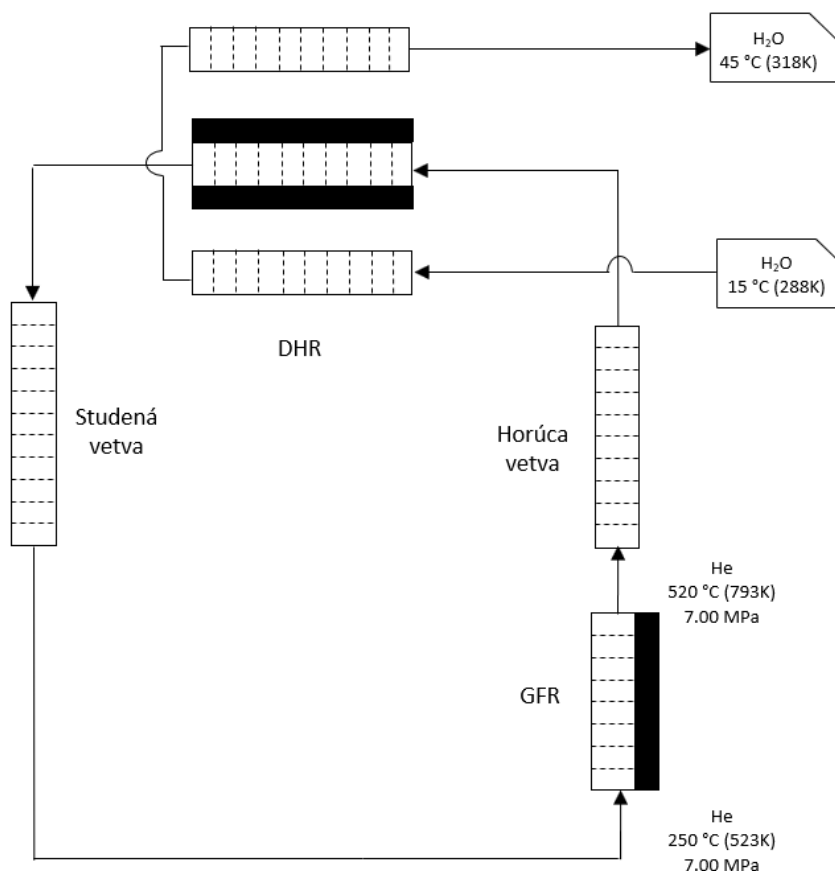
Konstruktívne héliová slučka pozostáva z primárneho okruhu, sekundárneho okruhu, niekoľkých pomocných okruhov na riadenie hélia v slučke, systému merania a regulácie a elektrickej časti hélionej slučky. Na zostavenie modelu slúžiaceho na overenie termodynamických a hydraulických vlastností je najpodstatnejší primárny okruh a jeho hlavné komponenty – reaktor GFR, tepelný výmenník DHR, horúca a studená slučka. Na nasledujúcich obrázkoch je schematicky znázornený primárny okruh hélionej slučky STU a detaily reaktora GFR a výmenníka DHR [11].



Obr. 11: Experimentálna héliová slučka STU a jej hlavné okruhy

Vstupný súbor pre výpočtový program RELAP5

Experimentálne zariadenie ako celok sa skladá z viacerých okruhov, ktoré umožňujú overiť termodynamické a termohydraulické vlastnosti experimentálneho zariadenia v širokom spektre prevádzkových podmienok. Pri vytváraní vstupného súboru pre výpočtový program RELAP5 nie sú uvažované všetky zariadenia a pomocné okruhy, ako sú uvedené v technologickej schéme héliovej slučky. Pomocné systémy, ktoré priamo nevstupujú do prevádzky zariadenia boli nahradené okrajovými podmienkami. Modelované boli iba hlavné zariadenia primárneho okruhu – GFR, DHR, horúca a studená vetva spájajúca tieto dva komponenty. Nodalizačná schéma zjednodušeného modelu experimentálneho zariadenia pre výpočtový program RELAP5 je uvedená na nasledujúcom obrázku [12]:



Obr. 12: Nodalizačná schéma hélíovej slučky pre výpočtový program RELAP5

Vstupný súbor zjednodušeného termohydraulického modelu hélíovej slučky pre výpočtový program RELAP5 pozostáva z nasledujúcich základných komponentov:

Aktívna zóna GFR (s elektrickým výhrevom)

Aktívna zóna GFR zabezpečuje ohrev hélia v primárnom okruhu. Aktívna zóna je reprezentovaná odporovými tyčami s elektrickým výhrevom s celkovým inštalovaným výkonom 500 kW. V modeli je aktívna zóna modelovaná komponentom pipe, ktorý reprezentuje 33 vyhrievacích tyčí s dĺžkou 2500 mm a tepelná štruktúra, ktorá definuje inštalovaný výkon zóny a zabezpečuje prestup tepla medzi zdrojom tepla a prúdiacim héliom.

