

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva

Ing. Juraj Jančovič

Autoreferát dizertačnej práce

Dynamika vodíka v kontajmente jadrových blokov počas ťažkých havárií

Evidenčné číslo: FEI-10835-55391

na získanie akademického titulu philosophiae doctor
v doktorandskom študijnom programe

5.2.31 Jadrová energetika

Bratislava, máj 2015

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia na Ústave jadrového a fyzikálneho inžinierstva Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Juraj Jančovič,

Slovenská technická univerzita v Bratislave, Fakulta elektrotechniky
a informatiky, Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva,
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: Prof. Ing. Vladimír Slugeň, DrSc.,

Slovenská technická univerzita v Bratislave, Fakulta elektrotechniky
a informatiky, Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva,
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: Prof. Ing. Vasil Koprda, DrSc.,

Slovenská technická univerzita v Bratislave, Fakulta chemickej
a potravinárskej technológie, Ústav chemického a environmentálneho
inžinierstva,
Radlinského 9, 812 37 Bratislava

Ing. Zoltán Kovács, CSc.,

RELKO, s.r.o,

P.O.Box 95, Račianska 75, 830 08 Bratislava 38

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná:o.....h,

na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, Ilkovičova 3, v zasadačke dekana,
blok A, 1. poschodie.

Prof. Dr. Ing. Miloš Oravec

dekan fakulty

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

OBSAH

Obsah	3
Zoznam použitých skratiek a označení	4
1 Úvod	5
2 Súčasný stav problematiky.....	6
3 Ciele dizertačnej práce.....	8
4 Prístup k riešeniu problematiky	9
5 Dosiahnuté výsledky - metodika riešenia problematiky dynamiky vodíka v jadrových blokoch	11
5.1 Metodika riešenia fyzikálneho modelu problematiky	12
5.2 Metodika prístupu k výpočtovému riešeniu problematiky	14
6 Aplikácia metodiky riešenia problematiky dynamiky horľavých plynov v kontajneroch - stanovenie nebezpečenstva horenia vodíka.....	21
6.1 Modely zariadení pre použitie vo výpočtových nástrojoch.....	23
7 Súhrn výsledkov a nových poznatkov, závery pre prax a ďalší rozvoj vednej disciplíny.....	27
Referencie	30
Zoznam publikácií autora súvisiacich s problematikou dizertačnej práce.....	32
8 Summary	35

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A OZNAČENÍ

AZ	aktívna zóna
BWR	boiling water reactor - varný ľahkovodný reaktor
CFD	computational fluid dynamics - počítačová dynamika tekutín
CO	oxid uhoľnatý
DDT	prechod deflagrácie na detonáciu
DZK	dolná zmiešavacia komora
EBO V2	jadrová elektrárň Bohunice, 3. a 4. blok
EMO12	jadrová elektrárň Mochovce, 1. a 2. blok
HRK	havarijnú, regulačné a kompenzačné kazety
HZ	hermetická zóna, kontajment, ochranná obálka reaktora
INES	International Nuclear Event Scale - stupnica závažnosti udalostí v JE
I.O.	primárny okruh
JE	jadrová elektrárň
KO	kompenzátor objemu
LOCA	loss of coolant accident - havária so stratou chladiva
MCCI	molten core concrete interaction - interakcia roztavených trosiek AZ s betónom
MO34	jadrová elektrárň Mochovce 3. a 4. blok
PAR	pasívny autokatalytický rekombinátor
PDS	Plant Damage State - stav bloku v pravdepodobnostnom hodnotení bezpečnosti
PG	parogenerátor
PSA	Probabilistic Safety Assessment - pravdepodobnostné hodnotenie bezpečnosti
PWR	pressurized water reactor – tlakovodný reaktor
RBMK	reaktor bolšoj močnošti kanal'nyj - kanálový reaktor s veľkým výkonom
SAMG	Severe Accident Management Guidelines - predpisy pre znižovanie následkov ťažkých havárií
TNR	tlaková nádoba reaktora
VVER440	vodou chladený, vodou moderovaný energetický reaktor s nominálnym elektrickým výkonom 440 MW

1 ÚVOD

Energetická potreba ľudskej spoločnosti kontinuálne narastá s nárastom populácie a so zvyšovaním životnej úrovne. Odpoveďou na požiadavku nárastu potreby elektrickej energie sú spoľahlivé zdroje energie dostatočného výkonu. I napriek neodškriepiteľnej výhodnosti obnoviteľných zdrojov energie, z pohľadu udržateľnosti uspokojovania potrieb dodávky elektrickej energie, nie sú v súčasnosti adekvátnou, tobôž nie výlučnou, odpoveďou na požiadavky nárastu dodávky elektrickej energie.

V súčasnosti sú, i v blízkej budúcnosti budú, nezastupiteľnou súčasťou zdrojov elektrickej energie elektrárne využívajúce neobnoviteľné zdroje energie; najmä zemný plyn, urán a uhlie. Berúc do úvahy vplyv výroby elektrickej energie z neobnoviteľných zdrojov na emisie skleníkových plynov je využitie jadrových elektrární jednoznačne výhodnou alternatívou produkcie elektrickej energie. Energia získaná zo štiepenia atómu, i keď čerpajúca z neobnoviteľných zásob štiepateľných prvkov, neprispieva k zvyšovaniu koncentrácie oxidu uhličitého v atmosfére a tým sa prevádzka jadrových elektrární prakticky nepodieľa na vplyve ľudskej činnosti na klimatické zmeny. Až do času technologického zvládnutia jadrovej fúzie, resp. v medzikroku jadrovej energetiky založenej na množivých reaktoroch tóriového cyklu, budú klasické jadrové elektrárne nevyhnutnou súčasťou energetického mixu.

Prevádzka jadrových elektrární vyžaduje špičkové technológie a vysoko odborný, vycvičený a spoľahlivý personál. Vzhľadom na povahu zdroja energie, ktorý produkuje odpad vysoko nebezpečný pre životné prostredie, je nevyhnutnosťou vydať maximálne úsilie na zabránenie veľkému úniku štiepných produktov do okolia elektrárne. Nekontrolovateľný únik štiepných produktov môže nastať počas havárií s vážnym poškodením aktívnej zóny reaktora - počas ťažkých havárií.

Skúsenosti získané z ťažkých havárií v elektrárni v Černobyle, v elektrárni Three Mile Island a v jadrových blokoch elektrárne vo Fukušime I viedli k neopomínaniu dôsledkov ťažkých havárií na okolie a k požiadavke znižovať pravdepodobnosť úniku štiepných produktov do okolia elektrárne venovaním zvýšeného úsilia poznávaniu javov a procesov v jadrových blokoch počas ťažkých havárií.

Havária v elektrárni Fukušima I ukázala, že nedostatočná pozornosť venovaná systémom a návodom pre zmiernenie následkov ťažkých havárií sa v prípade havárie s poškodením paliva môže prejaviť významnými negatívnymi následkami pre okolie elektrárne.

2 SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Využívanie energetického mixu zdrojov elektrickej energie v súčasnosti zahŕňa i využitie jadrovej energie. Vlastnosti použitého paliva v jadrových zdrojoch elektrickej energie vyžadujú venovanie významnej pozornosti možnosti vzniku nehôd a havárií na jadrových zariadeniach, nakoľko vážna havária je nevyhnutne spojená s rizikom kontaminácie štiepnymi produktmi z jadrového paliva a s rizikom významného poškodenia značnej časti životného prostredia v okolí jadrového zariadenia.

Problematika horľavých plynov v kontajmente jadrových elektrární počas havarijných scenárov v jadrových zariadeniach je spojená s ťažkými haváriami, ktoré zahŕňajú poškodenie jadrového paliva, respektíve poškodenie aktívnej zóny reaktora.

Plyny uvažované z hľadiska nebezpečenstva horenia plynov v priestoroch kontajmentu sú najmä vodík a oxid uhoľnatý. V analýzach nebezpečenstva horenia je hlavný dôraz kladený na problematiku horenia vodíka. Produkcia vodíka nastáva v časovom slede udalostí havárie jadrového bloku podstatne skôr, vo fáze havárie s roztavenou AZ nachádzajúcou sa v tlakovej nádobe reaktora. K produkcii CO prichádza až po pretavení tlakovej nádoby reaktora v neskoršej fáze havárie. Horenie CO je navyše z chemického hľadiska horeniu vodíka podobné. Produkcia CO priamym tepelným rozkladom betónu stien HZ vedie (okrem možnosti horenia CO a následného ohrozenia integrity HZ) k priamemu ohrozeniu integrity HZ poškodzovaním hermetickej hranice kontajmentu tepelným rozkladom betónu v šachte reaktora. Iné horľavé plyny, ako napríklad metán, sa vyskytujú v priebehu modelovaných ťažkých havárií reaktorov VVER440/V213 v zanedbateľných množstvách a nie sú uvažované.

Najnevýhodnejšou vlastnosťou produkcie elektrickej energie v jadrových elektrárnach je produkcia rádioaktívnych štiepných produktov, ktorých uvoľnenie do životného prostredia predstavuje veľké nebezpečenstvo pre biosféru. Vytvorenie systému bariér proti úniku štiepných produktov do okolia je nutnou podmienkou spoľahlivej a bezpečnej prevádzky jadrových zariadení. Zlyhanie všetkých bariér znamená uvoľnenie štiepných produktov do životného prostredia a je nežiaduce.

Z definície je ťažkou haváriou taká nadprojektová havária jadrového zariadenia s jadrovým reaktorom, ktorá zahŕňa závažné poškodenie aktívnej zóny alebo palivových článkov, ktoré si vyžaduje aplikáciu ochranných opatrení [2].

Závažné poškodenie aktívnej zóny zodpovedá stavu s aspoň čiastočným tavením paliva a majúcim za následok také poškodenie rozhodujúcich komponentov elektrárne, že ďalšie prevádzkovanie elektrárne nie je možné (napríklad mechanické poškodenie

tlakovej nádoby reaktora, deštrukcia geometrie AZ brániaca jednoduchému odstráneniu poškodeného paliva, kontaminácia komponentov elektrárne a podobne).

Ťažké havárie na energetických jadrových blokoch, pri ktorých prišlo k poškodeniu AZ reaktorov a k horeniu horľavých plynov sú reprezentované najmä haváriou v elektrárni Three Mile Island v Spojených štátoch amerických, haváriou v Černobyle na Ukrajine a haváriou v elektrárni vo Fukušime v Japonsku.

Zhodnotením priebehu ťažkých havárií počas histórie využívania jadrovej energetiky je možné skonštatovať, že problematika vodíka je neopomenuteľnou súčasťou analýz ťažkých havárií a analýz zameraných na stanovenie jadrovej bezpečnosti jadrových blokov.

Horenia vodíka nastalo pri uvedených haváriách ľahkovodných reaktorov následne po odtlakovaní primárneho okruhu (TMI-2), respektíve po odtakovaní primárneho kontajnementu (Fukušima I). Nakoľko systémy spoľahlivého odtakovania primárneho okruhu sú súčasťou plánov na zvýšenie bezpečnosti prevádzkovaných jadrových blokov, dopad odtakovania primárneho okruhu počas ťažkej havárie musí byť podrobne analyzovaný pri stanovení interakcie jednotlivých systémov elektrárne.

Horenie vodíka v kontajmente počas havarijných podmienok je, minimálne pre reaktory bez plnotlakového kontajnementu, významná bezpečnostná výzva, ktorá musí byť riešená špecializovaným, robustným a spoľahlivým systémom.

Novým fenoménom nebezpečenstva horenia vodíka je, že pri ťažkej havárii na jednom bloku nie je možné vylúčiť priamy vplyv na jadrovú bezpečnosť susedných blokov jadrovej elektrárne, ba priame fyzické ohrozenie zariadení elektrárenských blokov v rovnakej lokalite elektrárne.

