

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

DISERTAČNÍ PRÁCE

Modelování chování štěpných produktů uvnitř kontejnmentu tlakovodních
reaktorů při haváriích s únikem chladiva

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou disertační práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, dokumentace atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....

Adam Kecek

Poděkování

Děkuji Ing. Jiřímu Mackovi, CSc. a Ing. Lubomíru Denkovi za vedení mé disertační práce a za podnětné připomínky a návrhy, které ji obohatily. Dále děkuji Ing. Ianě Zamakhaevě za podnětnou vědeckou spolupráci.

Ing. et Ing. Adam Kecek

Bibliografický záznam

Autor	Ing. et Ing. Adam Kecek
Název práce	Modelování chování štěpných produktů uvnitř kontejnmentu tlakovodních reaktorů při haváriích s únikem chladiva
Studijní program	Aplikace přírodních věd
Studijní obor	Jaderné inženýrství
Školitel	Ing Jiří Macek, CSc. ÚJV Řež, a. s. Hlavní 130 250 68 Husinec-Řež
Školitel specialista	Ing. Ondřej Huml, Ph.D. FJFI ČVUT V Holešovičkách 2 180 00 Praha 8
Konzultant	Ing. Lubomír Denk ÚJV Řež, a. s. Hlavní 130 250 68 Husinec-Řež
Akademický rok	2021/2022
Počet stran	120
Klíčová slova	kontejnment, LB LOCA, zdrojový člen, COCOSYS, VVER-1000/V-320

Bibliographic Entry

Author	Ing. et Ing. Adam Kecek
Title of Dissertation	Modelling of fission product transport inside pressurized water reactor containments during loss-of-coolant accidents
Degree Programme	Applications of Nuclear Science
Field of Study	Nuclear Engineering
Supervisor	Ing Jiří Macek, CSc. ÚJV Řež, a. s. Hlavní 130 250 68 Husinec-Řež
	Ing. Ondřej Huml, Ph.D. FNSPE CTU V Holešovičkách 2 180 00 Praha 8
	Ing. Lubomír Denk ÚJV Řež, a. s. Hlavní 130 250 68 Husinec-Řež
Academic Year	2021/2022
Number of Pages	120
Keywords	containment, LB LOCA, source term, COCOSYS, VVER-1000/V-320

Abstrakt

Předkládaná práce se zabývá modelováním šíření štěpných produktů uvnitř kontejnmentu tlakovodních reaktorů při haváriích s únikem chladiva s cílem určit zdrojový člen. V rámci práce jsou podrobně popsána legislativní východiska a požadavky na určení zdrojového členu a výchozí stav problematiky v rámci České republiky. Na základě zmíněné rešerše je provedena samotná práce, která se zabývá několika na sebe navazujícími tématy. V první řadě jde o metodiku určení zdrojového členu. Na tu navazuje validace výpočetního kódu COCOSYS. Poznatky z validace jsou následně aplikovány při úpravě a rozšíření stávajícího modelu kontejnmentu VVER-1000/V-320 pro potřeby výpočtu šíření štěpných produktů. S modifikovaným modelem byla provedena citlivostní studie počátečních a okrajových podmínek s cílem určit takové, které přinášejí konzervativní výsledky. Posledním krokem je určení samotného kontejnmentového zdrojového členu a taktéž porovnání s existujícím referenčním výpočtem ŠKODA JS.

Abstract

The report deals with modelling of fission product transport inside pressurized water reactor containments during loss-of-coolant accidents with aim to estimate the source term. In the frame of this work, an extensive description of legislative foundation and requirements on estimation on the source term and an initial state of the problematics in the Czech Republic is described. Based on the research, the work itself dealing with several follow-up themes is conducted. Firstly, it is the methodology on source term estimation. This is followed by the COCOSYS code validation. The findings from validation are then applied in modification and extension of the existing VVER-1000/V-320 containment model for the need of fission products transport calculation. With modified model, a sensitivity study towards conservative initial and boundary conditions was conducted. The final step is the determination of the containment source term and a comparison with ŠKODA JS calculation as reference.

Obsah

Seznam obrázků	10
Seznam tabulek.....	13
Seznam zkratk	15
1 Úvod	17
1.1 Výchozí stav problematiky v ČR	18
1.2 Zdrojový člen.....	19
1.2.1 Obecné předpoklady určení zdrojového členu	20
1.2.2 Legislativní požadavky na určení zdrojového členu	21
2 Cíle práce a metody zpracování.....	25
3 Metodika určení zdrojového členu v České republice.....	26
3.1 Určení inventáře radionuklidů	26
3.2 Uvolněná frakce inventáře a skupiny radionuklidů.....	27
3.3 Chemické formy, chování radionuklidů.....	28
3.4 Časování a cesty úniku	29
3.5 Specifikace předpokladů pro konzervativní výpočet zdrojového členu pro LOCA havárie kategorie IV (DBC4)	30
4 Výpočetní kódy a validace	32
4.1 Výpočetní program COCOSYS 2.4v5.....	32
4.1.1 Termohydraulický modul THY	33
4.1.2 Modul aerosolových štěpných produktů AFP.....	34
4.2 Validace v domovské organizaci (GRS).....	36
4.3 Validace v ÚJV	37
4.3.1 Adsorpce jódu	38
4.3.2 Chemie jódu v jímce a fázový transport	59
4.3.3 Transport štěpných produktů a termohydraulika kontejnmentu	71
5 Určení zdrojového členu pro událost LB LOCA na VVER-1000/V-320	88
5.1 Model kontejnmentu VVER-1000/V-320	88
5.2 Počáteční a okrajové podmínky výpočtů	94
5.2.1 Definice iniciační události	94

5.2.2	Primární a sekundární okruh	94
5.2.3	Vnitřní kontejmentový zdrojový člen	95
5.2.4	Citlivostní studie počátečních a okrajových podmínek výpočtu kontejmentu	96
5.3	Výpočet a vyhodnocení.....	97
5.3.1	Únik štěpných produktů.....	98
5.4	Porovnání s referenčním výpočtem ŠKODA JS	103
5.4.1	Porovnání předpokladů a výpočetních postupů	103
5.4.2	Výsledky a porovnání	104
5.4.3	Shrnutí dosažených výsledků	108
6	Závěr	109
	Seznam literatury a publikací	111
	Příloha 1	119
	Příloha 2	120

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma výpočetních kódů využitých při výpočtu zdrojového členu a radiačních následků	18
Obr. 2 Schéma struktury kontejnmentového programu COCOSYS.....	35
Obr. 3 Vzorky standardní velikosti z oceli 316Ti (vlevo čerstvý, vpravo exponovaný jódem)	41
Obr. 4 Nádoba pro studium adsorpce ve vodní fázi [40].....	42
Obr. 5 Nodalizace experimentu IA ve vodním prostředí	43
Obr. 6 Adsorpce jódu ve vodním prostředí, test A-3.....	47
Obr. 7 Adsorpce jódu ve vodním prostředí, test A-4.....	47
Obr. 8 Adsorpce jódu ve vodním prostředí, test AECL-11	48
Obr. 9 Adsorpce jódu ve vodním prostředí, test AECL-12	48
Obr. 10 Schéma zařízení RAA (Radioiodine Adsorption Apparatus), upraveno z [40].....	49
Obr. 11 Schéma nodalizace experimentu IA v plynném prostředí.....	50
Obr. 12 Adsorpce jódu v plynném prostředí, test G-01	54
Obr. 13 Adsorpce jódu v plynném prostředí, test G-03	54
Obr. 14 Adsorpce jódu v plynném prostředí, test G-04	55
Obr. 15 Adsorpce jódu v plynném prostředí, test G-14	55
Obr. 16 Adsorpce jódu v plynném prostředí, test G-16	56
Obr. 17: Modelování chování jódu za podmínek bez kondenzace [26]	56
Obr. 18: Adsorpce jódu v plynném prostředí, test G-20, porovnání nastavení výpočetních modelů	58
Obr. 19 Schéma chování jódu uvnitř objemu v závislosti na podmínkách [46]	59
Obr. 20 Schéma zařízení RTF (upraveno z [53]).....	61
Obr. 21 Nodalizace zařízení RTF (nahore termohydraulická nodalizace, dole nodalizace pro transport jódu).....	62
Obr. 22 P9T1 - pH jímky, 0 - 500 h, kompartment IVESSEL	65
Obr. 23 P9T1 - celková koncentrace jódu, pH, atmosféra, 0 - 500 h, kompartment IVESSEL	66

Obr. 24 P9T1 - koncentrace I_2 , pH, atmosféra, 0 - 500 h, kompartment IVESSEL	66
Obr. 25 P9T1 – celková koncentrace jódu, pH, jímka, 0 - 500 h, kompartment IVESSEL.....	67
Obr. 26 P9T1 - koncentrace I_2 , jímka, 0 - 500 h, kompartment IVESSEL	68
Obr. 27 P9T1 - koncentrace I^- , jímka, 0 - 500 h, kompartment IVESSEL.....	68
Obr. 28 P9T1 - koncentrace IO_3^- , jímka, 0 - 500 h, kompartment IVESSEL.....	69
Obr. 29 P9T1 - koncentrace organických jódových sloučenin, jímka, 0 - 500 h, kompartment IVESSEL	69
Obr. 30 Schéma zařízení PHEBUS FPT (upraveno z [59])	71
Obr. 31 Vertikální řez kontejnmentem (vlevo) a kondenzátorem (vpravo) (upraveno z [59])	73
Obr. 32 Nodalizace kontejnmentu PHEBUS FP - vertikální řez (převzato a doplněno z [59]).....	75
Obr. 33 Nodalizace kontejnmentu PHEBUS FP - horizontální řez v úrovni kondenzátoru (převzato a doplněno z [59]).....	75
Obr. 34 Nodalizace kontejnmentu PHEBUS - vizualizace speciální nodalizace pro výpočty šíření jódu – vertikální řez (upraveno z [59])	76
Obr. 35 PHEBUS FPT 1 - Průběh tlaku, degradační fáze	79
Obr. 36 PHEBUS FPT 1 - Průběh relativní vzdušné vlhkosti, různé úrovně, degradační fáze.....	80
Obr. 37 PHEBUS FPT 1 - Průběh teploty v úrovni vstupní trubky, zóny Zx09, degradační fáze.....	80
Obr. 38 PHEBUS FPT 1 - Průběh teploty na úrovni – 2 180 mm, zóny Zx16, degradační fáze.....	81
Obr. 39 PHEBUS FPT 1 - Průběh teploty na úrovni – 1 500 mm, zóny Zx25, degradační fáze.....	81
Obr. 40 PHEBUS FPT 1 - Průběh teploty na úrovni – 1840 mm, zóny Zx25, degradační fáze.....	82
Obr. 41 PHEBUS FPT 1 - Průběh teploty na úrovni – 480 mm, zóny Zx33, degradační fáze.....	82

Obr. 42 PHEBUS FPT 1 - Průběh teploty na úrovni – 140 mm, zóny Zx42, degradační fáze.....	83
Obr. 43 PHEBUS FPT 1 - Průběh tlaku, aerosolová fáze	83
Obr. 44 PHEBUS FPT 1 - Průběh relativní vzdušné vlhkosti, různé úrovně, aerosolová fáze.....	84
Obr. 45 PHEBUS FPT 1 - Průběh hmotnosti jódu v atmosféře experimentu – aerosolová fáze.....	85
Obr. 46 PHEBUS FPT 1 - Průběh hmotnosti cesia v atmosféře experimentu – aerosolová fáze.....	86
Obr. 47 PHEBUS FPT 1 - Průběh hmotnosti telluru v atmosféře experimentu – aerosolová fáze.....	86
Obr. 48 Nodalizace ochranné obálky ETE_CNT_ma01.07 [69].....	90
Obr. 49 Schéma kompartmentizace pro šíření jódu.....	92
Obr. 50 Úniky vybraných štěpných produktů přes systém TL 22, 0 – 30 s.....	99
Obr. 51 Úniky vybraných štěpných produktů přes systém TL 42, 0 – 30 s.....	99
Obr. 52 Formy jódu v úniku skrze systém TL22 do životního prostředí, 0 – 30 s	100
Obr. 53 Formy jódu v úniku skrze systém TL42 do životního prostředí, 0 – 30 s	100
Obr. 54 Únik kryptonu skrze netěsnosti do životního prostředí, celý výpočet	101
Obr. 55 Únik cesia skrze netěsnosti do životního prostředí, celý výpočet	101
Obr. 56 Únik jódu skrze netěsnosti do životního prostředí, celý výpočet.....	102
Obr. 57 Formy jódu v úniku skrze netěsnosti do životního prostředí, celý výpočet	102
Obr. 58 Únik jódu (porovnání výpočtu kódem COCOSYS se ŠKODA JS)	105
Obr. 59 Únik cesia (porovnání výpočtu kódem COCOSYS se ŠKODA JS)	106
Obr. 60 Únik kryptonu (porovnání výpočtu kódem COCOSYS se ŠKODA JS)..	107

