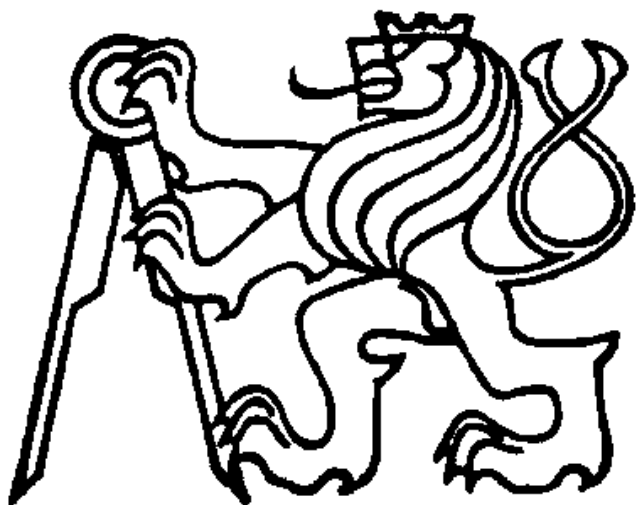


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
Katedra jaderných reaktorů

Ing. Pavel Král

**VLIV PŘÍTOMNOSTI NEKONDENZUJÍCÍCH PLYNŮ NA CHOVÁNÍ
PRIMÁRNÍHO OKRUHU VVER**

Doktorský studijní program: Aplikace přírodních věd
Studijní obor: Jaderné inženýrství

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha, 2014

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na Katedře jaderných reaktorů Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze.

Uchazeč: Pavel Král
Oddělení Bezpečnostní analýzy
ÚJV Řež, a. s.

Školitel: Ing. Jiří Macek, CSc.
Oddělení Bezpečnostní analýzy
ÚJV Řež, a. s.

Oponenti: prof. Ing. Marcel Miglierini, DrSc. - KJR FJFI ČVUT
Ing. Jozef Mišák CSc. - ÚJV Řež, a. s.
Dr. Ing. Jan Šik - Škoda JS, a. s.

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod. před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Jaderné inženýrství v zasedací místnosti č Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze.

S disertací je možno se seznámit na děkanátu Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze, na oddělení pro vědeckou a výzkumnou činnost, Břehová 7, Praha 1.

prof. Ing. Marcel Miglierini, DrSc.
předseda komise pro obhajobu disertační práce
ve studijním oboru
Jaderné inženýrství
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT, Břehová 7, Praha 1

OBSAH

1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	6
1.1 Stav uvažování NK plynů v bezpečnostních analýzách	6
1.2 Stav modelování nekondenzovatelných plynů v hlavních výpočetních programech.....	7
1.3 Přehled, obsah a závěry nejdůležitějších prací na téma vliv NK plynů na provoz a bezpečnosti VVER	7
2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	8
3. METODY ZPRACOVÁNÍ.....	9
3.1 Základních vztahy pro plyny a směsi	9
3.2 Rešerše dostupných experimentálních dat a dokumentovaných událostí s NK plyny na JE s VVER	10
3.3 Identifikace zdrojů nekondenzovatelných plynů pro I.O PWR a VVER11	
3.4 Popis základních rovnic a modelů systémového TH programu důležitých pro modelování NK plynů v I.O.....	12
3.5 Rozšířená validace standardní verze systémového TH programu pro události s NK plyny v I.O	15
3.6 Pilotní výpočty chování VVER s přítomností NK plynů v I.O se standardní verzí systémového TH programu	15
3.7 Úpravy systémového TH programu pro zdokonalené modelování vlivu NK plynů na chování I.O	17
3.8 Ověřování upravené verze systémového TH programu vůči měřením kondenzace na experimentálních zařízeních typu SET a ITF	17
3.9 Posouzení a výběr iniciačních událostí v jejichž bezpečnostních analýzách by měly být uvažovány NK plyny.....	18
4. VÝSLEDKY	19
4.1 Kvantifikace zdrojů nekondenzovatelných plynů pro primární okruh tlakovodního reaktoru	19
4.2 Výsledky rozšířené validace standardní verze systémového TH programu pro události s NK plyny v I.O	27
4.3 Výsledky pilotních výpočty chování VVER s přítomností NK plynů v I.O se standardní verzí systémového TH programu.....	36
4.4 Úpravy systémového TH programu pro zdokonalené modelování vlivu NK plynů na chování systému chlazení reaktoru.....	38
4.5 Výsledky ověřovacích výpočtů s upravenou verzí programu RELAP540	
4.6 Poznámka k dalšímu vývoji systémových TH programů	53
4.7 Výběr iniciačních událostí v jejichž bezpečnostních analýzách by měly být uvažovány NK plyny.....	54
5. ZÁVĚR	55

Seznam v tezích použité literatury.....	49
Seznam prací disertanta vztahujících se k disertaci.....	50
Ohlasy / Bez ohlasů a recenzí.....	52
SUMMARY.....	53
RESUMÉ	54

Seznam hlavních zkratek

AZ	aktivní zóna
COTINCO	experimentální zařízení (University di Roma)
EOKO	elektroohříváky kompenzátoru objemu
EOP	<i>Emergency Operating Procedures</i>
HA	hydroakumulátor
HCS	hlavní cirkulační smyčka
HTC	koefficient přestupu tepla (<i>heat transfer coefficient</i>)
HUA	hlavní uzavírací armatura
I.O	primární okruh
II.O	sekundární okruh
ITASCO	experimentální zařízení (University di Roma)
JE	jaderná elektrárna
KO	kompenzátor objemu
LOCA	havárie se ztrátou chladiva (<i>Loss-of-Coolant-Accident</i>)
NK	nekondenzovatelný (plyn)
NTČ	nízkotlaké čerpadlo (systému havarijního chlazení aktivní zóny)
PC	přirozená cirkulace
PG	parogenerátor
PWR	tlakovodní reaktor (pressurized water reactor)
SAOZ	systém havarijního chlazení aktivní zóny
SET	experimentální zařízení pro separátní testy (separate effect test)
TH	termohydraulický
VTČ	vysokotlaké čerpadlo (systému havarijního chlazení aktivní zóny)
VVER	vodo-vodní energetický reaktor (druh PWR)

1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Problematika přítomnosti nekondenzovatelných (NK) plynů v primárním okruhu a jejich vlivu na chování systémů VVER a PWR je zatím jen velmi málo analyzována a zmapována na úrovni systémové termohydraulické (TH) analýzy. Spíše z praxe na JE a z obecného TH posouzení vlivu plynů na přestup tepla a přirozenou cirkulaci jsou obecně přijímány jisté závěry ohledně chování primárního systému při přítomnosti plynů, jako například zhoršení přestupu tepla na PG, narušení přirozené cirkulace při expanzi plynových bublin, neřízené změny hladiny v KO apod.

Přítomnost NK plynů v I.O tlakovodního reaktoru se prakticky vůbec neuvažuje v bezpečnostních analýzách dokumentujících bezpečnost jaderné elektrárny v Předprovozní bezpečnostní zprávě (PpBZ) – viz níže. Rovněž v termohydraulických analýzách zpracovaných pro JE mimo PpBZ (analýzy pro EOP, PSA, PTS aj.) se NK plyny prakticky neuvažují.

Jedním z důvodů neutěšeného stavu ohledně (ne)uvažování plynů v I.O v TH analýzách je fakt, že výpočetní programy řešící proudění vody a páry v systému JE měly v minulosti obvykle značné potíže s modelováním dalšího média v okruhu, tj. s numerickým řešením více-složkového („multi-component“) systému. Současné verze programů již tuto problematiku zvládají lépe, nicméně i nyní znamená uvažování nekondenzovatelných plynů v systému výrazný nárůst výpočetního času.

1.1 Stav uvažování NK plynů v bezpečnostních analýzách

Uvolnění plynů v I.O se doposavad prakticky vůbec neuvažuje v bezpečnostních analýzách uvedených v Předprovozní bezpečnostní zprávě (PpBZ) JE s VVER provozovaných v ČR (podobný stav je i jinde ve světě), ačkoliv u řady iniciačních událostí by k uvolnění plynů došlo a u některých z nich by plyny v I.O mohly mít negativní vliv na chování systému predikované v bezpečnostní analýze.

Například v PpBZ JE Dukovany [20] je jedinou výjimkou analýza LOCA se selháním kulového ventilu hydroakumulátoru uvedená v kapitole „15.9 Speciální analýzy“.

Faktor uvažování či neuvažování NK plynů v bezpečnostních analýzách se stává velmi aktuálním v současné době i proto, že jsou do Bezpečnostních zpráv JE doplňovány analýzy nadprojektových nehod, analýzy událostí z odstavených stavů aj. doposavad neprováděné typy bezpečnostních analýz.

Co se týče analýz zpracovávaných mimo PpBZ, velmi významný dopad by přítomnost plynů v I.O měla na reálný průběh řady havarijních událostí se zásahy operátora (tj. v analýzách zpracovaných pro podporu EOP). Plyny v I.O mohou například výrazně zhoršit přestup tepla na parogenerátorech a tím znesnadnit obvyklé vychlazování systému pomocí odtlakování II.O přes PSA apod., kterým operátor reaguje prakticky na všechny významnější havarijní události s únikem primárního nebo sekundárního chladiva. V realistických analýzách podporujících Havarijní provozní předpisy (EOP)

by se tedy plyny v I.O v relevantních scénářích rozhodně měly uvažovat. Přitom ale NK plyny byly doposavad v tomto typu analýz uvažovány spíše výjimečně [26].

1.2 Stav modelování nekondenzovatelných plynů v hlavních výpočetních programech

Termohydraulické výpočetní programy, specifikované níže z hlediska schopnosti modelovat přítomnosti NK plynů v chladivu, lze rozdělit do 3 skupin:

- systémové TH programy určené pro výpočty projektových nehod (RELAP5/MOD3, RELAP5-3D, TRACE, CATHARE, ATHLET, APROS)
- programy pro chování kontejnmentu a/nebo pro výpočty těžkých havárií (MELCOR, COCOSYS)
- programy pro podrobné výpočty proudění třídy Computational Fluid Dynamics, CFD (FLUENT, CFX, STAR-CD)

V příslušné části disertační práce je stručně popsán stav modelování nekondenzovatelných plynů ve všech výše uvedených TH výpočetních programech. Závěrem je konstatováno, že v kategorii systémových TH programů (které jsou pro bezpečnostní analýzy nejdůležitější) pokračuje pozvolný a místy přerušovanému vývoj jejich modelů pro predikci přítomnosti, transportu a vlivu NK plynů v systému. Prakticky všechny programy dnes již zvládají výpočet chování primárního okruhu i při přítomnosti NK plynu v plynné fázi (dříve problematické z hlediska stability výpočtu). Některé programy pak přicházejí s vývojovými verzemi modelujícími i plyny rozpuštěné v kapalném chladivu. Jsou to ovšem teprve první kroky, které musí být následovány zdokonalením a experimentálním ověřením modelů pro uvolňování a rozpouštění plynů (časové konstanty pro uvolňování a rozpouštění plynů v různých režimech proudění a v geometriích). Ještě větší díl práce je pak třeba udělat při zdokonalení a experimentálním ověřením všech modelů proudění a přestupu tepla, které mohou být přítomností NK plynů v plynné i kapalně fázi ovlivněny (mezifázový přenos hmoty a tepla, model varu a kondenzace, model kritického proudění aj.).

1.3 Přehled, obsah a závěry nejdůležitějších prací na téma vliv NK plynů na provoz a bezpečnosti VVER

V poslední části popisu současného stavu problematiky je uveden přehled důležitých prací k problematice plynů v primárním okruhu VVER a jejich stručný obsah. U každé z celkem 9 prací (4 z toho jsou autorovy) je stručně popsáno její zaměření a výsledky.

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Obecné cíle práce jsou tyto dva:

- 1) Otevřít prakticky novou oblast bezpečnostních analýz, ve kterých se budou systematicky uvažovat NK plyny v I.O tlakovodního reaktoru (s důrazem na VVER).
- 2) S pomocí úprav TH programu a jeho validace vůči experimentálním datům přispět ke zpřesněnému a věrohodnějšímu modelování procesů s přítomností NK plynů v I.O.

Vlastní práce má potom větší počet specifických cílů. V předchozí kapitole „Současný stav problematiky“ a v následujících „řešeršních“ kapitolách jsou zpracovány tyto pomocné cíle práce:

- Popis stavu uvažování NK plynů v bezpečnostních analýzách JE s VVER.
- Stav modelování nekondenzovatelných plynů v hlavních výpočetních programech.
- Přehled, obsah a závěry nejdůležitějších prací na téma vliv NK plynů na provoz a bezpečnosti VVER.
- Uvedení základních vztahů pro plyny, jejich směsi a rozpustnost plynů v kapalinách.
- Přehled dostupných experimentů s NK plyny.
- Přehled události s NK plyny na JE s VVER.

Informace shromážděné při práci na výše uvedených pomocných cílech práce poslouží jednak při práci na hlavních odborných cílech práce (viz níže), jednak mohou být cenným a uceleným zdrojem základních informací pro odborníky JE, vývojáře programů, výpočtáře a posuzovatele bezpečnostních analýz při posuzování či modelování vlivu NK plynů na chování JE a hodnocení bezpečnostních analýz (to vše v souladu s obecným cílem č.1 uvedeným výše).

Hlavní odborné cíle disertační práce jsou pak následující:

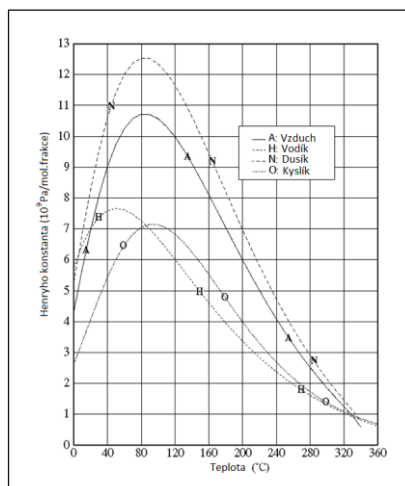
- Identifikace všech reálných zdrojů plynů pro I.O JE s VVER a provedení jejich předběžné kvantifikace. Rozbor možných dopadů a vlivu přítomnosti plynů v I.O na chování I.O a chlazení reaktoru VVER.
- Popis systémového TH programu (RELAP5) a identifikace všech důležitých modelů, které mají nebo by měly mít spojitost s modelováním přítomností NK plynů v systému.

- Rozšířená validace a aplikace standardní verze systémového TH programu RELAP5 na procesy s přítomností NK plynů v I.O.
- Návrh úprav systémového TH programu RELAP5 pro zdokonalené modelování vlivu NK plynů na chování systému chlazení reaktoru. Provedení vybraných úprav programu. Ověření (validace) modifikované verze programu vůči experimentálním datům.
- Posouzení celého spektra iniciačních událostí pro JE s VVER (dle struktury PpBZ) a výběr iniciačních událostí, v jejichž analýzách by měly být uvažovány NK plyny.

3. METODY ZPRACOVÁNÍ

3.1 Základních vztahy pro plyny a směsi

V úvodní části práce jsou uvedeny základní vztahy a zákony pro plyny, směsi vodních par a plynů a rozpustnost plynů ve vodě jako zákon Daltonův, vztahy pro suchost, stavová rovnice, Fickův zákon a zákon Henryho-Daltona. Dále jsou zde uvedeny základními fyzikálními vlastnosti vybraných plynů v tabulkovém i grafickém zobrazení.



Obr. 1: Teplotní závislost Henryho konstanty pro různé plyny [15]

Pro ilustraci je uveden zákon Henryho-Daltona pro rozpustnost plynu v kapalině, kde vztah mezi parciálním tlakem plynu nad hladinou p_i a molárním podílem plynu v kapalině N_i je následující:

$$p_i = K_H(T) \cdot N_i$$

Grafické znázorněním teplotní závislosti Henryho konstanty K_H pro různé plyny je na Obr. 1 výše.

3.2 Rešerše dostupných experimentálních dat a dokumentovaných událostí s NK plyny na JE s VVER

V této části disertační práce jsou nejprve shromážděny informace k experimentálním zařízením a datům relevantním pro problematiku nekondenzovatelných plynů v systému chlazení tlakovodního reaktoru. Informace jsou rozděleny do následujících bloků:

- Přehled hlavních integrálních experimentální zařízení pro VVER
- Přehled experimentů s NK plyny provedených na experimentálním zařízení PACTEL-VVER (VTT)
- Přehled experimentů s NK plyny provedených na exp. zařízení PMK (KFKI)
- Vybrané testy z experim. zařízení University Wisconsin
- Matice testů na experim. zařízení COTINCO (University di Roma)
- Matice testů na experim. zařízení ITASCO (University di Roma)

Dále jsou uvedeny a popsány dokumentované události s uvolněním NK plynů v I.O VVER. Jejich stručný přehled uvádíme i zde:

- 1) Vznik plynové bubliny pod víkem reaktoru na JE Bohunice V-1 (1985)
- 2) Nesprávné přivedení dusíku do PG pracovních smyček na JE Paks (1988)
- 3) Připojení smyčky I.O se zavzdušněným PG k reaktoru JE Dukovany (1989)
- 4) Narušení PC uvolněním nekondenzovatelných plynů JE Loviisa (1991)
- 5) Vznik plynové bubliny ve všech PG na JE Kozloduj (1994)
- 6) Průnik dusíku do I.O při zjišťování netěsnosti armatur na JE Kola (1994)
- 7) Vznik plynové bubliny pod víkem reaktoru uvolněním dusíku rozpuštěného v I.O na JE Bohunice V-1 (1998)
- 8) Vznik a exploze třaskavé směsi s vodíkem v PG na JE Zaporožská (1989)
- 9) Vznik a exploze třaskavé směsi s vodíkem pod víkem R na JE Kalinin (1990)

3.3 Identifikace zdrojů nekondenzovatelných plynů pro I.O PWR a VVER

Dosavadní povědomí o možné přítomnosti plynů v primárním okruhu JE se obvykle omezovalo na průnik dusíku z hydroakumulátorů do I.O při LOCA, plyny vzniklé při radiolýze vody, případně vodík uvolněný při reakci povlak-pára při LOCA, výjimečně pak na uvolnění plynů rozpuštěných v primárním chladivu při poklesu tlaku.

V disertační práci je proveden důslednější rozbor dané problematiky, jehož výsledkem je následující seznam možných zdrojů plynů pro I.O tlakovodního reaktoru:

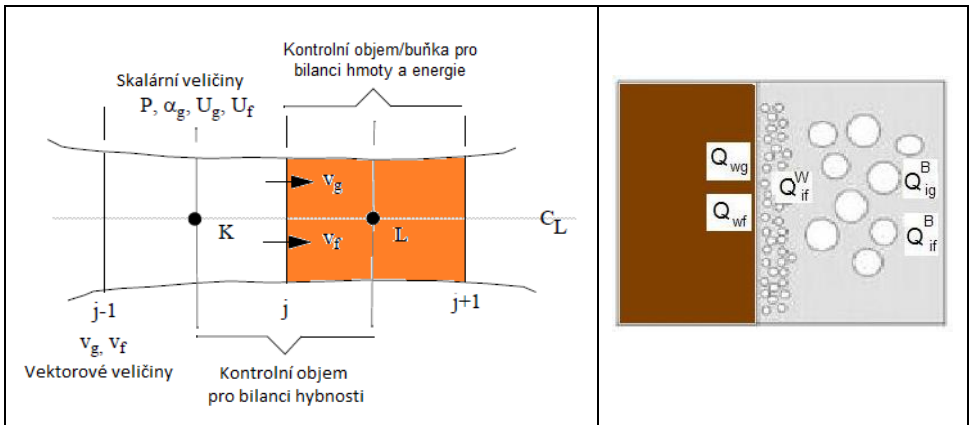
- a) Kontinuální uvolňování plynů rozpuštěných v primárním chladivu v KO během normálního provozu při varu na EOKO.
- b) Nedostatečné odplyňování primárního chladiva během normálního provozu.
- c) Uvolnění plynů rozpuštěných normálně v primárním chladivu (kvůli radiolýze vody nebo od dávkování plynů provozním personálem) při poklesu tlaku nebo změnách teploty.
- d) Radiolýza vody (od gama záření) po odstavení reaktoru a systémů kontinuálního čištění chladiva.
- e) Uvolnění dusíku rozpuštěného ve vodě hydroakumulátorů po vstřiku do I.O s nižším tlakem.
- f) Přímý průnik plynného dusíku z HA do I.O při selhání uzavření ventilů na konci vstřiku HA (mechanické selhání ventilu nebo ztráta el. napájení pohonu ventilu v pozdější fázi události typu „blackout“).
- g) Zpětné proudění na únikovém otvoru v některých fázích LOCA (průnik paro-plynné směsi z hermetických prostor do I.O).
- h) Uvolňování plynů rozpuštěných v neodplyněném chladivu vstřikovaném do I.O z aktivních systémů SAOZ při LOCA, přičemž k uvolňování dochází především při varu v AZ.
- i) Produkce vodíku z reakce povlak-pára v LOCA při přehřívání AZ.
- j) Speciální zdroje/příčiny průniku plynů do I.O v odstavených stavech (průnik dusíku z KO do primárních smyček při poklesu hladiny v KO, pronikání plynu do I.O přes netěsné trasy odvodu plynu, pronikání plynu do nádoby reaktoru přes netěsnou HUA odpojené smyčky, poddrenážování reaktoru a následný průnik plynů do cirkulačních smyček aj.).