Nebezpečenstvom horenia vodíka v havarijných stavoch na elektrárenských blokoch, ktoré bolo predpokladané od havárie Three Mile Island a v skutočnosti v plnej miere potvrdené haváriou vo Fukušime I, sa zaoberajú výskumné projekty prakticky vo všetkých krajinách prevádzkujúcich jadrové elektrárne a problematika horenia vodíka je intenzívne rozvíjaná v národných projektoch ako aj v medzinárodných projektoch. Na Slovensku je medzinárodná spolupráca často organizovaná v rámcových programoch Európskej komisie.

Následky havárií spojených s horením vodíka viedli k definovaniu požiadavky na inštaláciu systému zmiernovania následkov ťažkých havárií na slovenských jadrových blokoch. Výsledky medzinárodných projektov Phare 4.2.7a, [10], Phare 2.07, [6] poukázali na vysoké nebezpečenstvo horenia vodíka v kontajmente elektrárne typu VVER440/V213 a na potrebu znížiť nebezpečenstvo vyplývajúce z potenciálneho horenia vodíka.

3 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Ciele dizertačnej práce, ktoré sú základom riešenia problematiky v dizertačnej práci, boli stanovené rešpektujúc zadanie záverečnej práce.

Hlavným cieľom práce je vytvorenie metodiky hodnotenia rizika horenia vodíka v kontajnmemente jadrových blokov VVER440/V213 a metodika simulácie opatrení pre znižovanie rizika horenia vodíka vrátane vytvorenia potrebných fyzikálnych modelov preferovaných zariadení pre vhodný systém znižovania následkov horenia vodíka. Cieľ práce bol dosiahnutý vypracovaním nasledujúcich bodov riešenia.

1. Analyzovanie problematiky ťažkých havárií jadrových blokov s ľahkovodnými reaktormi so zameraním sa na problematiku horľavých plynov v kontajnmemente jadrovej elektrárne VVER440/V213.
2. Vytvorenie metodiky hodnotenia dynamiky vodíka v kontajnmemente jadrových blokov v podmienkach reaktorových blokov VVER440/V213 a metodiky simulácie opatrení pre zmierňovanie následkov ťažkých havárií v oblasti ohrozenia integrity kontajnmementu vplyvom potenciálneho horenia vodíka.
3. Aplikácia metodiky na vytvorenie návrhu systému riešenia nebezpečenstva horenia vodíka v kontajnmemente vrátane fyzikálnych modelov.
4. Aplikácia dosiahnutých poznatkov na zvýšenie bezpečnosti prevádzky slovenských jadrových blokov.

4 PRÍSTUP K RIEŠENIU PROBLEMATIKY

Problematika zahŕňa rozmanitý súbor javov a procesov z oblasti termodynamiky i chémie a je analyzovaná v obmedzených podmienkach riešenia z pohľadu možnosti simulácie fyzikálnej reality. Nevyhnutná potreba neustáleho zvyšovania bezpečnosti prevádzky jadrových elektrární však vyžaduje aktuálne riešenie problematiky s dôsledným zvážením dostupných možností simulácie a optimálny prístup riešenia s využitím dostupných prostriedkov i vedomostí.

Silné a slabé stránky existujúcich výpočtových nástrojov, prístupy riešenia vo všeobecných postupoch v oblasti riešenia problematiky a vedomosti o fyzikálnych zákonitostiach je potrebné zohľadniť a zjednotiť do metodiky riešenia problematiky. Metodika riešenia problematiky je založená na aplikácii dostupných výpočtových nástrojov a na vývoji nových modelov zariadení, ktoré nie sú súčasťou vhodných výpočtových nástrojov, respektíve modely zahrnuté v programoch nie sú dostatočné pre prijateľné modelovanie fyzikálnej skutočnosti v súčasnom stave poznania. V metodike sú zohľadnené všeobecné postupy používané v medzinárodnom meradle a sú adaptované na podmienky reaktorových blokov VVER440/V213. Vzhľadom na výrazne odlišnú konštrukciu kontajnementu VVER440/V213 voči tlakovodným reaktorom západného typu, je potrebné postupy v oblasti najmä hodnotenie rizika horenia vodíka v podstatnej miere modifikovať. Komplexná geometria kontajnementu VVER440/V213 vyžaduje v metodike aplikovať výpočtové programy z oblasti integrálnych programov so sústredenými parametrami avšak aj programy počítačovej dynamiky tekutín. Kooperácia programov s využitím ich silných stránok a využitie kooperácie programov na praktickú elimináciu nepriaznivých vplyvov nedostatkov použitých programov je črtou použitej metodiky.

Jedným z cieľov riešenia je vytvorenie metodiky riešenia problematiky dynamiky vodíka v kontajnemente jadrových blokov VVER440/V213 s dôrazom na metodiku riešenia fyzikálneho modelu a na metodiku výpočtového riešenia a simulácie reality v dostupných výpočtových nástrojoch. Súčasťou metodiky je návrh a verifikácia modelovania šírenia horľavých plynov v kontajnemente jadrových elektrární. Prístup k modelovaniu šírenia horľavých plynov je konfrontovaný s prístupmi využitými v medzinárodnom projekte SARNET2 v rámci európskeho rámcového programu v oblasti analýz termodynamiky kontajnementu jadrových elektrární.

Rovnako je cieľom riešenia aplikácia metodiky riešenia problematiky dynamiky vodíka v kontajnemente na analýzu možností vhodných opatrení pre zníženie nebezpečenstva horenia vodíka v kontajnemente jadrových blokov VVER440/V213.

Analyzovaním vhodných opatrení pre zníženia rizika horenia vodíka je potrebné vybrať optimálne riešenie a riešenie rozvinúť do návrhu technického riešenia pre reaktorové bloky VVER440/V213 s využitím dostupných technologických zariadení.

Záverečným cieľom práce je vytvorenie metodiky stanovenia nebezpečenstva horenia vodíka v kontajnmemente pre využitie v analýzach bezpečnosti pri preukazovaní akceptovateľnej bezpečnosti jadrových blokov v oblasti štvrtej úrovne ochrany do hĺbky - oblasti znižovania následkov ťažkých havárií.

Pre potreby modelovania technického riešenia v simuláciách priebehu ťažkých havárií a potreby preukázania efektívnosti navrhovaného systému je nevyhnutné vyvinúť modely konkrétnych technických zariadení. Modely zariadení sú inkorporované do integrálnych modelov jadrového bloku a sú následne využiteľné pre analýzy preukázania bezpečnosti jadrových blokov a preukázania splnenia kritérií prijateľnosti v oblasti únikov štiepných produktov do okolia elektrárne počas ťažkých havárií.

5 DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY - METODIKA RIEŠENIA PROBLEMATIKY DYNAMIKY VODÍKA V JADROVÝCH BLOKCH

Problematika riešenia horenia vodíka je oblasťou prelínajúcou viaceré oblasti technických vied najmä však čerpá z termodynamiky plynov a pár, chémie a z náuky o materiáloch. Podstatnou časťou riešenia problematiky je aj simulácia fyzikálnej reality v obmedzených a nedokonalých možnostiach modelov v dostupných výpočtových nástrojoch, ktorých využitie kladie požiadavky na kompromisné riešenia, návrhy špecifických modelov a na modelovanie vlastností elektrární typu VVER440/V213 v podmienkach chýbajúcich modelov komponentov v daných výpočtových nástrojoch.

Metodika riešenia problematiky je, z dôvodu interakcie riešenia fyzikálneho modelu a riešenia interpretácie tohto modelu v použitých výpočtových nástrojoch, rozdelená do metodiky riešenia fyzikálneho modelu problematiky, metodiky prístupu k výpočtovému riešeniu problematiky a vlastnej metodiky vyhodnotenia a riešenia nebezpečenstva horenia vodíka.

1. Metodika riešenia fyzikálneho modelu problematiky je založená na uvedených bodoch:
 - identifikácia a kvantifikácia zdrojov vodíka a iných horľavých plynov v kontajneroch VVER440,
 - fyzikálny základ šírenia vodíka,
 - potenciál horenia vodíka - fyzikálny základ priestorového horenia vodíka, analýza dynamiky horenia,
 - vyhodnotenie rizika horenia vodíka na integritu HZ.
2. Metodika prístupu k výpočtovému riešeniu problematiky je založená na nasledujúcich bodoch:
 - identifikácia dostupných vhodných nástrojov pre riešenie problematiky,
 - verifikácia prístupu využitia programov so sústredenými parametrami z pohľadu prípravy korektného reprezentatívneho výpočtového modelu,
 - verifikácia prístupu využitia programov so sústredenými parametrami z pohľadu vhodnosti aplikovateľnosti programu na simuláciu šírenia vodíka v kontajneroch,
 - zhodnotenie možnosti kooperácie programov so sústredenými parametrami a programov počítačovej dynamiky tekutín využívajúcich metódu konečných objemov.

3. Vlastná metodika vyhodnotenia a riešenia nebezpečenstva horenia vodíka je obsiahnutá v bodoch:

- analýza potenciálnych vhodných opatrení pre riešenie problematiky vodíka,
- vyhodnotenie aplikovateľnosti jednotlivých opatrení na riešenie problematiky vodíka,
- vytvorenie potrebných podporných modelov a výpočtových modulov pre riešenie problematiky vo vybraných výpočtových nástrojoch,
- metodika hodnotenia nebezpečenstva horenia vodíka v kontajnmemente,
- návrh technického riešenia vybraného opatrenia pre riešenie problematiky vodíka.

5.1 Metodika riešenia fyzikálneho modelu problematiky

Vyvinutá metodika riešenia fyzikálneho modelu problematiky predstavuje postup riešenia problematiky horenia vodíka z pohľadu fenoménov vplývajúcich na jadrovú bezpečnosť v oblasti zmierňovania následkov ťažkých havárií najmä v oblasti produkcie a horenia vodíka.

V prostredí materiálovo rozmanitom a so zdrojom energie, akým je HZ reaktorového bloku, je možnosť oxidácie rozličných prvkov vodnou parou a tým je umožnená produkcia vodíka z rozličných zdrojov. Ďalšie horľavé plyny produkované počas havárií s poškodením paliva zahŕňajú najmä oxid uhoľnatý a metán.

Šírenie vodíka v hermetickej zóne je zjednotením viacerých spôsobov prúdenia tekutín v termodynamickom priestore. Prirodzená konvekcia je významným mechanizmom šírenia vodíka, nakoľko zmes vodíka s parou má v dôsledku výrazne vyššej teploty ako aj chemického zloženia oveľa nižšiu hustotu ako okolitá atmosféra v HZ. Vzhľadom na veľkosť HZ je priestor ovplyvnený prúdom unikajúcej tekutiny z I.O. a priestor ovplyvnený činnosťou sprchového systému HZ, teda priestor s energetickými zdrojmi vyvolávajúcimi nútené prúdenie, obmedzený na časť priestoru boxu parogenerátorov.

Po úniku z I.O. sa vodík šíri vplyvom voľnej i vynútenej konvekcie do ostatných priestorov HZ a stúpa jeho koncentrácia. V kontajnmemente sa vytvorí zmes vzduchu, vodíka a vodnej pary, ktorá je horľavá a je v nej možná propagácia horenia. Nutnou podmienkou na propagáciu horenia vodíka v kontajnmemente v smere nahor je objemová koncentrácia vodíka v rozpätí 4 - 74%, pre propagáciu vo vodorovnom smere 6 - 74% a smerom nadol 9 - 74%. Koncentrácia kyslíka umožňujúca propagáciu horenia je min. 5%. Koncentrácia pary v atmosfére, ktorá zabraňuje horeniu vodíka je závislá na koncentrácii vodíka, avšak obsah pary nad 55% zabraňuje horeniu vodíka pri všetkých koncentráciách vodíka. Atmosféra, v

ktorej nie je možná propagácia horenia je inertná. So stúpajúcou teplotou klesá potrebná koncentrácia vodíka potrebná pre udržateľnú propagáciu horenia.