Seznam tabulek

Tab. 1 Uniklé frakce štěpných produktů během LOCA pro reaktory s PWR [18]	27
Tab. 2 Prvky uvažované v jednotlivých skupinách [18]	28
Tab. 3 Poměry zastoupení chemických forem jódu	28
Tab. 4 Přehled experimentů přepočtených v rámci validace COCOSYS [25]....	36
Tab. 5 Přehled experimentů přepočtených v rámci validace COCOSYS organizací ÚJV	37
Tab. 6 Přehled vzorků a jejich povrchové úpravy	41
Tab. 7 Přehled termohydraulických počátečních a okrajových podmínek (běžné podmínky testu) [39]	43
Tab. 8 Přehled experimentů provedených ve vodním prostředí [41], [42].....	44
Tab. 9 Přehled experimentů provedených v plynné fázi [40].....	51
Tab. 10: Porovnání výchozích [26] a modifikovaných [44] hodnot parametrů BAS ₁ a XPHS	59
Tab. 11 Počáteční a okrajové podmínky Phase 9 Test 1 [56]	63
Tab. 12 Suché povrchy Phase 9 Test 1 [56]	63
Tab. 13 Smáčené povrchy Phase 9 Test 1 [56]	64
Tab. 14 Scénář Phase 9 Test 1 [56]	64
Tab. 15 Scénář testu FPT 1 [59]	77
Tab. 16 Počáteční TH podmínky výpočtu testu FPT 1 [59]	77
Tab. 17 Přehled geometrických faktorů zón.....	91
Tab. 18 Přehled modelovaných kompartmentů.....	93
Tab. 19 Přehled frakcí uniklých štěpných produktů z paliva	96
Tab. 20 Výsledky citlivostní studie konzervativních počátečních a okrajových podmínek.....	97
Tab. 21 Únik jódu ve vybraných časových krocích, porovnání výpočtu kódem COCOSYS se ŠKODA JS	106
Tab. 22 Únik cesia ve vybraných časových krocích, porovnání výpočtu kódem COCOSYS se ŠKODA JS	107

Tab. 23 Únik kryptonu ve vybraných časových krocích, porovnání výpočtu kódem COCOSYS se ŠKODA JS	108
---	-----

Seznam zkratek

AFP	Aerosol Fission Product Module
AIM	Advanced Iodine Module
AtZ	Atomový zákon
AZ	Aktivní zóna
BIP	Behaviour of Iodine Project
CCI	Core Concrete Interaction Module
DBC	Design Basis Conditions
DBE	Design Basis Event
DEC	Design Extension Conditions
ETE	Elektrárna Temelín
FPT	Fission Product Transport
GRS	Gesellschaft für Reaktorsicherheit gGmbH
IAEA	International Atomic Energy Agency
I.O	Primární okruh
II.O	Sekundární okruh
ISP	International Standard Problem
KP	Kritérium přijatelnosti
LB LOCA	Large break loss-of-coolant accident
OECD NEA	Organization for Economic Co-operation and Development Nuclear Energy Agency
PrBZ	Provozní bezpečnostní zpráva
RAA	Radioiodine Adsorption Apparatus
RTF	Radioiodine Test Facility
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
ŠJS	ŠKODA JS
ŠP	Štěpné produkty

TAČR	Technologická agentura České republiky
THY	Thermal Hydraulic Module
US NRC	United States Nuclear Regulatory Commission
VVER	Vodo-vodní energetický reaktor
WENRA	Western European Nuclear Regulators Association

1 Úvod

Mírové využití jaderné energie započalo již desítky let nazpět. Ať už se jednalo o první člověkem řízený jaderný reaktor pod taktovkou Enrica Fermiho nebo o první jadernou elektrárnu v Obninsku, bylo cílem zajistit bezpečný zdroj energie. S provozem jaderného reaktoru je však spjata existence štěpných produktů a ionizujícího záření, které může mít nepříznivý vliv na životní prostředí. V historii se bohužel již několikrát prokázalo, že v případě jaderné havárie, mohou být následky devastující, nejen z pohledu životního prostředí, ale i z pohledu ekonomického.

Pro snížení možných nepříznivých následků vycházejí jaderné elektrárny z principu ochrany do hloubky, kdy je využito spektra bariér, které mohou případné dopady minimalizovat. V posledních letech je navíc patrný silný tlak na co možná nejvyšší schopnost pasivní bezpečnosti.

Pokud nahlédneme do národní legislativy, alfou a omegou je definice jaderné bezpečnosti [1].

Stav a schopnost jaderného zařízení a osob obsluhujících jaderné zařízení zabránit nekontrolovatelnému rozvoji štěpné reakce nebo nedovolenému úniku radioaktivních látek nebo ionizujícího záření do životního prostředí a omezovat následky nehod.

Uvedená definice přináší poměrně jasné požadavky na zařízení, zároveň však vyvolává otázky, jak těchto požadavků dosáhnout. Jsme schopni ověřit, zda dané zařízení a obsluha skutečně dokáže zabránit nekontrolovatelnému rozvoji štěpné reakce a případnému úniku radioaktivity? Jakým způsobem lze zmíněné ověřit?

Jednou z možností je zajisté experimentální ověření, nicméně zde je potřeba mít na paměti, že takový experiment by pro zařízení a okolí mohl mít fatální následky. Existuje tedy jiná možnost? Zajisté, tou možností jsou bezpečnostní analýzy. Národní legislativa je definuje následovně [2]:

Bezpečnostní analýzy, prováděné zpravidla pomocí výpočetních programů, prokazují bezpečnost provozu jaderného zařízení, plnění základních bezpečnostních funkcí, zachování funkčnosti fyzických bariér a dalších opatření na jednotlivých úrovních ochrany do hloubky pro široké spektrum výchozích stavů a režimů jaderného zařízení, odezvy jaderného zařízení na postulované iniciační události s průkazem splnění požadovaných bezpečnostních cílů a kritérií přijatelnosti.

Samotné bezpečnostní analýzy pokrývají široké spektrum oblastí, kupříkladu neutronické analýzy aktivní zóny, termomechanické analýzy paliva, termohydraulické chování primárního a sekundárního okruhu, analýzy transportu štěpných produktů

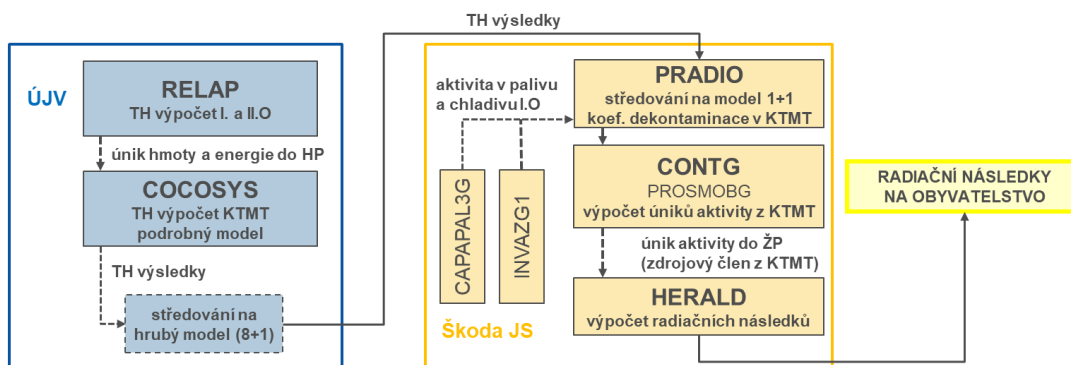
v kontejnmentu a v neposlední řadě analýzy radiačních následků, kterými celý řetězec bezpečnostních analýz končí.

Poměrně široce orientovaný úvod je však pro potřeby této práce významně zredukovat a zpřesnit. Cílem této práce je určit zdrojový člen, tj. počáteční podmínku právě pro zmíněný poslední krok v řetězci bezpečnostních analýz, určení radiačních následků. Určení zdrojového členu je prováděno s ohledem na zkoumanou událost. V rámci této práce bude podrobně prozkoumán postup určení zdrojového členu pro událost LB LOCA na elektrárně VVER-1000/V-320.

1.1 Výchozí stav problematiky v ČR

V době, kdy začala vznikat tato práce, nebyla v rámci České republiky jednotná metodika určování radiačních následků událostí ani určování zdrojového členu. Mezi další nedostatky lze označit i to, že pro výpočty radiačních událostí LB LOCA byly využívány proprietární kódy vycházející z velkého množství zjednodušení a, v porovnání se zahraniční praxí, omezenou validací na experimentech. Dalším problémem je jistá monopolizace, díky čemuž neexistovala konkurenční síla, která by mohla zapříčinit vývoj celého procesu.

Původní výpočty prováděné v ŠJS byly založeny na termohydraulických výpočtech provedených v ÚJV. Ty sestávaly z výpočtu I.O a II.O v programu RELAP, na něž navazovaly výpočty kontejnmentu. Získané termohydraulické výsledky podrobného modelu kontejnmentu používaného v ÚJV byly středovány na hrubý model čítající 8 zón uvnitř kontejnmentu a 1 zónu reprezentující okolí. Takto připravená data byla předána do ŠJS, kde došlo k dalšímu středování v kódu PRADIO na model uvažující 1 zónu reprezentující kontejnment a 1 zónu reprezentující okolí. Kódy CAPAPAL3G a INVAZG1 určily aktivitu v palivu a chladiivu I.O. Na napočtené koeficienty dekontaminace navazoval kód CONTG, který vypočetl úniky aktivit do životního prostředí, což sloužilo jako počáteční podmínka pro finální výpočet radiačních následků.



Obr. 1 Schéma výpočetních kódů využitých při výpočtu zdrojového členu a radiačních následků

Významný průlom v problematice v rámci naší země přinesl požadavek na nezávislé ověření deterministických bezpečnostních analýz [2]:

Deterministické bezpečnostní analýzy DBE použité v PrBZ podléhají programu systému řízení dle vyhlášky [3] a musí být v souladu s § 8 této vyhlášky v přiměřeném rozsahu nezávisle ověřeny. Doporučený rozsah je následující:

(1) Deterministické bezpečnostní analýzy DBE přímo prokazující v PrBZ plnění kritérií přijatelnosti pro radiační důsledky DBE (od výpočtu úniku z ochranné obálky / zdrojového členu) by měly být nezávisle ověřeny výpočtem. Pro toto nezávislé ověření je použit model vytvořený nezávisle na modelu použitém pro provedení analýz, předkládaných v PrBZ. Nezávislé ověření výpočtem je provedeno pracovníkem nebo skupinou pracovníků, kteří se nepodíleli na tvorbě modelu a výpočtech, použitých pro analýzy předkládané v PrBZ.

(2) Deterministické bezpečnostní analýzy obálkových událostí nebo událostí s nejméně příznivými výsledky v každé skupině DBE, předkládané v PrBZ, by měly být nezávisle ověřeny výpočtem pomocí modelu odlišného od modelu použitého pro provedení analýz předkládaných v PrBZ výpočtem, provedeným pracovníkem nebo skupinou pracovníků, která se nepodílela na tvorbě modelu, použitého pro provedení analýz předkládaných v PrBZ.

(3) Všechny ostatní deterministické bezpečnostní analýzy DBE by měly být ověřeny minimálně nezávislým inženýrským posouzením výpočtu a jeho výsledků pracovníkem nebo skupinou pracovníků, která se nepodílela na provedení analýz, předkládaných v PrBZ.

Citovaný požadavek jasně určuje **nutnost nezávislého ověření** a rozšiřuje tak prostor pro analýzy v režii dalších subjektů a vytvoření lepšího, konkurenčního prostředí.