Kvantifikace jednotlivých zdrojů pro VVER-440/213 (resp. VVER-1000/320) je ve stručné formě dokumentována v kap.4.1.

3.4 Popis základních rovnic a modelů systémového TH programu důležitých pro modelování NK plynů v I.O

V další části disertační práce je uveden podrobný popis systémového TH programu RELAP5 s důrazem na modelování systému chlazení reaktoru tlakovodního reaktoru při přítomnosti nekondenzovatelných plynů.

Jako příklad zde uvádíme rovnice zachování energie pro páru a vodu, rozšířenou o dodatečný člen Q_{gf} pro modelování přestupu citelného tepla mezi parní a kapalnou fází při přítomnosti NK plynů.



Obr. 2: Znázornění výpočtového kontrolního objemu pro výpočet zachování energie a znázornění přestupu tepla na hranici objemu a stěny

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g U_g) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_g \rho_g U_g v_g A) = & -P \frac{\partial \alpha_g}{\partial t} - \frac{P}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_g v_g A) + Q_{wg} + Q_{ig} \\ & + \Gamma_{ig} h_g^* + \Gamma_w h_g' - Q_{gf} + DISS_g \\ \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f U_f) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_f \rho_f U_f v_f A) = & -P \frac{\partial \alpha_f}{\partial t} - \frac{P}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_f v_f A) + Q_{wf} + Q_{if} \\ & - \Gamma_{ig} h_f^* - \Gamma_w h_f' + Q_{gf} + DISS_f \end{aligned}$$

Na levé straně rovnic jsou tyto členy:

- rychlost akumulace energie v kontrolním objemu
- rychlost konvektivního přívodu energie

Na pravé straně rovnice pak vidíme tyto členy:

- změna tlakové energie

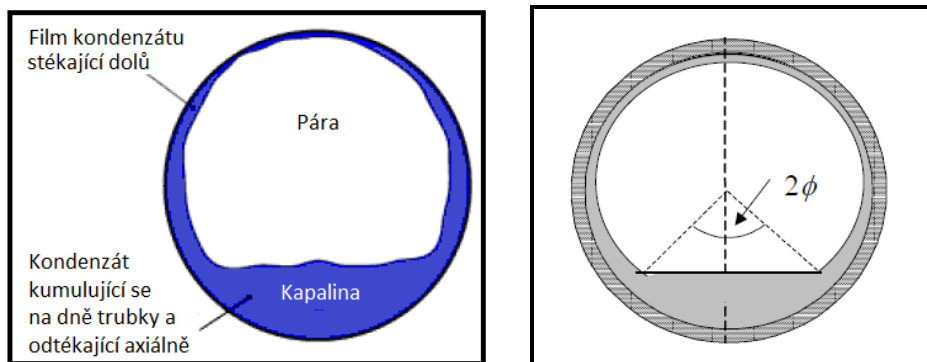
- práce tlakových sil
- přenos tepla na stěnách
- přenos tepla na mezifázovém rozhraní
- přenos energie při vzniku fáze uvnitř kontrolního objemu
- přenos energie při vzniku fáze na stěně kontrolního objemu
- přestup citelného tepla mezi fázemi
- disipační energie

Jeden z největších dopadů přítomnosti nekondenzovatelných plynů na chování systému chlazení tlakovodního reaktoru (PWR i VVER) je zhoršení kondenzace a přestupu tepla na teplosměnných trubkách parogenerátoru (PG). Proto se disertační práce věnuje modelu kondenzace na stěně podrobněji.

Popis a rozbor modelu kondenzace v programu RELAP5 je v disertační práci zpracován v těchto krocích:

- Celkové schéma řešení výpočtu kondenzace na stěně
- Model kondenzace ve svislých objemech
- Model kondenzace v horizontálních objemech
- Model kondenzace v přítomnosti nekondenzovatelných plynů
- Alternativní modely kondenzace

Z hlediska kondenzace v parogenerátorech VVER je nejdůležitější model kondenzace v horizontálních objemech (trubkách), případně objemech s malým sklonem.



Obr. 3a/b: Znázornění kondenzace v horizontální trubce v řezu

Pro kondenzaci v horizontálních objemech se v programu RELAP5 používá modifikace klasické Nusseltovy korelace pro svislé povrchy, kterou navrhnul Chato v roce 1962 [1] pro laminární kondenzaci uvnitř horizontálních trubek:

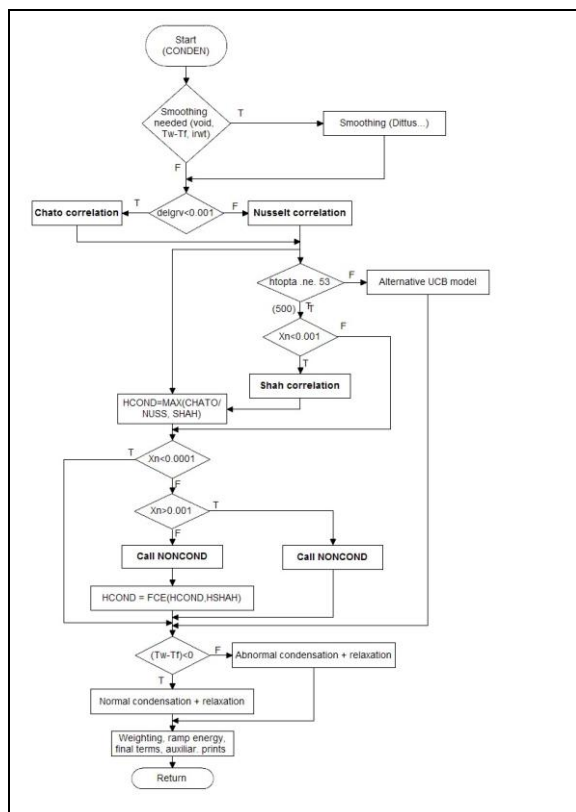
$$h_{c, chato} = F \left(\frac{g \rho_f \Delta \rho h_{fg} k_f^3}{D_h \mu_f (T_{spbb} - T_w)} \right)^{\frac{1}{4}}$$

kde:

$h_{fgb} = h_{gsat}(P_{vb})$ páry mínus entalpie syté kapaliny v objemu („bulk“)

P_{vb} = parciální tlak páry v objemu („bulk“)

F = člen zahrnující vliv hladiny kapaliny v spodní části trubky



Obr. 4: Celkový diagram řešení kondenzace v programu RELAP5

3.5 Rozšířená validace standardní verze systémového TH programu pro události s NK plyny v I.O

Ověřování (validace) výpočetního programu vůči naměřeným experimentálním datům z integrálních testovacích zařízení („integral test facility“, ITF) nebo z testovacích zařízení pro separátní jevy („separate effect test“, SET) prováděná jak autorskou organizací, tak uživateli programu, je nezastupitelné pro možnost vykonávat následně věrohodné bezpečnostní analýzy pro jaderné elektrárny.

Mimo standardních testů v čistou vodou v experimentálních smyčkách modelujících systém chlazení reaktoru PWR a VVER se autor práce účastnil i následujících projektů, ve kterých byly v chladicích smyčkách přítomny kromě vody i NK plyny:

- Ověřovací výpočty programu RELAP5/MOD3.3 vůči měření z testu T3.1 (LOCA 30% z horkého stavu a s dusíkem v KO) provedené v rámci projektu IMPAM na experimentálním zařízení PMK [25][33].
- Úvodní výpočty s programem TRACE s využitím dat z testu T3.1 provedeném rovněž na PMK [32].
- Výpočet testu PMK T1 (test stability/narušení přirozené cirkulace v odtlakovaném a otevřeném I.O při postupném snižování množství chladiva) vykonaného v rámci projektu OECD PKL2. Výpočet byl proveden s program RELAP5/MOD3.3 [34].
- Ověřovací výpočty (pre-test i post-test) vůči datům z „PWR PACTEL Benchmark SBL-50“ s programem RELAP5 (vč. variantních výpočtů s dusíkem na primární straně PG) [36][43].

Vybrané výsledky z těchto prací byly využity pro disertační práci – viz kap. 4.2.

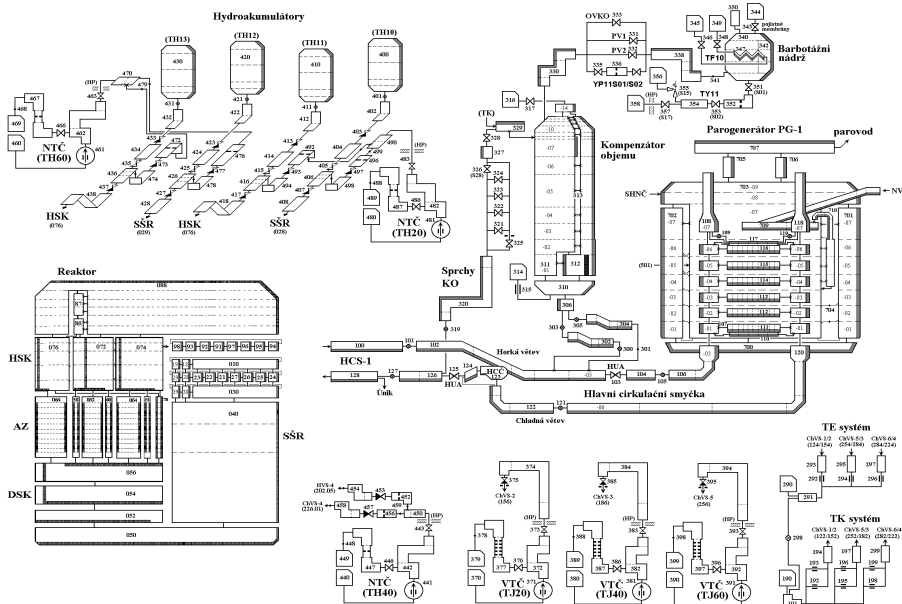
3.6 Pilotní výpočty chování VVER s přítomností NK plynů v I.O se standardní verzí systémového TH programu

V posledních letech byla problematice vlivu nekondenzovatelných plynů na chování I.O VVER věnována zvýšená pozornost, především pak v analýzách autora disertační práce pro JE Dukovany (VVER-440/213). Autor disertační práce se podílel na následujících analýzách:

- TH analýzy odvodu zbytkového tepla v režimu 5 při expanzi plynové bubliny v I.O JE s VVER-440/213 [21]
- TH analýzy časových oken, která má operátor k dispozici při LOCA vycházejících z režimu-5 a úplném selhání doplňování I.O [22]
- Bezpečnostní analýzy LOCA z odstavených stavů JE Dukovany [27]

- Analýzy ztráty přirozené cirkulace v režimu 6 JE Dukovany [30]
- Analýzy odstavených stavů JE Dukovany - ztráta odvodu tepla z důvodu ztráty proudění v II.O [35]
- Analýzy odstavených stavů JE Dukovany - ztráta přirozené cirkulace z důvodu poddrenážování v režimu-6 [37]
- Úvodní analýza vlivu nekondenzovatelných plynů na dochlazování I.O v havarijních podmínkách [41]

Nodalizace primárního okruhu vstupního modelu JE s VVER-440/213 připravená autorem pro výpočetní program RELAP5 [21] je uvedena na Obr. 5 níže.



**Obr. 5: Nodalizace primárního okruhu JE Dukovany
(zobrazena pouze 1 ze 6 modelovaných smyček)**

Vybrané výsledky z těchto pilotních prací byly využity i pro disertační práci – výsledky výpočtů malé a střední LOCA s/bez přítomnosti NK plynů v I.O a zásahy operátora jsou prezentovány v kap. 4.3.

3.7 Úpravy systémového TH programu pro zdokonalené modelování vlivu NK plynů na chování I.O

Zdokonalování systémových TH programů ve směru zlepšení jejich schopnosti modelovat vliv NK plynů na systém chlazení reaktoru lze provádět ve dvou základních oblastech (úrovních):

- Rozšíření standardního 2-složkového modelu (6÷8 rovnic) o rovnici zachování hmoty NK plynu rozpuštěného v kapalně fázi plus doplnění vztahů pro uvolňování/rozpuštění NK plynu z/do kapalně fáze a úpravy dotčených korelací a modelů.
- Zdokonalení korelací popisujících vliv nekondenzovatelných plynů na přestup tepla na stěně, mezifázový přestup tepla, var, kondenzaci apod.

Po rozboru obou možných směrů úprav přijal autor disertační práce rozhodnutí zaměřit se na zdokonalení jednoho konkrétního modelu programu a to na **model kondenzace páry v přítomnosti nekondenzujících plynů v horizontálních a nakloněných trubkách**, což je geometrie specifická mj. pro parogenerátory VVER. Popis úprav modelu kondenzace – viz kap. 4.4.

3.8 Ověřování upravené verze systémového TH programu vůči měřením kondenzace na experimentálních zařízeních typu SET a ITF

Upravená (a rovněž originální) verze programu RELAP5 byla podrobena sadě ověřovacích výpočtů. Byla přitom využita data z „separate effect test (SET)“ experimentálních zařízení COTINCO a ITASCO, na kterých byla proměřena řada testů zaměřených na kondenzaci páry i paro-plynné směsi v horizontální i nakloněné trubce. Výsledky ověřovacích výpočtů – viz kap.4.5.

Tab. 1: Příklad jedné matice testů na experimentálním zařízení ITASCO [10]

	Průtok vzduchu v [g/s] pro různé hmotnostní koncentrace na vstupu							
Průtok páry [l/s]	5%	7%	14%	20%	25%	30%	35%	40%
3.8	0.12	0.17	0.38	0.58	0.77	0.99	1.24	1.54
3.3	0.11	0.15	0.33	0.50	0.67	0.86	1.08	1.34
2.8	0.09	0.13	0.28	0.42	0.57	0.73	0.92	1.13
2.3	0.07	0.11	0.23	0.35	0.47	0.60	0.75	0.93
1.8	0.06	0.08	0.18	0.27	0.36	0.47	0.59	0.73
1.5	0.05	0.07	0.15	0.23	0.30	0.39	0.49	0.61

Ověřování vůči měřením na integrálním experimentálním zařízení PMK

Pro ověření funkčnosti a stability modifikované verze programu RELAP5 byly provedeny výpočty s modelem integrálního experimentálního zařízení PMK a porovnány výsledky získané s originální a modifikovanou verzí programu. Byly propočteny tyto dva případy:

- výpočet testu T3.1 (LOCA 30% z horkého stavu, s dusíkem v KO, bez VTČ; podrobnější specifikace - viz kapitoly 3.5 a 4.2)
- výpočet umělé varianty malé LOCA bez VTČ a s vychlazováním přes PSA (umělý scénář vycházející z T3.1 s menším únikem D2 mm a s vychlazováním systému přes II.O vedoucím ke kondenzaci primárního chladiva v trubkách PG)

Výsledky ověřovacích výpočtů – viz kapitola 4.5.

3.9 Posouzení a výběr iniciačních událostí, v jejichž bezpečnostních analýzách by měly být uvažovány NK plyny

Jednou ze závěrečných částí disertační práce bude posouzení a výběr iniciačních událostí dle struktury PpBZ, v jejichž bezpečnostních analýzách by měly být uvažovány NK plyny. Budou posouzeny jak projektové tak nadprojektové události, plus události z odstavených stavů.

4. VÝSLEDKY

4.1 Kvantifikace zdrojů nekondenzovatelných plynů pro primární okruh tlakovodního reaktoru

Na základě důsledného rozboru možných zdrojů plynů pro I.O tlakovodního reaktoru bylo identifikováno více než 10 potenciálních zdrojů NK plynů pro I.O. Níže uvedená kvantifikace jejich vydatnosti je provedena pro VVER-440/213, případně VVER-1000. Závěry tohoto rozboru však obecně platí pro všechny tlakovodní reaktory.

a) Kontinuální uvolňování plynů rozpuštěných v chladivu I.O v kompenzátoru objemu během normálního provozu

V primárním okruhu JE s VVER-440/213 je při normálním provozu udržován bezkyslíkatý (redukční), mírně alkalický chemický režim s minimálním obsahem chemických nečistot. Povolný obsah plynů v primárním chladivu VVER-440/213 je následující [16]:

Vodík (H_2): $25 \div 40$ Nml/kg (limit = 50 Nml/kg)

Kyslík (O_2): $1 \div 8$ μ g/kg (limit = 10 μ g/kg)

Čpavek (NH_3): $8 \div 13$ mg/kg (limit = 20 mg/kg)

Kompenzátor objemu (KO) funguje při normálním provozu kvůli kombinaci kontinuálního sprchování (malý průtok cca 2 m³/h přes trasu sprch KO kvůli jejímu prohřevu) a varu na elektroohřívácích (EOKO) v podstatě jako odplyňovák.

Především lehký vodík se následně kumuluje v horních částech KO a je nutné ho periodicky odpouštět. Jeho přítomnost je zřejmá např. z měření teploty v blízkosti připojení potrubí PVKO (po nárůstu koncentrace vodíku ukazuje teploměr výrazně nižší teplotu než je teplota sytosti odpovídající tlaku v I.O). Na JE Dukovany se dle provozního předpisu P030m [17] proto 2x týdně provádí odfuk vodíku z KO.

Pokud by operátor neprováděl odplyňování KO a při předpokladu dokonalého odplynění vody z kontinuálního sprchování v KO vychází celkové hypotetické množství vodíku nakumulovaného v parním prostoru KO za celou kampaň (340 dnů + 10 dnů kdy předpokládáme i při odstaveném reaktoru činnost EOKO a kontinuálního sprchování) následovně:

Hypotetické množství vodíku uvolněného v KO za kampaň při 50 Nml/kg (max.):

$$2 \text{ m}^3/\text{h} \times 785 \text{ kg/m}^3 \times 24 \text{ hod} \times 350 \text{ dnů} \times 50 \text{ Nml/kg} = 659 \text{ Nm}^3 \cong \mathbf{59,3 \text{ kg}}$$

Hypotetické množství vodíku uvolněného v KO za kampaň při 35 Nml/kg (realist.):

$$2 \text{ m}^3/\text{h} \times 785 \text{ kg/m}^3 \times 24 \text{ hod} \times 350 \text{ dnů} \times 35 \text{ Nml/kg} = 461 \text{ Nm}^3 \cong \mathbf{41,5 \text{ kg}}$$

Přepočet z normálních mililitrů (Nml, objem plynu za normálních podmínek 0 °C a 101,325 kPa), respektive normálních kubických metrů na kilogramy je proveden přes hustotu vodíku za normálních podmínek 0,08987 kg/m³.