Pre potreby analýzy dynamiky vodíka v kontajnermente VVER440/V213 bol zvolený prístup kompletného adiabatisko-izochorického zhorenia vodíka - AICC spolu s vyhodnotením potenciálu prechodu deflagrácie vodíka na detonáciu vodíka - DDT. Podmienky pri AICC zhorení sú definované ako kompletné zhorenie vodíka v priestore konštantného objemu v tepelno-izolovanej sústave. Pri využití prístupu AICC je možné stanoviť medzné koncentrácie vodíka, ktoré majú za následok poškodenie kontajnermentu. Pri uvažovaní 100% vlhkosti v atmosfére je na základe prístupu AICC hraničnou koncentráciou pre dosiahnutie maximálneho projektového tlaku kontajnermentu (250 kPa) už koncentrácia 4,7% vodíka pri počiatocnom tlaku 100 kPa. Pre dosiahnutie maximálneho konštrukčného tlaku kontajnermentu (460 kPa) je potrebné horenie zmesi s podielom 12,5% pri počiatocnom tlaku 100 kPa. Avšak už nárast počiatocného tlaku pred horením vodíka na 120 kPa znižuje hranicu nebezpečnej koncentrácie vodíka na 3,5 % pre projektový tlak a 9,5% vodíka pri uvažovaní konštrukčného tlaku HZ. V skutočnosti však neprichádza k podmienkam umožňujúcim horenie podľa prístupu AICC a celkový tlak dosiahnutý po horení vodíka môže byť nižší.

Na základe štúdia geometrie kontajnermentu je nutné uvažovať s nehomogénnou atmosférou v kontajnermente vo fáze unikania vodíka z I.O.. Kontajnerment VVER440/V213 je tvorený mnohými relatívne oddelenými objemami, ktoré sú spojené so susednými objemami otvormi relatívne malej plochy voči ich objemu. Takáto geometria vyžaduje riešiť tieto objemy ako samostatné objemy pre horenia vodíka. Veľkou nevýhodou kontajnermentu je, že všetky relevantné objemy riešené z hľadiska horenia vodíka sú objemami susediacimi s vonkajšou hranicou kontajnermentu. Geometria kontajnermentu navyše vytvára priaznivé podmienky pre akceleráciu steny horenia a pre prechod z deflagrácie na detonáciu.

Priama iniciácia detonácie (horenie s postupom steny horenia nadzvukovou rýchlosťou) vyžaduje dostatočné množstvo dodania energie, napr. výbuchom výbušniny, laserom alebo elektrickým oblúkom. V prostredí hermetickej zóny však pravdepodobnejšie k detonácii môže prísť postupným prechodom deflagračného horenia do detonačného urýchlením postupu steny plameňa turbulenciou, prekážkami a podmieneným deflagráciou v obmedzenom objeme. Expanzia horúceho plynu spôsobí kompresiu nehoriacich plynov pred čelom vlny. Postupným stláčaním dôjde k zahriatiu nehoriaceho plynu, rastu rýchlosti plameňa, čo spôsobí ďalšie stláčanie plameňa až dôjde k vzniku rázovej vlny. Nehoriaci plyn sa následnou kompresiou vplyvom rázovej vlny zahreje na teplotu samovznietenia, čo priamo vedie k vzniku detonácie. Horiace plyny za detonáciou sa pohybujú v smere detonácie, pričom keď táto narazí na prekážku, vybudí sa odrazená rázová vlna, ktorá ďalej

stláča horiaci plyn, čím dôjde k nárastu tlaku po detonácii 2-3x vyššiu, než bola hodnota tlaku pôvodného detonačného horenia.

Prístup hodnotenia nebezpečenstva horenia vodíka je založený na vyhodnocovaní tlaku AICC a vyhodnotení potenciálu DDT v prípade dosiahnutého horenia v jednotlivých miestnostiach kontajnementu. Vyhodnotenie nebezpečenstva potenciálu DDT vychádza zo stanovenia chemických a geometrických tried nebezpečnosti.

5.2 Metodika prístupu k výpočtovému riešeniu problematiky

Výpočtové riešenie problematiky vychádza z dostupných výpočtových nástrojov a z dostupných výpočtových prostriedkov nájdením optimálnej miery podrobnosti modelovania priestoru hermetickej zóny reaktorového bloku VVER440/V213.

Na analýzy šírenia vodíka sa v súčasnosti používajú najmä integrálne programy, ktorých výhodou je, že kombinujú v sebe špecializované programy zamerané na jednotlivé fyzikálne, chemické a termodynamické procesy počas priebehu ťažkej havárie a tým umožňujú sledovať haváriu od počiatkovej iniciačnej udalosti až po zlyhanie všetkých bariér proti šíreniu štiepných produktov. Špeciálne modely degradácie AZ, interakcie roztavených materiálov AZ s parou, produkcie vodíka, uvoľňovania vodíka a štiepných produktov do kontajnementu cez únikový otvor i sledovania procesov v kontajmente zahrnuté v jednom výpočtovom programe, vytvárajú nástroj, ktorý poskytuje hodnotu integrálnej produkcie vodíka (zdrojový člen vodíka), možnosť sledovania šírenia vodíka v kontajmente, jeho prípadné horenie ako aj následky horenia vodíka.

Nevýhodou integrálnych programov v oblasti sledovania šírenia vodíka je charakter výpočtu. Integrálne programy ako napríklad program MELCOR sú programy so sústredenými parametrami a teda pre jediný objem nodalizácie existuje len jedna hodnota termodynamickej veličiny – v celom výpočtovom objeme je rovnaká teplota, tlak, hustota atď. Aj keď v nodalizácii HZ je možné modelovať rádovo desiatky objemov, nedostatky vyplývajúce z charakteru programov so sústredenými parametrami vytvárajú neurčitosti pri modelovaní šírenia vodíka, ktoré môžu byť efektívne znížené práve nasadením programov CFD na analýzy šírenia vodíka.

Výhodou programov CFD ako je napríklad program FLUENT oproti integrálnym programom je možnosť podrobne modelovať geometriu vnútorného priestoru HZ vrátane zariadení a vnútorných zostavieb. Komplexnosť modelovania je však obmedzená možnosťou vytvoriť v tomto priestore výpočtovú sieť požadovanej kvality. Pre extrémne rôznorodé a komplikované objemy je obťažné vytvoriť výpočtovú sieť akceptovateľných parametrov kvality siete.

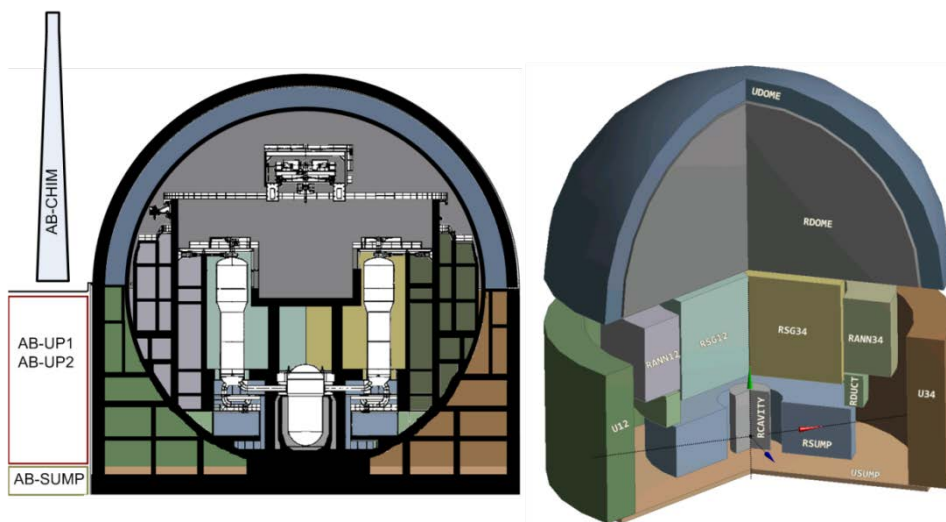
Na základe zhodnotenia výhod a nevýhod rozličných prístupov k riešeniu problematiky bol ako metodický prístup zvolený prístup k riešeniu problematiky pomocou integrálnych programov so sústredenými parametrami s preukázaním vhodnosti použitého prístupu.

Preukázanie vhodnosti prístupu bude založené na dvoch pilieroch:

- verifikácia prístupu využitia programov so sústredenými parametrami z pohľadu prípravy korektného reprezentatívneho výpočtového modelu pomocou porovnávacej analýzy všeobecného modelu kontajnementu,
- verifikácia prístupu využitia programov so sústredenými parametrami z pohľadu vhodnosti aplikovateľnosti programu na simuláciu šírenia vodíka v kontajnemente pomocou CFD programu FLUENT.

Z pohľadu dostupnosti a vhodnosti aplikácie boli pre riešenie problematiky vybraté programy MELCOR a FLUENT6. Program MELCOR, ktorý je určený na analýzy ťažkých havárií ľahkovodných reaktorov, je špičkovým zástupcom programov so sústredenými parametrami. Program FLUENT6 je zástupcom programov využívajúcich metódu konečných objemov v oblasti riešenia počítačovej dynamiky tekutín.

Verifikácia prístupu modelovania HZ v programe MELCOR, overenie metodiky prípravy modelu, bolo vykonané využitím výsledkov medzinárodného projektu SARNET2 7. rámcového programu Európskej komisie v pracovnej skupine WP7 Containment, v pracovnej úlohe WP7.3 Task 3 venovanej modelovaniu kontajnementu pomocou programov so sústredenými parametrami. Prístup modelovania a vytvárania modelu bol v rámci participácie v projekte porovnaný s prístupmi využívanými v medzinárodnom meradle.



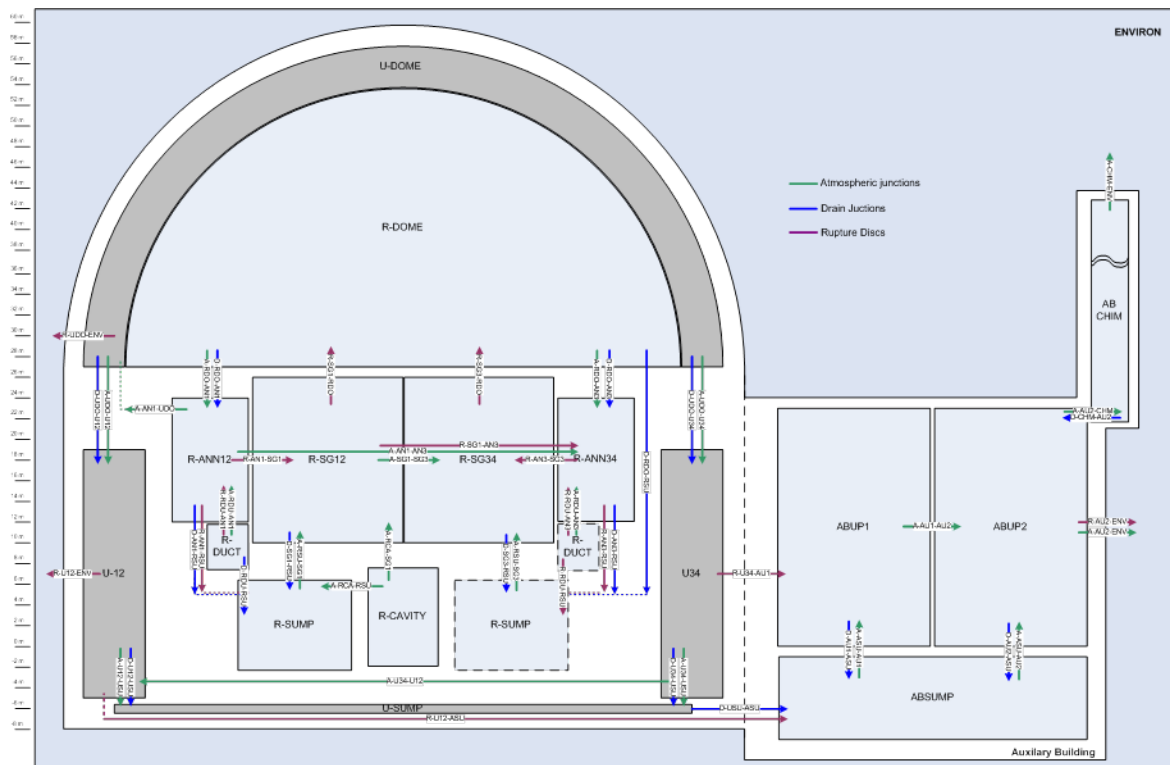
Obr. 5.2-1 Všeobecný model kontajnementu - Generic containment.