1.2 Zdrojový člen

Zdrojovým členem lze rozumět hned několik pojmů, které je potřeba, pro další pochopení korektně rozdělit. V nejobecnějším náhledu jej lze definovat jako soubor štěpných produktů, které unikají v definovaném časovém horizontu do určeného objemu. Obvykle se jedná o únik z některého prostoru či systému jaderné elektrárny do životního prostředí. V případě havárií s velkým únikem primárního chladiva (LB LOCA), které jsou předmětem studia této práce, lze rozlišovat dva typy:

- Vnitřní kontejnmentový zdrojový člen (in-containment source term), který definuje množství uniklých radioaktivních štěpných produktů z primárního, popř. sekundárního okruhu do kontejnmentu,

- Vnější kontejnmentový zdrojový člen (často jen zdrojový člen, ex-containment source term), který definuje množství uniklých radioaktivních štěpných produktů z kontejnmentu do životního prostředí.

Přístupy k určení výše zmíněných zdrojových členů mohou vycházet z různých předpokladů a postupů, přičemž mohou být využity jak výpočetní postupy, definitorické či metody kombinované.

1.2.1 Obecné předpoklady určení zdrojového členu

Vzhledem k zaměření práce je vhodné ve zkratce připomenout chování primárního okruhu a kontejnmentu jaderné elektrárny během LB LOCA. Iniciační událostí je gilotinové roztržení studené větve primárního okruhu blízko vstupu do reaktoru. Následně dochází k prudkému odtlakování primárního okruhu, což má za následek odhalení AZ a tím ke snížení odvodu tepla z aktivní zóny (a možnému následnému porušení paliva, úniku štěpných produktů). Parovodní směs uniklá z primárního okruhu expanduje do volného objemu kontejnmentu a zvyšuje tlak a teplotu. Přetlak uvnitř kontejnmentu vede k úniku parovzdušné směsi z kontejnmentu do životního prostředí. Úniky jsou možné dvěma cestami. První reprezentuje ventilační systémy, které v případě správného zareagování bezpečnostního signálu ESFAS signálu od přetlaku v kontejnmentu jsou uzavřeny do 15 s od iniciační události. Druhou cestou jsou úniky skrze netěsnosti kontejnmentu. Ty jsou definovány projektem a prezentují únik parovzdušné směsi během celé havárie. Vlivem snížené schopnosti chlazení aktivní zóny dochází k poškození pokrytí palivových proutků, a úniku štěpných produktů do chladiwa atd. Během celé události zasahují do průběhu systému chlazení aktivní zóny a taktéž sprchové systémy kontejnmentu.

Štěpné produkty jsou základním kamenem definice zdrojového členu. Jejich původ lze v případě LOCA havárií rozdělit do dvou skupin. První tvoří štěpné produkty, nacházející se v palivových proutcích, a to jak v palivové matici, tak i v mezeře palivo-pokrytí. Druhou skupinu tvoří štěpné produkty nacházející se v chladiwu, jejichž původ je z aktivace korozních produktů či štěpných produktů z netěsných palivových proutků. Únik obou skupin je determinován termohydraulickým chováním primárního okruhu.

V případě štěpných produktů přítomných v chladiwu dochází k jejich distribuci s unikajícím chladiwem do kontejnmentu, přičemž je potřeba brát v úvahu i možnost odparu, tj. kdy část štěpných produktů unikajících ve vodě mohou přestoupit do atmosféry.

Únik štěpných produktů z palivových proutků je ovlivněn jejich schopností udržet hermetičnost za termohydraulických podmínek analyzované události. V případě jejich poškození může docházet k jejich úniku do chladiwa, částečné retenci v primárním

okruhu a následně úniku do objemu kontejnmentu, přičemž jako v předchozím případě, je potřeba uvažovat možnost přestupu štěpných produktů z vody do atmosféry.

Kromě termohydraulických podmínek a uvedených dějů, je třeba zohlednit i chemickou stránku zdrojového členu. Štěpné produkty lze obecně rozdělit do tří základních tříd,

- první z nich jsou vzácné plyny,
- druhou aerosoly
- a třetí, z hlediska radiačních následků nejvýznamnější, jód a jeho sloučeniny.

Pokud vezmeme v úvahu vše dosud jmenované, vznikne několik základních témat, která je v případě definice zdrojového členu řešit:

- Množství uniklých štěpných produktů,
- Časový horizont úniku,
- Cílové médium a
- Chemické složení.

Vzhledem ke dvěma hlavním uvažovaným původcům štěpných produktů, se určení vnitřního zdrojového členu rozděluje dále na dvě oblasti, a to na určení zdrojového členu z paliva a určení zdrojového členu z chladiva.

1.2.2 Legislativní požadavky na určení zdrojového členu

Určení vnitřního kontejnmentového zdrojového členu a následné určení zdrojového členu nelze oddělit od účelu, za jakým se provádí, tedy pro výpočet radiačních následků nehod na obyvatelstvo. Platí pro něj legislativní požadavky kladené na výpočet radiačních následků, tedy na bezpečnostní analýzy. Tyto požadavky se liší podle kategorie iniciační události.

V ČR je pro hodnocení radiačních následků klíčový Atomový zákon č. 263/2016 Sb. [1] (AtZ), na který navazují Vyhláška č. 422/2016 Sb [4], Vyhláška č. 359/2016 Sb. [5], Vyhláška č. 329/2017 Sb. [6] a také Vyhláška č. 162/2017 [7].

Při hodnocení radiačních následků projektových událostí analyzovaných v bezpečnostní zprávě se vždy vychází z kontroly kritéria přijatelnosti (KP) pro radiační následky postulovaných iniciačních událostí. Toto KP slouží ke kvantitativnímu ohodnocení radiačních důsledků s uvážením odstupňovaného přístupu.

KP9 pro ETE [16]: Napočtené dávky musí být pod limity pro abnormální provoz nebo havarijní podmínky s uvažováním událostí generovaného zvýšení koncentrace jódu (jódomá špička) a rovnovážné koncentrace jódu při pokračujícím provozu na plném výkonu, a s uvažováním skutečné aktivity v chladivu primárního a sekundárního okruhu.

Iničiační události jsou přitom rozděleny do 6 kategorií podle ANSI [10]. Rozdělení vychází z očekávané pravděpodobnosti vzniku jednotlivých událostí a potenciálních radiačních důsledků pro obyvatelstvo. Uvažovanými kategoriemi jsou:

- DBC1, kategorie I: Normální provoz
- DBC2, kategorie II: Abnormální provoz
- DBC3, kategorie III: Základní projektové nehody – události s řídkou četností výskytu (projektové nehody)
- DBC4, kategorie IV: Základní projektové nehody – limitující nehody
- DEC A, kategorie V: Rozšířené projektové podmínky typu A (bez tavení AZ)
- DEC B, kategorie VI: Rozšířené projektové podmínky typu B (těžké havárie)

Výpočet zdrojového členu je součástí bezpečnostních analýz jaderné elektrárny. Bezpečnostní analýzy včetně výpočtů zdrojového členu a následných radiačních následků se přitom provádějí pro události kategorie vyšší než I (DBC1), jelikož tato kategorie představuje normální provozní stav jaderné elektrárny. Analyzované události však vychází obecně ze souboru počátečních podmínek, odpovídajícímu nepříznivému vývoji a stavům, které mohou nastat v průběhu událostí Kategorie I [16]

Pro bezpečnostní analýzy obecně je v legislativě rozlišován konzervativní a realistický přístup, který je použit podle kategorie řešené nehody.

Národní vyhláška č. 329/2017 [6] přitom rozlišuje dva přístupy

- **konzervativní přístup** v § 3 odst. a) se konzervativním přístupem rozumí „způsob posuzování vlivu neurčitostí znalostí, vstupních dat, použitých metod a modelů odborným odhadem nebo statistickým vyhodnocením výsledku tak, že výsledek hodnocení posuzované položky zahrnuje též jeho nejméně příznivé věrohodné varianty“;
- **realistický přístup** v § 3 odst. b) se realistickým přístupem rozumí „způsob posuzování vlivu neurčitostí znalostí, vstupních dat, použitých metod a modelů odborným odhadem nebo statistickým vyhodnocením výsledku hodnocení posuzované položky, při němž výsledek představuje jeho nejpravděpodobnější variantu“.

Vyhláška č. 329/2017 [6] dále uvádí:

- § 24 odst. (4) „Při hodnocení bezpečnosti projektu musí být přednostně uplatněn konzervativní přístup v metodách tohoto hodnocení a při stanovení bezpečnostních rezerv.“

Národní legislativa v oblasti bezpečnostních analýz je v souladu i s mezinárodními požadavky. Například dokument IAEA SSR-2/1 (Rev. 1) [11] obsahuje požadavek:

- „5.26. The design basis accidents shall be analysed in a conservative manner. This approach involves postulating certain failures in safety systems, specifying design criteria and using conservative assumptions, models and input parameters in the analysis.” *(Základní projektové nehody musí být analyzovány konzervativním způsobem. Tento přístup zahrnuje postulování určitých poruch v bezpečnostních systémech, stanovení projektových kritérií a použití konzervativních předpokladů, modelů a vstupních parametrů při analýze.)*

V dokumentu IAEA SSG-2 (3.9) [12] je definován konzervativní přístup následujícím způsobem:

- (a) The code is conservative, as it is intended to produce pessimistic results. (Výpočtový program je konzervativní, za účelem dosažení pesimistických výsledků)
- (b) The selected initial and boundary conditions, including the time available for the operator to act, are assumed to have pessimistic values. *(Pro vybrané počáteční a okrajové podmínky, včetně času zásahu operátora, jsou uvažovány pesimistické hodnoty)*
- (c) No credit is taken for non-safety-grade equipment unless it is conservative to do so. (Nejsou uvažovány systémy, které nejsou kvalifikovány jako bezpečnostní, pokud jejich zásah nevede ke konzervativním výsledkům.)
- (d) The most severe single failure of the safety systems that are designed to mitigate the consequences of the accident is assumed. *(Je uvažována nejzávažnější jednoduchá porucha bezpečnostních systémů navržených ke zmírnění důsledků nehody)*

Část E8 dokumentu WENRA SRL [14] se zabývá prokázáním rozumného konzervatismu a bezpečnostních rezerv. Její rozsah a obsah zhruba odpovídá definici konzervativního přístupu v dokumentu IAEA SSG-2 (3.9) [12]. Dále se v dokumentu uvádí, že bezpečnostní analýza musí:

- a) spoléhat na metody, předpoklady nebo argumenty, které jsou odůvodněné a konzervativní;
- b) zajistit, aby neurčitosti a jejich důsledky byly dostatečně zohledněny,

- c) prokázat, že byly při definování projektové nehody byly zahrnuty přiměřené rezervy, aby se zajistilo, že jsou pokryty všechny projektové nehody;
- d) být auditovatelná a reprodukovatelná.

V části F3.1 dokumentu WENRA SRL [14] je požadavek vztahující se na bezpečnostní analýzu událostí DEC (rozšířených projektových podmínek), že musí:

- a) spoléhat na metody, předpoklady nebo argumenty, které jsou odůvodněné, ale neměly by být nepřiměřeně konzervativní;
- b) být auditovatelné, přičemž je třeba věnovat zvláštní pozornost použití znaleckých posudků, a brát v úvahu neurčitosti a jejich důsledky.

Podrobně se konzervativním a realistickým přístupem zabývá IAEA SSG-2 [12], ve kterém jsou podrobně rozepsány základní aspekty konzervativního a realistického přístupu k bezpečnostním analýzám a je v něm popsán i doporučený přístup ke stanovení počátečních a okrajových podmínek a dostupnosti bezpečnostních systémů. Požadavky na počáteční a okrajové podmínky deterministických bezpečnostních analýz jsou také součástí dokumentu IAEA SRS-30 [13].

Pro výpočet zdrojového členu událostí kategorie II (DBC2, abnormální provoz) a kategorií III a IV (základní projektové nehody – DBC3, události s řídkou četností výskytu, - DBC4, limitující nehody) musí být uplatněn **konzervativní** přístup ve smyslu Vyhlášky č. 329/2017 [6] a dokumentů IAEA SSG-2 [12] a IAEA SRS-30 [13]. Jelikož účelem výpočtu zdrojového členu je určení radiačních následků, musí být výpočty konzervativní vůči radiačním následkům a musí maximalizovat zdrojový člen z kontejnmentu, a to pro prvky, které způsobují majoritní příspěvek k radiačním následkům (jódu, cesium, vzácné plyny).