Tepelný výmenník DHR

Tepelný výmenník DHR slúži ako chladič. Do DHR vstupuje ohriate hélium z horúcej vetvy a vystupuje ochladené do studenej vetvy primárneho okruhu. Konštrukčne sa tepelný výmenník DHR skladá z rúrok v tvare U, ktorými prúdi chladiivo primárneho okruhu – hélium. V medzirúrkovom priestore prúdi chladiivo sekundárneho okruhu – voda. Ochladené hélium vstupuje do studenej vetvy primárneho okruhu. V modeli je tepelný výmenník reprezentovaný komponentom pipe s príslušnou tepelnou štruktúrou, ktorá zabezpečuje

prestup tepla z primárneho chladiwa (hélia) do chladiwa sekundárneho okruhu (voda). Sekundárny okruh tepelného výmenníka je zjednodušene modelovaný okrajovými podmienkami s definovanými parametrami sekundárneho okruhu.

Horúca a studená vetva

Horúca a studená vetva hélíovej slučky tvorí spojovací prvok medzi GFR a DHR. Horúcou vetvou prúdi hélium z GFR do tepelného výmenníka DHR. Studená vetva primárneho potrubia spája výstup tepelného výmenníka DHR a je zaústená do spodnej časti DHR. Obe vetvy sú modelované komponentom pipe. Nie sú modelované tepelné straty do okolia.

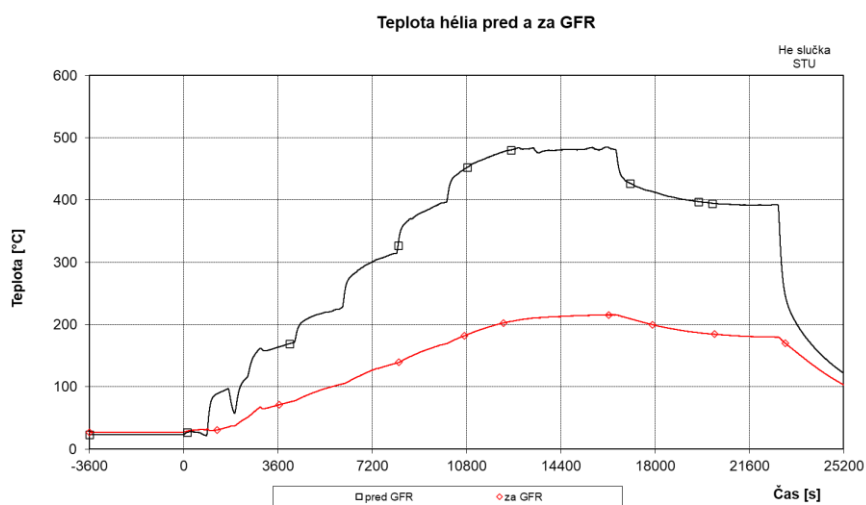
Stacionárny stav dosiahnutý modelom pre RELAP5

Po zostavení modelu pre výpočtový program RELAP5 nasledovalo odladenie zjednodušeného termohydraulického modelu experimentálneho zariadenia za účelom preukázania schopnosti modelu kvalitatívne a kvantitatívne reprezentovať ustálený stav na nominálnych parametroch hélíovej slučky.