Při uvažování odplyňování kompenzátoru objemu JE Dukovany operátorem dle stávající praxe 2x za týden, lze vyjádřit množství vodíku uvolněného v KO za 4 dny:

Množství vodíku uvolněného v KO za 4 dny při 35 Nml/kg (realist.):

$$2 \text{ m}^3/\text{h} \times 785 \text{ kg}/\text{m}^3 \times 24 \text{ hod} \times 4 \text{ dny} \times 35 \text{ Nml}/\text{kg} = 5,3 \text{ Nm}^3 \cong \mathbf{0,48 \text{ kg}}$$

Toto je reálné množství vodíku v KO, se kterým lze počítat v realistické analýze. Výše uvedené hodnoty jsou vhodné pro konzervativní výpočty.

b) Nedostatečné odplyňování primárního chladiva během normálního provozu

Problematické především v kombinaci se snížením primárního tlaku při odstavování reaktoru. Viz přehled událostí s uvolněním NK plynů a narušením přirozené cirkulace dokumentovaných na VVER v kap. 3.2.

c) Uvolnění plynů rozpuštěných normálně v primárním chladivu při poklesu tlaku nebo změně teploty

Obecně, plyny rozpuštěné normálně v primárním chladivu se mohou uvolnit buď při poklesu tlaku nebo při změně teploty vedoucí k nižší rozpustnosti plynu v dané kapalině.

Při 220 tunách primárního chladiva VVER-440 a obsah plynů na horním okraji povoleného provozního rozsahu (viz výše) pak hypotetické maximální uvolnění plynů z primárního chladiva povede k následujícím množstvím volného plynu v I.O:

$$\text{Vodík (H}_2\text{): } 220000 \text{ kg} \cdot 40 \text{ Nml}/\text{kg} = 8,8 \text{ Nm}^3 = \mathbf{0,792 \text{ kg}}$$

$$\text{Kyslík (O}_2\text{): } 220000 \text{ kg} \cdot 8 \text{ } \mu\text{g}/\text{kg} = \mathbf{1,76 \text{ kg}} = 1,23 \text{ Nm}^3$$

$$\text{Čpavek (NH}_3\text{): } 220000 \text{ kg} \cdot 13 \text{ mg}/\text{kg} = \mathbf{2860 \text{ kg}} = 3707 \text{ Nm}^3$$

V reálném procesu dojde samozřejmě pouze k částečnému uvolnění plynů rozpuštěných v chladivu I.O. Největší uvolnění lze čekat u LOCA s velkým poklesem tlaku (ať již kvůli velikosti úniku nebo kvůli řízenému vychlazování a odtlakování systému operátorem) a varem v AZ. U LOCA ale dojde k úniku části chladiva i s plyny z I.O do hermetických prostor. Podobně může dojít k úniku již uvolněných plynů z I.O do kontejnmentu a naopak do I.O se ze systémů havarijního chlazení AZ dodává neodplynná voda obsahující značné množství rozpuštěných plynů (bude diskutováno a kvantifikováno níže).

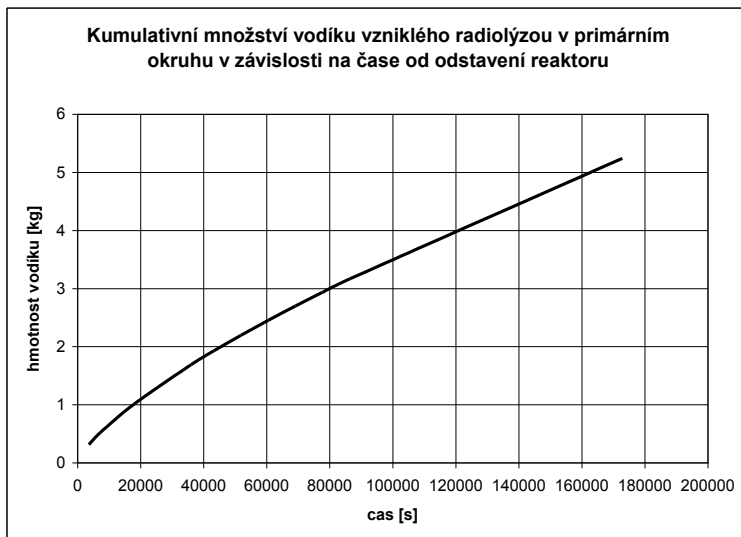
U čpavku (amoniak, NH_3) s vysokou rozpustností ve vodě lze očekávat uvolnění jen velmi malé části rozpuštěného plynu i při odtlakování I.O a dosažení rovnovážné koncentrace NH_3 ve vodě odpovídající parciálnímu tlaku NH_3 nad hladinou.

d) Radiolýza vody po odstavení reaktoru a systému kontinuálního čištění chladiva

Důležitým zdrojem vodíku pro I.O je pokračující radiolýza primárního chladiva po ukončení činnosti systému kontinuálního čištění chladiva. Podle kap. 6.2.6.3.2.2 PpBZ EDU se za 100 dní po odstavení reaktoru VVER-440 uvolní z paliva v podobě záření γ energie 8×10^{12} J. Ze záření γ se zachycuje 9% vodou v reaktoru, to je $7,2 \times 10^{11}$ J, tedy $7,2 \times 10^{11} \text{ J} \times 6,24146 \times 10^{18} \text{ eV/J} = 45 \times 10^{29}$ eV.

Dle PpBZ EDU na 100 eV γ záření připadá 0,45 molekuly H_2 . Tedy, celkem se v reaktoru vytvoří $20,3 \times 10^{27}$ molekul vodíku, to je 67 kg vodíku a pro zvýšený výkon reaktoru (z původních 1375 MW_t na 1444 MW_t , provedeno na EDU v letech 2010-2011) zhruba 70 kg vodíku.

Pro kratší časové úseky lze provést přepočít dle křivky zbytkového tepla pro časový úsek cca 2 dny (173000 s), což je dostatečný časový úsek pro TH analýzy LOCA aj. procesů.



Obr. 6: Kumulativní množství H_2 vznikající v odstaveném R radiolýzou vody

Pro časový úsek 1 dne (86400 s) lze tedy očekávat vytvoření **3,2 kg vodíku** z radiolýzy vody. Za 2 dny se pak vytvoří 5,3 kg vodíku.

e) Uvolnění dusíku rozpuštěného ve vodě hydroakumulátorů po vstřiku do I.O s nižším tlakem

Parametry média v hydroakumulátorech VVER-440/213 JE Dukovany se mohou pohybovat v rozsazích teplot $40 \div 60$ °C ($\rho = 993,7 \div 984,8$ kg/m³, $K_H = 10,6 \div 11,9 \cdot 10^9$ Pa), tlaků $3,1 \div 6,1$ MPa a hladin $6,2 \pm 0,2$ m ($V = 40 \div 43$ m³).

Pro limitní hodnoty parametrů vedoucích k minimálnímu a maximálnímu množství rozpuštěného dusíku ve vodě 1 HA, můžeme provést s pomocí Henryho zákona a vztahů pro molární zlomky následující výpočty:

$$m_{N_2, \max} = N_{N_2, \max} \frac{M_{N_2}}{M_{\text{celk}}} m_{\text{celk}, \max} \cong \frac{p_{N_2, \max}}{K_{H, 40^\circ\text{C}}} \frac{M_{N_2}}{M_{H_2O}} V_{H_2O, \max} \rho_{40^\circ\text{C}} = \frac{6,1 \cdot 10^6}{10,6 \cdot 10^9} \frac{28}{18} 43,0 \cdot 993,7 = 38,25 \text{ kg}$$

$$m_{N_2, \min} = N_{N_2, \min} \frac{M_{N_2}}{M_{\text{celk}}} m_{\text{celk}, \min} \cong \frac{p_{N_2, \min}}{K_{H, 60^\circ\text{C}}} \frac{M_{N_2}}{M_{H_2O}} V_{H_2O, \min} \rho_{60^\circ\text{C}} = \frac{3,1 \cdot 10^6}{11,9 \cdot 10^9} \frac{28}{18} 40,0 \cdot 984,8 = 15,96 \text{ kg}$$

Množství dusíku rozpuštěného ve vodě 4 HA se tedy může pohybovat v rozmezí $64 \div 153$ kg ($51 \div 122$ Nm³). Prakticky celé toto množství dusíku v případě LOCA dostane spolu s vodou HA do primárního okruhu.

Pro reálnější podmínky pozdější fáze LOCA (0,5 MPa, 150 °C) lze ze stavové rovnice ($R_{N_2} = 296,84$ J/(kgK)) napočít hustotu dusíku 3,98 kg/m³. Potom množství $64 \div 153$ kg dusíku odpovídá objem $16,1 \div 38,4$ m³.

f) Přímý průnik dusíku z HA do I.O při selhání uzavření ventilů na konci vstřiku

Téměř 30 m³ dusíku pod tlakem 3,6 MPa v jednom hydroakumulátoru VVER-440/213 odpovídá hmotnosti dusíku 1040 kg (832 Nm³). Celkové množství dusíku ve 4 hydroakumulátorech je tedy **4160 kg**, čemuž odpovídá normální objem dusíku **3328 Nm³**.

Ukončení vstřiku hydroakumulátoru (HA) je zajištěno dosednutím plovákového ventilu do kónického sedla ve spodní části HA – při hladině zhruba 0,5 m. Pokud plovákový ventil selže, dojde k úplnému vyprázdnění HA a průniku dusíku do potrubí HA a dále do I.O. V závislosti na míře netěsnosti a rozdílu tlaků mezi HA a I.O bude průtok dusíku silnější nebo slabší. Časově může být průnik dusíku omezen uzavřením izolačních ventilů na potrubí HA operátorem. Může tedy dojít k úplnému nebo částečnému výtoku dusíku do I.O.

Při selhání izolace lze očekávat částečný nebo úplný výtok dusíku do primárního okruhu. I částečný únik 20% dusíku z pouze 1 HA vnese do I.O 208 kg dusíku, což je 260 Nm³, tedy zhruba objem celého I.O.

g) Zpětné proudění na únikovém otvoru a průnik paro-plynné směsi z kontejnmentu do I.O v některých fázích LBLOCA

Reverzní proudění na únikovém otvoru(ech) se vyskytuje především u velkých LOCA (LBLOCA) ve fázi vstřiku studené vody z HA, která vede k silné kondenzaci páry a v extrémním případě může vést až k poklesu primárního tlaku pod tlak v kontejnmentu (hermetických prostorech, HP) a reverznímu proudění paro-vzdušné směsi z HP do I.O. Tento jev byl poprvé identifikován v pracích autora v r. 2008 pro JE Temelín s komplexním modelem VVER-1000 vč. kontejnmentu a podrobného modelu SAOZ a prezentován mj. v práci [28].

Kombinované výpočty s modelem I.O a kontejnmentu byly doposavad prováděny především pro VVER-1000 (jednodušší kontejnment, který lze modelovat s pomocí systémových TH programů typu RELAP5).

V typické LBLOCA s gilotinovým roztržením hlavního cirkulačního potrubí VVER-1000 dochází k reverznímu proudění na únikových otvorech v časovém intervalu 25-40 s [39]. Maximální reverzní průtok je přitom 200 kg/s. Viz níže srovnávací obrázky z výpočtů LBLOCA bez modelu kontejnmentu (tj. s konstantním protitlakem za únikovými otvory) a s plným modelem vč. kontejnmentu a proměnlivým protitlakem za únikovými otvory:

Maximální integrální množství plynů proniknuvších tímto způsobem do I.O je přitom přibližně **10 kg**. Později, po obnovení výtoku z I.O do kontejnmentu, množství tohoto plynů v I.O klesá.

h) Uvolňování plynů rozpuštěných v neodplynném chladivu vstřikovaném do I.O z aktivních systémů SAOZ při LOCA

Typický obsah hlavních atmosférických plynů - dusíku a kyslíku - ve vodě s hladinou v kontaktu s atmosférou lze napočítat z údajů uvedených v 3.1 (a v příslušné kapitole disertační práce) jejich přenásobením podílem těchto plynů v atmosféře, tj. zohledněním parciálních tlaků těchto plynů ve vzduchu. Pokud jsou výsledné koncentrace $[N_{cm}^3/g]$ následně přenásobeny hustotou plynů pro příslušnou teplotu (ze stavové rovnice) je výsledkem koncentrace dusíku a kyslíku ve vodě ve styku se vzduchem ve formě váhového podílu $[g/kg]$ – viz níže.

V LOCA s varem v AZ dodávka neodplynné vody (přesněji roztoku kyseliny borité) od SAOZ kompenzuje odpar v AZ. Při varu v AZ se samozřejmě uvolňují i rozpuštěné plyny obsažené ve vodě.

Podobně v recirkulační fázi havarijního chlazení AZ během LOCA, kdy se do I.O vstřikuje chladivo z jímky a zároveň dochází ke sprchování hermetických prostor, bude voda vstřikovaná do I.O samozřejmě neodplynná. Obsah plynů bude záviset na teplotě, tlaku a složení atmosféry v hermetických prostorech a dále na teplotě a tlaku v jímkě a v sacích potrubích čerpadel SAOZ.

Předběžná kvantifikace uvolňování nekondenzovatelných plynů v AZ během LOCA:

Při uvažování výkonu AZ 15 MW, což je průměrný zbytkový výkon VVER-440 v časovém intervalu 5000 – 25000 s po odstavení, lze při znalosti rozdílu entalpií páry produkované v AZ při tlaku 1 MPa ($h''=2778$ kJ/kg) a vody vstřikované do I.O od SAOZ ($h_{30C}=126$ kJ/kg) lehce odvodit průměrný odpar v AZ:

$$\dot{m} = \frac{Q_{AZ}}{\Delta h} = \frac{15 \cdot 10^6}{(2778 - 126)10^3} = 5,66 \text{ kg/s}$$

Dále při předpokladu průměrné teploty vody v nádržích SAOZ 30 °C a tomu odpovídající koncentraci rozpuštěného dusíku a kyslíku ve vodě a pro příslušnou hustotu těchto plynů napočtenou pro 30 °C např. ze stavové rovnice ($\rho_{N_2,30^\circ C}=1,126$ kg/m³, $\rho_{O_2,30^\circ C}=1,129$ kg/m³) lze napočíst tyto aktuální koncentrace dusíku a kyslíku ve vodě SAOZ:

$$C_{N_2} = 0,79 \cdot 0,0133 = 0,0105 \text{ Ncm}^3/\text{g} = 10,5 \text{ Ncm}^3/\text{kg} \cong 11,82 \text{ mg/kg}$$

$$C_{O_2} = 0,21 \cdot 0,0255 = 0,0054 \text{ Ncm}^3/\text{g} = 5,4 \text{ Ncm}^3/\text{kg} \cong 6,05 \text{ mg/kg}$$

Pokud je průměrný odpar v AZ 5,66 kg/s, potom je nezbytná dodávka vody od SAOZ do oblasti AZ rovněž 5,66 kg/s a relevantní uvolňování kyslíku při varu v AZ je 34 mg/s (0,122 kg/h) a uvolňování dusíku je 67 mg/s (0,241 kg/h). Celková vydatnost toho zdroje vzdušných plynů pro I.O během LOCA je tedy 0,363 kg/h, tj. 8,7 kg/den.

K uvolňování plynů z vody do SAOZ nemusí docházet jen v AZ, ale rovněž při ohřevu nebo varu na horkých stěnách I.O a v parogenerátorech (pokud jsou na sekundární straně PG vyšší parametry než v I.O). Potom by uvolňování plynů v I.O z chladiva vstřikovaného aktivními systémy SAOZ v úvodní části nehody mohlo být nepatrně vyšší. Naopak v opačném směru může působit zpětné rozpouštění plynů ve vodě a její výtok z I.O přes únikový otvor nebo odvod části výkonu AZ pouhou konvekcí do kapalného chladiva (bez varu). Přesná kvantifikace uvolňování a rozpouštění plynů v I.O je možná jen v rámci výpočtu s TH programem, který má základní bilanční rovnice pro plyny v parní fázi (směs s vodní parou nebo čistý plyn) i pro plyny v kapalně vodě (rozpuštěné plyny) a doplňkové rovnice pro uvolňování a rozpouštění plynů.

i) Produkce vodíku z reakce povlak-pára v LOCA při odhalení a přehřívání AZ

Při maximální projektové havárii – roztržení primárního potrubí – dochází k přechodnému odhalení a přehřívání aktivní zóny, přičemž probíhá exotermická reakce zirkonium – vodní pára spojená s produkcí vodíku.

Limitní hodnota (specifické kritérium přijatelnost) pro projektové nehody je přitom 1% maximálního hypotetického množství vodíku, který by vznikl při zreagování veškerého zirkonia v AZ. Maximální hypotetické množství je přitom 494 kg a 1% z toho množství je 4,94 kg.

Typické množství vygenerovaného vodíku v bezpečnostní analýze tohoto typu události je pro VVER-440/213 $0,05 \pm 0,1$ kg, což je množství zanedbatelné vůči jiným zdrojům nekondenzovatelných plynů diskutovaným v ostatních částech kap.4.1.

Důležitost tohoto zdroje plynu může být významnější pouze v nadprojektových a především pak v těžkých haváriích.

j) Zdroje plynů pro I.O specifické pro odstavené stavy

Mimo zdrojů nekondenzovatelných plynů uvedených výše může dojít v odstavených stavech k následujícím procesům, jež vedou k průniku plynu do I.O:

- pronikání plynu do I.O přes netěsné trasy odvzdušnění
- pronikání plynu do nádoby reaktoru přes netěsnou HUA odpojené smyčky
- poddrenážování reaktoru a následný průnik vzduchu do hlavních cirkulačních smyček
- nadměrné rozpouštění dusíku v chladiu I.O při doplňování chladiva do KO (sprchování) s dusíkovým polštářem
- připojení neodvzdušněné smyčky I.O
 - nedostatečné odvzdušnění smyčky při jejím zaplňování
 - zachycení vzduchu v šikmých trubkách PG při zaplňování smyčky
- uvolnění NK plynů při čištění primárního chladiva na SVO bez jeho náhřevu v odplynováku
- průnik dusíku z KO do HCS (při chybném snížení hladiny KO operátorem nebo při LOCA)
- selhání izolačních ventilů na trase HA vedoucí při odstavování bloku a snižování tlaku v I.O k vytečení HA a při selhání i plovákového ventilu k průniku dusíku do I.O
- nesprávné přivedení dusíku do smyčky (dusík se používá při drenážování odstavené smyčky – může dojít k chybě operátora, který přivede omylem dusík do pracující nebo rezervní smyčky)
- průnik dusíku do I.O při testech prováděných na oddělené části systému přivedením plynu
- neřízené rozpouštění plynů ze vzduchu do primárního chladiva přes volné hladiny při otevřeném I.O

Předběžné posouzení možného dopadu přítomnosti plynů na chování primárního okruhu VVER a PWR

Na základě výše uvedeného seznamu možných zdrojů plynů pro I.O PWR jsou zde popsány hlavní možné dopady přítomnosti NK plynů na chování I.O:

- **Kumulace vodíku v kompenzátoru objemu při normálním provozu.**
Vzhledem ke kontinuálnímu sprchování KO a činnosti EOKO dochází k uvolňování vodíku a jiných plynů do parního objemu KO. Vodík stoupá díky své nízké specifické hmotnosti do horních částí KO, kde se kumuluje. Následkem toho zde dochází k poklesu měřené teploty, což je pro operativní personál indikace nutnosti odplynění KO (provádí se cca 2x týdně). Při dodržování příslušných provozních předpisů nemá zásadní vliv na chování I.O.
- **Vznik plynové bubliny pod víkem reaktoru nebo v parogenerátorech bez ztráty přirozené cirkulace.**
Uvolnění plynů v I.O vede ke vzniku plynových bublin pod víkem reaktoru a/nebo v parogenerátorech. Tyto bubliny mohou vést k zeslabení přirozené cirkulace a případně ke zhoršení přestupu tepla na PG. Nicméně pokud plynové bubliny nepřesáhnou kritickou velikost, nedojde k přerušení přirozené cirkulace.
- **Zhoršení přestupu tepla na PG v režimu dvoufázové přirozené cirkulace.**
Zde mimo možnosti zablokování části trubek PG plynem dojde ještě ke zhoršení kondenzace páry v PG kvůli přítomnosti NK plynů.
- **Expanze plynové bublin (bublin) v horních částech I.O vedoucí k přerušení přirozené cirkulace.**
Při větším množství plynů uvolněných v I.O může dojít nejen ke zhoršení přestupu tepla na PG, ale k úplnému vytěsnění kapalného chladiva z primární strany PG, případně k poklesu hladiny v reaktoru pod elevaci výstupních nátrubků a tím k přerušení přirozené cirkulace v příslušné smyčce nebo v celém I.O.
- **Problematické obnovení přirozené cirkulace i přes doplňování chladiva do I.O operátorem (např. po předchozím poddrenážování I.O a průniku plynů do PG).**
Plyny zachycené v parogenerátorech mohou bránit zaplnění PG vodou a tím rozběhu přirozené cirkulace (zcela nebo částečně). Reakce systému nezávisí jen na množství plynů v PG a na tom, zda je dostupné havarijní odplynění PG, ale i na stavu zbytku I.O, tj. zda jsou otevřené odvzdušňovací trasy na reaktoru a na KO. Pokud odvzdušnění otevřená nejsou a tím pádem dodávka vody vede ke zvýšení tlaku v I.O, tak dojde ke stlačení plynových kapes v PG, nárůstu hladin v PG, průniku vody do trubek PG a alespoň částečnému obnovení přirozené cirkulace v I.O.
- **Zhoršení přestupu tepla na PG v režimu „var - kondenzace“.**
Po přerušení přirozené cirkulace v I.O se může odvod zbytkového tepla z reaktoru k parogenerátorům a do II.O realizovat v režimu „var – kondenzace“, kdy

v zaplavené AZ probíhá var, pára proniká k parogenerátorům, zde kondenzuje a kapalně chladivo se vrací přes smyčky do reaktoru. Přítomnost plynů v PG může zhoršit přestup tepla na PG v tomto režimu a vést ke zvýšení teploty a tlaku v I.O.