Všechny programy použité v rámci analýz zdrojového členu musí dále být podle požadavků SÚJB prováděny programovým vybavením, které prošlo hodnotící procedurou dle příslušné Směrnice SÚJB (VDS 030 [9]). Použité výpočetní programy musí být verifikovány a validovány.

2 Cíle práce a metody zpracování

Hlavním cílem práce je určení zdrojového členu, který je nezbytnou součástí prokazování jaderné bezpečnosti a plnění kritérií přijatelnosti. Dílčí cíle práce jsou definovány následovně:

1. Určení in-containment zdrojového členu s ohledem na existující a nejmodernější přístupy
2. Validace výpočetního kódu COCOSYS 2.4v4 či novější verze včetně úpravy koeficientů výpočetních modelů a jejich naladění na existující a dostupné experimenty
3. Vytvoření podrobného modelu kontejnmentu jaderné elektrárny VVER-1000/V320 nebo VVER-440/V213 pro potřeby analýz radiačních následků
4. Aplikace bodů 1 až 3 s cílem určení zdrojového členu z kontejnmentu při projektových haváriích s únikem chladiva na konkrétní jadernou elektrárnu, vliv na kritéria přijatelnosti a porovnání s dosavadními výsledky starších přístupů

S ohledem na zmíněné dílčí cíle, je potřeba taktéž vhodně definovat metody zpracování. Pro oblast určení in-containment zdrojového členu je potřeba vycházet ze širokého spektra dokumentů, tj. je potřeba provést rešerši, na kterou naváže expertní zhodnocení a návrh metodiky, která ovlivní samotné určení zdrojového členu.

Pro oblast validace je stěžejní porovnání výsledků výpočetního kódu s experimentálními daty. V této oblasti se opět uplatní rešerše nutná pro přípravu vstupních dat, na kterou naváží samotné výpočty, které bude možno v případě potřeby iterovat. Porovnání výsledků bude provedeno graficky s cílem určit blízkost výsledků. Významný zde bude i expertní odhad, který zhodnotí, zda dosažené výsledky jsou konzervativní.

Pro vytvoření modelu je potřeba opět aplikovat rešerši s cílem získání všech potřebných podkladů pro tvorbu modelu. Zároveň budou aplikovány poznatky z validace výpočetního kódu.

Poslední oblast vyžaduje aplikaci všech dosavadně získaných výsledků. Porovnání s výsledky starších přístupů bude provedeno numericky i graficky, přičemž výsledky budou vztaženy k referenčnímu výpočtu.

3 Metodika určení zdrojového členu v České republice

Jak již bylo zmíněno v úvodu práce, historicky nebyl v rámci České republiky ucelený přístup k určení vnitřního kontejnmentového zdrojového členu, stejně tak neexistovala ucelená metodika popisující celý řetězec výpočtů k určení vnějšího kontejnmentového zdrojového členu a následných radiačních následků. Z toho důvodu byl iniciován v rámci ÚJV Řež, a. s. projekt TAČR TH02021010 Metodiky a modely výpočtu zdrojového členu pro určení radiologických následků nehod JE, v jehož rámci byla provedena značná část činností uvedených v této práci. Hlavním výstupem celého projektu je certifikovaná metodika určení zdrojového členu, která přinesla přesnou definici požadavků a je v současné době využívána pro hodnocení projektových nehod jaderných elektráren v České republice.

Vzhledem k rozsahu práce budou uvedeny pouze dílčí části metodiky [22], které přímo souvisí s určením zdrojového členu události LB LOCA.

3.1 Určení inventáře radionuklidů

Výpočtem zdrojového členu lze chápat určení množství radionuklidů, které se mohou potenciálně uvolnit do životního prostředí. Nejvýznamnějším zdrojem radionuklidů je palivo v aktivní zóně reaktoru obsahující především štěpné produkty. Inventář štěpných produktů v palivu je také nutný pro určení obsahu štěpných produktů v chladivu primárního a sekundárního okruhu.

Obsah štěpných produktů v neporušeném palivu (inventář ŠP v AZ) by měl být řešen pomocí detailních výpočetních programů (např. v ČR využívaný INVAZG1 nebo ORIGEN). Výpočet musí stanovit limitní inventář štěpných produktů s uvážením předpokladů maximalizujících obsah štěpných produktů.

Mezi základní konzervativní předpoklady patří:

- Tepelný výkon reaktoru konzervativně zvýšený o minimálně 2 % nominálního (požadavek [19]).
- Maximální dovolené vyhoření paliva.
- Uvážit maximální možnou dobu pobytu jednotlivých kazet v AZ

- Inventář počítat na konci cyklu v ustálené kampani

Takto spočítaný maximální inventář se používá pro výpočet radiačních následků všech nehod, u kterých je předpokládáno porušení paliva.

Počáteční inventář radionuklidů v chladivu I.O je určen jako součet obsahu štěpných produktů v chladivu I.O, korozních produktů v chladivu I.O a radionuklidů pocházejících z aktivace chladiva a jeho příměsí. Obsah štěpných produktů odpovídá maximálnímu povolenému obsahu štěpných produktů v chladivu danými příslušnými limity a podmínkami jaderné elektrárny. Pokud je při události možné náhlé navýšení množství jódu nebo jiných radionuklidů má být výsledná limitní aktivita zvýšena o tuto špičku (spike).

3.2 Uvolněná frakce inventáře a skupiny radionuklidů

Uvolněná frakce štěpných produktů vzhledem k celkovému inventáři štěpných produktů v palivu AZ je postulována s pomocí dokumentů US NRC [18] nebo [19]. Přitom jsou rozlišeny dvě možné fáze úniku z paliva. První jsou frakce pro uvolnění štěpných produktů z mezery palivo pokrytí (gap release) pokud dochází k poškození pouze pokrytí. Druhá se používá v případě, že je uvažováno natavení paliva a udává frakce pro tuto fázi (early in-vessel).

Uniklé frakce jsou definovány pro skupiny radionuklidů podle jejich vlastností. Pro LOCA události je doporučeno používat frakce uvedené v Tab. 1. Prvky uvažované v jednotlivých skupinách jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 1 Uniklé frakce štěpných produktů během LOCA pro reaktory s PWR [18]

Skupina, prvky	Uvolněná frakce štěpných produktů		
	během fáze úniku z mezery palivo pokrytí	během fáze natavení paliva	celkem
Vzácné plyny	0,05	0,95	1
Halogeny	0,05	0,35	0,4
Alkalické kovy	0,05	0,25	0,3
Telurické kovy	0,00	0,05	0,05
Ba, Sr	0,00	0,02	0,02
Vzácné kovy	0,00	0,0025	0,0025
Lanthanidy	0,00	0,0005	0,0005
Skupina ceria	0,00	0,0002	0,0002

Tab. 2 Prvky uvažované v jednotlivých skupinách [18]

Skupina	Prvky
Vzácné plyny	Xe, Kr
Halogeny	I, Br
Alkalické kovy	Cs, Rb
Telurické kovy	Te, Sb, Se
Ba, Sr	
Vzácné kovy	Ru, Rh, Pd, Mo, Tc, Co
Lanthanidy	La, Zr, Nd, Eu, Nb, Pm, Pr, Sm, Y, Cm, Am
Skupina ceria	Ce, Pu, Np

Jakýkoliv přídavek prvků nebo zvýšení unikající frakce při definici zdrojového členu v porovnání s frakcemi uvedenými v Tab. 1 je konzervativním přístupem.

3.3 Chemické formy, chování radionuklidů

U radionuklidů uvolňovaných z paliva se, s výjimkou části jódu a všech vzácných plynů, uvažuje, že unikají v částicové formě jako aerosoly. Vzácné plyny jsou chemicky inertní. Pro jód se předpokládá, že uniká ve třech různých formách – jako aerosol (CSI), jako elementární jód (I_2) nebo organický jód (metyljodid, CH_3I). Rozdělení mezi jednotlivými chemickými formami není mezinárodně jednotné a neustále se vyvíjí.

Poměry zastoupení chemických forem jódu se uvažují pro prvotní uvolnění jódu z porušeného paliva do chladiva primárního okruhu a následně v případě LOCA nehod do ochranné obálky. Chemické složení forem jódu se může měnit v závislosti na typu a průběhu řešené havárie.

V mezinárodně často používaných a uznávaných dokumentech (Regulatory Guide) od US NRC byly postupem času uvedeny různé poměry procentuálního zastoupení aerosolové, elementární a organické formy jódu unikajícího z paliva. Shrnutí rozdělení je uvedeno v Tab. 3.

Tab. 3 Poměry zastoupení chemických forem jódu

Forma jódu	RG 1.183 2000, [18]	RG 1.195 2003, [19]
Aerosolová (částicová)	95 %	5 %
Organická (CH_3I)	0,15 %	4 %
Elementární (I_2)	4,85 %	91 %

Nejednotnost v nastavení těchto parametrů se projevuje i v evropských zemích, kdy každá země uvažuje jiná procentuální zastoupení forem jódu vstupujícího z primárního okruhu do kontejnmentu [17].

Pokud nebudou známy jiné dodatečné informace o poměru forem unikajícího jódu je doporučeno používat poměry pro nehody bez natavení paliva podle RG 1.183 [18] v případě těžších nehod s natavením podle RG 1.195 [19].

3.4 Časování a cesty úniku

Časování jednotlivých fází úniku štěpných produktů z poškozeného paliva AZ do chladiwa I.O a následně do prostor ochranné obálky v průběhu LOCA havárií je možné použít z předpokladů uvedených v RG 1.183 [18], kde se uvažuje pro fázi úniku z mezery palivo pokrytí čas od 30 s do 1800 s po iniciační události, v případě natavení paliva (early in-vessel phase) se uvažuje čas od 0,5 hod do 1,3 hod po iniciační události.

Časový vývoj úniku radionuklidů do životního prostředí je pak dán cestou úniku a průběhem události. Z vnitřního prostoru ochranné obálky je během LOCA havárií nutné řešit dvě dílčí cesty úniku.

První cesta úniku z ochranné obálky do životního prostředí vede přes netěsnosti ochranné obálky. Pro výpočet úniku se přitom použije maximální povolená netěsnost ochranné obálky.

Druhá cesta vede přes ventilační systémy od doby vzniku LOCA do úplného uzavření izolačních armatur. Výpočet radiačních následků pro tuto cestu je požadován v dokumentech NUREG-0800, 15.6.5 Appendix A [20] a v části 17.2 SRS 30 [21].

Výpočet chování a chemických reakcí štěpných produktů v ochranné obálce a únik do životního prostředí v průběhu událostí lze řešit kontejnmentovými programy jako MELCOR, COCOSYS nebo ASTEC. Uvedené programy řeší chování nekondenzovatelných plynů, štěpných produktů ve formě částic aerosolů a jódu s uvažováním hlavních mechanických (usazování, resuspenze, smývání apod.) a chemických procesů. Poslední dva jmenované mají navíc implementované pokročilé modely chování jódu, které postihují jeho nejdůležitější chemické reakce (kupříkladu změny chemické formy vlivem interakce s povrchem či díky přítomnosti ionizujícího záření), transport mezi atmosférou a jímkou i mezi jednotlivými prostory (ochranné obálky, budovy).

Při výpočtu zdrojového členu z ochranné obálky lze uvážit retenci (zadržení) štěpných produktů v netěsnostech, nebo v okolních prostorech přes které vede cesta úniku do životního prostředí. Použité retenční koeficienty by měly být výpočetně ověřeny a podloženy věrohodnými experimentálními daty.

3.5 Specifikace předpokladů pro konzervativní výpočet zdrojového členu pro LOCA havárie kategorie IV (DBC4)

Předchozí kapitoly poskytly podrobný náhled na požadavky ohledně určení zdrojového členu a taktéž zmínily významné cesty možného úniku štěpných produktů z kontejnmentu během havárie typu LOCA. S ohledem na legislativní požadavky a doporučení uvedené v kapitole 1.2.2, byla vytvořena následovná sada předpokladů.

Stanovení zdroje radionuklidů pro LOCA havárie kategorie IV by mělo zahrnovat následující konzervativní podmínky a předpoklady:

postulované roztěsnění 100 % všech palivových proutků v AZ¹,

uvažovat limitní rovnovážnou měrnou aktivitu chladiwa I.O,

Pro výpočet zdrojového členu pro cestu přes netěsnosti ochranné obálky a ventilačními systémy na počátku nehody by měly být uvažovány následující konzervativní předpoklady:

Použití scénáře maximalizujícího únik do okolí.