Využitie všeobecného modelu kontajnementu na porovnanie typu analýza programom - analýza programom je rozdielne voči štandardnej verifikácii programu na experimente. Štandardným postupom verifikácie je porovnanie fyzikálnych modelov programu so separátnymi alebo komplexnými experimentmi alebo testami. V modeli všeobecného modelu kontajnementu sú porovnávané výsledky komplexných výpočtových programov a preto je potrebné postupovať po definovaných čiastočných krokoch v procese pochopenia rozdielov a odchýlok ako aj v identifikácii zdrojov týchto rozdielov a odchýlok.

Postup projektu bol rozdelený do troch krokov. Každý z krokov obsahuje tzv. „blind“ fázu a „open“ fázu. V „blind“ fáze vytvára každý participant model kontajnementu podľa dostupnej špecifikácie bez znalosti ostatných výsledkov. V „open“ fáze sú vyhodnotené všetky výsledky a je vypočítaný referenčný priebeh sledovaných termohydraulických parametrov. Participant, ktorí sa výrazne odlišili od referenčného priebehu, identifikovali dôvod rozdielu a upravili model, respektíve vysvetlili rozdiely v princípe modelovania v použitom výpočtovom programe.

1. Prvý krok porovnania, run0, sa sústredil na prípravu a verifikáciu vstupných súborov a na možnosť porovnania výsledkov medzi viacerými programami so sústredenými parametrami. Modelovanie generického scenára sa zameralo na termohydrauliku atmosféry kontajnementu pre simulovaný scenár havárie malá LOCA.
2. V kroku run1 boli k jestvujúcemu modelovanému scenáru pripojené špecifikácie typické pre prebiehajúcu ťažkú haváriu, uvoľňovanie vodíka vo fáze havárie do poškodenia tlakovej nádoby reaktora a uvoľňovanie CO a CO₂ vo fáze havárie po zlyhaní integrity tlakovej nádoby reaktora. Zostatkový výkon prchavých štiepných produktov uvoľnených do kontajnementu bol modelovaný zjednodušene ako tepelné zdroje v atmosfére a vo vodnom bazéne na dne miestností v kontajnemente.
3. V záverečnom kroku porovnania, run2, boli participantmi porovnania modelované zmierňujúce opatrenia pre zníženie nebezpečenstva horenia vodíka - pasívne autokatalytické rekombinátory.

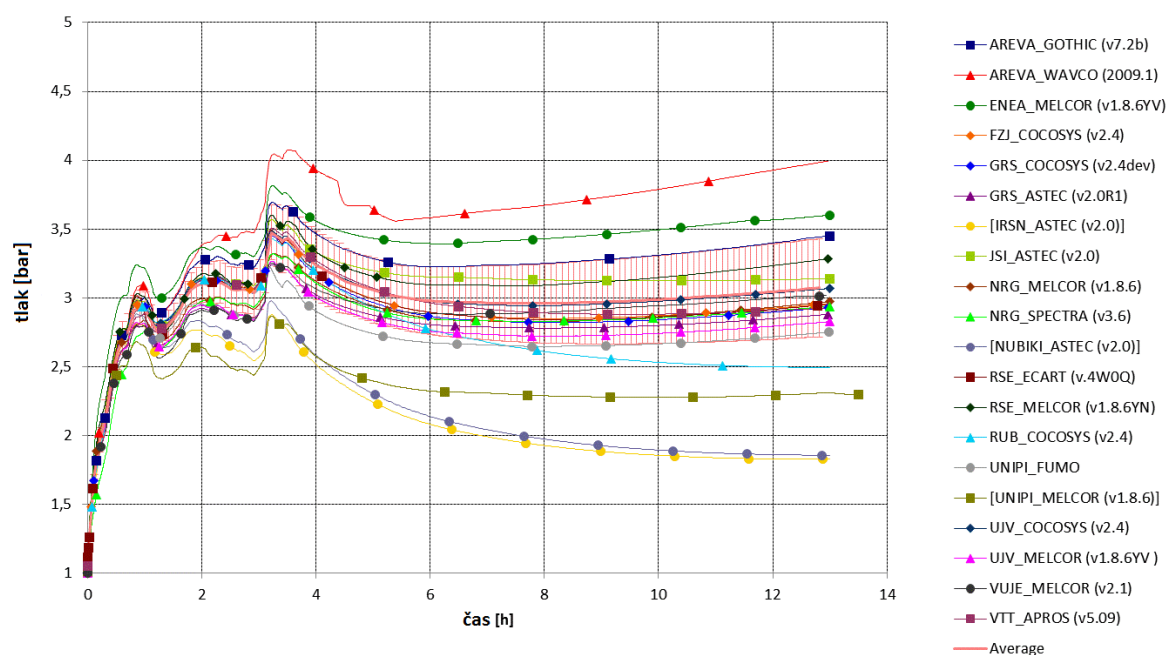
Rozvinutie verifikácie prístupu riešenia problematiky horenia vodíka v kontajnemente jadrových blokov využitím prístupov v medzinárodnom projekte SARNET2, v pracovnej úlohe Generic containment je súčasťou metodiky riešenia prístupu k výpočtovému riešeniu problematiky. Model všeobecného kontajnementu bol vytvorený v programe MELCOR podľa zásad vytvárania modelu a podľa uvedenej nodalizácie.



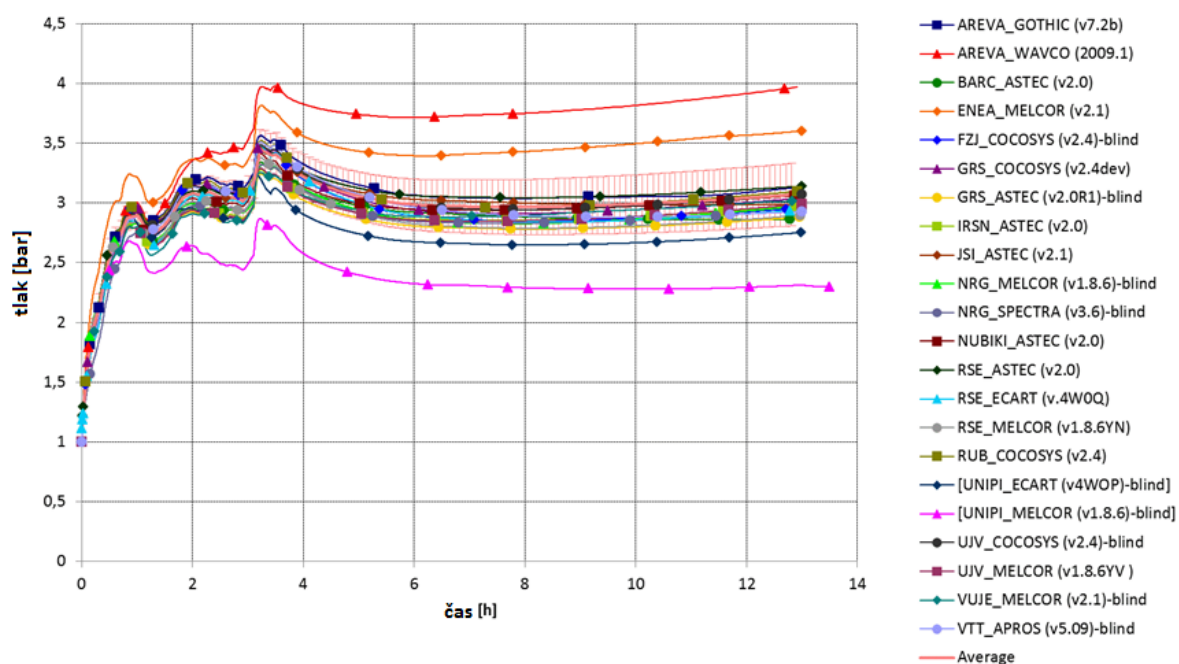
Obr. 5.2-2 Nodalizácia všeobecného kontajmentu

Výpočtová simulácia pripraveného modelu pri dodržaní zásad vytvárania modelu je v grafe dosiahnutého celkového tlaku v kontajmente označená ako „VUJE_MELCOR v2.1“. Výsledky simulácie v projekte Generic containment v oblasti modelovania šírenia vodíka (run1) sú znázornené v nasledujúcich grafoch. Pre porovnanie dosiahnutých výsledkov vo fáze slepej „blind“ a vo fáze otvorenej „open“ bola vybraná dokumentácia časového priebehu celkového tlaku v kontajmente. Výsledky otvorenej fázy ako aj tzv. slepej fázy run1 na Obr. 5.1-3 a Obr. 5.1-4 znázorňujú časovú závislosť celkového tlaku v kontajmente.

Absolute Containment Pressure



Obr. 5.2-3 Priebek tlaku v kontajne v etape run1 - slepá fáza.



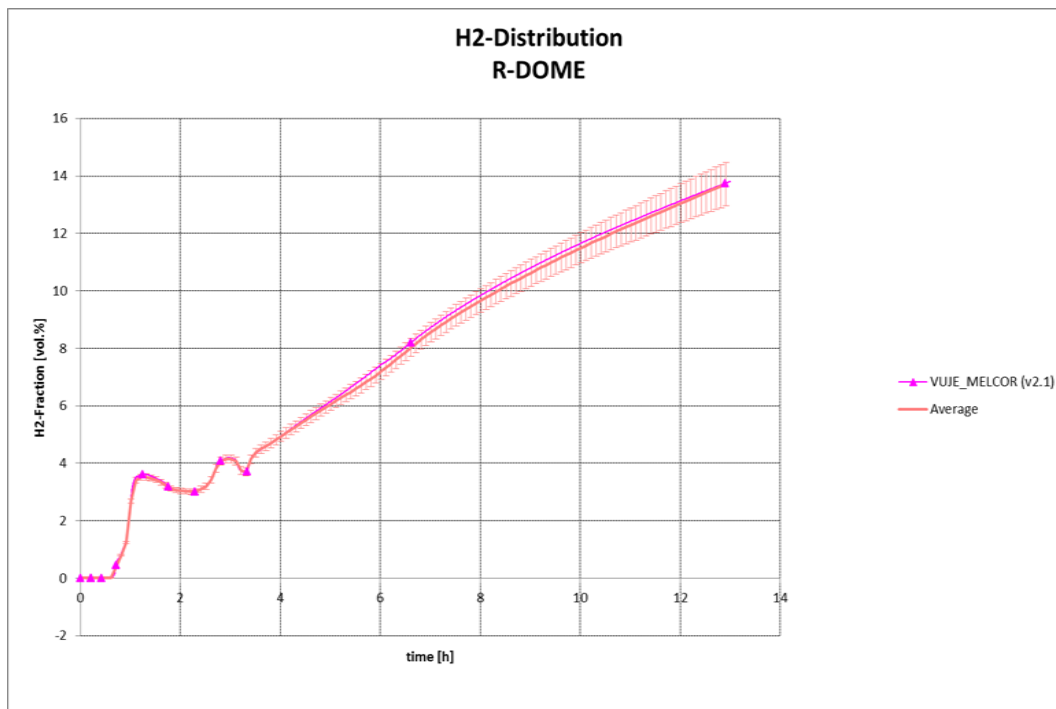
Obr. 5.2-4 Priebek tlaku v kontajne v etape run1 - otvorená fáza.

V etape run2 boli modelované zmierňujúce opatrenia reprezentované pasívnymi autokatalytickými rekombinátormi typu AREVA FR90/1-320, FR90/1-380T, FR90/1-750T,

FR90/1-960, FR90/1-1500. Uvedený typ rekombinátora je jedným s potenciálnych kandidátov pre zariadenia systému pre zníženia následkov horenia vodíka v kontajneroch aj blokov VVER440/V213.