➤ **Vytěsnění kapalného chladiva při LOCA při velmi velkém uvolnění plynů v I.O.**

Uvolnění většího množství plynů v I.O v průběhu LOCA může vést až k vytěsnění kapalného chladiva z horní části I.O až po elevaci únikového otvoru. Dostatečně velký zdroj plynů může být např. dusík z hydroakumulátorů a/nebo dlouhodobá dodávka neodplyněného chladiva od aktivních systémů SAOZ v kombinaci s varem v AZ a nedostupností/nedostatečností systému havarijního odplynění.

➤ **Vytvoření třaskavé směsi v horních částech I.O při uvolnění vodíku a jiných plynů z primárního chladiva.**

I během normálního provozu existují provozní stavy, při kterých může docházet k hromadění vodíku v horních koncích I.O (podobně pak při přechodových stavech a havarijních podmínkách), čímž se vytváří nebo může vytvářet potenciál pro zahoření nebo výbuch vodíku. Je třeba poznamenat, že problematika explozí vodíku uvnitř a vně I.O je mimo rozsah této práce, která se soustředí na systémovou termohydrauliku I.O.

➤ **Další dopady rozpuštěných a uvolněných plynů v I.O na chování AZ, PG a jiných částí I.O.**

Rozpuštěné nebo uvolněné plyny v I.O mohou mít vliv na iniciaci varu (podchlazený var), na dosažení kritického tepelného toku (krize varu), na měření teplot atd.

4.2 Výsledky rozšířené validace standardní verze systémového TH programu pro události s NK plyny v I.O

Přehled prací autora zaměřených na validaci systémových TH programů vůči experimentům s nekondenzovatelnými plyny v primárním okruhu je uvedený v kap. 3.5. Pro ilustraci zde uvedeme základní informace a výsledky z ověřovacího výpočtu s programem RELAP5 vůči testu T3.1 (LOCA 30% z horkého stavu a s dusíkem v KO) provedeného na experimentálním zařízení PMK v rámci projektu IMPAM [25][33].

Základní specifikace testu PMK T3.1 byly následující:

- Počáteční podmínky odpovídají odstavenému stavu VVER-440 po výměně parního polštáře v kompenzátoru objemu za dusíkový (tlak v KO 2,8 MPa, teplota v I.O 150 °C).
- Vlastní LOCA test začíná otevřením únikového ventilu s průřezem odpovídajícím 30% průtočného průřezu HCS v čase 0 s.

- Simultánně s otevřením úniku je provedena izolace PG ze strany NV i páry, vypnutí EOKO a vypnutí HCC. Rovněž je snížen výkon AZ z 21 kW (zvýšený výkon pro kompenzaci tepelných ztrát) na 6 kW odpovídajících zbytkovému výkonu VVER-440.
- Ze systémů havarijního chlazení AZ je k dispozici pouze čerpadlo NTČ, které začne dodávku vody do I.O v případě poklesu primárního tlaku pod 0,7 MPa (nebo v případě nárůstu teploty AZ nad 450 °C)
- Test je ukončen, pokud teplota v AZ překročí 500 °C.

Hlavní cíl experimentu bylo ověření havarijních postupů obnovení chlazení AZ při LOCA v odstaveném stavu, kdy nejsou dostupné HA a signály ESFAS iniciující aktivní systémy SAOZ. Dále je test T3.1 velmi přínosný z hlediska modelování chování celého I.O v podmínkách LOCA s přítomností dusíku v I.O.

Počáteční a okrajové podmínky experimentu T3.1 i následného výpočtu v ÚJV Řež jsou uvedeny v tabulkách níže.

Tab. 2: Počáteční podmínky testu IMPAM T3.1 (PMK)

	Jednotka	Nepřesnost měření	Specifikace	Měření	Výpočet RELAP5 (ÚJV)
Primární tlak (PR21)	MPa	±0,05	2,6	2,82	2,87
Průtok v I.O (FL53)	kg/s	±0,06	4,5	4,54	4,54
Teplota na vstupu AZ	K	±1,0	150,0	152,5	152,8
Výkon AZ (PW01)	kW	-	21,0	21,0	21,0
Hladina v KO (LE71)	m	±0,02	9,27	8,98	8,98
Sekundární tlak (PR81)	MPa	±0,02	1,0	1,32	1,319
Průtok NV (FL81)	kg/s	-	0,31	1,0	1,1
Teplota NV (TE81)	°C	±1,67	146,8	148,0	146,8
Hladina v PG (LE81)	m	±0,05	zcela zaplněný		

Tab. 3: Okrajové podmínky testu IMPAM T3.1 (PMK)

	Jednotka	Specif.	Měření	Výpočet RELAP5
Velikost únikového otvoru (průměr clony)	mm	6,0	6,0	6,0
Čas otevření únikového ventilu	s	0,0	1,0	0,0

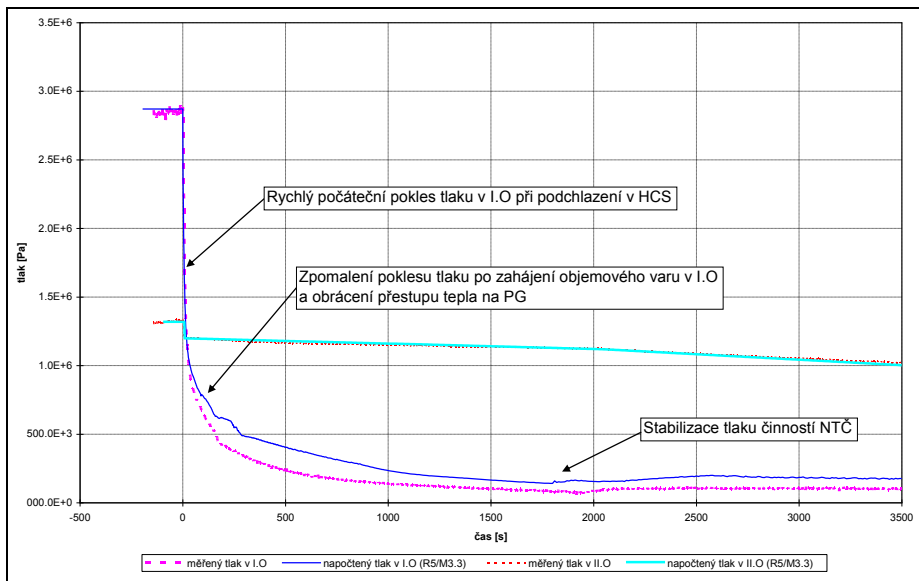
Čas lineárního poklesu výkonu AZ na 6 kW	s	0,0	1,0	0,0
Čas izolace NV a parovodu	s	3,0	0,0	0,0
Začátek odstavování HCČ	s	0,0	2,0	2,0
Konec doběhu HCČ	s	150	86	150
Kapacita NTČ	kg/s	0,042	0,070	0,070
Iničiací vstřiku NTČ od teploty povlaku nebo od času	°C s	450 1800	N/A 1777	N/A 1777

Časová posloupnost hlavních událostí v testu T3.1 je uvedena v Tab. 4. Dále pak uvádíme grafické průběhy hlavních parametrů PMK během testu T3.1.

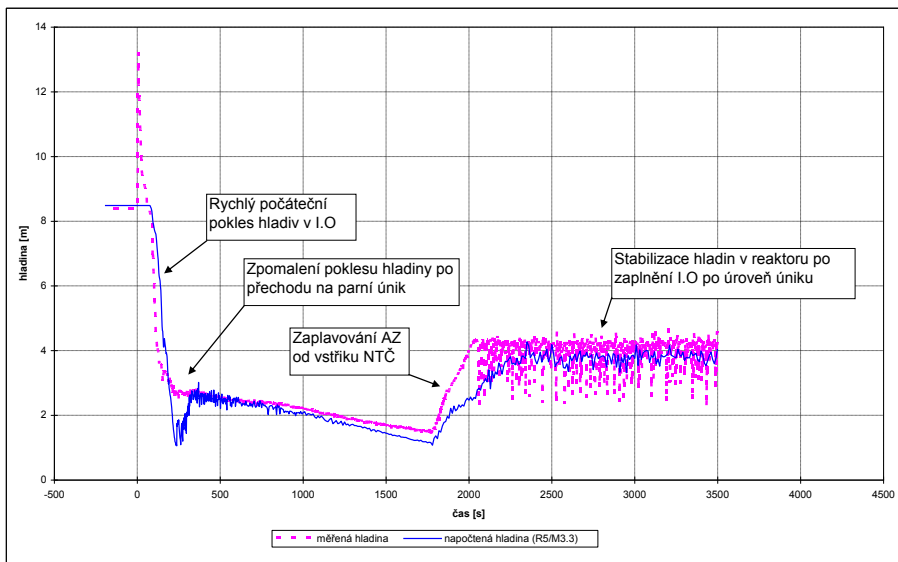
Tab. 4: Časová posloupnost hlavních událostí testu IMPAM T3.1 (PMK)

Událost	Měření	Výpočet
Otevření únikového otvoru (únik D6 mm, 30% průřezu ChVS)	0,0	0,0
Pokles výkonu AZ	(0,0)	0,0
Izolace NV a parovodu	0,0	0,0
Začátek odstavování HCČ	2,0	2,0
Prázdný KO	8	8
Ukončen doběh HCČ	86	150
Prázdný horký kolektor PG	88	90
Otevření hydrouzávěru na horké větvi	150	192
Otevření hydrouzávěru na studené větvi	172	180
Začátek 2. přehřívání AZ	1281	1360
Start NTČ	1777	1777
Minimum hladiny v AZ	1763 (1,40 m)	1780 (1,08 m)
Maximální teplota v AZ	1806 (405 °C)	1800 (417 °C)
Konec přehřívání AZ = dokončeno zaplávání	1950	1920
Konec testu	3543	3500

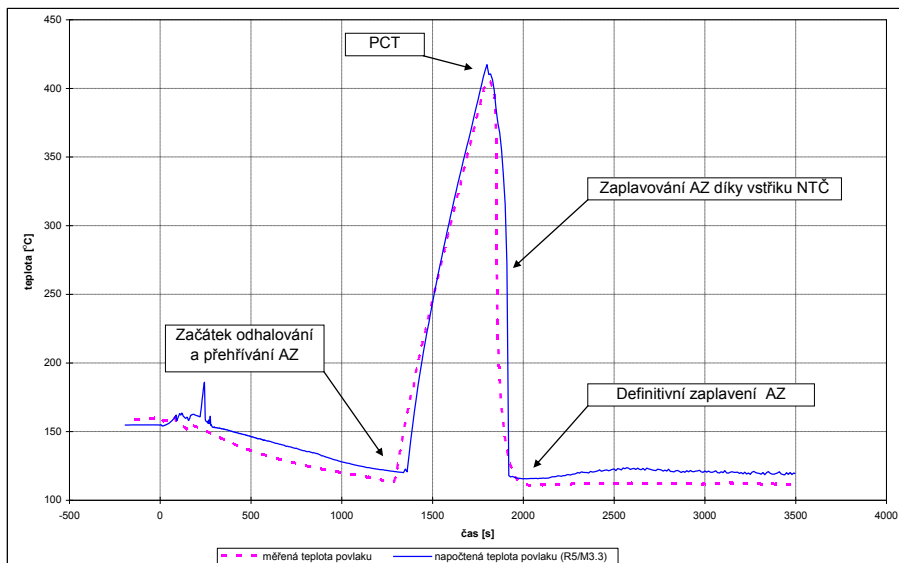
Z tabulky časové posloupnosti hlavních událostí i z grafického srovnání na Obr. 7 až Obr. 9 vidíme, že shoda výpočtu s měřením je velmi dobrá. A to včetně predikce odhalení a přehřívání simulátoru aktivní zóny v pozdější fázi SBLOCA (bez VTČ!) dříve než se do protitlaku prosadí NTČ a obnoví hladinu v AZ.



Obr. 7: Primární a sekundární tlak (PMK IMPAM T3.1)



Obr. 8: Hladina v reaktoru (PMK IMPAM T3.1)



Obr. 9: Maximální teplota v AZ (PMK IMPAM T3.1)

Statistické hodnocení shody výpočtu s experimentem PMK T3.1

Pro statistické vyhodnocení shody výsledků výše uvedeného výpočtu s měřením testu T3.1 bude použit program ACAP (Automated Code Assessment Program, [11]) a tyto statistické metody:

- střední kvadratická odchylka (MSE), váha 0,4
- D'Auriiova varianta rychlé Fourierovy transformace (FFT), váha 0,3
- průměrná absolutní odchylka (MEM), váha 0,3

Výsledky napočtené pomocí jednotlivých statistických metod vyhodnocujících míru odchylky výsledků výpočtu od naměřených hodnot jsou převedeny na tzv. „figures of merit“ (FOM) a pomocí těchto je vyhodnocována přijatelnost přesnosti výpočtu (dle NUREG/IA220, [18]) – viz **Tab. 5**. Převod na FOM je níže demonstrován na příkladu střední kvadratické odchylky (mean square error, MSE). Základní vzorec pro výpočet střední kvadratické odchylky je následující:

$$MSE \equiv \frac{1}{N} \left\{ \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2 \right\}$$

Jeho normalizovaný tvar:

$$MSE^* \equiv \frac{1}{N} \left\{ \sum_{i=1}^N (O_i^* - P_i^*)^2 \right\}$$

Příčemž vztahy pro normování experimentálních dat (O) a predikovaných data (P) jsou:

$$O^* \equiv \frac{O}{\bar{O}}$$

$$P^* \equiv \frac{P}{\bar{P}}$$

Převod na FOM:

$$FOM_{MSE} = \frac{1}{(MSE^* + 1)}$$

Kvalita shody výsledů výpočtu s experimentálním měřením bude v souladu s NUREG/IA220 [18] rozdělena do 4 úrovní (mimo FOM se zde používá i parametr AA – average amplitude).

Tab. 5: Úrovně shody výpočtu s experimentem dle NUREG/IA220 [18]

NUREG/IA-0220	Přepočet na FOM	Kvalita výpočtu a shody s experimentálním měřením
AA _{tot} ≤ 0.3	FOM ≥ 0.77	Velmi dobrá shoda
0.3 < AA _{tot} ≤ 0.5	0.67 ≤ FOM < 0.77	Dobrá shoda
0.5 < AA _{tot} ≤ 0.7	0.59 ≤ FOM < 0.67	Slabá shoda
AA _{tot} > 0.7	FOM < 0.59	Velmi slabá shoda

Pomocí výše uvedené metodiky bude vyhodnoceno 15 níže uvedených parametrů a to pro celé časové okno experimentu a výpočtu (při výrazně odlišné shodě výpočtu a testu v jednotlivých fázích/oknech procesu je možno provádět i vyhodnocení shody pro jednotlivé fáze procesu separátně – to zde není nutné).

Tab. 6: Statistické hodnocení (ACAP) shody výpočtu RELAP5 s testem T3.1

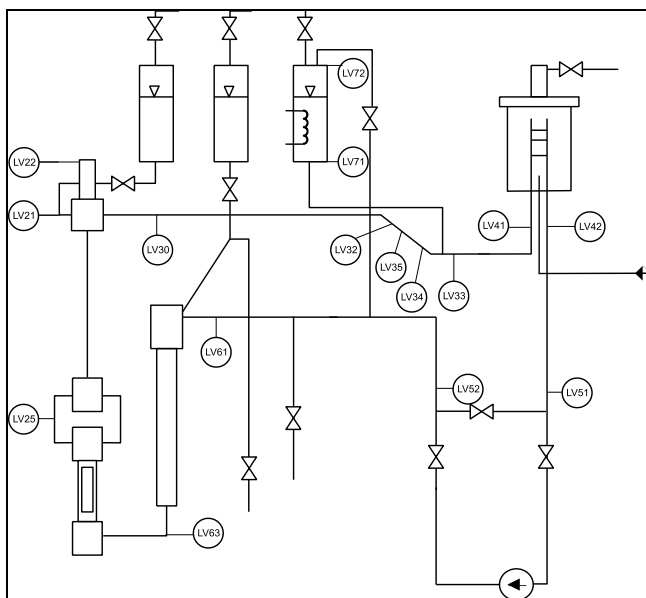
Parametr	Označení dle PMK	Jednotka	FOM
1. Primární tlak	PR21	Pa	0,937
2. Teplota na vstupu AZ	TE63	°C	0,904
3. Teplota na výstupu AZ	TE22	°C	0,894
4. Teplota v HSK	TE23	°C	0,823
5. Teplota v horké větvi	TE40	°C	0,806
6. Maximální teplota povlaku v AZ	TW01	°C	0,897

7. Váhová hladina ve vnitřním reaktoru	LE11	m	0,876
8. Váhová hladina v sestupné šachtě reaktoru	LE61	m	0,854
9. Váhová hladina v KO	LE71	m	0,960
10. Váhová hladina v horké větvi u reaktoru	LE31	m	0,923
11. Váhová hladina v horké větvi u PG	LE45	m	0,879
12. Váhová hladina v chladné větvi u PG	LE46	m	0,925
13. Průtok smyčkou	FL53	kg/s	0,854
14. Tlak v sekundárním okruhu	PR81	Pa	0,944
15. Integrál výtoku přes únikový otvor	MA02	kg	0,964
FOM celkový průměr:			0,896

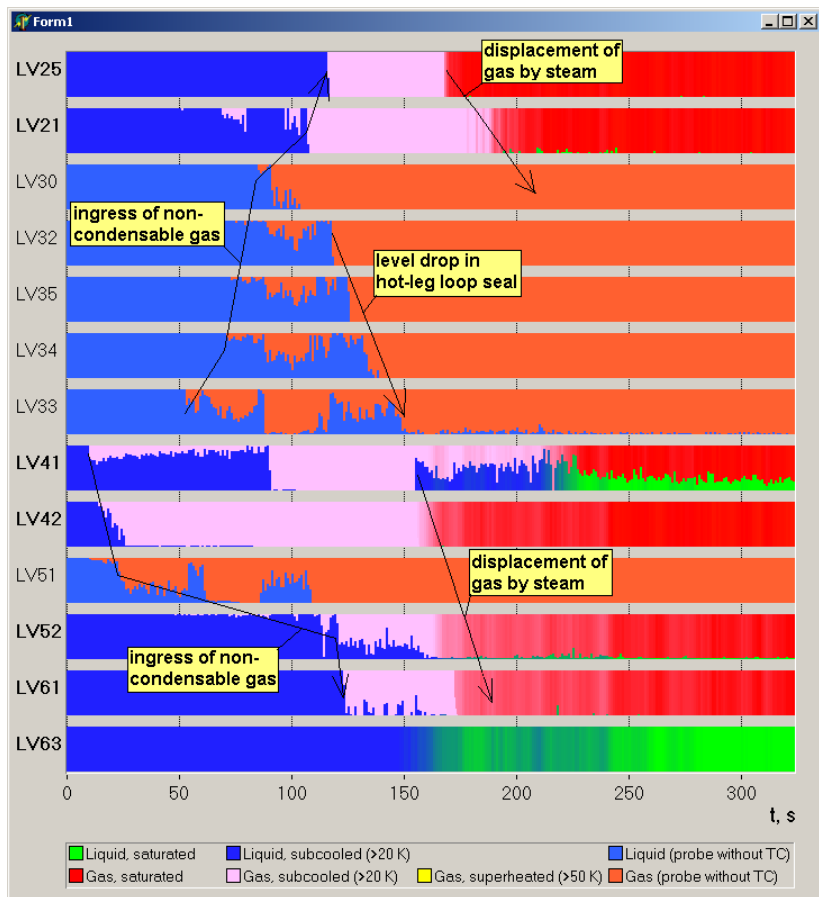
Statistické hodnocení provedené pomocí programu ACAP a využívající kombinace D'Auria FFT, střední kvadratické odchylky a průměrné absolutní odchylky ukazuje „velmi dobrou shodu“ u všech parametrů.