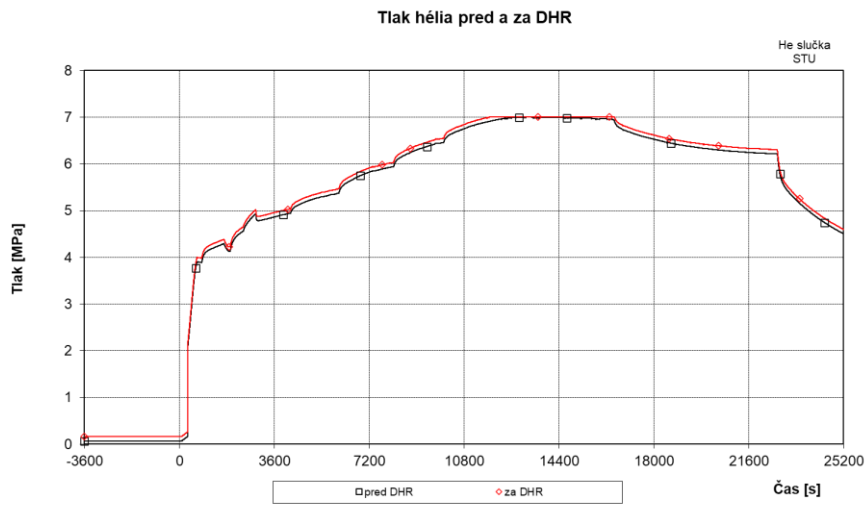
Na nasledujúcich obrázkoch sú zobrazené základné parametre reprezentujúce stacionárny stav:



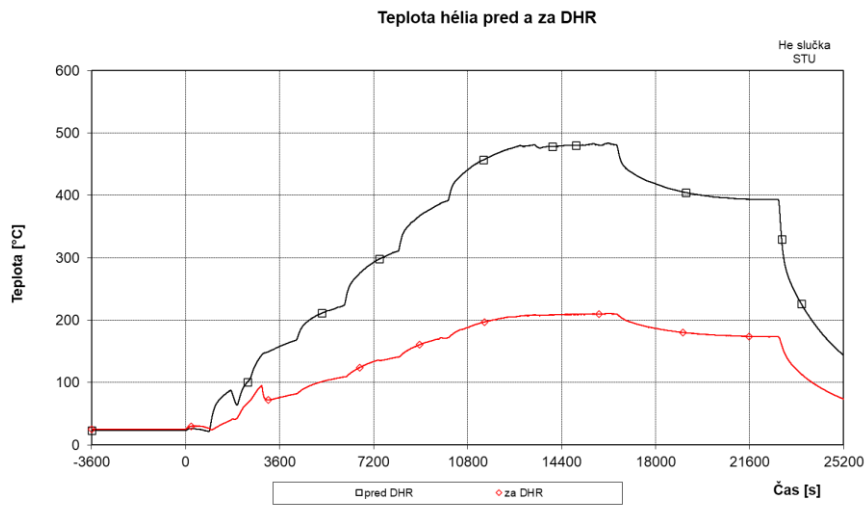
Obr. 13: Tlak hélia pred a za GFR



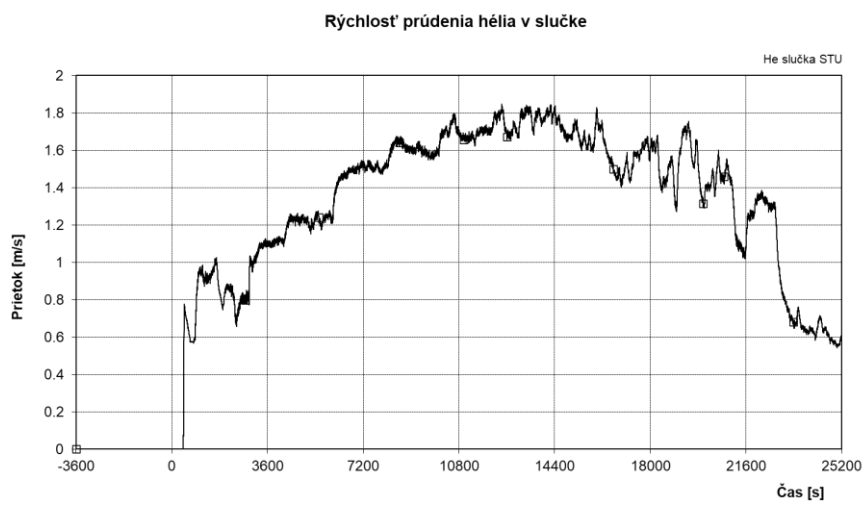
Obr. 14: Teplota hélia pred a za GFR



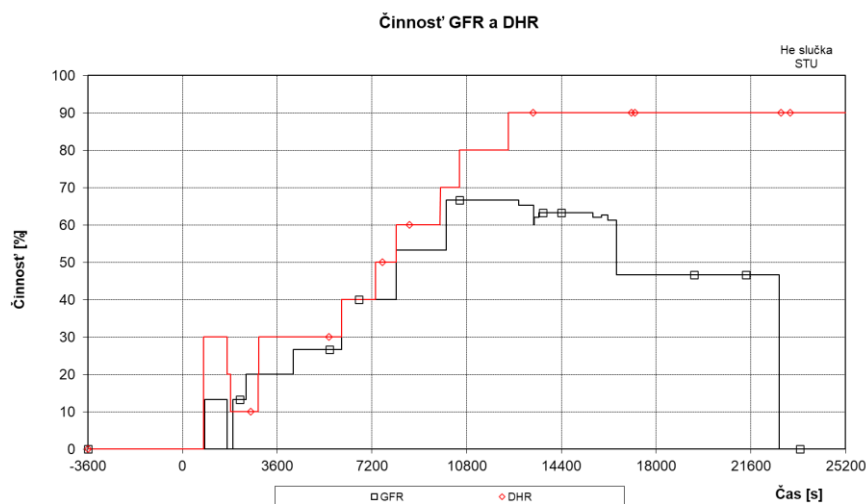
Obr. 15: Tlak hélia pred a za DHR



Obr. 16: Teplota hélia pred a za DHR



Obr. 17: Rýchlosť prúdenia hélia



Obr. 18: Činnosť GFR a DHR

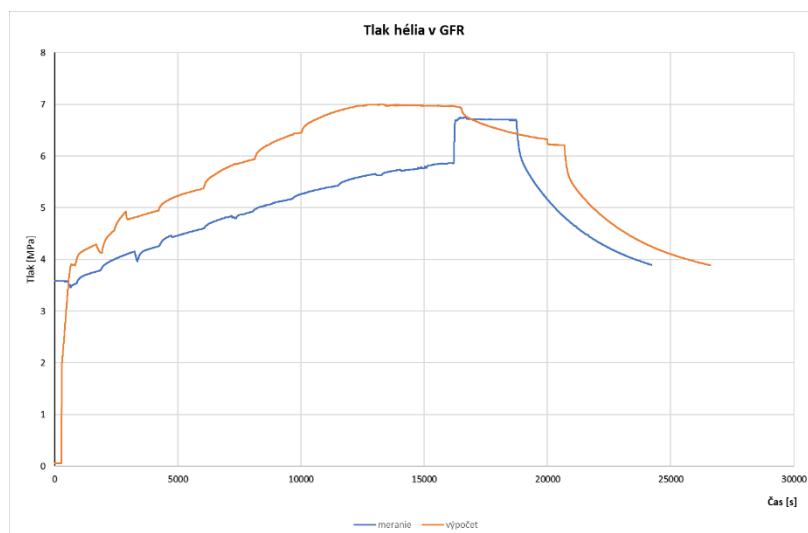
Validácia TH modelu héliovej slučky na základe nameraných dát počas experimentu

Kvalifikácia výpočtových modelov zahrňajúca validáciu na úrovni stacionárneho stavu a prechodových procesov na základe nameraných dát na experimentálnom zariadení héliovej slučky pozostáva z nasledujúcich krokov [13]:

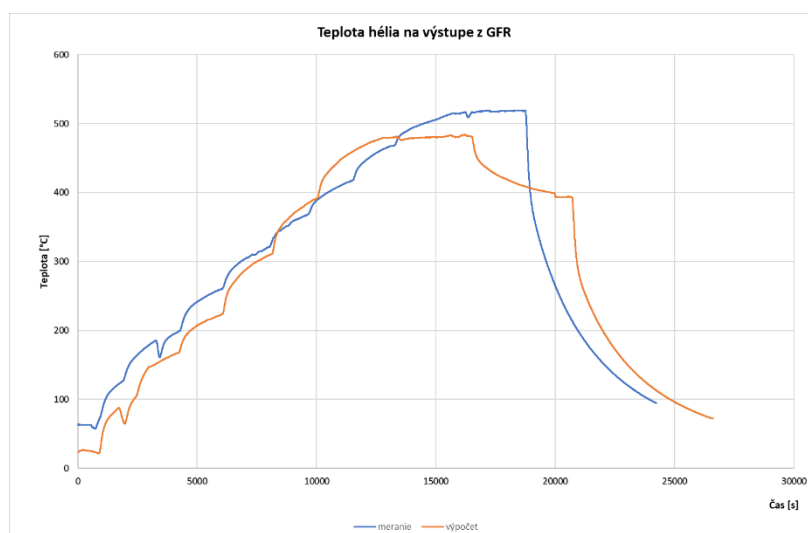
- Odladenie zjednodušeného termohydraulického modelu experimentálneho zariadenia pre výpočtový program RELAP5
- Spracovanie nameraných dát z experimentálneho zariadenia – stacionárny stav
- Spracovanie nameraných dát z experimentálneho zariadenia – predhodový proces
- Definovanie parametrov, na základe ktorých je realizovaná validácia výpočtového modelu na základe nameraných dát