S cieľom zjednodušiť vstup do modelu a zároveň overiť možnosť daného prístupu k modelovaniu boli rekombinátory umiestnené v jednotlivých zónach modelu nahradené ekvivalentným počtom rekombinátorov definovaných ako „PAR FR90/1-750T ekvivalent“.

Uvedený prístup k modelovaniu bol aplikovaný na etapu run2 – modelovanie zmierňujúcich opatrení. Na nasledujúcich obrázkoch je ukázaný časový priebeh koncentrácie vodíka vo vybraných miestnostiach nodalizácie všeobecného kontajneru. Na grafoch je znázornený priebeh koncentrácie z výpočtu a rozpätie hodnôt pre akceptáciu výsledkov stanovené na základe výsledkov simulácií ostatných participantov v programe.



Obr. 5.2-5 Priebeh koncentrácie vodíka v miestnosti R-DOME v kontajneroch v etape run2.

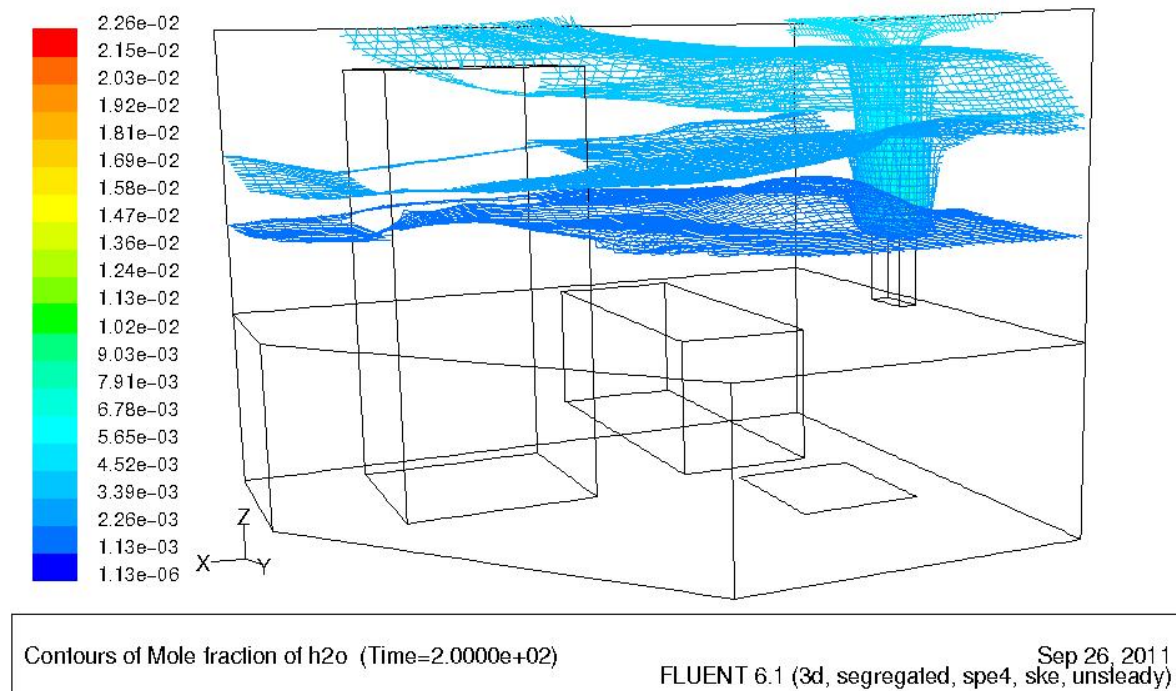
Dosiahnuté výsledky v projekte SARNET2 dávajú predpoklad pre vytvorenie výpočtového modelu pre integrálny program so sústredenými parametrami s korektným modelovaním všetkých rozhodujúcich fenoménov najmä však šírenia vodíka a modelovania opatrení pre zníženia následkov horenia vodíka.

Verifikácia prístupu využitia programov so sústredenými parametrami z pohľadu vhodnosti aplikovateľnosti programu na simuláciu šírenia vodíka v kontajneroch

Verifikácia aplikácie programu so sústredenými parametrami na riešenie problematiky bola preukázaná simuláciou riešenia šírenia vodíka a simuláciou práce rekombinátora vodíka

vo vybranej miestnosti HZ pomocou CFD programu FLUENT. Náplňou práce bola simulácia modelu rekombinátora FR1-750T (AREVA) osadeného v miestnosti kompenzátora objemu A527 (JE EMO34). Model rekombinátora FR1-750T umožnil realizáciu analýz procesu rekombinácie metódou úplného adiabatického izochorického horenia. Analýza využitím CFD modelu má preukázať z pohľadu šírenia vodíka a pary, že činnosťou rekombinátora prichádza k prúdeniu v podstatnej časti miestnosti a podstatná časť miestnosti je činnosťou rekombinátora ovplyvnená. Rovnako je potrebné overiť, či rekombinátor napomáha vyrovnávať rozdiely v koncentráciách komponentov atmosféry v rámci miestnosti. Analýza využitím CFD prístupu má ukázať, že výsledky analýz scenárov ťažkých havárií s programom so sústredenými parametrami je možné akceptovať ako reprezentatívne pre simuláciu činnosti systému pre zníženie nebezpečenstva horenia vodíka v HZ v oblasti použitia pasívnych autokatalytických rekombinátorov vodíka.

V analýze je umiestnený rekombinátor nad otvor očakávaného vstupu zmesi vodíka a pary do miestnosti a z hľadiska výšky umiestnenia asi v polovici výšky miestnosti. Výsledky analýzy sú znázornené na nasledujúcich obrázkoch.



Obr. 5.2-6 Priestorové rozloženie vodnej pary v čase 200 s

6 APLIKÁCIA METODIKY RIEŠENIA PROBLEMATIKY DYNAMIKY HORĽAVÝCH PLYNOV V KONTAJNMENTE - STANOVENIE NEBEZPEČENSTVA HORENIA VODÍKA

Problematika horenia vodíka a možnosti znižovania následkov horenia vodíka je problematika so širokým záberom zahŕňajúca však najmä problematiku šírenia vodíka v kontajnmemente a problematiku postupu steny horenia a fyzikálno-chemického modelu horenia vodíka.

Podstatnou časťou riešenia je analyzovanie možnosti technického riešenia spaľovania vodíka v priestoroch hermetickej zóny reaktorových blokov VVER440/V213 na Slovensku. Uvažuje sa viac alternatív riešenia a vyzdvihujú sa výhody a nevýhody viacerých prístupov. Alternatívy riešenia nebezpečenstva vyplývajúceho z nekontrolovateľného horenia vodíka v kontajnmemente sú vyhodnotené z technického hľadiska a z pohľadu realizovateľnosti. Pre realizáciu je odporučená tá alternatíva, ktorá uvedené kritéria spĺňa najlepšie.

Metodika hodnotenia rizika horenia vodíka v kontajnmemente

Riziko horenia vodíka v kontajnmemente je podstatným parametrom jadrovej bezpečnosti v oblasti 4. úrovne ochrany do hĺbky – v oblasti znižovania následkov ťažkých havárií. Ohrozenie integrity poslednej bariéry proti úniku štiepných produktov predstavuje podstatné zhoršenie radiačnej situácie v okolí elektrárne a predstavuje významné poškodenie životného prostredia v okolí elektrárne.

Rešpektovaním hodnoty tlaku po horení stanoveným metódou AICC, rešpektovaním javov vedúcim k zníženiu tlaku pri reálnom horení vodíka a rešpektovaním javov vedúcim k nárastu tlaku pri reálnom horení vodíka bola vypracovaná metodika hodnotenia rizika horenia vodíka založená na troch krokoch:

- stanovenie AICC tlaku vo všetkých miestnostiach susediacich s hranicou hermetickej zóny a vo všetkých miestnostiach, v ktorých by horenie vodíka mohlo viesť k následkom na integritu hermetickej hranice kontajnmementu,
- v miestnostiach, v ktorých prišlo k prekročeniu limitného AICC tlaku (limitný tlak AICC je výsledkom pravdepodobnostného hodnotenia štrukturálnej integrity kontajnmementu) je vykonaná analýza možnosti propagácie horenia v zmesi nachádzajúcej sa v dnom objeme (možnosť horenia v danom objeme). Analýza je vykonaná na základe zloženia zmesi s ohľadom na potrebnú koncentráciu vodíka, kyslíka a vodnej pary,
- v miestnostiach, v ktorých je pri prekročení limitného tlaku AICC možné horenie vodíka, je vykonaná analýza potenciálu dosiahnutia limitného AICC tlaku analýzou zmesi, ktorá sa nachádza v danom objeme. Hlavným cieľom je vyhodnotiť očakávanú

rýchlosť horenia a možnosť akcelerácie horenia analýzou zloženia zmesi s ohľadom na potrebnú koncentráciu vodíka, kyslíka a vodnej pary. Rovnako je v tomto kroku vykonaná analýza potenciálu prechodu deflagrácie na detonáciu podľa vyhodnotenia triedy zloženia atmosféry a podľa triedy geometrie miestnosti s cieľom stanoviť triedu potenciálu prechodu deflagrácie vodíka na detonáciu.

Metodika hodnotenia rizika horenia vodíka bola aplikovaná pre stanovenie nebezpečenstva horenia vodíka pre bezpečnostné analýzy reaktorového bloku MO34. Metodika je odporučená pre vyhodnocovanie kritéria prijateľnosti DEC-2 podľa bezpečnostného návodu, [2], pre analýzy bezpečnosti.

Kritérium prijateľnosti DEC-2 pre nadprojektové havárie vrátane ťažkých havárií vyžaduje: DEC2 - Pre havarijné scenáre s nezanedbateľnou pravdepodobnosťou výskytu nedôjde k zlyhaniu ochrannej obálky jadrového reaktora následkom jej tlakového a teplotného zaťaženia. Funkčnosť ochrannej obálky jadrového reaktora môže byť analyzovaná na základe realistického prístupu.

Pre potreby hodnotenia bezpečnosti v uvedenej analýze bezpečnosti sú pre splnenie kritéria DEC2 uvažované nasledovné kritériá:

- neprekročenie termodynamického tlaku 350 kPa v HZ. Uvedený tlak je definovaným cieľom projektu elektrárne a zodpovedá kvantilu 5% pravdepodobnosti zlyhania integrity HZ,
- neprekročenie celkového tlaku 500 kPa v betónovej šachte reaktora. Celkový tlak sa skladá z termodynamického tlaku a z hydrostatického tlaku v šachte reaktora,
- neprekročenie tlaku AICC v miestnostiach HZ susediacich s hermetickou hranicou HZ, v ktorých je možná, v čase vyhodnocovania lokálnych tlakových špičiek tlaku AICC, propagácia horenia horľavých plynov (najmä vodíka); t.j. tlaku AICC 350 kPa. Propagácia horenia sa považuje za možnú, ak je koncentrácia vodíka nad 4% a zároveň koncentrácia pary pod 55% a zároveň koncentrácia kyslíka nad 5%; všetky koncentrácie sú v % objemových.

Aplikáciou metodiky hodnotenia rizika horenia vodíka v analýzach bezpečnosti bola preukázaná bezpečnosť jadrového bloku MO34 v oblasti ohrozenia integrity hermetickej obálky.

6.1 Modely zariadení pre použitie vo výpočtových nástrojoch

Integrálny program MELCOR obsahuje model všeobecného rekombinátora, ktorý umožňuje reakciu vodíka a kyslíka a následné uvoľnenie pary do priestoru umiestnenia modelu rekombinátora. Využitím toho modelu je možné simulovať aj rekombinátor typu AREVA FR90/1. Simulácia rekombinátora využitím vstavaného modelu rekombinátora však vyžaduje niektoré zjednodušenia a zahŕňa neurčitosti.

Rekombinátor je možné v integrálnom programe MELCOR modelovať úpravou vstavaného modelu rekombinátora alebo vyvinutím nového modelu s modelovaním energetických a hmotnostných tokov. Pri simulácii boli využité obidva prístupy. Podrobnejšie je priblížené novovyvinutý model rekombinátora.