Dodatečná analýza transportu NK plynů v testu PMK T3.1

Část sond pro měření objemového podílu paro-plynné směsi byla vybavena integrovaným termočlánkem, který umožňoval určit, ve kterých fázích procesu bylo v měřeném místě přítomen převážně NK plyn a ve kterých pára (případně jejich směs).



Obr. 10: Rozmístění sond pro měření objemového podílu paro-plynné směsi [12]



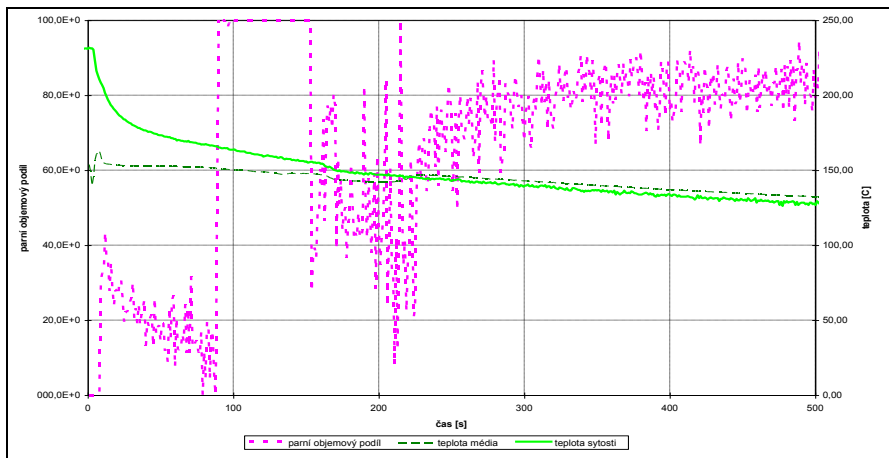
Obr. 11: Přehled signálů ze sond měřících paro-plynný objemový podíl [12]

Překlad anglických termínů z výše uvedeného obrázku:

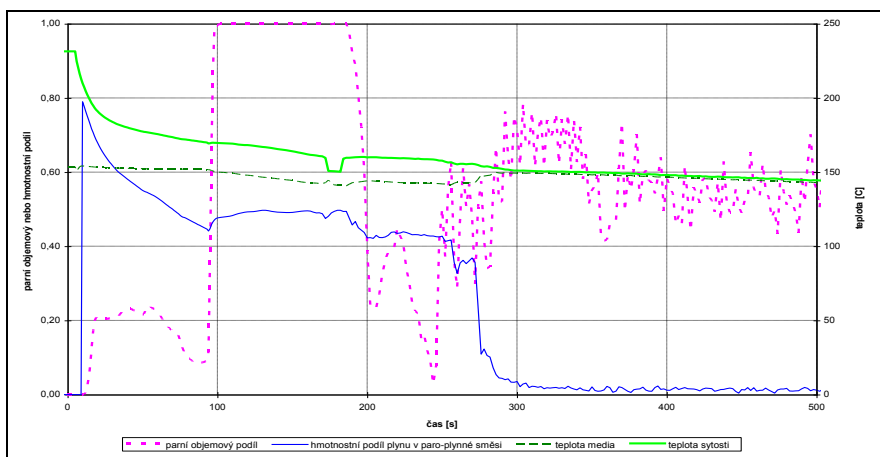
- „ingress of noncondensable gas“ – průnik nekondenzujícího plynu
- „displacement of gas by steam“ – vytlačení plynu parou
- „level drop in hot leg loop seal“ – pokles hladiny v hydrouzávěru horké větve

Změny stavu chladicího média (kapalina – pára – plyn) v místech měřících sond jsou znázorněny na následujícím 2D obrázku níže (**Obr. 11**). U sond vybavených termočlánkem (tučně vyznačené LV25, LV21, LV41 aj.) je vidět, jak na většině měřících míst dochází k změně proudění z jednofázového kapalného na plyno-kapalné a jednofázové plynné (po průniku dusík z KO do smyčky a reaktoru) a posléze na paro-plynné a parní (po zesílení varu v AZ a vytěsnění většiny dusíku z I.O).

Podobně lze tyto změny sledovat na následujících 2 obrázcích, kde je srovnáno měření (**Obr. 12**) a výpočet (**Obr. 13**) parní objemové frakce, teploty média a teploty sytosti v horké větvi (v **Obr. 13** z výpočtu programem RELAP5 je navíc i suchost dusíku). Po 15 s, kdy dochází k průniku dusíku z KO do primární smyčky, je vidět nárůst parní objemové frakce při teplotě média nižší než je teplota sytosti, což svědčí o přítomnosti NK plynu v místě měření. V intervalu 200-300 s pak dochází k vytěsnění dusíku z horké větve a teploty média a sytosti jsou prakticky shodné.



Obr. 12: Parní objemová frakce a teploty v horké větvi (měření PMK)



Obr. 13: Parní objemová frakce a teploty v horké větvi (výpočet RELAP)

4.3 Výsledky pilotních výpočty chování VVER s přítomností NK plynů v I.O se standardní verzí systémového TH programu

V posledních letech byla problematika vlivu nekondenzovatelných plynů na chování I.O VVER věnována zvýšená pozornost, především pak v analýzách JE Dukovany (VVER-440/213). Přehled prací autora z této oblasti je uveden v kap. 3.6.

Pro ilustraci jsou uvedeny výsledky výpočtů SBLOCA s uvažováním NK plynů rozpuštěných v chladivu primárního okruhu a v nádržích SAOZ, zadaných pomocí okrajových podmínek a vzorců pro uvolňování rozpuštěných plynů. Výpočty jsou provedeny s programem RELAP5, nicméně tento postup je možný se všemi současnými systémovými TH programy modelujícími plyny v parní fázi (tj. i bez modelování plynů rozpuštěných v kapalně vodě). Byly propočteny následující varianty malé LOCA s únikem D60 mm na chladné větvi a bez VTC:

1A) bez NK plynů, bez PSA

1B) bez NK plynů, vychlazování přes PSA

1C) uvolnění NK plynů ze vstřikování HA, bez PSA

1D) uvolnění NK plynů ze vstřikování HA, vychlazování přes PSA

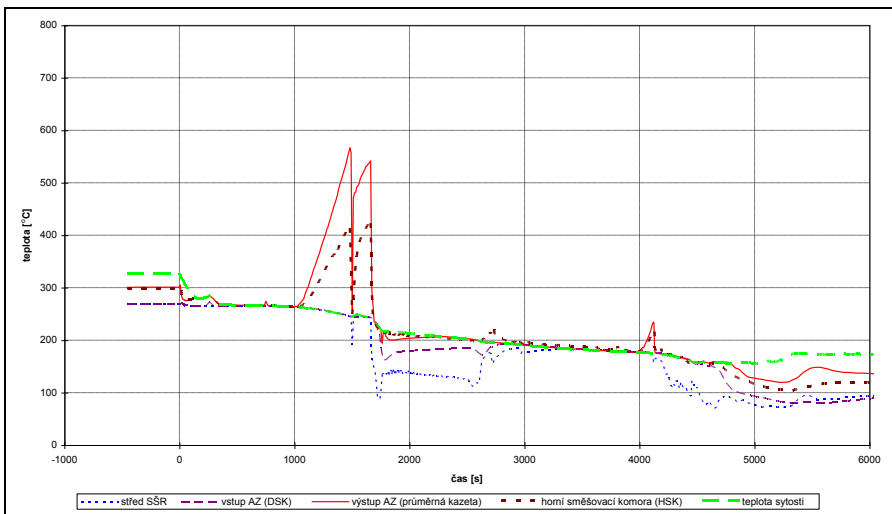
V případech s uvolnění NK plynů ze vstřikování 4/4 HA bylo modelováno uvolnění 184 kg dusíku. Toto množství se skládá z 80 kg dusíku uvolněného z vody HA (viz kap. 4.1) a 104 kg dusíku, který do I.O pronikl při částečném selhání izolace 1 HA (10% dusíku z 1 HA).

Zhodnocení:

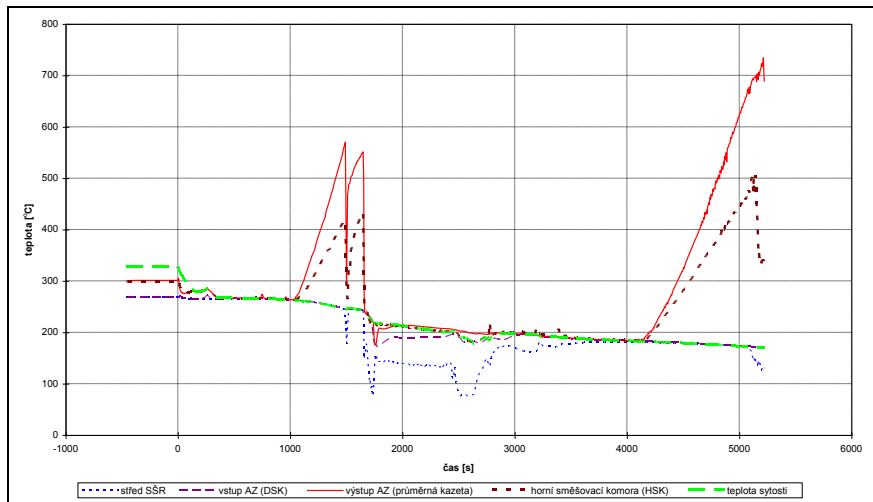
Pro grafickou prezentaci a porovnání jsou vybrány pouze varianty 1B a 1D – na nichž je demonstrován vliv NK plynů v I.O na zhoršenou efektivitu zásahu operátora v malé LOCA.

Na Obr. 14 a Obr. 15 je vidět, že u malé LOCA D60 se zásahy operátora dle EOP (zde zjednodušeno na vychlazování systému přes PSA) vede přítomnost dusíku v I.O k pomalejšímu odtlakování I.O a tím k pozdějšímu prosazení se NTČ a k přehřátí AZ.

Pokud by byly modelovány i další zásahy operativního personálu dle EOP - jako například použití studeného vstřiku do KO pro odtlakování I.O a obnovení hladiny v KO - tak i zde lze při přítomnosti dusíku v I.O očekávat zhoršení efektivity tohoto zásahu a průběhu nehody.



Obr. 14: Teploty chladiva v reaktoru (D60 bez NK plynů v I.O, var.1B)



Obr. 15: Teploty chladiva v reaktoru (D60 se 184 kg dusíku v I.O, var.1D)

4.4 Úpravy systémového TH programu pro zdokonalené modelování vlivu NK plynů na chování systému chlazení reaktoru

Po rozboru možných úprav systémového výpočetního programu pro zdokonalené modelování vlivu NK plynů na chování systému chlazení reaktoru (viz kap. 3.7) přijal autor disertační práce rozhodnutí zaměřit se na **zdokonalení modelu kondenzace** s důrazem na přítomnost NK plynů a na kondenzaci v horizontálních a nakloněných trubkách, což je geometrie specifická pro parogenerátory VVER.

Při důkladné analýze modelů kondenzace v programu RELAP5/MOD3.3 [19][44][46] bylo nalezeno několik možných zlepšení modelu:

- Rozšíření oblasti použití modelu kondenzace v horizontálních trubkách ze striktně horizontální objemu i na nakloněné objemy - v souladu s originální prací [1]. Což je velmi důležité pro mírně nakloněné trubky parogenerátorů VVER (drenážní sklon).
- Zpřesnění parametru pro rozhodování o požití modelu pro horizontální kondenzaci. Namísto elevačního parametru „delgrv“ použít některého z parametru programu RELAP5 reprezentujícího přímo úhel sklonu objemu.
- Zpřesnění modelování vlivu množství kapalné objemové frakce ve spodní části horizontálního (nakloněného) objemu na koeficient přestupu tepla při kondenzaci – přechod od korelace Chato (1962) k její modifikaci, kterou navrhl Jaster a Kosky (1976).
- Přidání volby pro uživatele, kterou by u vstupního objemu teplosměnné trubky mohl „změkčit“ vliv modelu difúzní vrstvy (Colburn-Hougen) na kondenzaci v přítomnosti NK plynů a tím respektovat fakt, že ve vstupní části kondenzační trubky ještě není vyvinutý profil s vysokou koncentrací NK plynu u rozhraní s kondzátem, ale paro-plynná směs je zpočátku homogenní.
- Úprava zdrojového kódu v proceduře „conden.f“ při detekci NK plynů ($X_n \geq 0,001$) tak, aby nedocházelo k vynechání modelu Shah.

Dále je stručně prezentováno provedení třetí úpravy ze seznamu výše. Týkají se **modelu kondenzace v horizontálních a nakloněných trubkách**.

Původní korelace Chato 1962 [1] pro laminární kondenzaci uvnitř horizontálních a nakloněných trubek má následující tvar:

$$h_{c, \text{chato}} = F \left(\frac{g \rho_f \Delta \rho h_{fg} k_f^3}{D_h \mu_f (T_{sppb} - T_w)} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Člen F má v originální verzi programu RELAP5 konstantní hodnotu a reprezentuje vliv hladiny kapaliny v spodní části trubky na zmenšení kondenzační plochy trubky.

Při použití tohoto typu korelace v pokročilém TH programu typu RELAP5, kde je parní objemová frakce α jednou z hlavních řešených proměnných, je možné nahradit korelaci Chato její modifikací dle Jaster a Koskyho z roku 1976 [2], která namísto s konstantním parametrem F pracuje přímo s parní objemovou frakcí:

$$h_{c,jaster-kosky} = 0,725\alpha^{\frac{3}{4}} \left(\frac{g\rho_f \Delta\rho h_{fg} k_f^3}{D_h \mu_f (T_{sppb} - T_w)} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Ukázka hlavní části původního a upraveného zdrojového kódu (viz níže) se týká prvních třech úprav ze seznamu výše. Za prvé změny hraničního úhlu pro modely horizontální a vertikální kondenzace na 45° tak aby modely kondenzace (přestup tepla) byly konzistentní s mapami režimů proudění (hydraulika). Za druhé změny parametru pro rozhodování o požití modelu horizontální kondenzace, kde je namísto elevačního parametru „delgrv“ použit úhlový parametr „sinb(iv)“. A za třetí použití korelace Jaster-Kosky namísto Chato.

Původní zdrojový kód v proceduře „conden.f“ (obdobně v „pintfc.f“):

```
if (abs(delgrv) .lt. 0.001) then
c Horizontal stratified condensation heat transfer.
  twsub = -dtpss
  hcond = .296*((rhof(iv)*max((rhof(iv) - rhog(iv)),0.0)*gravcn*
& hfg*thconf(iv)**3)/(htdiam*viscf(iv)*(max(1.,twsub))))**.25
else
```

Upravený zdrojový kód:

```
if (abs(sinb(iv)) .lt. 0.087) then
c Laminar film condensation models
c Horizontal stratified condensation heat transfer (Jaster-Kosky)
  twsub = -dtpss
  hcond = .725*voidg(iv)**.75*((rhof(iv)*max((rhof(iv) - hog(iv)),0.0)*gravcn*
& hfg*thconf(iv)**3)/(htdiam*viscf(iv)*(max(1.,twsub))))**.25
else
```

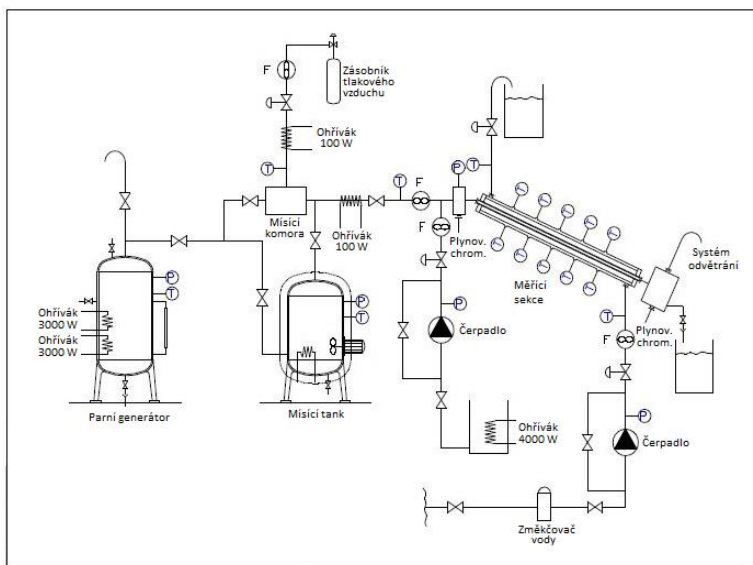
4.5 Výsledky ověřovacích výpočtů s upravenou verzí programu RELAP5

Pro validaci modifikované verze programu RELAP5 byly nejprve využity výsledky „separátních“ testů s kondenzací páry a paro-plynné směsi provedených na experimentálních zařízeních COTINCO a ITASCO. Tyto testy jsou cenné mj. i proto, že modelují kondenzaci v horizontální resp. nakloněné trubce – tedy v geometrii podobné trubkám v parogenerátorech VVER. Srovnání výsledků měření a výpočtů s originální i modifikovanou verzí programu RELAP5 ukazují zlepšení funkce modelu kondenzace páry a paro-plynné směsi.

Dále byly pro ověření funkčnosti a stability modifikované verze programu RELAP5 provedeny výpočty s modelem integrálního experimentálního zařízení PMK a porovnány výsledky získané s originální a modifikovanou verzí programu.

Popis experimentálního zařízení COTINCO-Beta

Experimentální zařízení COTINCO- β je instalováno na University di Roma a určené pro měření koeficientu přestupu tepla při kondenzaci páry a paro-plynných směsí v horizontální nebo nakloněné trubce [6][7][8][9][10].