Velikost netěsnosti kontejnmentu uvažovat na úrovni maximálního dovoleného úniku z kontejnmentu.

Uvolnění aktivity z porušeného paliva předpokládat podle RG 1.183 [18] v čase od 30 s do 1800 s po iniciační události.

V dílčí cestě přes ventilační systémy na počátku nehody je možné uvážit odstranění radionuklidů filtry přes které únik prochází.

Maximalizaci úniku hmoty a energie do kontejnmentu (volba největšího únikového otvoru z I.O).

Počáteční podmínky události v ochranné obálce by měly být konzervativní z hlediska maximálního úniku radionuklidů z kontejnmentu v průběhu prvních dvou hodin po iniciační události, které mají dominantní podíl na radiačních následcích.

Za ukončení nehody z hlediska úniků z ochranné obálky by mělo být považován čas dosažení podtlaku v kontejnmentu nebo dosažení takové úrovně přetlaku, kdy je

¹ Ve výpočtech lze uvažovat i jinou hodnotu podílu porušených palivových proutků. V tomto velmi konzervativním případě se předpokládá návaznost na výpočet radiačních následků, které určí, pro jaké procento porušených palivových proutků z celkového obsahu AZ je právě splněno kritérium přijatelnosti.

možné spustit vnitřní cirkulační systémy ventilace, které dodatečně odvádějí teplo z ochranné obálky a čistí atmosféru od radionuklidů. Jejich práci pak lze snížit tlak v kontejnmentu pod úroveň okolí nebo na úroveň, kdy je možné odvodními ventilačními systémy začít odsávat prostor kontejnmentu a kontrolovat tak jeho vnitřní tlak. Pro události LOCA se tato doba obvykle pohybuje mezi 3 až 24 hodinami po iniciační události podle typu kontejnmentu a velikosti trhliny.

Rozdělení chemických forem unikajícího jódu je doporučeno uvažovat podle RG 1.183 [18] takto:

95 % jako aerosolová forma (CsI)

4,85 % jako elementární jód (I_2)

0,15 % jako organický jód (metyljodid, CH_3I)

4 Výpočetní kódy a validace

Výpočetní kódy představují nezbytnou součást řetězce bezpečnostních analýz s cílem určení zdrojového členu. Existuje řada výpočetních kódů, které jsou vybaveny modely pro simulaci transportu štěpných produktů, mezi které patří kupříkladu MELCOR, ASTEC či APROS.

Jedním z výpočetních kódů využívaných pro analýzy termohydraulické odezvy ochranných obálek a určení zdrojového členu je i kód COCOSYS vyvíjený v GRS gGmbH, který je již po několik desítek let nedílnou součástí bezpečnostních analýz jaderných elektráren v České republice.

Požadavky SÚJB pro aplikaci výpočetních kódů v oblasti bezpečnostních analýz jasně definují nároky na výpočetní kódy použité v rámci analýz zdrojového členu, tj. všechny programy použité v rámci analýz zdrojového členu musí být prováděny programovým vybavením, které prošlo standardizací pro použití v bezpečnostních analýzách JE podle příslušných návodů a směrnic SÚJB. Součástí procesu standardizace je i dokazování ověření schopností reprodukovat validační experimenty.

Dle mezinárodních požadavků uvedených v [12], by validace měla být prováděna jak na úrovni uživatelské, tak i v rámci domovské organizace, přičemž je potřeba provádět několik úrovní validačních výpočtů od těch nejjednodušších, kdy jsou zkoumány separátní jevy, přes složitější integrální testy až po testy na úrovni elektrárny. V ideálním případě by validační testy měly pokrývat celý rozsah hodnot parametrů, podmínek a fyzikálních procesů, které má výpočetní kód pokrýt.

4.1 Výpočetní program COCOSYS 2.4v5

Popis uvedený v této kapitole vychází z dokumentace [24].

Program COCOSYS (**CO**ntainment **CO**de **SY**stem) je kontejnmentový kód vyvíjený od roku 1994 německou společností „Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH“. Jedná se o modulárně stavěný programový systém, který na základě mechanistických modelů umožňuje komplexní simulaci procesů, které nastávají při těžkých haváriích v ochranných obálkách jaderných elektráren (JE) s lehkovodními (varnými a tlakovodními) reaktory. Oblast použití zahrnuje i analýzy fyzikálních i chemických procesů v ochranných obálkách i během projektových havárií. Programem COCOSYS lze postihnout jednak interakce mezi jednotlivými jevy jako např. termohydraulikou, hořením vodíku, chováním aerosolů, jednak celkový stav ochranné

obálky. Použití programu se neomezuje pouze na ochrannou obálku, lze jím počítat obecně termohydraulické chování uvnitř jakékoliv jiné budovy.

Podrobný popis programu včetně všech matematicko-fyzikálních modelů programu jsou uvedeny v příručkách autorské organizace.

Kompletní programový systém COCOSYS V2.4v5 obsahuje několik hlavních modulů, které představují samostatně spustitelné programy pro specifický jev. Komunikaci mezi moduly zajišťuje řídicí program systému, který využívá programu PVM (Parallel Virtual Machine). Základními moduly jsou přitom termohydraulický modul (THY), modul aerosolových štěpných produktů (AFP) a modul pro interakce aktivní zóny s betonem (CCI). Celkové schéma programu je znázorněno na Obr. 2.

Ostatní programové moduly (ATHLET-CD, LAVA) jsou propojeny stejně jako hlavní moduly. Při výpočtu přitom moduly paralelně a uživatel může ovlivňovat parametry propojení modulů (předávaná data, synchronizaci) ve vstupních datech. Výpočtem se zahrnutím systémového programu ATHLET lze získat integrovaný kód, který modeluje úplnou sekvenci nehody, od iniciace, přes děje v primárním a sekundárním okruhu až po odezvu ochranné obálky. Data z výpočtu mohou být zobrazeny online (za běhu programu) nebo offline vizualizačním nástrojem ATLAS.

4.1.1 Termohydraulický modul THY

Termohydraulický modul THY programového systému COCOSYS popisuje především samotnou termohydrauliku tedy změny teploty a tlaku čase, distribuce teploty, tlaku a vody v prostoru, hoření vodíku, rozdělení energie včetně přenosu a vedení tepla v strukturách, šíření plynů (H_2 , CO), hmotnostní a objemové průtoky otvory, chování modelovaných bezpečnostních systémů a zpětnou vazbu z modulu aerosolových štěpných produktů (AFP). Hlavními typy objektů k popisu analyzovaných procesů jsou zóny, spojky, 1D spojky a tepelné struktury.

Modul THY je založen na modelování metodou soustředěných parametrů (lumped-parameter model). Modelovaný objekt (kontejnment, experimentální zařízení, budova) je proto rozdělen do kontrolních objemů (zón). Termodynamický stav zóny je definován její teplotou a hmotnostmi jednotlivých komponent (vzduch, pára, voda, H_2 , CO_2 aj.). Zóny lze dále dělit do několika částí: plynná část s kapkami nebo prachem, kapalná část s rozpuštěnými plyny nebo pevnými částicemi a pevná část s rozpuštěnými plyny nebo kapalinami. V programu je implementováno 6 různých modelů zón.

Tepelné struktury modelují stěny, podlahy a stropy sledované geometrie. Vedení tepla v strukturách je řešeno jednorozměrnou Fourierovou rovnicí. Simulovat lze deskové a válcové typy struktur, které mohou být dále děleny do vrstev s libovolným uspořádáním.

Pro modelování přestupu tepla mezi strukturami a příslušnými zónami je možno zvolit konvekci volnou i nucenou, kondenzaci nebo radiaci. V příslušných korelacích se používají průměrné látkové vlastnosti tekutin platné do 3000 °C. Materiál struktur může být libovolný a je určen hodnotami hustoty, tepelné vodivosti, měrné tepelné kapacity a emisivity. Jednotlivé materiály mohou být od sebe odděleny vzduchovými mezerami. Dále je třeba specifikovat typ povrchu struktur (BOTTOM, CEILING, SIDE nebo INNER), jehož volba má výrazný vliv na druh použitého modelu přestupu tepla a na příslušnou část (FLUID nebo GAS) připojené zóny. Jednotlivým strukturám je možno předepsat počáteční a okrajové podmínky.

Únik hmoty nebo energie do kontejnmentu netěsnostmi nebo roztrženým potrubím při nehodě lze simulovat únikem hmoty nebo energie do zóny nebo uvolněním energie do struktury.

4.1.2 Modul aerosolových štěpných produktů AFP

Modul aerosolových štěpných produktů **AFP** (Aerosol Fission Product) je používán pro best-estimate simulace chování štěpných produktů v kontejnmentech lehkovodních jaderných elektráren. Jak modul štěpných produktů, tak i termohydraulický modul THY uvažují vzájemnou interakci termohydraulikou a chováním štěpných produktů. V rámci výpočetního kódu COCOSYS je rozlišováno v simulaci radioaktivních štěpných produktů, aerosolů a sloučenin jódu. Každý ze zmíněných je řešen samostatným modulem.

Celkem osm chemicky různých aerosolů může být řešeno v rámci výpočtů modulem AERIKA (Aerosolverhalten in den kondensierender Atmosphäre), přičemž je přihlíženo k počátečním a okrajovým termohydraulickým podmínkám. Modul rozlišuje mezi rozpustnými a nerozpustnými aerosoly, dále pak i mezi hygroskopickými a nehygroskopickými aerosoly. Z depozičních procesů jsou řešeny následující: sedimentace, difuzivní depozice, termoforéza a difuzoforéza. Pro výpočty kondenzace na aerosolech je využita metoda pohyblivé mřížky MGA, která značně snižuje numerické difuze mezi jednotlivými velikostními kategoriemi aerosolů. V případě hygroskopických aerosolů může docházet ke kondenzaci i v případě přehřátých podmínek, což může mít za následek změnu úrovně vlhkosti v atmosféře. Tato odezva je uvažována při termohydraulických výpočtech zejména v blízkosti saturevaných podmínek, kdy chování aerosolů silně závisí na míře saturace.

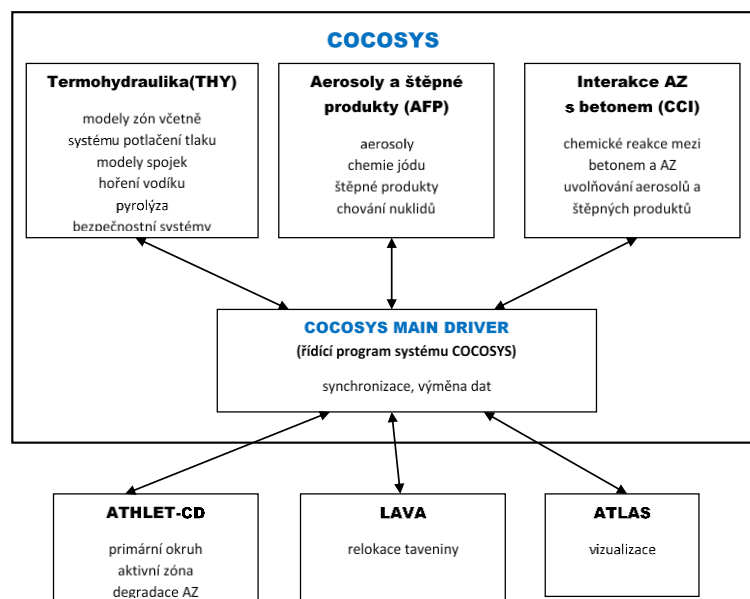
Modul FIPHOST simuluje transport štěpných produktů uvnitř kontejnmentu. Na štěpné produkty je nahlíženo jako na radioaktivní část aerosolů či nekondenzovatelné radioaktivní plyny, přičemž jejich hmotnost není v modelu uvažována. FIPHOST rozlišuje mezi atmosférou, aerosolem a jímkovou vodou jako nosiči štěpných produktů (koncept pěti nosičů). Štěpné produkty mohou být deponovány na površích jak v jímcě, tak i

v atmosféře. Jejich transport závisí na převládajícím plynném a kapalném hmotnostním toku. Všechny relevantní procesy spojené s transportem štěpných produktů jsou simulovány: depozice aerosolových částic přirozenými procesy či zapříčiněnými technickými systémy jako jsou filtry a sprchy, smývání ze stěn a změna nosiče vlivem radioaktivní přeměny. Chování nuklidů je simulováno s pomocí modulu FIPISO. Ten uvažuje počáteční inventář aktivní zóny (napočtený předem dalšími kódy) a následně řeší radioaktivní rozpad štěpných produktů na základě počátečního času problému s využitím etablovaných knihoven jaderných dat (analogické k ORIGIN). Transport nuklidů je počítán modulem FIPHOST. Celkem je řešeno až 600 různých nuklidů. Energie uvolněná rozpadem v jednotlivých zónách a na jednotlivých nosičích je uvažována v termohydraulickém modulu THY.