Model rekombinátora FR90/1-1500T

Nedostatky simulácie rekombinátora pomocou adaptovaného modelu rieši model rekombinátora vyvinutý na základe fyzikálnej podstaty rekombinátora a rešpektujúc údaje výrobcu o rekombinačnej kapacite.

Rekombinácia vodíka je hlavnou vlastnosťou rekombinátora a hodnota rekombinačnej kapacity rekombinátora je pre rozličné podmienky v atmosfére poskytnutá výrobcom zariadenia. Modelovanie rekombinátora pomocou riadiacich funkcií je zložitejšie, avšak je možné priamo modelovať údaje výrobcu pre rekombinačnú kapacitu spolu so všetkými obmedzeniami (účinnosť rekombinácie, minimálna koncentrácia vodíka pre začiatok rekombinácie a podobne).

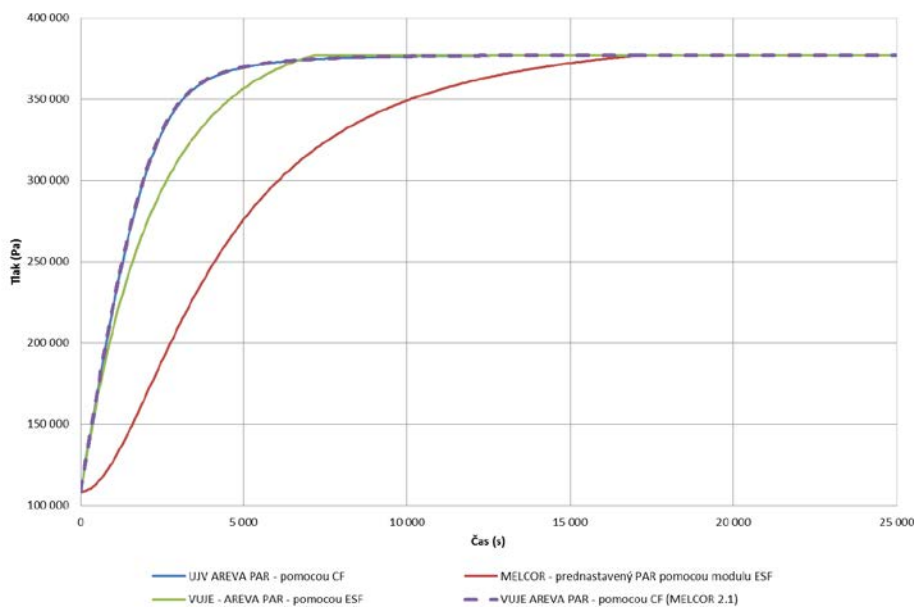
Vyvinutý model rekombinátora bol verifikovaný pomocou porovnania s horením vodíka princípom AICC. V testovacom modeli HorenieH2.m6s boli vytvorené dva výpočtové objemy konštantného objemu a tepelne izolované s rovnakým zložením atmosféry. V porovnaní v nasledujúcich obrázkoch je znázornené preukázanie zachovania hmotnosti, zachovania vnútornej energie a dosiahnutie rovnakého tlaku a teploty po horení i po rekombinácii (AICC tlak a teplota) a dosiahnutie rovnakej nulovej koncentrácie vodíka v obidvoch objemoch. Dosiahnuté výsledky preukazujú správnosť prístupu k modelovaniu termodynamickej podstaty rekombinátora.

Model rekombinátora bol verifikovaný z pohľadu správnosti termodynamického modelu. Pre celkovú verifikáciu je potrebná rovnako aj verifikácia správneho modelovania rekombinačnej kapacity.

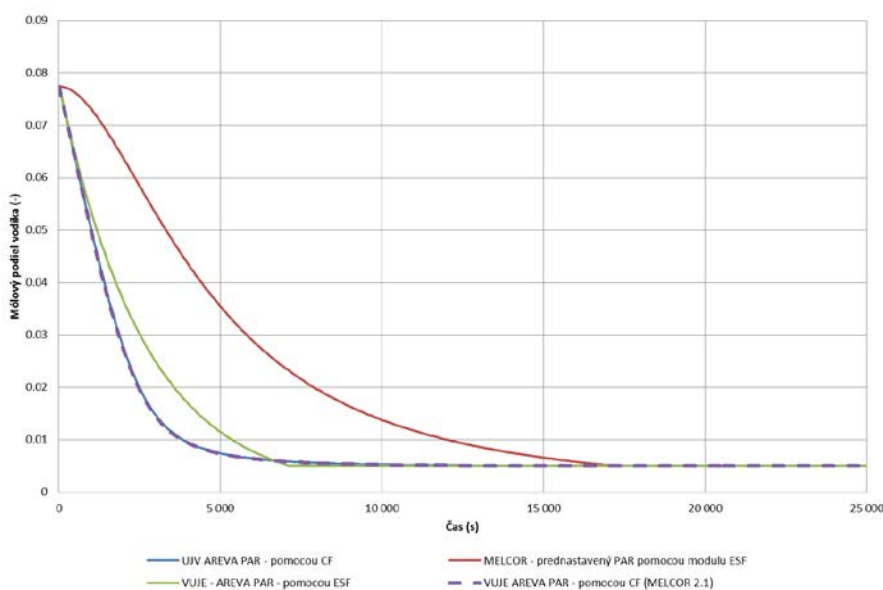
Vyvinutý základný model rekombinátora bol testovaný v modeli CUBE1000, ktorý bol vyvinutý v spolupráci s Ústavom jaderného výskumu Řež, Česká republika. V tomto testovacom modeli bola vytvorená atmosféra so zmesou vodíka s koncentráciou 7,288%

a vzduchu. V danom modeli boli testované v rovnakej atmosfére modely rekombinátorov vyvinutých v UJV Řež a modely rekombinátorov vyvinuté v rámci riešenia problematiky dynamiky vodíka v jadrových blokoch. Výsledky porovnania pre simuláciu rekombinátora AREVA PAR FR90/1-1500T sú znázornené na obrázku Obr. 6.1-1 pre dosiahnutý tlak v objeme a na Obr. 6.1-2 pre časový priebeh koncentrácie vodíka.

Dosiahnuté výsledky porovnania dávajú dobrý predpoklad, že verifikovaný model rekombinátora reprezentuje fyzikálnu skutočnosť v maximálne dosiahnuteľnej miere a preukazujú, že model rekombinátora môže byť využitý pre analýzy bezpečnosti jadrových blokov.

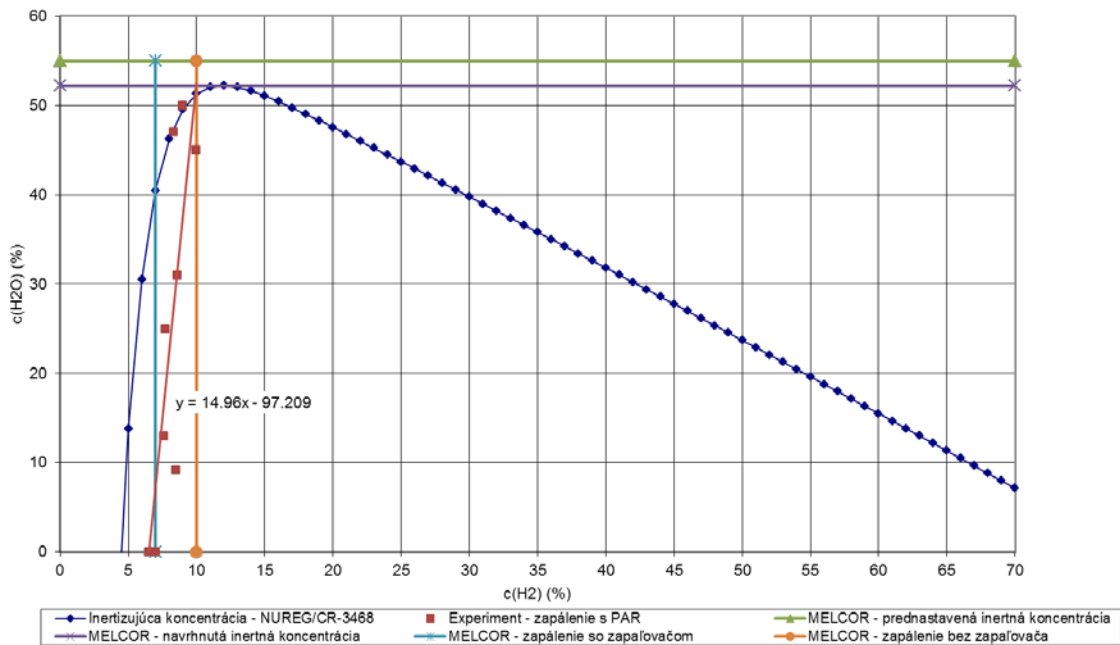


Obr. 6.1-1 Priebeh tlaku pre rozličné modely rekombinátora

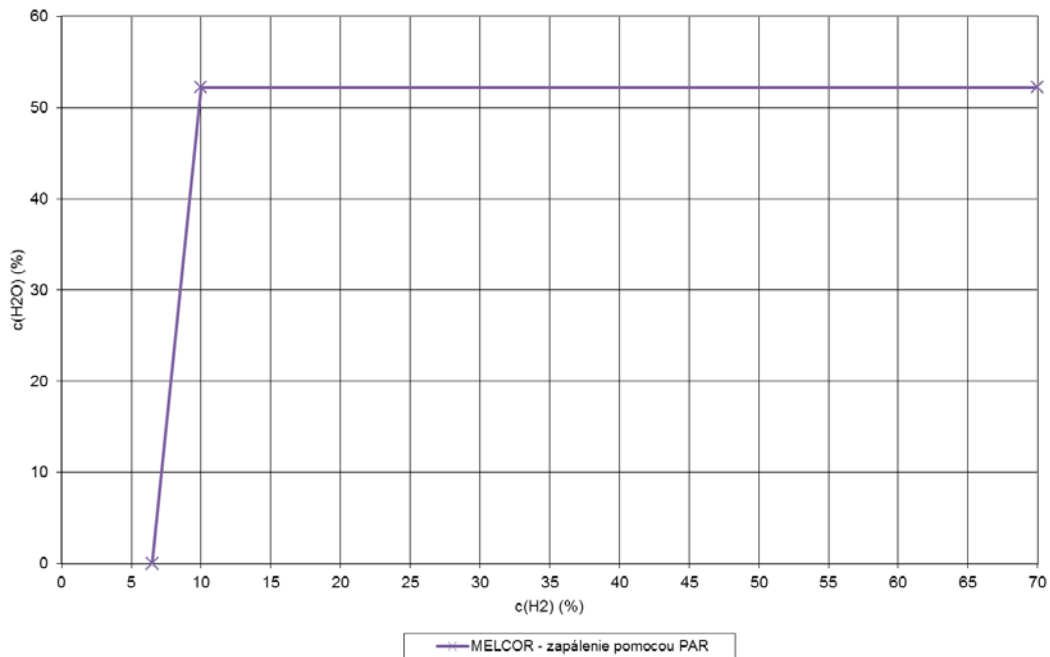


Obr. 6.1-2 Priebeh koncentrácie vodíka pre rozličné modely rekombinátora

Zapaľovanie vodíka je funkciou rekombinátora, ktorá reprezentuje funkciu autokatalytického zapaľovača. Navrhnutá zapaľovacia charakteristika rekombinátorov navrhnutá pre použitie vo výpočtovom modeli pre program MELCOR je vyhodnotením a zjednotením uvedených dostupných údajov a je zobrazená na Obr. 6.1-4.