Validácia termohydraulického modelu bola uskutočnená na základe výsledkov merania dosiahnutého ustáleného stavu počas experimentálneho programu meraní (kapitola 10). Slučka bola prevádzkovaná na nominálnych parametroch: na výstupe He z reaktora GFR boli tlak $p_{\text{He1}} = 6,72 \text{ MPa}$ a teplota $t_{\text{He1}} = 520,8 \text{ }^\circ\text{C}$.

Na nasledujúcich obrázkoch sú znázornené porovnania vypočítaných a nameraných parametrov reprezentujúcich ustálený stav na nominálnych parametroch héliovej slučky. Odchýlky medzi nameranými a vypočítanými priebehmi sú spôsobené najmä zjednodušeniami aplikovanými v modeli DHR (z dôvodu obmedzení vo výpočtovom kóde), rozdielnou rýchlosťou prúdenia hélia cez okruh (odchýlky v odpore trasy prúdením hélia) a rozdiely v modeli tepelných štruktúr – neuvažuje sa so stratami do okolia.



Obr. 19: Porovnanie vypočítaného a nameraného tlaku hélia v GFR



Obr. 20: Porovnanie vypočítanej a nameranej teploty hélia na výstupe z GFR

V rámci validácie TH modelu na základe nameraných dát z experimentálneho zariadenia je cieľom dosiahnuť minimálne rozdiely medzi vypočítanými a nameranými dátami. Z grafov porovnania nameraných dát a výsledkov výpočtu vyplýva, že vytvorený TH model fenomenologicky predpovedá javy a procesy na experimentálnom zariadení v dobrej zhode. Pri kvantitatívnom hodnotení model vykazuje odchýlky od experimentu. Na základe citlivostných analýz boli identifikované parametre s najväčším vplyvom na presnosť výpočtov. Medzi najvýznamnejšie patria zjednodušenia aplikované v modeli tepelného výmenníka DHR, aplikovaný model tepelných štruktúr (GFR, DHR) a celkový odpor trasy hélíovej slučky, ktorý vplyva na rýchlosť prúdenia hélia v slučke [14].

5 Dosaiahnuté výsledky a prínosy pre rozvoj vednej disciplíny

Predkladaná dizertačná práca sa venuje problematike bezpečnostných analýz reaktorov IV. generácie. Jedným z hlavných cieľov dizertačnej práce je prispieť k zvýšeniu bezpečnosti plynom chladených reaktorov formou pokročilých bezpečnostných analýz. Najvýznamnejšie závery práce a prínos pre vednú disciplínu možno zhrnúť do niekoľkých bodov.

1. Charakteristika konceptov reaktorov IV. generácie so zameraním sa na prototyp rýchleho, plynom chladeného reaktora - demonštrátor ALLEGRO

Úvod predkladanej práce je venovaný prehľadu jednotlivých konceptov reaktorov IV. generácie, ktoré boli v rámci medzinárodného fóra generácie IV. (GIF) definované ako perspektívne a do budúcnosti sa plánujú ďalej rozvíjať. Pred reaktormi IV. generácie stoja mnohé fyzikálne a technologické výzvy, ktorým sa dizertačná práca venuje a prispieva tak ku napredovaniu vo vývoji a následne komerčnej prevádzke týchto reaktorov.

Okrem výroby elektrickej energie sa predpokladá využitie reaktorov IV. generácie aj na produkciu tepla pre široké spektrum priemyselných aplikácií, ako aj možnosť využitia jadrových reaktorov pri výrobe vodíka. Ako perspektívne sa ukazujú práve vysokoteplotné, plynom chladené reaktory, ktorým sa v práci venuje najvyššia pozornosť.