Obr. 16: Schématické znázornění experimentálního zařízení COTINCO- β [7]

Hlavní komponenty experimentálního zařízení COTINCO- β jsou:

- generátor páry: atmosférický tlak, elektricky vyhříváný, výkon 375-6000 W
- pomocný systém pro dodávku vzduchu (válcový zásobník, elektrický přehříváč).
- míchací nádrž, kde se produkuje paro-vzdušná směs (objem 1000 l)
- kondenzační měřicí sekce sestávající z 1,5 m dlouhé trubky o vnitřním/vnější průměru 22/25 mm (materiál AISI304); vnější chlazení trubky je zajištěno prouděním vody v mezikruží mezi vnitřní a vnější trubicí (vnitřní průměr vnější trubky je 32 mm, tloušťka trubky 8 mm, mezera mezi trubicemi 3,5 mm)
- chladicí systém (vodní zásobník, čerpadla, ohříváč, změkčovač vody)
- I&C systém pro měření a vyhodnocování dat

Tab. 7: Matice testů na experimentálním zařízení COTINCO [7]

Sklon trubky [°]	Průtok páry [m ³ /s]	Rychlost páry [m/s]	Průtok vzduchu [SLPM]	Hmotnostní podíl vzduchu [%]
0°/15°/30°/45°	1.6	4.2	0	0%
0°/15°/30°/45°	1.6	4.2	1	2%
0°/15°/30°/45°	1.6	4.2	2	4%
0°/15°/30°/45°	1.6	4.2	5	10%
0°/15°/30°/45°	1.6	4.2	10	20%
0°/15°/30°/45°	1.6	4.2	15	25%
0°/15°/30°/45°	1.2	3.15	15	30%
0°/15°/30°/45°	0.777	2.0	15	40%
0°/15°/30°/45°	0.388	1.0	15	60%

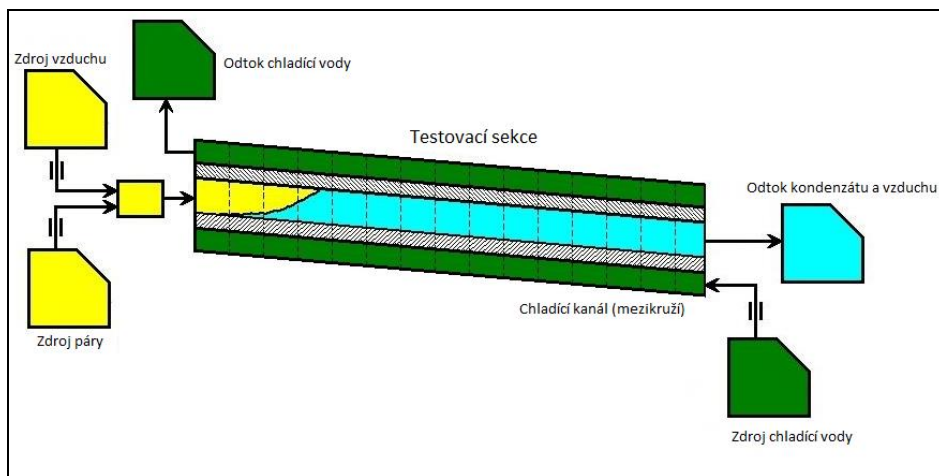
Hlavní závěry experimentů s kondenzací paro-plynných směsí [7]:

- Kondenzační koeficient přestupu tepla (heat transfer coefficient, HTC) je silně ovlivňován přítomností NK plynů. Při koncentraci plynu na vstupu 2% klesá HTC o řád, při koncentraci 60% klesá HTC o dva řády.
- Vliv sklonu kondenzační trubky (0÷45°) se projevuje pouze pro nižší koncentrace NK plynů (do 5%), kde sklon trubky zvyšuje přestup tepla při kondenzaci.

Příprava vstupního modelu experimentálního zařízení COTINCO pro RELAP5

Při přípravě vstupního modelu zařízení COTINCO- β pro program RELAP5 byla zvolena níže uvedená nodalizace s dělení testovací kondenzační trubky na 15 podobjemů o délce 0,1 m. V podobném duchu byla provedena prostorová diskretizace chladicího mezikruží a teplotní struktury pro modelování přestupu tepla mezi kondenzační trubkou a chladicí vodou v mezikruží. „Primární“ kondenzační část je znázorněna žlutou a modrou barvou (plynná a kapalná fáze), „sekundární“ chladicí část barvou zelenou.

Na obrázku je testová sekce znázorněná při mírném sklonu (-5°) kondenzační trubky – při jednotlivých testech pak byla situována v úhlech od 0° do -45° (ve výpočtech byl autorem aplikován větší úhlový rozsah $+1^\circ$ až -90° a to kvůli „širšímu“ ověření funkčnosti a návaznosti modelů kondenzace).



Obr. 17: Nodalizace COTINCO- β pro RELAP5

Výpočet koeficientů přestupu tepla při kondenzaci páry

Pro zadání výpočtů koeficientů přestupu tepla při kondenzaci čisté páry byly použity údaje z materiálů [7] a [8]. Společné předpoklady výpočtů (zadané dle experimentu) jsou pak následující:

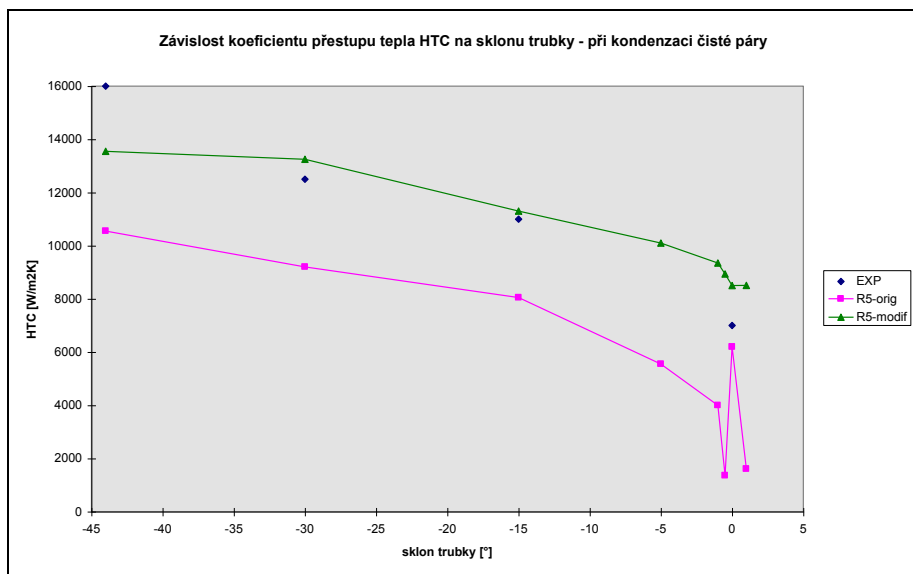
- tlak: atmosférický
- vstupní rychlost páry: 4,2 m/s

- koncentrace vzduchu: 0 %
- průtok chladicí vody: 600 kg/h

Variantní předpoklad:

- modelovaný sklon trubky: -45° , -44° , -30° , -15° , -1° , 0° , $+1^\circ$
(plus pomocné úhly -90° a -60°)

Výsledky výpočtu kondenzace páry v COTINCO s originální i modifikovanou verzí programu RELAP5 jsou zjednodušeně prezentovány na **Obr. 18** níže. U výpočtu s modifikovanou verzí programu RELAP5 vidíme jednak značné zlepšení shody vůči měřeným HTC (zmenšení směrodatné odchylky z 3533 na 1492 W/m²K), jednak pak odstranění nefyzikálního propadu HTC při malých nenulových sklonech, které se objevují při výpočtu s originální verzí programu a postihují sklony potrubí typické pro trubky parogenerátorů VVER. Maximální hodnoty HTC z celé škály sklonů 0° až -90° jsou s modifikovanou verzí programu RELAP5 napočtené pro sklony -15° až -45° (ve shodě s experimentálními pracemi – např. [1]).



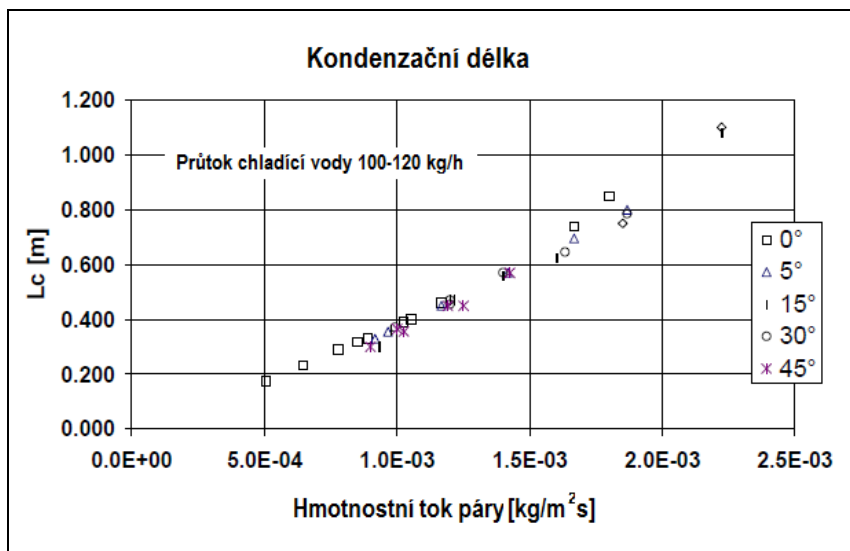
Obr. 18: Závislost HTC na sklonu trubky při kondenzaci čisté páry

Výpočty kondenzační délky

Další sada měření na zařízení COTINCO [8] je využita pro porovnání naměřené a napočtené kondenzační délky při kondenzaci čisté páry. Byly přitom provedeny testy s různými průtoky páry a s různým sklonem kondenzační trubky.

Předpoklady pro výpočty kondenzační délky:

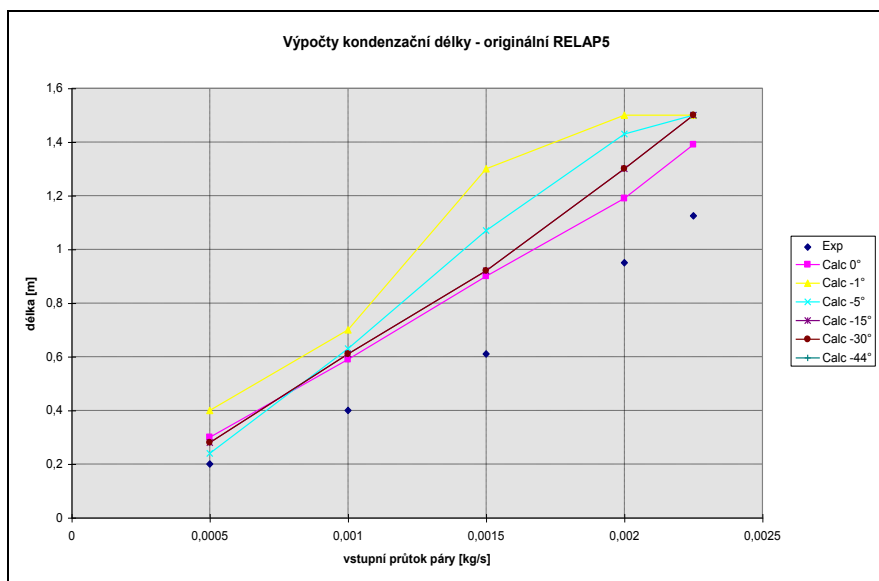
- tlak: atmosférický (na výstupu trubky zadán tlak 0,105 MPa)
- vstupní průtok páry: 0,0005 / 0,001 / 0,0015 / 0,002 / 0,00225 kg/s
(průtoku páry 0,001 kg/s zhruba odpovídá rychlosti 4,2 m/s)
- koncentrace vzduchu: 0 %
- průtok chladicí vody: 120 kg/h
- modelované sklony trubky: 0°, -1°, -5°, -15°, -30°, -44°



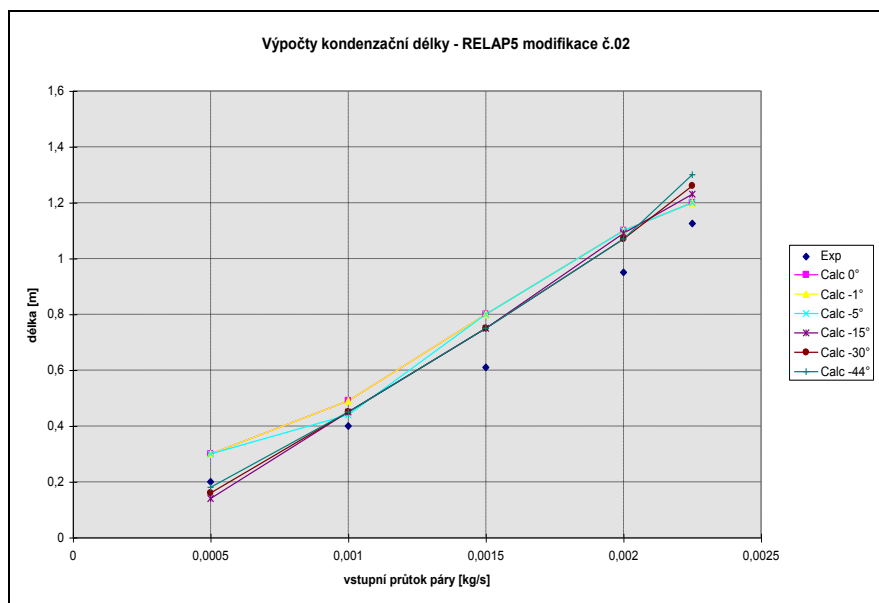
Obr. 19: Kondenzační délka dle experimentů COTINCO [8]

Originální výsledky ze zařízení COTINCO [8] jsou dokumentovány na **Obr. 19**, srovnání měření s výsledky výpočtů s originální a modifikovanou verzí programu RELAP5 pak na **Obr. 20** a **Obr. 21**.

Je zjevné, že modifikace programu RELAP5 jednak zlepšila shodu s experimentem pro všechny sklony kondenzační trubky (zmenšení směrodatné odchylky z 0,304 m na 0,112 m), a dále odstranila nefyzikální zhoršení kondenzace při malých nenulových sklonech potrubí (viz žlutá čára pro sklon -1° na **Obr. 20**).



Obr. 20: Kondenzační délka v experimentu a ve výpočtech s orig. RELAP5



Obr. 21: Kondenzační délka v experimentu a ve výpočtech s modif. RELAP5

Popis experimentálního zařízení ITASCO

Experimentální zařízení ITASCO (In Tube Air-Steam mixture COndensation) je instalované rovněž na University di Roma a je určeno pro přesné měření a vyhodnocování celkových i lokálních hodnot koeficientu přestupu tepla při kondenzaci páry a paro-plynných směsí v horizontální nebo nakloněné trubce [10][13].

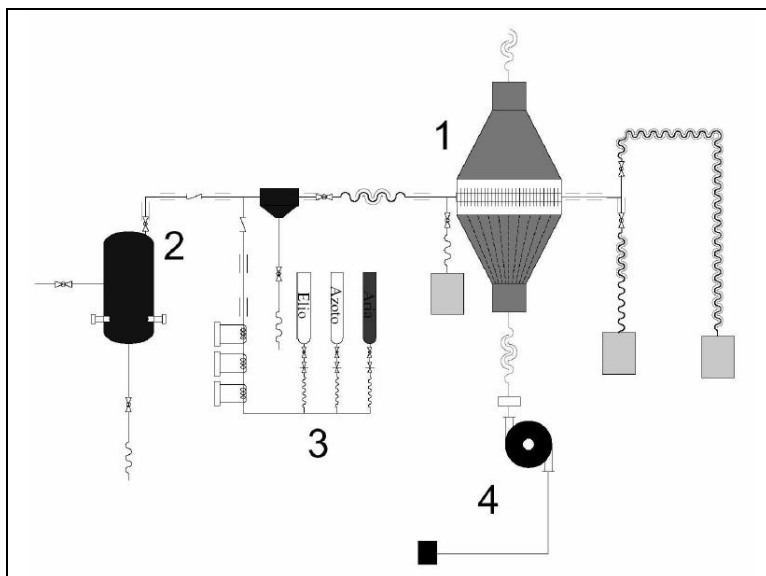
ITASCO je přitom nástupce zařízení COTINCO (viz výše) přičemž jeho 10-kanálový chladicí systém umožňuje lepší měření a vyhodnocování lokálních jevů při přestupu tepla.

Hlavní části experimentálního zařízení ITASCO:

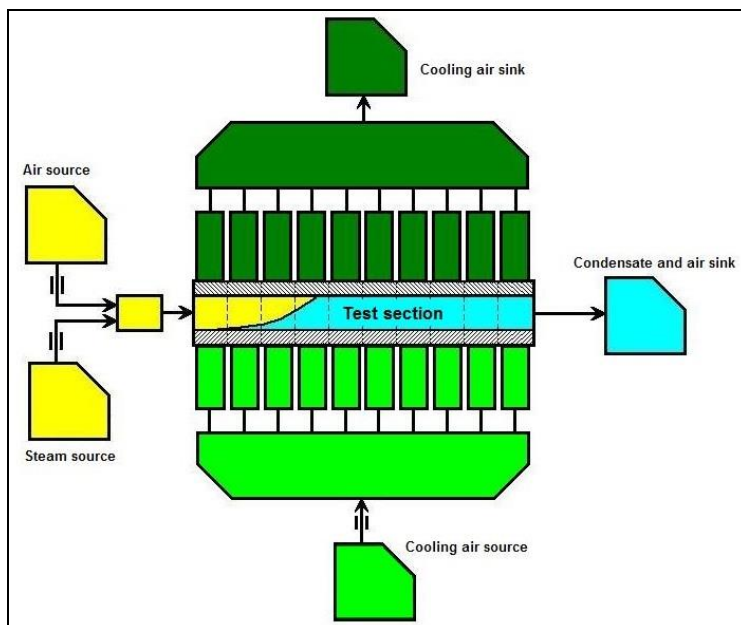
1. kondenzační měřicí (testová) sekce sestávající z dlouhé trubky (o 3 možných poloměrech) s vnějším žebrováním a chlazením nucenou cirkulací vzduchu
2. systém pro výrobu páry (SPS, Steam Production System)
3. systém pro vstřikování NK plynu (NCIS, Non-Condensable Injection System)
4. chladicí systém (CAS, Cooling Air System)

Specifikace měřicí sekce:

- měření kondenzace se provádí pomocí 1,5 m dlouhé měděné trubky s vnějším žebrováním pro zesílení přestupu tepla na vnější straně s těmito rozměry
- jsou připraveny 3 různé testovací trubky lišící se průměrem (D_i 12, 20 a 27 mm); pro výsledky prezentované v [10] a pro zde prezentované ověřovací výpočty byla použita trubka B s vnitřním průměrem 20 mm
- měřicí kondenzační trubka je vybavena 22 termočlánky pro měření vnitřní teploty a jejího axiálního profilu po délce trubky
- vnější chlazení je rozděleno do 10 paralelních kanálů, kdy každý chladí 15 cm kondenzační trubky
- každý chladicí kanál je vybaven teplotním senzorem na vstupu a výstupu tak, aby bylo možné vyhodnocovat odvod tepla v každém 15 cm úseku trubky
- měřicí trubka i chladicí kanály jsou uchyceny na nosné konstrukci umožňující naklápění měřicí sekce do různých úhlů (0° , 7° , 15° , 30° , 45°)



Obr. 22: Celkové schéma experimentálního zařízení ITASCO [10]



Obr. 23: Nodalizace ITASCO pro RELAP5

Příprava vstupního modelu experimentálního zařízení ITASCO pro RELAP5

Při přípravě vstupního modelu zařízení ITASCO pro program RELAP5 byla zvolena nodalizace zobrazená na Obr. 23.