Modul řešící chemii sloučenin jódu AIM je založen na kódu IMPAIR a obsahuje přibližně 70 různých chemických reakcí. Modul rozlišuje celkem mezi 17 druhů sloučenin jódu v atmosféře a 11 v jímce. Počítá transport jódu a jeho sloučenin mezi atmosférou a jímkou a dále i mezi jednotlivými zónami. Chování jódových aerosolů CsI a IOx je řešeno modelem přímo v modulu AFP. Modul AIM byl testován na mnoha experimentech v rámci projektů ThAI. To pomohlo ke zlepšení interakcí mezi I₂ a ocelovými povrchy. Modul AIM byl úspěšně využit pro přepočet výpočtů spojených s ISP-41.

Retence aerosolů během transportu plynů skrz jímky je řešena pomocí modulu SPARC. Ten, kromě dalších věcí, umožňuje simulaci čištění jímek systémů potlačení tlaku u varných reaktorů.

Dále jsou k dispozici speciální modely pro simulaci filtrů (HEPA, granulární). Ty taktéž uvažují tlakové ztráty v atmosférických spojkách.



Obr. 2 Schéma struktury kontejmentového programu COCOSYS

4.2 Validace v domovské organizaci (GRS)

Validační matice uvedená v dokumentaci k výpočetnímu kódu představuje souhrn všech experimentů, na nichž byl kód validován, a to jak ze strany tvůrce kódu, tak i ze strany dalších nezávislých organizací. Celkový přehled je uveden v tabulce Tab. 4.

Tab. 4 Přehled experimentů přepočtených v rámci validace COCOSYS [25]

Zkoumaná oblast	Experiment	Test
Termohydraulika	BMC	Rx4, C13, D3, D6, D7, F2, VANAM M2*, M3, M4
	HDR	T31.3, T31.5, E11.1, E11.2, E11.4
	THAI	TH1, TH2, TH7, TH9, TH10, TH13 (step 2 of ISP-47) , TH-14, TH-15, TH17 HM-1, HM-2 WH20
	TOSQAN / MISTRA	ISP-47 step 1 tests, MICOCO
	PANDA	T9, T9bis, T17
Spalování vodíku	BMC	Ix2, Ix9, Ix23, Hx26
	HDR	E12.3.2
	NUPEC D)	B-2-6, B-8-3
	ENACEFF	RUN736, RUN765, RUN153, RUN158, RUN160
	THAI	HD-2R, HD-15, HD-22, HD23, HD-24
Pasivní autokatalytické rekombinátory	BMC	Gx4
	HDR	E11.8.1
	THAI	HR-2, HR-35
Sprchové systémy	BMC	PACOS Px1
	HDR	E11.1
	NUPEC	M7-1
	MISTRA	MASPO, MASP1, MASP2
Pasivní systémy, hydrodynamika	PANDA	BC3, BC4, PC1, ISP-42 tests, A, D, E and F
	BC-V213	LB LOCA test 1, SLB-G02
	GKSS	M1
Trysky	BMC	HYJET Jx2
	PANDA	OECD-SETH T9, T9bis, T17
Pyrolýza	HDR	E41.7, E42
	NIST	more than ten tests of ICFMP No. 3
	OSKAR	ICFMP No. 4: tests T1 and T3
	DIVA	OECD PRISME: PRS-SI-D1, PRS-SI-D3, PRS-SI-D6 PRS-LK-D1, PRS-LK-D2, PRS-LK-D4 PRS-INT-D1, PRS-INT-D2, PRS-INT-D4, PRS-INT-D5, PRS-INT-D6
Chování aerosolů	BMC	VANAM M2*, M3 (ISP-37), M4
	KAEVER	K123, K148, K151, K156, K159, K186, K187, K188
	THAI	Aer-1, Aer-3, Aer-4, AW-1, AW-2
Chemie jódu	RTF	3 B, P9T1, P10T1, P10T3, RTF1, RTF3, RTF5 OECD BIP: G-1, G-13 OECD BIP: G-4, ... G-12 OECD BIP: A-7, A-9
	EPICUR	S1-3, S1-4, S1-5, S1-11, AER1, AER2

Zkoumaná oblast	Experiment	Test
Transport jódu	CAIMAN	ISP-41 tests: 97/02, 01/01, 01/03
	THAI	Iod-6 ... Iod-30
Integrální testy se štěpnými produkty	PHEBUS	FPT1, FPT2, FPT3
Vymývání jímky		EPRI-II series 1 POSEIDON test series
Interakce taveniny coria s betonem	BETA	V1.8, V3.3, V5.1, V5.2
	ANL	ACE: L1, L2, L5, L8 MACE: M3B, M4 OECD-MCCI: CCI-2, CCI-3, CCI-4, CCI-5
	COMET	L1, L2, L3
	MOCKA	3.1, 6.1
Šíření coria	KATS	Tests No. 7, 14, 15, 17 and ECOKATS V1 and 1
	COMAS	Tests No. 5a, EU2b, EU3a, EU4
	VULCANO	VE-U5, VE-U6, VE-U7, VE-U8
Přímý ohřev kontejnmentu	DISCO	D06 FH01 ... FH03 H1 ... H6 KH1 ... KH7 L04 ... L05

4.3 Validace v ÚJV

Oproti validaci v domovské organizaci je v rámci ÚJV provedena méně rozsáhlá validace. Menší spektrum experimentů je dáno jednak dostupností experimentálních dat pro přepočty a dále i aplikací kódu, kdy některé jeho části pro využití v organizaci nehrají roli.

Z pohledu aplikace kódu v ÚJV se jeví jako zásadní experimenty zaměřené na termohydraulické chování kontejnmentu a dále pak experimenty spojené se šířením štěpných produktů, tj. aerosolů a jódu. Jód je zkoumán ve větší míře kvůli složitému chemickému chování, přičemž je snaha provádět přepočty jak separátních jevů, tak i složitějších integrálních testů. Přehled přepočtených experimentů je uveden v Tab. 5.

Standardizace kódu COCOSYS 2.4v5 dle směrnice [9] před komisí pro šíření štěpných produktů proběhla v létě 2020 s kladným výsledkem [34]. Díky tomu je kód možné využívat v rámci bezpečnostních analýz jaderných elektráren v České republice.

V dalších kapitolách je uveden hrubý výtah vybraných experimentů předložených v rámci zmíněného standardizačního řízení. Dílčí výsledky validace byly prezentovány i na mezinárodních konferencích NENE 2021 [35], [36] a NURETH19 [37] a taktéž v periodiku KERntechnik [38].

Tab. 5 Přehled experimentů přepočtených v rámci validace COCOSYS organizací ÚJV

Zkoumaná problematika	Projekt	Experiment	Integrální/separátní	Testy	Zpráva
Adsorpce jódu na povrchu ve vodním prostředí	BIP	IA (water)	Separátní	A1 – A9 AECL-2 – AECL-23	[28]
Adsorpce jódu na povrchu bez kondenzace		IA (gas)	Separátní	G-1 – G-21	[28]

Zkoumaná problematika	Projekt	Experiment	Integrální/separátní	Testy	Zpráva
Uvolnění jódu z barveného povrchu		OIF	Separátní	ORG1-G – ORG40-G – ORG7-A – ORG42-A	[29]
Chemie jódu v jímce a fázový transport		RTF	Integrální	P9T1 P9T2 P10T2 P10T3 P11T1	[30]
Transport a depozice štěpných produktů	FALCON	ISP-2	Integrální	-	[31]
Transport a depozice štěpných produktů Termohydraulika kontejnmentu	PHEBUS	FP	Integrální	FPT1 FPT2	[32]
Barbotážní systémy	EREC	-	Separátní	Phare/Tacis PH 2.13/95 „VVER 440/213 Bubble Condenser Experimental Qualification“	[33]

4.3.1 Adsorpce jódu

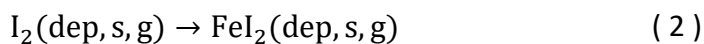
Uvnitř kontejnmentů jaderných elektráren se nachází velké plochy, které v případě havárie mohou posloužit jako efektivní způsob zachytávání štěpných produktů, zejména jódu. Fyzikálně chemické chování jódu představuje rozsáhlý problém, který je po mnoho let řešen na národní i mezinárodní úrovni. Jedním z projektů, který se problematikou zabýval je i projekt BIP (Behaviour on Iodine Project) s experimentální sérií Iodine Adsorption, která je typickým příkladem separátních efektů.

Výpočetní kód COCOSYS je vybaven sadou modelů pro rozličné podmínky adsorpce jódu na povrchu. Tyto modely závisí jednak na termohydraulických podmínkách, tj. zda dochází k jevu ve vodním či vzdušném prostředí, přičemž je dále řešeno, zda na zkoumaném povrchu dochází či nedochází ke kondenzaci. S ohledem na dostupná data z experimentálního programu BIP se lze soustředit na adsorpci na suchém ocelovém povrchu, suchém barveném povrchu a barveném povrchu ve vodě.

Popis následujících výpočetních modelů vychází z dokumentace [24] až [26].

Ocelové povrchy

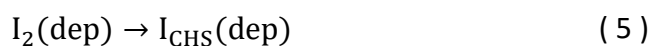
Proces adsorpce jódu na ocelovém povrchu bez kondenzace ve vzdušném prostředí probíhá ve třech krocích. V první fázi dochází k fyzikální depozici na povrchu. Tento jev je rychlý a reverzibilní, rovnice 1. Následně dochází k pomalejší chemické vazbě, při které vznikají trvalejší sloučeniny jódu a železa, rovnice 2. Tento proces není reverzibilní. Pokud je v atmosféře přítomen kyslík, dochází k oxidaci těchto sloučenin a vzniku pevně vázaných železo-iodidových oxidů, rovnice 3. Během této oxidace může docházet k uvolnění elementárního jódu do atmosféry. Uvedený model je vytvořen na základě dat pro ocel AISI 316 Ti.



Kde $I_2(g)$ představuje elementární jód v plynné fázi, $I_2(\text{dep}, s, g)$ fyzikálně adsorbovaný jód na oceli, $FeI_2(\text{dep}, s, g)$ chemicky adsorbovaný jód na oceli a $I_{2\text{FIXED}}(\text{dep}, s, g)$ železo-iodidové oxidy.

Suché barvené povrchy

Výpočetní modul AIM modeluje proces adsorpce na suchém barveném povrchu za pomoci dvou dějů, které probíhají paralelně. V první řadě jde o fyzikální adsorpci na povrchu, kdy dochází k fyzikální vazbě jódu na barvený povrch. Tento typ vazby umožňuje i zpětnou desorpci jódu do volného objemu. Druhá z rovnic popisuje chemickou vazbu jódu na barvu, přičemž není možné zpětné reakce a uvolnění elementárního jódu zpět do volného objemu. Model je ve výchozím stavu adjustován na barvu GEHOPON-EXW-E10 RAL 1013, která se běžně používá v německých jaderných elektrárnách. [24]



Kde $I_2(g)$ představuje elementární jód v plynné fázi, $I_2(dep)$ fyzikálně adsorbovaný jód na barveném povrchu a $I_{CHS}(dep)$ chemicky sorbovaný.

Barvené povrchy ve vodě

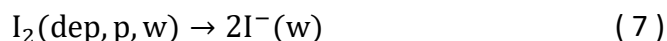
Adsorpce ve vodním prostředí je v rámci výpočetního modulu AIM řešena separátně dle chemické speciace (chemické formy) jódu. Výpočetní modely jsou opět nastaveny dle GEHOPON-EXW-E10 RAL 1013.