Spomedzi šiestich konceptov reaktorov IV. generácie, je práca zameraná na plynom chladený rýchly reaktor GFR a jeho demonštrátor ALLEGRO, ktorého úlohou je overiť technológiu hélia chladených rýchlych reaktorov a otestovať nové materiály palivových kaziet aktívnej zóny pre reaktor s tepelným výkonom 2400 MW_t, ktorý je určený na komerčnú výrobu elektrickej energie. Nevyhnutným krokom vo vývoji tohto komerčného reaktora, založeného na technológii GFR, je zriadenie experimentálneho demonštračného reaktora na kvalifikáciu paliva a na overenie bezpečnostných systémov špecifických pre GFR. Dizertačná práca sa odvoláva na súčasný dizajn demonštrátora ALLEGRO, ktorý je navrhovaný iba na produkciu tepla, bez premeny energie (bez produkcie elektrickej energie). Navrhovaný tepelný výkon reaktora je 75 MW_t, pričom teplo generované v aktívnej zóne je odvádzané z primárneho okruhu do sekundárneho okruhu prostredníctvom hlavných tepelných výmenníkov.

2. Aktualizácia existujúcich modelov podľa aktuálneho stavu vývoja demonštrátora ALLEGRO

Súčasnú požiadavku vykonávať analýzy havarijných stavov plynom chladených systémov neboli výpočtovými kódmi pokryté. V posledných dvoch dekádach boli do výpočtových kódov doplnené vlastnosti a moduly umožňujúce predpovedanie správania sa aj plynom chladených reaktorov. Do výpočtových kódov boli doplnené moduly pre modelovanie prúdenia hélia, turbín, turbogenerátorov, tepelných výmenníkov plyn-voda a podobne.

Na kvalifikáciu stacionárneho stavu a analýzu prechodových procesov boli použité výpočtové programy RELAP5 a CATHARE2. Pre každý výpočtový program bol vyvinutý výpočtový model (vstupný súbor), ktorým je možné analyzovať správanie sa systému ALLEGRO a predpovedať očakávané fenomény ako odozvu na iniciačnú udalosť. Uvedené výpočtové modely boli aktualizované podľa najnovších dostupných dát reflektujúcich aktuálny stav vývoja demonštrátora ALLEGRO v rámci národných a medzinárodných projektov. Veľká pozornosť je venovaná validácii výpočtového kódu a výpočtového modelu na základe porovnávania výpočtov a experimentálnych dát pochádzajúcich z héliaovej slučky, prípadne iného plnorozmerového zariadenia.

3. Vytvorenie TH modelu hélíovej slučky STU

Za účelom validácie termohydraulického modelu experimentálneho zariadenia použitím reálnych dát meraných na zariadení je dôležité zamerať sa na vytvorenie zjednodušeného termohydraulického modelu experimentálneho zariadenia pre zvolený výpočtový program. Vytvorený zjednodušený model (vstupný súbor) reprodukuje experimentálne zariadenie s ohľadom na formát vstupných dát, ktorý vyhovuje požiadavkám aplikovaného výpočtového programu.

V rámci dizertačnej práce bol vytvorený zjednodušený model hélíovej slučky STU pre výpočtový program RELAP5. Zjednodušenie spočíva v tom, že nie sú uvažované všetky zariadenia a pomocné okruhy, ako sú uvedené v technologickej schéme. Pomocné systémy, ktoré priamo nevstupujú do prevádzky zariadenia boli nahradené okrajovými podmienkami. Modelované boli iba hlavné zariadenia primárneho okruhu – reaktor, tepelný výmenník, horúca a studená vetva spájajúca tieto dva komponenty.

Po zostavení modelu a preukázaní schopnosti modelu kvalitatívne a kvantitatívne reprezentovať ustálený stav na nominálnych parametroch hélíovej slučky bola vykonaná kvalifikácia výpočtového modelu zahŕňajúca validáciu na úrovni stacionárneho stavu s využitím nameraných dát na experimentálnom zariadení hélíovej slučky. Z porovnania experimentálnych dát a výsledkov výpočtu vyplýva, že vytvorený TH model fenomenologicky predpovedá javy a procesy na experimentálnom zariadení v dobrej zhode.