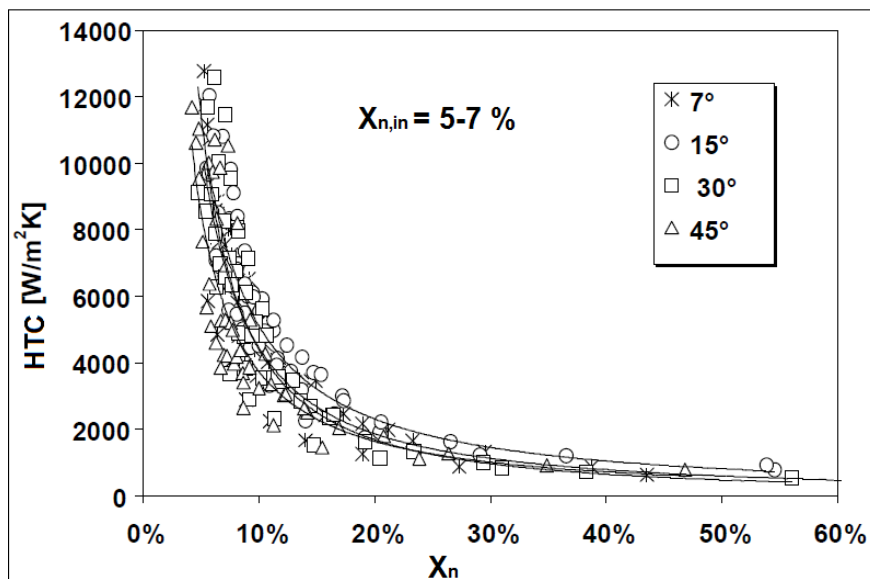
V souladu s koncepcí zařízení a 10 paralelními chladicími kanály byla zvolena axiální diskretizace testovací trubky (1,5 m) do 10 objemů o délce 0,15 m a 10-kanálový model systému chlazení.

Na obrázku je testovací kondenzační sekce znázorněná ve vodorovné poloze – při jednotlivých testech a výpočtech pak byla v úhlech od 0° do -45° . Zeleně vyznačené objemy reprezentují chladicí systém včetně 10 paralelních kanálů v oblasti kondenzační trubky. Vliv vnějšího žebrování měřicí trubky je modelován pomocí zvýšeného HTC pro vnější povrch, které vychází z výsledků měření a výpočtů uvedených v [13].

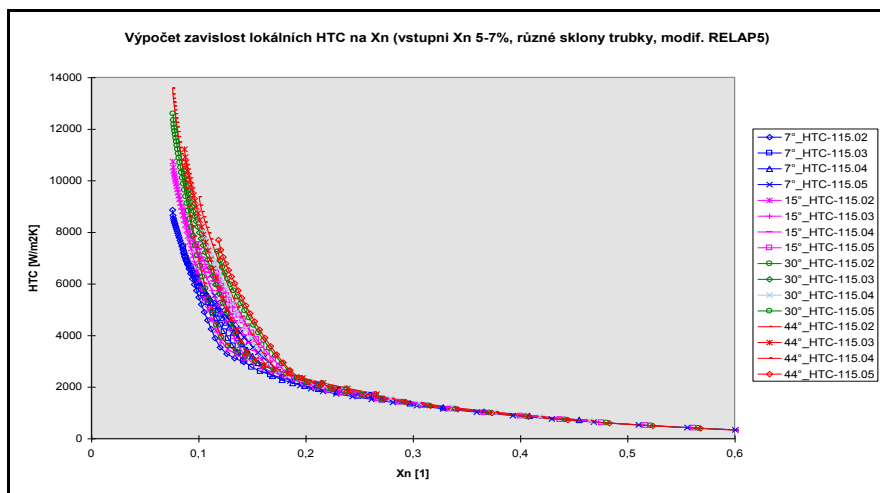
Výpočet lokálních koeficientů přestupu tepla při kondenzaci paro-plynné směsi

S modifikovanou verzí programu RELAP5 byla provedena sada výpočtů pro různé sklony kondenzační trubky. V každém výpočtu byl plynule měněn průtok (při zachování konstantního X_n na vstupu 6%). Srovnání experimentálních a výpočtových závislosti lokálních koeficientů přestupu tepla HTC na lokálním X_n je provedeno v Obr. 24 a Obr. 25.

Při porovnání lokálních koeficientů přestupu tepla z experimentu a výpočtu je vidět, že shoda mezi měřením a výpočtem s modifikovanou verzí programu RELAP5 je velmi dobrá.



Obr. 24: Závislost lokálního HTC na lokálním X_n – experimenty COTINCO [10]



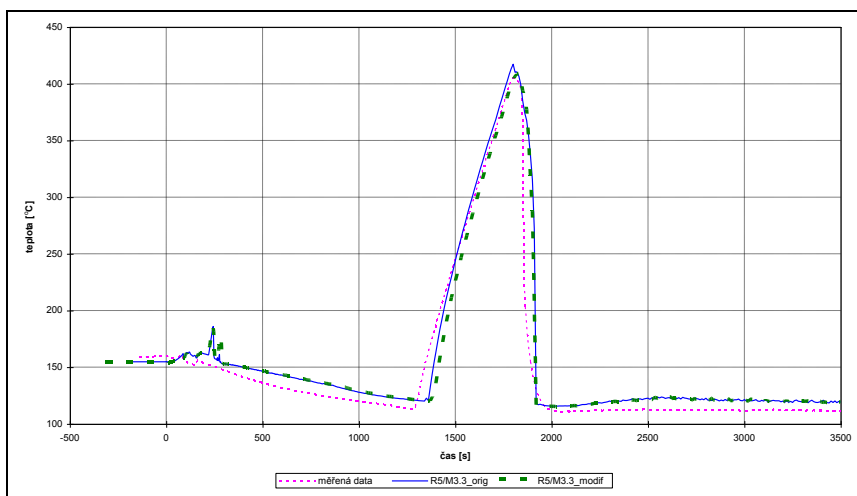
Obr. 25: Závislost lokálního HTC na lokálním X_n – výpočet s modif. RELAP5

Výsledky ověřovacích výpočtů vůči měření na integrálním zařízení PMK

Pro ověření funkčnosti a stability modifikované verze programu RELAP5 byly provedeny výpočty s modelem integrálního experimentálního zařízení PMK a porovnány výsledky získané s originální a modifikovanou verzí programu. Byly propočteny tyto 2 případy:

- výpočet testu T3.1 (stejný případ jako byl podrobně analyzován v kap.4.2)
- výpočet umělé varianty malé LOCA bez VTČ a s vychlazováním přes PSA (umělý scénář vycházející z T3.1 s menším únikem D2 mm a s vychlazováním systému přes II.O vedoucím ke kondenzaci primárního chladiva v trubkách PG)

Vybrané výsledky výpočtů obou případů jsou uvedeny níže. Nejprve jsou uvedeny výsledky přepočtu testu T3.1.



Obr. 26: Maximální teplota v AZ (PMK IMPAM T3.1)

Zhodnocení výsledků přepočtu testu T3.1:

Výsledky prokazují stabilitu výpočtu s modifikovanou verzí programu RELAP5. Vzhledem k tomu, že v testu T3.1 (velká LOCA) došlo velice rychle k hlubokému poklesu tlaku v I.O pod tlak sekundární a obrácení přestupu tepla na PG (v originálním výpočtu v čase 125 s) a tudíž nedocházelo ke kondenzaci páry na primární straně PG, jsou výsledky s originální i modifikovanou verzí programu téměř identické a subjektivně hodnocená shoda s měřenými daty (viz Obr. 26) je v obou případech velmi dobrá.

Rovněž statistické hodnocení provedené pomocí programu ACAP a využívající kombinace statistických metod D'Auria FFT, střední kvadratická odchylka a průměrná absolutní odchylka (popis metodiky – viz kap. 4.2), ukazuje velmi podobné výsledky u výpočtů originálním i modifikovaným programem RELAP5 a „velmi dobrou shodu“ u všech parametrů:

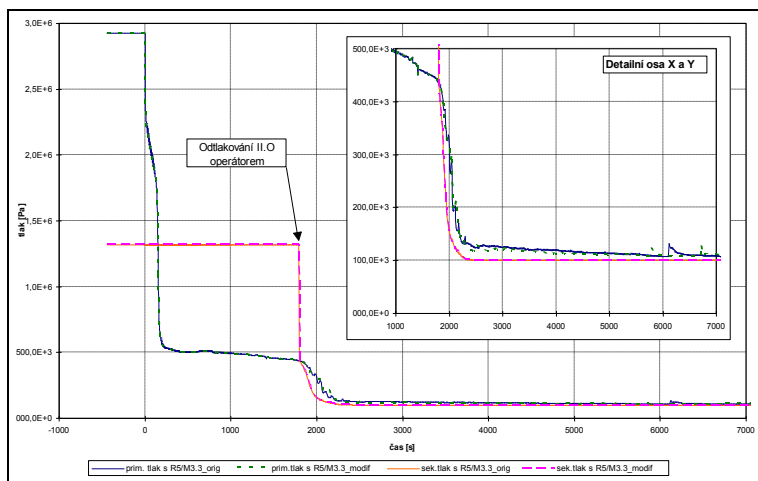
Tab. 8: Statistické hodnocení shody výpočtu RELAP5 s experimentem T3.1

Parametr	Označení dle PMK	Jednotka	FOM orig. RELAP5	FOM modif RELAP5
Primární tlak	PR21	Pa	0,937	0,937
Teplota na vstupu AZ	TE63	°C	0,904	0,902
Teplota na výstupu AZ	TE22	°C	0,894	0,892
Teplota v HSK	TE23	°C	0,823	0,841
Teplota v horké větvi	TE40	°C	0,806	0,804
Maximální teplota povlaku v AZ	TW01	°C	0,897	0,898
Váhová hladina ve vnitřním reaktoru	LE11	m	0,876	0,876
Váhová hladina v sestupné šachtě reaktoru	LE61	m	0,854	0,855
Váhová hladina v KO	LE71	m	0,960	0,960
Váhová hladina v horké větvi u reaktoru	LE31	m	0,923	0,923
Váhová hladina v horké větvi u PG	LE45	m	0,879	0,879
Váhová hladina v chladné větvi u PG	LE46	m	0,925	0,926
Průtok smyčkou	FL53	kg/s	0,854	0,854
Tlak v sekundárním okruhu	PR81	Pa	0,944	0,944
Integrál výtoku přes únikový otvor	MA02	kg	0,964	0,965
FOM celkový průměr:			0,896	0,897

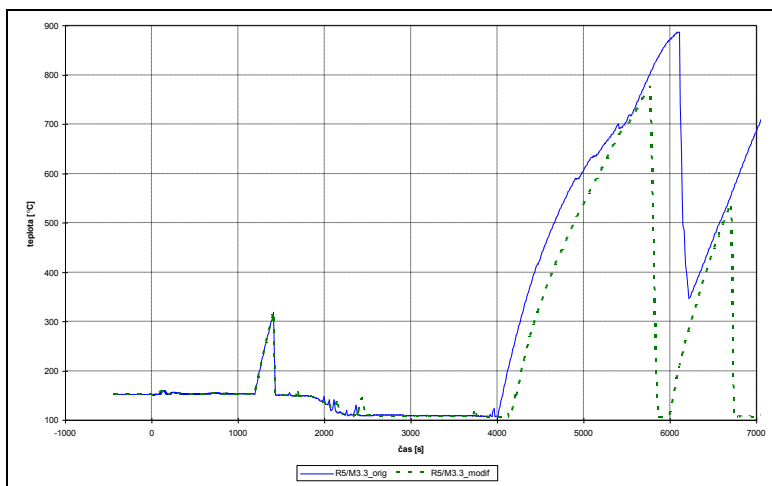
Druhý integrální testovací výpočet s modelem PMK je malá LOCA z odstaveného stavu bez havarijního vstřikování a s odtlakováním II.O operátorem. Jedná se o umělou variantu ke scénáři T3.1, ve které byla upravena velikost úniku (zmenšení z D6mm na D2mm) a další předpoklady tak, aby nedošlo k rychlému odtlakování I.O a operátor mohl přehřívání AZ oddálit pomocí odtlakování II.O. A tudíž, aby se projevil modifikovaný model kondenzace. Odtlakování II.O maximálním trendem operátor zahájí v čase 1800 s (30 min). Byl modelován realistický sklon trubek PG 0.5° (sklon trubek typický pro horizontální PG - pro možnost drenážování trubek při odstávce).

Rozdíly ve výsledcích výpočtu s originální a modifikovanou verzí programu RELAP5 nejsou tak výrazné jako u testů kondenzace na separátním zařízení, nicméně dle očekávání došlo k jistému zlepšení výsledků (z hlediska chlazení AZ) ve výpočtu

s modifikovanou verzí – viz nižší primární tlak v časovém intervalu 2000-5000 s (Obr. 27) a především příznivější průběh maximální teploty v AZ (Obr. 28). Pomalejší nebo pozdější přehřívání AZ v LOCA bez VTČ dává operátorovi více času na zprovoznění některého systému SAOZ (které jinak mohou být v odstaveném stavu nedostupné).



Obr. 27: Primární a sekundární tlak (test SBLOCA bez VTČ s modelem PMK)



Obr. 28: Maximální teplota v AZ (test SBLOCA bez VTČ s modelem PMK)

4.6 Poznámka k dalšímu vývoji systémových TH programů

V oblasti zpracované v předložené disertační práci je jedním z nejbližších úkolů spolupráce s US NRC a ISL při zabudování výše popsaných modifikací modelu kondenzace do distribuované verze programu RELAP5 – ať již jako standardního nebo variantního modelu kondenzace.

S indikací nutnosti zlepšení v modelech kondenzace páry a paro-plynných směsí autor započal již ve své prezentaci [44] na jednání CAMP na podzim 2013. Ještě předtím – na jednání CAMP v roce 2011 [39] – upozornil autor na závažnost problematiky nekondenzovatelných plynů na chování primárního okruhu PWR a VVER. V prosazení změn do výpočetního programu RELAP5 lze přitom navázat na řadu předchozích úspěšných iniciativ v rámci CAMP, mj. i prosazení úprav programu RELAP5 pro umožnění zadávání individuálních plynů do vstupního modelu a možnosti jejich exportu z výsledků pro grafické aj. zpracování (tj. možnost práce s více než jedním plynem nebo jednou směsí plynů o neměnném složení), která byla autorem disertační práce navržena na jednání CAMP 2003 a je zabudovaná v programu RELAP5 od verze Patch02 z roku 2004 (viz příslušný komentář k zadávání NK plynů do výpočtu v kapitole A2.10 svazku „Input Requirements“ manuálu programu RELAP5 [19]).

V poslední prezentaci práce na modelu kondenzace paro-plynných směsí programu RELAP5 [46] byly výsledky autorovy práce přijaty velmi pozitivně a byl požádán nejen o spolupráci při úpravách programu RELAP5, ale i o zdokonalení modelů kondenzace páry a paro-plynné směsi v horizontálních a nakloněných trubkách v programu TRACE. Program TRACE nemá ve stávající verzi specifický model kondenzace pro horizontální objemy [44][46]. V širším měřítku je třeba podporovat vývoj TH programů modelujících nejen uvolněné nekondenzující plyny, ale i plyny rozpuštěné v kapalném chladivu (vodě) a s návazné úpravy příslušných modelů a korelací.

V souvislosti s úpravami TH programů je též třeba zdůraznit nutnost pokračování v jejich validaci vůči měřeným testům ze separátních a integrálních experimentálních zařízení. Je tedy nutno podporovat i provádění nových měření s NK plyny – experimentů v podmínkách, které zatím nebyly proměřeny. Případně doplnit stávající zařízení novou měřicí technikou – pro měření množství rozpuštěných plynů apod.

4.7 Výběr iniciačních událostí v jejichž bezpečnostních analýzách by měly být uvažovány NK plyny

Výběr iniciačních událostí založený na předběžném posouzení vlivu uvažování NK plynů (v I.O) na výsledky TH bezpečnostních analýz je provedeno v následujících krocích:

- Posouzení možného vlivu přítomnosti NK plynů na výsledky bezpečnostních analýz abnormálních událostí a projektových nehod (kapitoly 15.1 až 15.6 PpBZ).
- Posouzení možného vlivu přítomnosti NK plynů na výsledky analýz nadprojektových nehod a odstavených stavů (kapitoly 15.8 a 15.9 PpBZ).

V Tab. 9 níže je ukázka z posouzení vlivu NK plynů na výsledky bezpečnostních analýz abnormálních událostí a projektových nehod zpracovaných v kapitolách 15.1 až 15.6 Předprovozní bezpečnostní zprávy JE Dukovany [20]. Pro PpBZ EDU (i ETE) je přitom použita sktruktura odpovídající formátu doporučeném v předpisu US NRC RG-1.70, [3]). Kompletní tabulky jak pro projektové tak pro nadprojektové události jsou uvedeny v disertační práci.

Tab. 9 Posouzení potřeby uvažování NK plynů v bezpečnostních analýzách abnormálních událostí a projektových nehod v JE s VVER-440/213

Díl PpBZ	Název kapitoly PpBZ EDU [20]	Komentář k potřebě uvažování NK plynů v analýzách
15.1	ZVÝŠENÍ ODVODU TEPLA SEKUNDÁRNÍM SYSTÉMEM	
15.1.1	Chybné funkce systému napájecí vody, které vedou ke snížení teploty napájecí vody	U této IU není třeba v základní bezpečnostní analýze v rozsahu typickém pro PpBZ plyny v I.O uvažovat neboť dojde jen k malým změnám parametrů I.O a uvolnění NK plynů je nepravděpodobné.
...	...	...
15.6	SNÍŽENÍ MNOŽSTVÍ CHLADIVA REAKTORU	
15.6.1	Neúmyslné otevření pojistného nebo přepouštěcího ventilu kompenzátoru objemu	Neúmyslné otevření PVKO nebo OVKO je speciální typ LOCA s poměrně vysokou pravděpodobností výskytu. Platí zhodnocení uvedené níže u LOCA (kap. 15.6.5 PpBZ).
...	...	...

15.6.5	Nehody se ztrátou chladiva (LOCA) v důsledku spektra postulovaných velikostí prasknutí potrubí v rámci tlakové hranice chladiva reaktoru	V událostech typu LOCA, ve kterých dochází k velkým změnám tlaku a teploty v I.O, je velmi žádoucí zařadit variantní analýzy s uvažováním NK plynů. A to jednak ve standardních „krátkodobých“ analýzách chování systému, kde mohou NK plyny významněji ovlivnit proces například při selhání izolace HA na konci vstříku (jednoduchá porucha). Je přitom třeba modelovat i další relevantní zdroje NK plynů. A jednak v „dlouhodobých“ analýzách modelujících následné zásahy operátora, vychlazování a snižování tlaku v systému až po jeho plné odtlakování, otevření I.O a vyvezení paliva (tyto analýzy mohou být zařazené do kap. 15.9.3 PpBZ „Speciální analýzy“).
--------	--	---

5. Závěr

Předložená disertační práce se věnuje vlivu přítomnosti nekondenzovatelných (NK) plynů na chování primárního okruhu tlakovodních reaktorů, což je téma, kterému bylo doposavad na poli bezpečnostních analýz JE věnováno velmi málo pozornosti.

Je přitom známo, že NK plyny jsou rozpuštěné v primárním chladivu i při normálním provozu. A v případě havarijních podmínek, především LOCA s činností systému havarijního chlazení AZ, bude množství NK plynů v I.O poměrně vysoké.

Zdrojů NK plynů pro I.O je přitom mnohem víc než jen standardně uvažovaný dusík v hydroakumulátorech nebo vodík z případné oxidace povlaků palivových elementů při LOCA. Možných zdrojů NK plynů pro primární okruh PWR nebo VVER je zhruba deset a v případě odstavených stavů ještě výrazně více.

V posledních letech se nicméně možnosti analýzy vlivu NK plynů na chování I.O PWR a VVER značně zlepšují – byla provedena řada experimentů s NK plyny v chladicím okruhu a rovněž vývoj TH programů došel do fáze, kdy je možno přítomnost NK plynů v systému chlazení reaktoru efektivně modelovat.