Obr. 6.1-3 Zjednotenie zdrojových údajov o možnosti zapálenia zmesi vodíka



Obr. 6.1-4 Závislosť inertizujúcej koncentrácie vodnej pary od koncentrácie vodíka - možnosť zapálenia pomocou PAR

Modelovanie predstavuje najlepšie priblíženie k realite. Modelovanie zapálenia atmosféry so zahrnutím krivky inertizácie podľa NUREG/CR-3468, [36], naráža na obmedzenia modelovania šírenia horenia vodíka medzi jednotlivými objemami v programe MELCOR. Šírenie vodíka je definované iba jednou koncentráciou vodíka, pary a kyslíka (pre daný smer šírenia horenia) a definovanie závislosti koncentrácie pary od koncentrácie vodíka pre vytvorenie inertnej atmosféry pre šírenie horenia (napríklad aj šírenia do miestností bez rekombinátorov) v modeli šírenia nie je možné len vstupom definovaným vo vstupnom súbore modelu. Nakoľko v problematike horenia vodíka je podstatnou oblasťou šírenie a horenie vodíka v oblasti do 13% v miestnostiach s inštalovanými rekombinátormi s funkciou Dual-PAR, je uvedené obmedzenie akceptovateľné.

7 SÚHRN VÝSLEDKOV A NOVÝCH POZNATKOV, ZÁVERY PRE PRAX A ĎALŠÍ ROZVOJ VEDNEJ DISCIPLÍNY

Problematika ťažkých havárií sa po udalostiach v japonskej Fukušime dostala do popredia záujmu v oblasti jadrovej bezpečnosti. Havária vo Fukušime, ale aj nehody v Černobyle, v elektrárni Three Mile Island i napríklad v elektrárni A1 na Slovensku poukázali na nevyhnutnosť poznania fenoménov nastávajúcich počas ťažkej havárie. Produkcia vodíka je nevyhnutne spojená so všetkými reaktormi, ktoré používajú vo svojich systémoch vodu a obsahujú oxidovateľné prvky, hlavne kovy. Vzhľadom na vhodné vlastnosti vody z pohľadu moderátora i chladiva a na vhodné vlastnosti ocele ako konštrukčného materiálu, bude problematika produkcie, šírenia a horenia vodíka súčasťou problematiky jadrovej bezpečnosti i v budúcnosti.

Predkladaná práca je súčasťou úsilia o rozvoj vedomostí v problematike ťažkých havárií na Slovensku. Práca sa zameriava na vytvorenie metodiky riešenia problematiky dynamiky vodíka v kontajnmene jadrových blokov s rešpektovaním dostupných výpočtových prostriedkov z pohľadu výpočtových programov (softvéru) ako aj dostupných počítačov a pracovných staníc (hardvéru). Metodika je optimalizovaná pre použitie v súčasnosti a v blízkej budúcnosti pre analýzy bezpečnosti a pre napĺňanie cieľov akčného plánu zvyšovania bezpečnosti vyplývajúceho z vykonaných záťažových testov elektrární. Záťažové testy jadrových elektrární vyplynuli z následných opatrení, vykonaných organizáciami zodpovedných za bezpečnosť, po havárii v elektrárni vo Fukušime.

Dizertačná práca poskytuje v úvodnej časti prehľad súčasného stavu výskumu a vývoja v problematike ťažkých havárií jadrových blokov s ľahkovodnými reaktormi so zameraním sa na problematiku horľavých plynov v kontajnmene jadrovej elektrárne.

Špeciálna pozornosť v zameraní práce je venovaná jadrovým elektrárnám prevádzkovaným na Slovensku; jadrovým elektrárnám s reaktormi VVER440/V213. Vzhľadom na potrebu realizácie opatrení pre znižovanie následkov ťažkých havárií, ako v prevádzkovaných elektrárnach - zvyšovanie bezpečnosti prevádzky, tak i v dostavovanej elektrárni Mochovce 34 - zakomponovanie opatrení pre znižovanie následkov ťažkých havárií do projektu elektrárne, je riešenie problematiky vysoko aktuálne a rozvoj vedomostí v uvedenej oblasti je nevyhnutný.

Hlavnou náplňou práce je vytvorenie metodiky riešenia problematiky dynamiky vodíka v kontajnmene jadrových blokov v podmienkach reaktorových blokov s reaktormi VVER440/V213 a metodika simulácie opatrení pre zmierňovanie následkov ťažkých havárií v oblasti ohrozenia integrity kontajnementu vplyvom potenciálneho horenia vodíka.

Vyvinutá metodika je aplikovaná na vytvorenie návrhu systému riešenia nebezpečenstva horenia vodíka v kontajmente. Pre aplikáciu metodiky sú v práci vyvinuté fyzikálne modely pre simuláciu podstatnej súčasti systému pre znižovanie nebezpečenstva horenia vodíka – modely pasívnych autokatalytických rekombinátorov.

Udalosti v jadrovej elektrárni Fukušima I po zemetrasení a následnej vlne cunami poukazujú na nemožnosť vylúčenia ťažkých havárií z oblasti analýz bezpečnosti jadrových zariadení, nakoľko špecifikácia uvažovaných extrémnych udalostí nemusí byť dostatočná. Horenie vodíka a následné štrukturálne poškodenie stavebných konštrukcií jadrových blokov sa v ťažkých haváriách v minulosti značnou mierou podieľalo na významných dopadoch havárií na životné prostredie.

Využitie systému znižovania následkov horenia vodíka v jadrových elektrárňach VVER440/V213 prispeje k zníženiu pravdepodobnosti straty integrity hermetickej obálky blokov a tým môže prispieť k zníženiu následkov potenciálnej ťažkej havárie na okolie

Participácia v medzinárodnom programe Európskej komisie umožnila vývoj metodiky s využitím poznatkov a skúseností s riešiteľských tímov prakticky z celého európskeho spoločenstva. Možnosť porovnania prístupov k vytváraniu modelov v rozličných programoch so sústredenými parametrami poskytlo cenné skúsenosti a schopnosti pre riešiteľov zo Slovenska.

Aplikácia vyvinutej metodiky viedla k analýze možností realizácie systémov pre znižovanie následkov ťažkých havárií, ktoré sú dostupné vo všeobecných návodoch medzinárodných organizácií, najmä však Medzinárodnej agentúry pre atómovú energiu (MAAE). Analýza efektivity jednotlivých opatrení vo špecifickom kontajmente reaktorov VVER440/V213 predstavuje unikátnu prácu, ktorej výsledky sú následne využité pri vytvorení technického riešenia systému pre znižovanie následkov horenia vodíka v kontajmente. Technické riešenie bolo transformované do projektu systému znižovania následkov horenia vodíka pre elektrárňu Mochovce 3. a 4. blok.

Pokračujúci vývoj modelov elektrárne ako aj model rekombinátorov vyvinutých v predkladanej práci umožňuje ďalšie spresnenie poznania priebehu ťažkých havárií na blokoch s inštalovanými opatreniami pre zníženie nebezpečenstva horenia vodíka. Porovnanie výsledkov modelu rekombinátora s modelom vyvinutým v ÚJV Řež poukazuje na správnosť použitého prístupu a preukazuje prospešnosť medzinárodnej spolupráce výskumných tímov.

Porovnanie použitia prednastaveného modelu rekombinátora vo fáze návrhu systému a modelu rekombinátora, ktorý bude aplikovaný pre analýzy bezpečnosti a pre ďalšie spresnenie simulácií rekombinácie a horenia vodíka umožní s aplikovaním vyvinutej

metodiky pokračovanie v analýzach s maximálnou dosiahnuteľnou mierou podrobnosti a spoľahlivosti.

Vývoj problematiky však jednoznačne smeruje k čoraz väčšiemu nasadzovaniu programov počítačovej dynamiky tekutín (CFD), ktoré postupne nahrádzajú a preberajú úlohy riešené programami so sústredenými parametrami v oblasti šírenia a horenia vodíka v kontajmente. Programy počítačovej dynamiky tekutín však v súčasnosti vyžadujú stále neakceptovateľné nároky na výpočtový výkon pri aplikácii programov na geometriu kontajmentu a pri aplikácii CFD programov na viacfázové prostredia so špecifickými potrebami modelovania vyparovania a kondenzácie ako je napríklad sprchový systém kontajmentu. Nakoľko výpočtový výkon potrebný na splnenie požiadaviek pre dosiahnutie konvergenzie a fyzikálnej správnosti výpočtu (počet buniek, modely kondenzácie) pre CFD programy je v súčasnosti nedostupný, vhodným medzikrokom sa zdajú byť hybridné programy, ktoré sa snažia využiť výhody ako programov so sústredenými parametrami tak aj programov počítačovej dynamiky tekutín. Reprezentatívnym zástupcom menovanej skupiny je výpočtový program GASFOW, ktorý obsahuje zjednodušené modely CFD a pomocou simulácie priestoru pomocou jednoduchých elementov v tvare kvádra umožňuje počítanie i pri simulácii veľkých priestorov reprezentujúcich kontajment. Program obsahuje i možnosť simulácie systémov pre znižovanie následkov ťažkých havárií a hlavných bezpečnostných systémov nachádzajúcich sa v kontajmente. Nasadenie programu pre analýzy je však podmienené vhodnými podmienkami pre vytvorenie riešiteľského tímu a kvantifikovanie požiadaviek na analýzy bezpečnosti zo strany prevádzkovateľov jadrových elektrární respektíve zo strany dozorných orgánov pre jadrovú bezpečnosť.

Skúsenosti z kooperačných projektov venovaných problematike vodíka v kontajmente jadrových blokov poukazujú na perspektívu využitia programov počítačovej dynamiky tekutín na analýzy procesov v kontajmente, [9].

REFERENCIE

- [1] SLUGENŤ V.: Safety of VVER reactors: Barriers Against Fission Products Release, ed. Springer, 2011, ISBN 978-1849964197
- [2] HUSÁRČEK J.: Požiadavky na vypracovávanie analýz bezpečnosti jadrových elektrární, BNS I.11.1/2013, Bratislava, 2013, ISBN 978-80-88806-98-1
- [3] HASKIN F. E. et al.: Perspectives on Reactor Safety, NUREG/CR-6042, Rev.1, USNRC Technical Training center, Reactor Safety Course R-800
- [4] SANGIORGI M.: 3rd EMUG Meeting ENEA, Bologna, 2011, Short overview of 11 March 2011 accidents and considerations, 2011
- [5] SEGHAL B.R.: Phenomenology of Severe Accidents, SARNET Programme Book, 2011
- [6] MAUERSBERGER H.: Phare Projects PH94_2.06/7, VVER-440/213 Analysis of the Need and Alternatives for Filtered Venting of Containment and Handling of Hydrogen in Containment during Severe Accidents, Final Report and Project Summary, WENX-99-19, Westinghouse Electric Europe, 1999
- [7] ARNOULD F.: State of the Art on Passive AutoCatalytic Recombiner, CONTRACT No. FIK5-CT1999-2002, Technicatome 2002
- [8] BAREITH A.: Method of Level 2 PSA Uncertainty Study for NPP Paks, International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, May 14-18, 2006, New Orleans, Louisiana, USA, 2006
- [9] HUHTANEN R.: Final report, Hydrogen Management for the VVER440/213 Containment, VTT, 2005
- [10] PRIOR R.: Accident Management Study, Main Report, Phare 4.2.7.a Project, Westinghouse Energy Systems Europe SA, 1998
- [11] JANČOVIČ J., CVAN M.: Horenie vodíka a riadená oxidácia vodíka v HZ - možnosti a nebezpečia neriadeného horenia vodíka, správa VUJE, 21/2003, 2003
- [12] JANČOVIČ J., REMIŠ J.: Analýza priestorového šírenia vodíka v HZ CFD kódom FLUENT5, správa VUJE 93/2003, 2003
- [13] CVAN M., JANČOVIČ J.: Možnosti riadeného spaľovania a rekombinácie vodíka - vyhodnotenie výsledkov kódom MELCOR, správa VUJE 94/2003, 2003
- [14] JANČOVIČ J. et al.: Analýza havárií s poškodením paliva, rozbor a podmienky havárií, správa VUJE V01-0220TD.3-1.4, 2004
- [15] CVAN M., JANČOVIČ J.: Návrh opatrení a technického doplnenia projektu pre zvládnutie ťažkých havárií, V01-VS/0220/2004.10, 2004
- [16] REMIŠ J. et al.: Model hermetickej zóny pre kód FLUENT, správa VUJE V01-VS/0220/2004.17, 2004