4. Rozšírenie validácie (kvalifikácie) výpočtového modelu demonštrátora ALLEGRO o dáta získané z experimentálnych meraní na hélíovej slučke

Analýzy bezpečnosti, vykonané v rámci termohydraulického benchmarku, ako aj vytvorený a validovaný výpočtový model hélíovej slučky STU, ktorý slúži na overenie prirodzenej cirkulácie hélia a overenie schopnosti odvodu tepla z GFR v režime prirodzenej cirkulácie, prispeli ku prehĺbeniu znalostí v problematike termodynamických a hydraulických vlastností primárneho okruhu demonštrátora ALLEGRO a potvrdili predpoklad bezpečnej prevádzky plynom chladených reaktorov IV. generácie, ktorých demonštračnou jednotkou je ALLEGRO. Dizertačná práca svojím obsahom prispela do oblasti rozvoja a skvalitňovania výpočtových nástrojov a výpočtových modelov využívaných na analýzy bezpečnosti demonštračného zariadenia ALLEGRO.

6 Zoznam použitej literatúry

- [1] ENERGOPROJEKT SLOVAKIA, Predbežná štúdia realizovateľnosti projektu ALLEGRO pre Slovensko, rev. 01, december 2015.
- [2] IAEA Power Reactor Information System, <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>
- [3] IRSN report: „Review of Generation IV Nuclear Energy Systems“.
- [4] B. KVIZDA a kol.: ALLEGRO Gas-cooled Fast Reactor (GFR) demonstrator thermal hydraulic benchmark, vedecký článok, doi:10.1016/j.nucengdes.2019.02.006, apríl 2019.
- [5] T. KLIMENT a kol.: „Rozbor možností vybraného integrálneho výpočtového programu RELAP5 alebo iného termohydraulického integrálneho výpočtového programu z pohľadu jeho aplikovateľnosti na bezpečnostné analýzy systému ALLEGRO (Úloha A.2.1)“, Ev.č. S_1300115_A-2-1, revízia 1, VUJE, máj 2015.
- [6] B. KVIZDA a kol.: „Validačná správa výpočtových modelov reaktora ALLEGRO pre T-H výpočtové kódy RELAP5, CATHARE2 a FLOWMASTER“ Výskumné centrum ALLEGRO, október 2015.
- [7] B. KVIZDA, Metodika pre kvalifikáciu termo-hydraulických výpočtových modelov, OKR-FVP-66-02, VUJE, a.s., Júl 2009.
- [8] A.PETRUZZI, F. D’AURIA: „Thermal-Hydraulic System Codes in Nuclear Reactor Safety and Qualification Procedures“, vedecký článok, doi:10.1155/2008/460795, University of Pisa, Taliansko, november 2007.
- [9] B. KVIZDA, S. BEBJAK et al., D3.2 Report of on job training and learning exercise "Generation IV Thermo-hydraulic Benchmark", final report, 2017.
- [10] B. KVIZDA, S. BEBJAK.: „Specification of ALLEGRO thermal hydraulic benchmark exercise“, revízia 3, VUJE, september 2017.
- [11] T. TROJAN a kol.: „ZHOTOVENIE A INŠTALÁCIA EXPERIMENTÁLNEJ HÉLIOVEJ SLUČKY“, Škoda JS, a.s., 2015.
- [12] S. BEBJAK a kol., Výskum fyzikálnych, technických a materiálových aspektov vysokoteplotných reaktorov s potenciálom výroby vodíka, Čiastková technická správa za úlohu 313BUH700003 (1H3), 2022.
- [13] S. BEBJAK a kol., Termohydraulické analýzy prúdenia vo vysokoteplotných okruhoch inertného plynu a jeho experimentálna validácia, technická správa, VUJE, 2022
- [14] V. SLUGENĚ a kol., Výskum fyzikálnych, technických a materiálových aspektov vysokoteplotných reaktorov s potenciálom výroby vodíka, Záverečná monitorovacia správa, 2023.