Práce na hodnocení vlivu NK plynů na I.O tlakovodních reaktorů dokumentovaná v této disertační práci je rozdělena do několika základních částí, respektive kapitol:

V úvodních částech práce je popsán jednak stav modelování NK plynů v hlavních TH výpočetních programech (systémových TH programech, programech pro výpočty kontejnmentu a programech třídy CFD). Dále je zpracována stručná rešerše nejdůležitějších prací na dané téma. V další z úvodních kapitol jsou uvedeny základní

vztahy pro plyny, jejich směsi a jejich rozpustnost ve vodě. Z těchto vztahů vycházíme v dalších částech práce při kvantifikaci jednotlivých zdrojů NK plynů pro primární okruh tlakovodního reaktoru. V další části práce je zpracována přehled dostupných experimentů s přítomností NK plynů v tlakovodním okruhu, které jsou nezbytné pro validaci stávajících nebo nově vyvinutých programů a modelů. V další z úvodních částí práce je podán přehled a stručný popis dokumentovaných událostí s NK plyny na JE s VVER.

Dále jsou systematicky zmapované jednotlivé zdroje NK plynů (vodík, kyslík, dusík aj.) pro primární okruh VVER a PWR a je provedena předběžná kvantifikace jejich vydatnosti a obecné hodnocení možných dopadů jejich přítomnosti na termohydrauliku I.O. Konkrétní rozbor jsou přitom zaměřeny především na VVER-440/213 (JE Dukovany), jejich závěry však obecně platí i pro VVER-1000 a pro PWR.

Další rozsáhlá část disertační práce je věnována rozšířené validaci a aplikaci standardní verze výpočetního programu RELAP5 pro analýzy s přítomností NK plynů v systému chlazení reaktoru. Systémový TH program RELAP5 je nejpoužívanější výpočetní program pro TH analýzy JE s VVER a autor práce má s jeho validací a aplikací pro analýzy VVER dlouholeté zkušenosti.

Nejprve je stručně popsán hydrodynamický model programu RELAP5 a sada základních rovnic pro páru a vodu bez a s přítomností NK plynů v parní fázi. Speciální pozornost je přitom věnována modelu kondenzace, který je eventuální přítomností NK plynů nejvíce dotčen.

Jsou uvedeny výsledky validačních výpočtů měřených integrálních testů s NK plyny v primárním okruhu experimentálních zařízení typu VVER. Po stručném přehledu všech relevantních validačních úloh provedených autorem jsou detailněji popsány 2 validační úlohy zpracované na základě testů na experimentálním zařízení PMK – testů T3.1 a T1. Práce autora věnovaná ověřování programu RELAP5 vůči testu T3.1 byla přitom vydána i v rámci publikační řady NUREG/IA. Srovnání výsledků měření a výpočtů je v případě obou testů velmi uspokojivé a v rámci disertační práce jsou demonstrovány různé způsoby grafické analýzy výsledků testů a výpočtů (standardní X-Y grafy, 2D grafy šíření NK plynu po okruhu, grafické animace stavu celého systému).

V závěru této kapitoly jsou uvedeny příklady výsledků dosavadních autorových aplikačních výpočtů JE s VVER-440/213 s přítomností NK plynů v systému chlazení reaktoru. Je podán přehled všech relevantních výpočtů a podrobněji jsou dokumentovány analýzy 2 nehod s únikem primárního chladiva (LOCA). Mimo jiné je demonstrováno zhoršení efektivity zásahů operátora při malé LOCA se selháním VT vstříkování, kdy přítomnost NK plynů v I.O zhoršuje přestup tepla na PG a tím snižuje účinnost vychlazování systému pomocí odpouštění páry přes PS-A.

Poslední velká část disertační práce je věnována úpravám hydrodynamického modelu programu RELAP5 pro zdokonalené modelování vlivu NK plynů na systém chlazení reaktoru. Po uvedení obecného seznamu možných úprav systémového TH programu se

v práci zaměřuji na zdokonalení modelu kondenzace, který je eventuelní přítomností NK plynů nejvíce dotčen.

Je popsána a provedena řada úprav v modelech kondenzace – použití dokonalejší korelace pro kondenzaci v horizontálních trubkách (korelace Jaster-Kosky namísto Chato), rozšíření působnosti modelu „horizontální kondenzace“ i pro nakloněné trubky a kanály, použití vhodnějšího parametru pro rozhodování mezi modely pro horizontální a vertikální kondenzaci a přidání volitelné relaxace mezi modely kondenzace s/bez NK plyny pro vstupní objem kondenzační trubky. Navržené a provedené změny jsou popsány až po úroveň upraveného zdrojového kódu.

Modifikovaná verze programu RELAP5 je následně podrobena několika validačním výpočtům. Byly přitom využity výsledky testů s kondenzací páry a paro-plynné směsi provedených na experimentálních zařízeních COTINCO a ITASCO. Tyto testy jsou cenné mj. i proto, že modelují kondenzaci v horizontální resp. nakloněné trubce – tedy v geometrii podobné trubkám v parogenerátorech VVER. Srovnání výsledků měření a výpočtů s originální i modifikovanou verzí programu RELAP5 ukazují zlepšení funkce modelu kondenzace páry a paro-plynné směsi.

Provedené modifikace modelu kondenzace mají tyto hlavní přínosy:

- zpřesnění výpočtu celkového i lokálního koeficientu přestupu tepla (a rovněž kondenzační délky) při kondenzaci páry i paro-plynné směsi v horizontálních a nakloněných trubkách
- přesnější zohlednění vlivu kapalného objemového podílu na kondenzační plochu v horizontální nebo nakloněné trubce
- odstranění nefyzikálního propadu koeficientu přestupu tepla při kondenzaci páry a paro-plynné směsi pro malé nenulové úhly (velmi důležité pro trubky parogenerátoru VVER s malým drenážním sklonem)

Dosažené výsledky a provedené změny v programu jsou průběžně prezentovány rovněž na setkání autorů a uživatelů TH programů US NRC (projekt CAMP), kde bylo navrženo zapracování navržených změn v programu do standardní verze programu RELAP5 (a provedení obdobných úprav u programu TRACE).

V předposlední kapitole práce je provedeno posouzení dalšího potřebného vývoje systémových TH programů z hlediska jejich schopnosti modelovat vliv NK plynů na chování systému chlazení tlakovodních reaktorů. Jedním z cílů je zapracování navržených úprav modelu kondenzace do standardní verze programu RELAP5.

V poslední části práce je proveden systematický výběr iniciačních událostí a scénářů, u kterých by se měly uvažovat NK plyny v I.O při zpracování bezpečnostních analýz VVER. Posouzení a výběr IU je proveden na základě struktury kapitoly 15 PpBZ pro všechny typy přechodových procesů, projektových nehod, nadprojektových nehod a událostí z odstavených stavů.

Seznam v tezích použité literatury

- [1] Chato J. C.:
Laminar Condensation Inside Horizontal and Inclined Tubes.
American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Eng. Journal 4. 1962.
- [2] Jaster H., Kosky P. G.:
Condensation Heat Transfer in a Mixed Flow Regime.
Int. Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 19, 1976.
- [3] **Standard Format and Content of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plant. U.S. Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 1.70, Revision 3.**
US NRC. 1978.
- [4] Huhtiniemi I. K., Corradini M. L.:
Condensation in Presence of Noncondensable Gases.
Condensation and Condenser Design, ASME 1993.
http://www.researchgate.net/publication/223846258_Condensation_in_the_presence_of_noncondensable_gases
- [5] Dobson M. K., Chato J. C.:
Condensation in Smooth Horizontal Tubes.
Journal of Heat Transfer 120, 1998.
- [6] Caira M., Caruso G., Naviglio A.:
Condensation inside Tube in the Presence of High Noncondensable Concentration and in Transient Conditions.
Universita di Roma „La Sapienza“. 1998.
- [7] Caruso G., Cumo F., Iorizzo A., Naviglio A.:
Experimental study of in-tube steam condensation in presence of high percentage of noncondensables, aimed at the design of an inherently safe heat transfer emergency system.
Pisa. 1999.
- [8] Caruso G., Naviglio A.:
The Influence of Noncondensable Gases on Condensation inside Tubes: An Experimental Analysis.
Universita di Roma „La Sapienza“. 1999.
- [9] Caruso G., Naviglio A.:
Experimental and Theoretical Investigation on In-Tube Condensation of Steam-Air Mixtures.
Universita di Roma „La Sapienza“. 2003.
[http://w3.uniroma1.it/impnuc2/Publications/Ref_96\[CARUSO%20G\].pdf](http://w3.uniroma1.it/impnuc2/Publications/Ref_96[CARUSO%20G].pdf)
- [10] Caruso G., Naviglio A., Spalvieri P.:
Heat Transfer Coefficient Evaluation of Condensing Steam-Air Mixtures in Tubes.
XXII Congresso Nazionale sulla Trasmissione del Calore, Genova 2004.

- [11] **ACAP Manual (Automated Code Assessment Program).**
Prepared for US NRC, 2004.
- [12] Toth I.:
PMK Test Result. Summary Report. IMPAM-VVER Project.
KFKI Budapest. 2004.
- [13] Caruso G., Naviglio A.:
Experimental Investigation on the Performance of Finned Tube.
XXII Congresso Nazionale sulla Trasmissione del Calore, Genova 2004.
- [14] Wu T., Vierow K.:
Local heat transfer measurements of steam/air mixtures in horizontal condenser tubes.
International Journal of Heat and Mass Transfer 49, 2006.
- [15] Downing J., Lockley S.:
Non-Condensable Gas Solubility Modelling.
Rolls-Royce. November 2007.
- [16] **Provozní předpis A041 – Chemické režimy, normy.**
JE Dukovany. 2007.
- [17] **Provozní předpis P030m – Systém kompenzace objemu včetně BN.**
JE Dukovany. 2009.
- [18] Prošek A., Mavko B.:
NUREG/IA-0220: Quantitative Code Assessment with Fast Fourier Transformation Method Improved by Signal Mirroring”.
U.S. NRC, Washington, December 2009.
- [19] **RELAP5/MOD3.3 Code Manual. Volumes I-VIII.**
Prepared by ISL for US NRC. NUREG/CR-5535.
October 2010.
- [20] **Předprovozní bezpečnostní zpráva JE Dukovany, revize 2, verze 10.**
JE Dukovany. Prosinec 2013.

Seznam prací disertanta vztahujících se k disertaci

- [21] Král P.:
TH analýzy odvodu zbytkového tepla v režimu 5 při expanzi plynové bubliny.
ÚJV 12207 T. ÚJV Řež. prosinec 2005 (plus Revize 1, 2007).
- [22] Král P.:
TH analýzy časových oken pro operátora při LOCA vycházejících z režimu 5 a při úplném selhání doplňování I.O.
ÚJV 12209 T. Prosinec 2005.
- [23] Kral P., Purhonen H., Elkin I., Toth I., Rohde U., Kokkonen I.:
Identification of the VVER Experimental Facilities and Description of the Available and Missing Experimental Capabilities.
COVERS. March 2006.

- [24] Kral P. et al:
Experimental Facilities for VVER Thermal Hydraulic Research and Code Validation (COVERS).
International Journal of Nuclear Science and Technology (IJNEST) 2007.
<http://www.ingentaconnect.com/content/ind/ijnest/2008/00000003/00000003/art00004>
- [25] Král P.:
RELAP5/MOD3.3 Assessment Against PMK Test T3.1 - LOCA with Nitrogen in PRZ.
Autumn 2008 CAMP Meeting, Rockville, November 2008.
- [26] Král P., Krhounková J., Macek J.:
Návrh metodického postupu provádění bezpečnostních analýz JE Dukovany s VVER-440/213 z odstavených stavů.
ÚJV Z 2550 T Revize 1. ÚJV Řež. Říjen 2009.
- [27] Král P., Denk L., Šimonková J.:
Bezpečnostní analýzy LOCA z odstavených stavů JE Dukovany.
ÚJV Z 2665 T. Prosinec 2009.
- [28] Král P.:
Advantages of Complex and Detailed Modeling of RCS-Containment-ECCS Systems in Single TH Analysis.
CAMP Meeting June 2010.
- [29] Král P.:
RELAP5/MOD3.3 Assessment against New PMK Experiments.
NUREG/IA-0229. June 2010.
<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/agreement/ia0229>
- [30] Král P.:
Analýzy ztráty přirozené cirkulace v režimu 6 JE Dukovany.
ÚJV Z 2827 T, srpen 2010.
- [31] Král P. a kol.:
Souhrnná zpráva k bezpečnostním analýzám pro LTO JE Dukovany.
(vč. kapitoly 9 - Analýza vývinu a kumulace vodíku v I.O),
ÚJV Z 2828 T. Srpen 2010.
- [32] Král P.:
Introductory TRACE Calculations with PMK Model.
Autumn 2010 CAMP Meeting, State College, October 2010.
- [33] Král P.:
RELAP5/MOD3.3 Assessment against PMK Test T3.1 - LBLOCA with Nitrogen in PRZ.
NUREG/IA-0246. November 2010.
<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1033/ML103370151.pdf>
- [34] Král P.:
Preliminary Results of PMK Test T1 Analysis with RELAP5/MOD3.3.
(test with primary loop open to atmosphere)
OECD/PKL-2 project. November 2010.

- [35] Král P.:
Analýzy odstavených stavů JE Dukovany - ztráta odvodu tepla z důvodu ztráty proudění v II.O.
UJV Z 3004 T. Prosinec 2010.
- [36] Král P.:
Pre-Test and Post-Test Calculations of PWR PACTEL Benchmark SBL-50 with RELAP5 (including variant calculations with nitrogen in SG tubing).
Lappeenranta. May 2011.
- [37] Král P.:
Analýzy odstavených stavů JE Dukovany - ztráta přirozené cirkulace z důvodu poddrenážování v R6.
UJV Z 3179 T. Srpen 2011.
- [38] Král P., Macek J., Meca R., Hofmann E., Trnka M.:
Thermal Hydraulic Analyses for Optimization of Hydroaccumulators Parameters in VVER-440.
NURETH-14. September 2011.
- [39] Král P.:
Sources of Non-Condensable Gases for Reactor Coolant System of PWR/VVER in LOCA Conditions. General Quantification and RELAP5 Analyses of Effects on RCS Behavior.
CAMP Meeting November 2011.
- [40] Král P., Hofmann E.:
Analysis of Potential Release of Nitrogen from Hydroaccumulators and Other NCG Gases into Reactor Coolant System of VVER-440 under Accident Conditions.
WANO MC Technical Support Mission. Loviisa. January 2012.
- [41] Král P.:
Úvodní analýza vlivu nekondenzujících plynů na dochlazování I.O v havarijních podmínkách.
UJV Z 3645 T. Prosinec 2012.
- [42] Král P.:
Validation of System Computer Codes on Integral Test Facilities.
GRNSPG – UJV Rez – University of Illinois „Nuclear Reactor Simulations Hands On Training“. Rez, June 24-28 2013.
- [43] Kouhia V., Riikonen V., Kauppinen O., Purhonen H., Austregesilo H., Bánáti c J., Cherubini M., D'Auria F., Inkinen P., Karppinen I., Kral P., Peltokorpi L., Peltonen J., Weber S.:
Benchmark exercise on SBLOCA experiment of PWR PACTEL facility.
Annals of Nuclear Energy, Volume 59, September 2013, Pages 149–156
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454913001928>
- [44] Král P.:
Analysis of Wall Condensation Models of RELAP and TRACE with Respect to Horizontal Tubes and NCG.
CAMP Meeting November 2013.

- [45] Král P.:
RELAP5 – popis systémového TH programu a jeho validace pro JE s VVER.
Kurz Bezpečnostní analýzy pro pracovníky jaderných elektráren.
ÚJV Řež, 18-20. listopadu 2013.
- [46] Král P.:
Analysis of Wall Condensation Models - Part 2.
CAMP Meeting, Zagreb. May 2014.

Bez ohlasů a recenzí

SUMMARY

Title: Impact of Noncondensable Gases on Behavior of Primary Circuit of VVER

The presented report evaluates influence of noncondensable gases (NCG) on behavior of primary circuit of pressurized water reactors (PWR), especially of the VVER type. The introductory part describes situation in (non)assuming noncondensable gases in safety analyses, status of modeling of noncondensable gases in major TH computer codes and overview of major work focused on presence of NCG in reactor coolant system. Further, all potential sources of noncondensable gases are defined and their preliminary quantification is made. Also, a general analysis of possible impacts of noncondensable gases on behavior of reactor coolant system (RCS) is done here. Also, all events with noncondensable gases reported from nuclear power plant (NPP) with VVER are listed and briefly described. An overview of experiments with noncondensable gases performed in integral test facilities (ITF) of VVER type is given in next part of the work. Also some available separate effect tests (SET) studying influence of noncondensable gases on heat transfer are briefly described. Next, models of the RELAP5 computer code relevant to modeling of NCG are described in detail. Results of RELAP5 assessment (done by author) against ITF and SET experiments with noncondensable gases are summarized and some examples are given. Also the results of author's analyses of NPP transients and accidents with NCG in reactor coolant system are summarized plus several comparative analyses (with/without NCG) are newly done and evaluated. In the next part possible modifications of system TH code are proposed. Further a selected set of code modifications – focused on condensation of steam and steam-gas mixtures in horizontal and sloped tubes - is applied to the source coding of RELAP5. The modified version of the code is assessed against experimental data. At the end of the work, among other conclusions, the initiating events for which noncondensable gases should be modeled in VVER safety analyses are defined.

RESUMÉ

Předkládaná práce zkoumá vliv nekondenzovatelných (NK) plynů na chování primárního okruhu tlakovodních reaktorů (PWR) s důrazem na JE s VVER. V úvodní části je popsána stávající praxe v (ne)uvažování NK plynů v bezpečnostních analýzách VVER, stav modelování NK plynů v hlavních TH výpočetních programech a přehled nejdůležitějších prací zabývajících se vlivem plynů na provoz a bezpečnost reaktorů VVER. Dále jsou zmapovány jednotlivé zdroje NK plynů pro primární okruh VVER a provedena předběžná kvantifikace jejich vydatnosti. Rovněž je proveden obecný rozbor možných dopadů přítomnosti NK plynů na termo-hydraulické (TH) chování reaktoru a primárního okruhu. V další části práce je uveden přehled dosavadních událostí s NK plyny v jaderných elektrárnách s VVER a dále zpracován seznam dostupných naměřených dat z testů s NK plyny a parovodní směsí z integrálních experimentálních zařízení (ITF) typu VVER. Jsou rovněž popsány vybrané testy typu „separate effect test“ (SET) zkoumající vliv NK plynů na přestup tepla a proudění vody a páry. V další části práce je popsáno modelování NK plynů v systémovém TH programu RELAP5. Jsou shrnuty výsledky autorových prací v oblasti ověřování tohoto výpočetního programu vůči experimentům s NK plyny v primárním okruhu experimentálních zařízení. Shrnuty jsou rovněž dosavadní autorovy pilotní analýzy VVER s NK plyny v I.O. V další části práce jsou navrženy možné úpravy systémových TH programů pro lepší modelování vlivu NK plynů, přičemž je realizována modifikace části TH programu, která je přítomností NK plynů postižena nejvíc – modelu kondenzace. Realizovaná modifikace programu RELAP5 sestává z řady úprav v modelech kondenzace s důrazem na kondenzaci v horizontálních a nakloněných trubkách (relevantní pro parogenerátory VVER). V závěru je originální i modifikovaná verze programu RELAP5 podrobena sadě ověřovacích výpočtů vůči experimentálním datům. Výsledky srovnání ukazují značné zlepšení funkce programu. V závěru práce je kromě shrnutí výsledků jednotlivých částí práce provedeno i systematické posouzení spektra přechodových a havarijních procesů VVER, u nichž by se v bezpečnostních analýzách v budoucnu měla uvažovat přítomnost NK plynů.