- [17] JANČOVIČ J. et al.: Analýza havárií s poškodením paliva, návrh obmedzenia následkov havárií, správa VUJE V01-VS/0220/2005.8, 2005
- [18] JANČOVIČ J.: Spaľovanie vodíka v hermetických priestoroch, analýza využitia rekombinátorov, správa VUJE V01-VS/0220/2005.18, 2006
- [19] JANČOVIČ J.: Realizácia jednotlivých opatrení zavedenia návodov SAMG (EBO, EMO), Súhrnná správa, správa VUJE V01-VS/0220/2006.14, 2006
- [20] VAN DORSSELAERE J.P.: Minutes of the 1st SARNET2 General Assembly, SARNET2-MANAG-M05 DPAM/DIR-2010-00180, 2010
- [21] KELM S.: Quick-Look Report on the Generic Containment Code-to-Code Comparison – run1, Blind Phase, 2011.
- [22] IAEA, IAEA SAFETY SERIES, No.75- INSAG-7, The Chernobyl Accident: Updating of INSAG-1, 1992
- [23] IRSN, Fukushima, one year later, Initial analyses of the accident and its consequences, Report IRSN/DG/2012-003 of March 12, 2012
- [24] CUMMINGS J.C et al.: NUREG/CR 2776, Light Water Reactor Hydrogen Manual, Sandia National Laboratories, 1983
- [25] TRAVIS J.R. et al. Evaluating detonation possibilities in a Hanford radioactive waste tank, Los Alamos National Laboratory, New Mexico, USA, 1994
- [26] DOROFEEV S.B.: Turbulent combustion and DDT events as an upper bound for hydrogen mitigation techniques, AECL-11762, NEA/CSNI/R(96)8, 1997
- [27] DOROFEEV S.B.: Large scale combustion tests in the RUT facility: Experimental study, numerical simulations and DDT, Transactions of the 14th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Lyon, France, 1997
- [28] BREITUNG W., REDLINGER R.: Containment pressure loads from hydrogen combustion in unmitigated severe accidents, Nuclear Technology, Vol. 111, 1995
- [29] LIPTÁKOVÁ M.: Problémy spojené s přítomností vodíku v kontejnmentových systémech za havarijných podmínek na jaderných elektrárnách, správa VUJE 150/89, 1989
- [30] KUBAČKA J.: Dynamika vodíka v kontajmente jadrových blokov v priebehu ťažkých havárií, diplomová práca FEI, študijný program Elektroenergetika, 2010
- [31] OECD, OECD/NEA THAI Project, Final report, NEA/CSNI/R(2010)3, 2010
- [32] LESCHKE C.: Budget estimate F.005092-B-01-2-000, Appendix 2, Dual function description, AREVA NP, 2010
- [33] EMO, Hydrogen removal system, Detailed design, Summary of data, EUS-976-EMO, NDMO/Da/SRE012/AA/0111.1/1663, 1997.
- [34] BLANCHAT T. K. Testing a Passive Autocatalytic Recombiner in the Surtsey Facility, Nuclear Technology, Volume 129, Number 3, 2000.

- [35] IAEA, IAEA-TECDOC-1196, Mitigation of hydrogen hazards in water cooled power reactors, February 2001
- [36] MARSHALL B. W. Jr., NUREG/CR-3468, Hydrogen:Air:Steam Flammability Limits and Combustion Characteristics in the FITS Vessel, December 1986

ZOZNAM PUBLIKÁCIÍ AUTORA SÚVISIACICH S PROBLEMATIKOU DIZERTAČNEJ PRÁCE

Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

- [1] AMMIRABILE L., ..., JANČOVIČ J. et al.: Application and Validation of ASTEC Code in the Analysis of Fission Product Release and Transport Processes taking Place in the PHEBUS and the STORM Facilities, Nuclear Technology, Vol. 172, 2010
- [2] KELM St., ..., JANČOVIČ J. et al.: Generic Containment: Detailed comparison of containment simulations performed on plant scale, Annals of Nuclear Energy, 2014

Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- [3] JANČOVIČ J.: Analysis of hydrogen distribution in the VVER440/V213 containment – application of the FLUENT code, NUSIM2005, Tabor, Czech republic, 2005
- [4] BARNAK M., MATEJOVIC P., JANCOVIC J. et al.: ASTEC Application to VVER-440/V213 Design Nuclear Power Plants, ERMSAR2005, Aix-en-Provence, 2005
- [5] JANČOVIČ J.: Severe Accident Analyses of VVER440 with Recent Integral Codes, IYNC2006, Stockholm, Sweden, 2006
- [6] AMMIRABILE L., ..., JANČOVIČ J., “Progress of ASTEC validation on fission product release and transport in circuits and containment”, Conference ERMSAR-2008, paper S4-6, Nesseber, Bulgaria, 2008
- [7] VAN DORSSELAERE J.P., ..., JANCOVIC J., RATEL G.: ASTEC extension to other reactor types than Generation II PWR, ERMSAR 2008, Nesseber, Bulgaria, 2008
- [8] JANČOVIČ J.: VVER-440: Design Upgrade in Severe Accident Area, NUSIM2009, Schoeneck, Germany, 2009
- [9] BALAZ J., JANČOVIČ J. et al: Assessment of the design of injection and depressurization system dedicated for severe accidents for VVER440, 17th QUENCH workshop, Karlsruhe, Germany, 2011, ISBN 978-3-923704-77-4, 2011
- [10] KELM St., ... , JANCOVIC J. et al: GENERIC CONTAINMENT, A first step towards bringing (European) containment simulations to a common level, 5th European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2012), Cologne, Germany, 2012
- [11] BALAZ J., JANČOVIČ J. et al: Assessment of the VVER440 core quenching with respect to plant design, 18th QUENCH workshop, Karlsruhe, Germany, 2012

- [12] BALAZ J., JANČOVIČ J., JURIŠ J.: Assessment of the VVER440 core quenching using enhanced Mochovce 12 design, 19th QUENCH Workshop, Karlsruhe, Germany, 2013
- [13] KUBAČKA J., SLUGENŤ V., JANČOVIČ J. et al.: Dynamics of Hydrogen in the Containment of a Nuclear Unit during Severe Accidents, Jadrenata energija za chorata, Nesseber, Bulgaria, 2010

Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- [14] JANČOVIČ J.: Analýza prechodových režimov parogenerátora JE, Odborná konferencia SNUS, 2001
- [15] JANČOVIČ J.: Kódy používané pre analýzy ťažkých havárií na Slovensku, Odborná konferencia Mladej generácie SNUS, 2002
- [16] JANČOVIČ J.: Neurčitosti v kontexte realizácie opatrení pre zmiernenie následkov ťažkých havárií, NUSIM2013, 2013
- [17] JANČOVIČ J.: Deterministic Safety Analysis, Introduction to Severe Accidents, European Nuclear Safety Training and Tutoring Institute, Trnava, 2013

Prezentácie na zahraničných odborných stretnutiach

- [18] JANČOVIČ J.: Experience in Severe Accidents Analysis – Analytical Support to the SAMG Development Project, International Workshop on Analysis of Severe Accidents, Zagreb, Croatia, 2003
- [19] JANČOVIČ J.: Analytical Support to the SAMG Development Project, Regional Workshop on Development and Implementation of Severe Accident Management Programme for NPPs, Sosnovyy Bor, Russia, 2006
- [20] JANČOVIČ J., JURIŠ P.: Run2 modelling approach using MELCOR 2.1, SARNET2 Meeting, Kaunas, Lithuania, 2013
- [21] JANČOVIČ J., JURIŠ P.: Generic containment simulation using MELCOR 2.1, 5th EMUG Meeting, Stockholm, Sweden, 2013

Riešenie projektov výskumu, vývoja a technického rozvoja – výskumné správy

- [22] JANČOVIČ J., CVAN M.: Horenie vodíka a riadená oxidácia vodíka v HZ - možnosti a nebezpečia neriadeného horenia vodíka, správa VUJE, 21/2003, 2003
- [23] JANČOVIČ J., REMIŠ J.: Analýza priestorového šírenia vodíka v HZ CFD kódom FLUENT5, správa VUJE 93/2003, 2003
- [24] CVAN M., JANČOVIČ J.: Možnosti riadeného spaľovania a rekombinácie vodíka - vyhodnotenie výsledkov kódom MELCOR, správa VUJE 94/2003, 2003
- [25] JANČOVIČ J. et al.: Analýza havárií s poškodením paliva, rozbor a podmienky havárií, správa VUJE V01-0220TD.3-1.4, 2004
- [26] CVAN M., JANČOVIČ J.: Návrh opatrení a technického doplnenia projektu pre zvládnutie ťažkých havárií, V01-VS/0220/2004.10, 2004

- [27] JANČOVIČ J. et al.: Zdroje vodíka v priebehu etapy ťažkých havárií pred porušením TNR, stanovenie neurčitostí výsledkov pre aplikáciu výsledkov pre SAMG, správa VÚJE 44/2003, 2003
- [28] JANČOVIČ J. et al.: Analýza havárií s poškodením paliva, návrh obmedzenia následkov havárií, správa VUJE V01-VS/0220/2005.8, 2005
- [29] JANČOVIČ J.: Spaľovanie vodíka v hermetických priestoroch, analýza využitia rekombinátorov, správa VUJE V01-VS/0220/2005.18, 2006
- [30] JANČOVIČ J.: Realizácia jednotlivých opatrení zavedenia návodov SAMG (EBO, EMO), Súhrnná správa, správa VUJE V01-VS/0220/2006.14, 2006
- [31] JANČOVIČ J. et al.: Zdroje vodíka v priebehu etapy ťažkých havárií pred porušením TNR, vplyv zásahov operátora, správa VÚJE 20/2003, 2003
- [32] JANČOVIČ J. et al.: Zdroje vodíka a nekondenzujúcich plynov v HZ po porušení TNR, analýzy kódom MELCOR, správa VÚJE 47/2003, 2003
- [33] JANČOVIČ J., CVAN M.: Horenie vodíka a riadená oxidácia vodíka v HZ, komplexné zhodnotenie zaťaženia HZ v dôsledku horenia vodíka, správa VÚJE 95/2003, 2003
- [34] JANČOVIČ J.: Výpočtové preukázanie účinností stratégií SAMG, správa VÚJE 132/2003, 2004
- [35] JANČOVIČ J. et al.: Zdôvodnenie projektu v časti pohavarijnej rekombinácie a zapaľovania vodíka, správa VUJE, PNM34368446, 2013
- [36] JANČOVIČ J.: Kvantifikácia zdrojových členov pre PSA L2 EBO V2 pre palivo Gd-2 so stredným obohatením 4,87% s uvažovaním opatrení pre zmiernenie následkov ťažkých havárií a predpisov SAMG, správa VUJE V01-TS/2002913/0220/2013.44, 2015

8 SUMMARY

Dynamics of hydrogen in the containment of nuclear units during severe accidents

The dissertation thesis is dedicated to problems of severe accidents at VVER440/V213 units with focus given to problems of hydrogen distribution and combustion in containment of nuclear units during severe accidents. In the solved problems, special attention is given to specifics of the VVER440/V213 containment. Methodology of the assessment of hydrogen risk in the containment is one of the main results of the thesis. The methodology contains utilisation of international cooperation for verification of an approach to preparation of a containment model for lumped parameter codes. The methodology also contains application of computational fluid dynamics codes for analysis of relevant phenomena of hydrogen distribution with consequent application of results for the preparation of nodalisation of containment models and justification of use of the models by lumped parameter codes. Measures for mitigation of hydrogen combustion risk are evaluated within the methodology and an optimal solution is proposed. The proposed solution is transformed into a technical design of a hydrogen mitigation system for VVER440/V213 containment. The solution uses generally available equipment. Recombination and ignition models for simulation and modelling of passive autocatalytic recombiners are developed for use in safety analyses. The results of the thesis are assessed from the point of view of application of the methodology to recent analyses and application in the near future. Aims for further evaluation of the analysed problems are proposed.