7 Publikačná činnosť autora

- [1] BEBJAK S.: „Supporting Deterministic T-H Analyses for Level 1 PSA, “23rd International Conference Nuclear Energy for New Europe – NENE 2014”, Portorož, Slovenia, September 8-11, 2014
ISBN: 978-961-6207-37-9
- [2] BEBJAK S., KVIZDA B.: „Gas-Cooled Fast Reactor – ALLEGRO Decay Heat Removal Studies”, International Conference Applied Physics of Condensed Matter - APCOM 2017, Štrbské Pleso, June 12 – 14, 2017
ISBN: 978-80-227-4699-1
- [3] VASILE A., KVIZDA B., BEBJAK S., MAYER G., VACHA P.: “Thermal-hydraulics and Decay Heat Removal in GFR ALLEGRO”, International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17), Yekaterinburg, Russian Federation, June 26 – 29, 2017
ISBN 978-92-0-108618-1, ISSN 0074-1884
- [4] BEBJAK S.: “Hodnotenie integrity pokrytia palivových prútkov pri LOCA havárii”, Česko-Slovenská odborná konferencie o jaderné energetice - NUSIM 2017, Brněnská přehrada, Česká republika, 23 - 24 november 2017
ISBN: 978-80-02-02773-7
- [5] KVIZDA B., MAYER G., VÁCHA P., MALESA J., SIWIEC A., VASILE A., BEBJAK S., HATALA B.: „ALLEGRO Gas-cooled Fast Reactor (GFR) demonstrator thermal hydraulic benchmark“, Nuclear Engineering and Design Volume 345, 15 April 2019, Pages 47-61
DOI: 10.1016/j.nucengdes.2019.02.006
- [6] BEBJAK S., „ALLEGRO as a demonstrator of GFR technology, “23rd Conference of Doctoral Students - ELITECH'21”, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Slovak University of Technology in Bratislava, Slovakia, on-line, May 26, 2021
ISBN: 978-80-227-5098-1
- [7] BEBJAK S, HATALA B, SLUGENŇ V.: “Aktuálny pohľad na projekt ALLEGRO“, Jaderná energie, číslo 3/2021, júl 2021, s. 33-39.
ISSN: 2694-9024
- [8] MAYER G., BATKI B., PANKA I., GUBA A., KVIZDA B., HATALA B., BEBJAK S., VÁCHA P., KORYČANSKÝ R., MALESA J., TOSELLO A., SERRE F., BERTRAND F., SHWAGERAUS E. Selection of the Enveloping Transients of ALLEGRO Reactor at the Beginning of the SafeG Project, Proceedings of the 19th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH19)", American Nuclear Society, March 6, 2022
ISBN: 9789076971261
- [9] HATALA B, BEBJAK S, KVIZDA B: Project SafeG: Safety of GFR Through Innovative Materials, Technologies and Processes, Proceedings of the 19th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH19)", American Nuclear Society, March 6, 2022
ISBN : 9789076971261

- [10] KVIKZDA B., BEBJAK S.: „Optimization of the Emergency Coolant Injection System of ALLEGRO“,
Proceedings of NURETH20 conference, 20-25 august 2023, Pages 3126-3139
doi.org/10.13182/NURETH20-41391
- [11] BEBJAK S., “Projekt Hydrogen IV”, konferencia NUSIM 2023, Česká nukleární společnost, Brno,
hotel Avanti, 5-6 október, 2023
ISBN : 978-80-02-03038-6

8 Summary

The dissertation thesis deals with the issue of safety analyses of generation IV. reactors. One of the main goals of the dissertation thesis was to contribute to increasing the safety of gas-cooled reactors by performing advanced safety analyses.

The first part of the thesis was devoted to an overview of generation IV. reactor concepts that were defined as prospective during the Generation IV. International Forum (GIF) and are planned to be further developed in the future. Among the six reactor concepts of generation IV., the work was focused on the gas-cooled fast reactor (GFR) and its demonstrator ALLEGRO, whose task is to verify the technology of helium-cooled fast reactors and to test new materials of fuel assembly for a reactor intended for commercial electricity production.

Safety analyses are used to demonstrate the achieved level of safety and reliability. For the RELAP5 and CATHARE2 codes, the computational models were updated according to the latest available data reflecting the current state of development of the ALLEGRO demonstrator within national and international projects. Computational models allow us analysing the behaviour of the ALLEGRO system and predicting expected phenomena as a response to an initiating event. Much attention is paid to the validation of the computational model based on the comparison of calculations and measured data from the experimental equipment.

As part of the thesis, a simplified model of the STU helium loop was created for the RELAP5 code. The simplification consists in the fact that not all devices and auxiliary circuits are considered in accordance with the technological diagram. After creating the thermohydraulic model and proving the ability of the model to represent the steady state qualitatively and quantitatively at the nominal parameters of the helium loop, the qualification of the computational model was performed, including validation at the steady state using the measured data on the experimental device of the helium loop.

The safety analyses performed within the thermohydraulic benchmark, as well as the created and validated computational model of the STU helium loop, which serves to verify the natural circulation of helium and the ability to remove heat from the GFR in the natural circulation mode, contributed to the deepening of knowledge in the issue of thermodynamic and hydraulic properties of the primary circuit of the ALLEGRO demonstrator and confirmed the assumption of safe operation of generation IV. gas-cooled reactors