V případě výskytu I_2 dochází k adsorpci na povrchu za pomoci fyzikální vazby. Následně dochází k vazbě chemické. V prvním případě je reakce reverzibilní, v druhém nikoliv.



Kde, $I_2(w)$ je elementární jód v kapalně fázi, $I_2(dep,p,w)$ fyzikálně adsorbovaný jód na barveném povrchu a $I_{CHS}(dep,p,w)$ chemicky sorbovaný.

Zároveň může docházet i k resuspenzi fyzikálně deponovaného jódu, ovšem s tím rozdílem, že se do vodního objemu uvolní aniont I^- .



Kde $I_2(dep,p,w)$ představuje fyzikálně adsorbovaný jód na barveném povrchu a $I^-(w)$ aniont I^- v kapalně fázi.

Pokud je v kapalně fázi přítomen jód ve formě aniontu I^- , dochází k adsorpci ve dvou krocích. V prvním dojde k fyzikální adsorpci na povrchu. Druhá, následná, fáze uvažuje chemické navázání na epoxidový nátěr. Obě reakce jsou reverzibilní.



Kde $I^-(w)$ představuje aniont I^- v kapalně fázi, $I^-(dep,p,w)$ fyzikálně adsorbovaný aniont jód na barveném povrchu a $I_{CHS}(dep,p,w)$ chemicky sorbovaný.

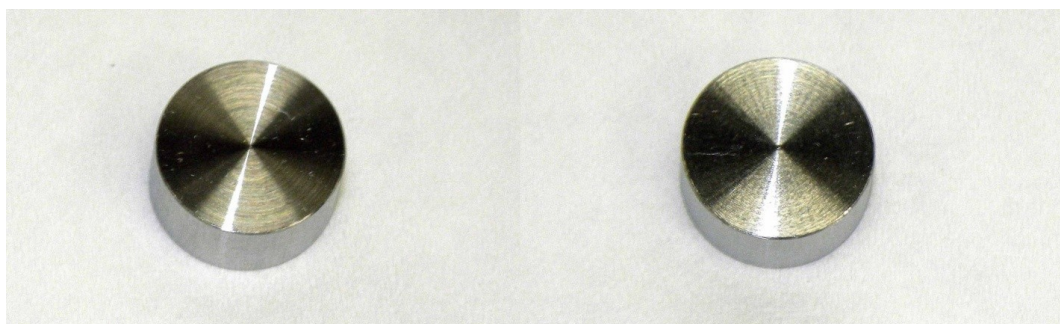
Adsorpční a desorpční testy barvených povrchů v projektu BIP v plynné a kapalně fázi byly obvykle realizovány na válcových vzorcích o průměru 1,27 cm a tloušťce 0,635 cm. Každý ze vzorků byl povrchově upraven dle požadavků výrobce barvy, přičemž byly přesně dodržovány technologické postupy jejího nanášení.

Kromě standardních AECL vzorků byly testovány i další materiály jako skelná vata, různé druhy oceli či vzorky oceli shodné s experimentem ThAl.

Přehled použitých vzorků a povrchových úprav je uveden v Tab. 6

Tab. 6 Přehled vzorků a jejich povrchové úpravy

Název	Povrchová úprava	Stáří nátěru	Průměrná tloušťka barvy [mm]	Základní nátěr
Aged Amerlock	Ameron Amerlock 400 Epoxy	~ 12 let	0.18 (3 vrstvy) 0.33 (5 vrstev)	Žádný
Larger Fresh Amerlock ²	Ameron Amerlock 400 Epoxy	1 - 2 roky	0.24	Žádný
Fresh Amerlock	Ameron Amerlock 400 Epoxy	< 1 rok	0.4	Žádný
Aged Ripolin	Hydrocentrigovaný bílý závěrečný 901 Ripolin	12 – 15 let	0.44	Centrex Ripolin N
Fresh Ripolin	Hydrocentrigovaný bílý závěrečný 901 Ripolin	< 1 rok	Neznámá	Neznámý
Fresh Epigrip	Epigrip M253	< 1 rok	Neznámá	Žádný
Aged Epigrip	Epigrip M253 „1994“	~ 16 let	Neznámá	Neznámý
Aged Epigrip	Epigrip M253 „1998“	~ 12 let	Neznámá	Neznámý



Obr. 3 Vzorky standardní velikosti z oceli 316Ti (vlevo čerstvý, vpravo exponovaný jódem)

4.3.1.1 Adsorpční studie ve vodní fázi

Základní roztok CsI byl označen pomocí 0,01 mCi ¹³¹I (ve formě NaI) přidaného do 1 dm³ 0,01 M roztoku kyseliny borité a zhruba 2,6x10⁻³ g CsI v čisté vodě pro dosažení iodidové koncentrace rovné přibližně 1x10⁻⁵ M. Dosažení požadované úrovně pH bylo zajištěno přidáním LiOH. Specifická aktivita roztoku byla zjištěna pomocí gama čítače na 1 ml vzorku. [39]

² Větší vzorek o délce 4.45 cm, šířce 1.27 cm a tloušťce 1.59 mm s otvorem o průměru 0.5 cm.

Roztok I_2 označený ^{131}I byl připraven přidáním 0,01 mCi ^{131}I ve formě NaI do 100 ml saturovaného vodného roztoku I_2 obsahujícího KH_2PO_4 adjustovaného na pH rovné 6 pomocí LiOH. Pro případy nižší koncentrace I_2 byl tento roztok adekvátně naředěn. [39]

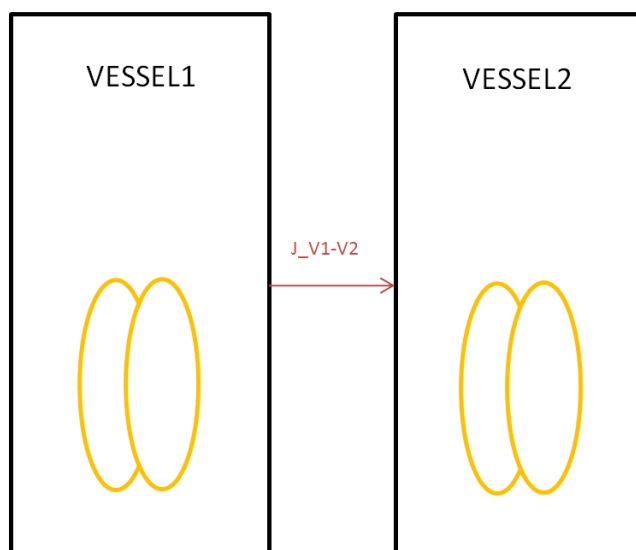
V každém z experimentů bylo přidáno 20 až 25 ml roztoku do série reakčních nádob obsahujících malé, teflonem pokryté, magnetické míchací tyčky. V každé z nádob byl umístěn jeden až dva vzorky ve vodní fázi na skleněné háčky. Roztoky byly míchány a vzorky periodicky vyjímány. Během vynětí došlo k osušení přebytečné vody a následně byly vzorky přeměřeny pomocí gama čítače. Poté došlo k opětovnému vložení do nádoby s roztokem a pokračovalo se v míchání. Každé z měření trvalo přibližně deset minut. [39]



Obr. 4 Nádoba pro studium adsorpce ve vodní fázi [40]

Nodalizace

V návaznosti na uvedený popis byl vytvořen model experimentu ve výpočetním kódu COCOSYS. Model experimentu sestává ze dvou nodů představujících experimentální nádoby. Tyto nody jsou totožné s kompartmenty pro jódové výpočty. Kromě zmíněných kontrolních objemů byla také modelována zóna simulující okolí experimentu. Jelikož dostupné materiály udávaly pouze celkový objem experimentálních nádob, byly zbylé rozměry odhadnuty z dostupných schémat a rozměrů. Vzhledem k požadavkům výpočetního kódu byla modelována spojka mezi oběma hlavními objemy, která, díky svým geometrickým parametrům, neumožňuje proudění. Tepelné struktury jsou v případě tohoto experimentu charakterizovány čtyřmi (v každé nádobě dvěma) vzorky. Náhled na řešení problému lze získat z Obr. 5.



Obr. 5 Nodalizace experimentu IA ve vodním prostředí

Přehled výpočtů a jejich počátečních a okrajových podmínek

Vzhledem k povaze experimentu byly odhadnuty (pokud nebyly explicitně uvedeny) počáteční a okrajové termohydraulické podmínky. Opakované výpočty poukázaly na značnou necitlivost vůči změně těchto hodnot. Použité hodnoty jsou uvedeny v Tab. 7.

Tab. 7 Přehled termohydraulických počátečních a okrajových podmínek (běžné podmínky testu) [39]

Veličina	Hodnota
Teplota	25°C
Tlak	98 kPa

Výpočty realizované v rámci studie odpovídají testům provedeným v rámci projektu BIP. Shrnutí je uvedeno v Tab. 8.

Tab. 8 Přehled experimentů provedených ve vodním prostředí [41], [42]

Výpočet	Test #	Teplota [°C]	Forma jódu	Buffer	pH	Poznámky
c00	A-1	25	1.0e-4 M Csl roztok	Žádný	10	Ripolin (2), Amerlock (2) / 2 nádoby, každá obsahuje 22 ml roztoku a 2 vzorky
c01	A-3	25	Saturovaný ³ I ₂ roztok	0.01 KH ₂ PO ₄	M 6	Amerlock (5 vrstev) (2) / 1 nádoba s 22 ml roztoku a dvěma vzorky
c02	A-4	25	Saturovaný I ₂ roztok	0.01 KH ₂ PO ₄	M 6	Čerstvý velký vzorek s nátěrem Amerlock (1) / 1 nádoba s 22 ml roztoku a jedním vorkem
c03	A-5	25	Saturovaný I ₂ roztok	0.01 KH ₂ PO ₄	M 6	Čerstvý velký vzorek s nátěrem Amerlock (1) / 1 nádoba s 22 ml roztoku a jedním vzorkem
c04	A-6	25	1.0e-5 M Csl roztok	0.01 M H ₃ BO ₃	10	Čerstvý velký vzorek s nátěrem Amerlock (1) / 1 nádoba s 22 ml roztoku a jedním vzorkem
c05	A-7	25	Saturovaný I ₂ roztok	0.01 KH ₂ PO ₄	M 6	Velký vzorek s čerstvým nátěrem Amerlock
c06	A-8	25	Saturovaný I ₂ roztok	0.01 KH ₂ PO ₅	M 6	Předozařený velký vzorek s čerstvým nátěrem Amerlock
c07	A-9	25	Saturovaný I ₂ roztok	0.01 KH ₂ PO ₄	M 6	Velký vzorek s čerstvým nátěrem Amerlock, teplotně namáhán 110°C po dobu 100 h
c08	AECL-2	25	1.0e-5 M Csl roztok	1.0e-3 H ₃ BO ₃	M 10	Amerlock (4) / 2 nádoby, každá obsahuje 25 ml roztoku a 2 vzorky
c09	AECL-4	25	2.0e-5 M I ₂ roztok	0.01 KH ₂ PO ₄	M 6	Amerlock (4) / 2 nádoby, každá obsahuje 22 ml roztoku a 2 vzorky, desorpce v bufferu
c10	AECL-5	25	4.0e-5 M I ₂ roztok	0.01 KH ₂ PO ₄	M 6	Amerlock (2) / 2 nádoby, každá obsahuje 22 ml roztoku a 1 vzorek
c11	AECL-6	25	1.6e-4 M I ₂ roztok	0.01 KH ₂ PO ₄	M 6	Amerlock (2) 2 nádoby, každá obsahuje 22 ml roztoku a 1 vzorek, desorpce jednoho vzorku v bufferu, druhý v 1.0e-5 Csl.
c12	AECL-7	25	Saturovaný I ₂ roztok	0.01 KH ₂ PO ₄	M 6	Amerlock (2), Ripolin (2) / 2 nádoby, každá obsahuje 22 ml roztoku a 2 vzorky (od každého typu jeden, nadbytečné krystaly jódu)

³ Saturovaný roztok jódu obsahuje 0,034 mg/l [45], což odpovídá molární koncentraci 1,34x10⁻⁴ mol/l.

Výpočet	Test #	Teplota [°C]	Forma jódu	Buffer	pH	Poznámky
						v nádobě, desorpce v bufferu
c13	AECL-8	25	Saturovaný I ₂ roztok	0.01 M KH ₂ PO ₄	6	Ripolin (2) / 1 nádoba s 22 ml roztoku a 2 vzorky, nadbytečný jód
c14	AECL-9	25	1.0e-5 M Csl roztok	0.01 M H ₃ BO ₃	10	Ripolin (2) / 1 nádoba s 22 ml roztoku a 2 vzorky, nadbytečný jód, desorpce v bufferu
c15	AECL-11	25	1.0e-4 M Csl roztok	0.01 M H ₃ BO ₃	10	Amerlock (2), Ripolin (1) / 2 nádoby, každá obsahuje 22 ml roztoku, první oba vzorky Amerlock, druhá Ripolin
c16	AECL-12	40	1.0e-5 M Csl roztok	0.01 M H ₃ BO ₃	10	Amerlock (1), Ripolin (1) / 2 nádoby, každá obsahuje 22 ml roztoku a 1 vzorek
c18	AECL-13	60	1.0e-5 M Csl roztok	0.01 M H ₃ BO ₃	10	Amerlock (1), Ripolin (1) / 2 nádoby, každá obsahuje 22 ml roztoku a 1 vzorek
c19	AECL-15	25	Saturovaný I ₂ roztok	0.01 M KH ₂ PO ₄	6	Ripolin (2) / 1 nádoba s 22 ml roztoku a 2 vzorky, nadbytečný jód, roztok I ₂ byl nahrazen
c20	AECL-17	40	Saturovaný I ₂ roztok	0.01 M KH ₂ PO ₄	6	Ripolin (2) / 1 nádoba s 22 ml roztoku a 2 vzorky, nadbytečný jód, roztok I ₂ byl nahrazen
c21	AECL-20	60	Saturovaný I ₂ roztok	0.01 M KH ₂ PO ₄	6	Ripolin (2) / 1 nádoba s 22 ml roztoku a 2 vzorky, nadbytečný jód, roztok I ₂ byl nahrazen
c22	AECL-21	50	Saturovaný I ₂ roztok	0.01 M KH ₂ PO ₄	6	Amerlock (1), Ripolin (1) /v Erlenmayerově baňce s 130 ml roztoku, nadbytečný jód v nádobě, roztok I ₂ odstraněn
c23	AECL-22	25	1.0e-4 M Csl roztok	0.01 M H ₃ BO ₃	10	Amerlock (2), Ripolin (1) / 2 nádoby, každá obsahuje 22 ml roztoku, první oba vzorky Amerlock, druhá Ripolin
c24	AECL-23	25	1.0e-5 M Csl roztok	Žádný	10	Amerlock (2), Ripolin (2) / 2 nádoby, každá obsahuje 22 ml roztoku a 2 vzorky

Zhodnocení výsledků

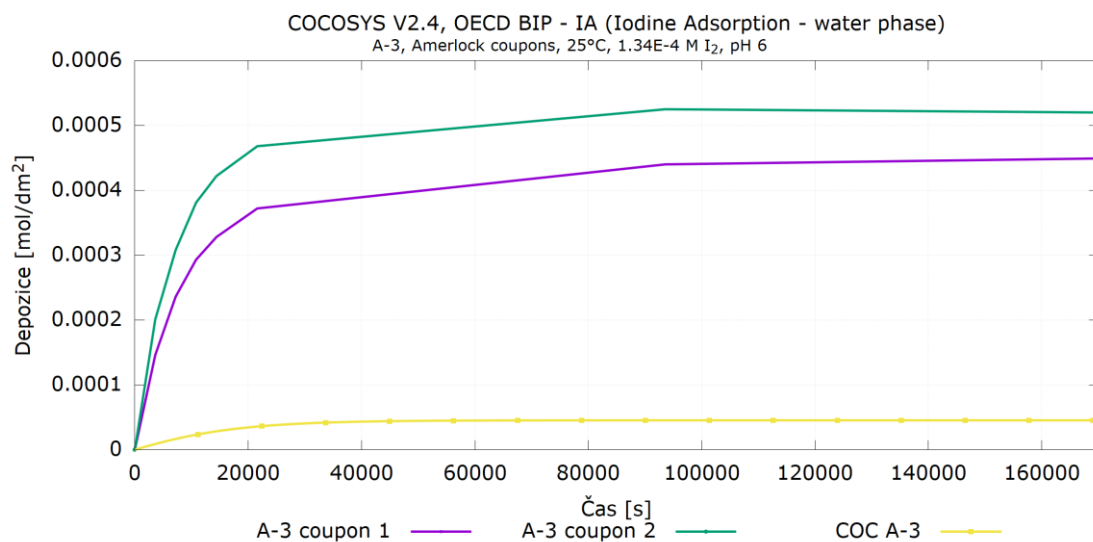
Vzhledem k rozsahu práce nejsou uvedeny kompletní grafické výsledky všech výpočtů, nicméně pro ilustraci jsou uvedeny ty nejzásadnější.

Před samotným zhodnocením je potřeba zmínit zjednodušení, která byla použita při řešení výpočtů.

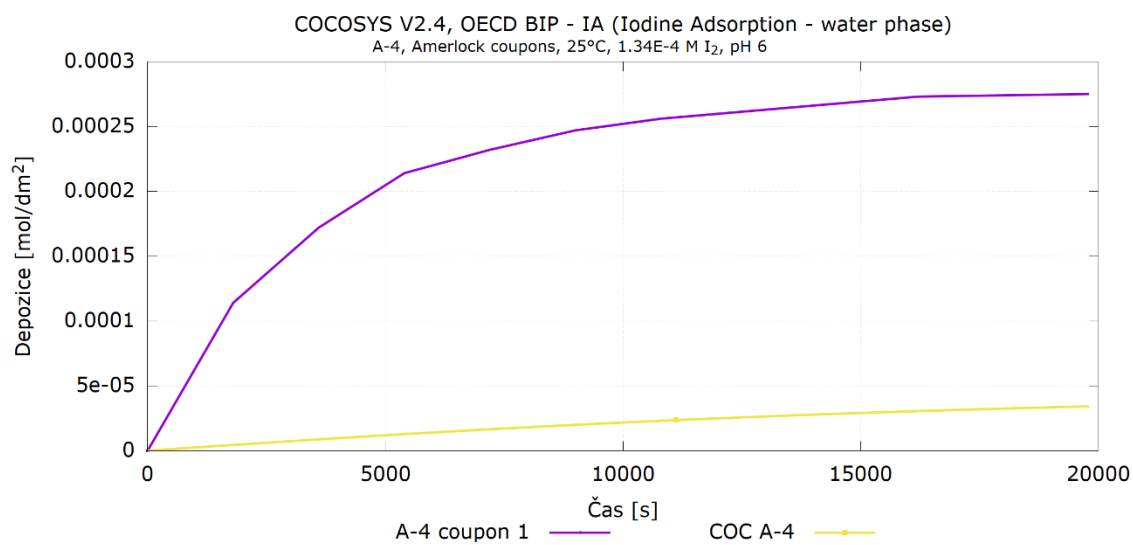
- Během experimentu je roztok, v němž jsou vzorky uloženy, míchán za pomoci magnetického míchátko. Tento pohyb nebyl v modelu, vzhledem k nemožnosti simulace a neznalosti jeho bližších podmínek, simulován.
- Byla zanedbávána tloušťka barvy, jelikož výpočetní kód COCOSYS neumožňuje zadání této proměnné.

Z uvedené analýzy experimentálních a vypočtených hodnot lze vyvodit několik následujících závěrů:

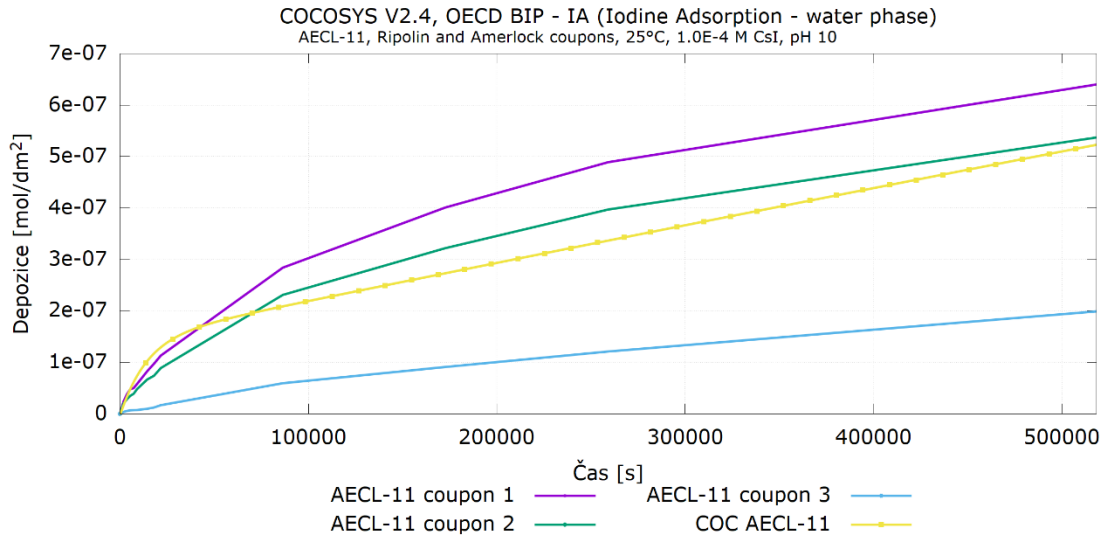
- V globálním hledisku lze shledat, že výpočetní kód COCOSYS přináší výsledky konzervativní z pohledu bezpečnostních analýz. Vlivem spočtené nižší depozice jódu na površích lze očekávat celkově vyšší obsah jódu a jeho sloučenin v kapalině. To může vést k vyššímu úniku jódu mimo prostor kontejmentu.
- V případě výpočtů a experimentů s elementárním jódem lze obecně shledat shodu v trendu depozice v dlouhodobém hledisku, v čase do 25 000 s je trend depozice u výpočtu pomalejší. Celková napočtená depozice je přibližně 3x až 8x menší nežli v případě experimentu, viz Obr. 6 a Obr. 7.
- Dobré shody je ve větší míře dosaženo u výpočtů a experimentů, kdy se v roztoku nacházel CsI. Zejména u testů AECL-11 (Obr. 8), AECL-12 (Obr. 9) a AECL-13 je shoda s výpočtem velmi dobrá. Ostatní výpočty se odlišují, avšak trend je obvykle zachován.



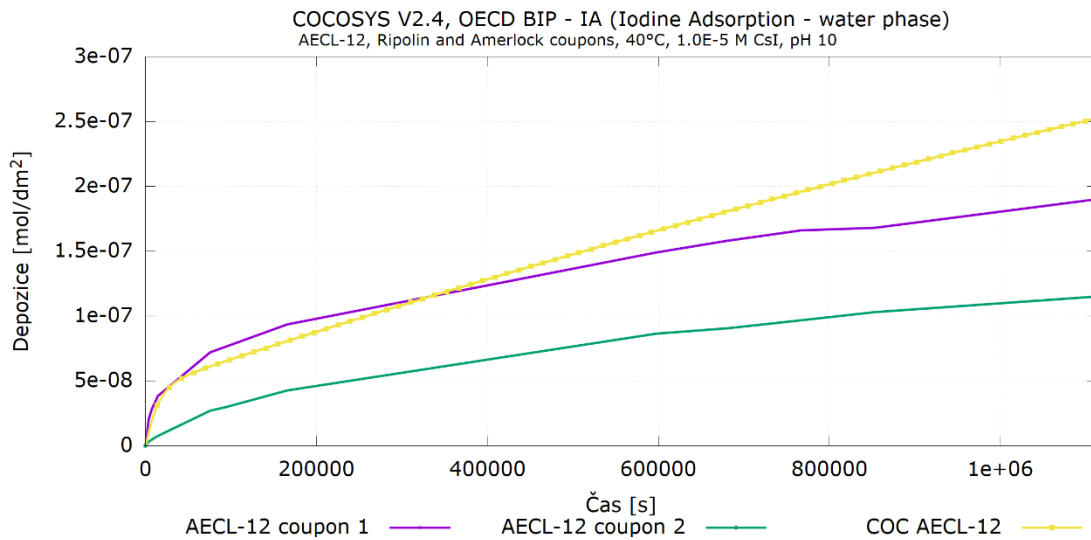
Obr. 6 Adsorpce jódu ve vodním prostředí, test A-3



Obr. 7 Adsorpce jódu ve vodním prostředí, test A-4



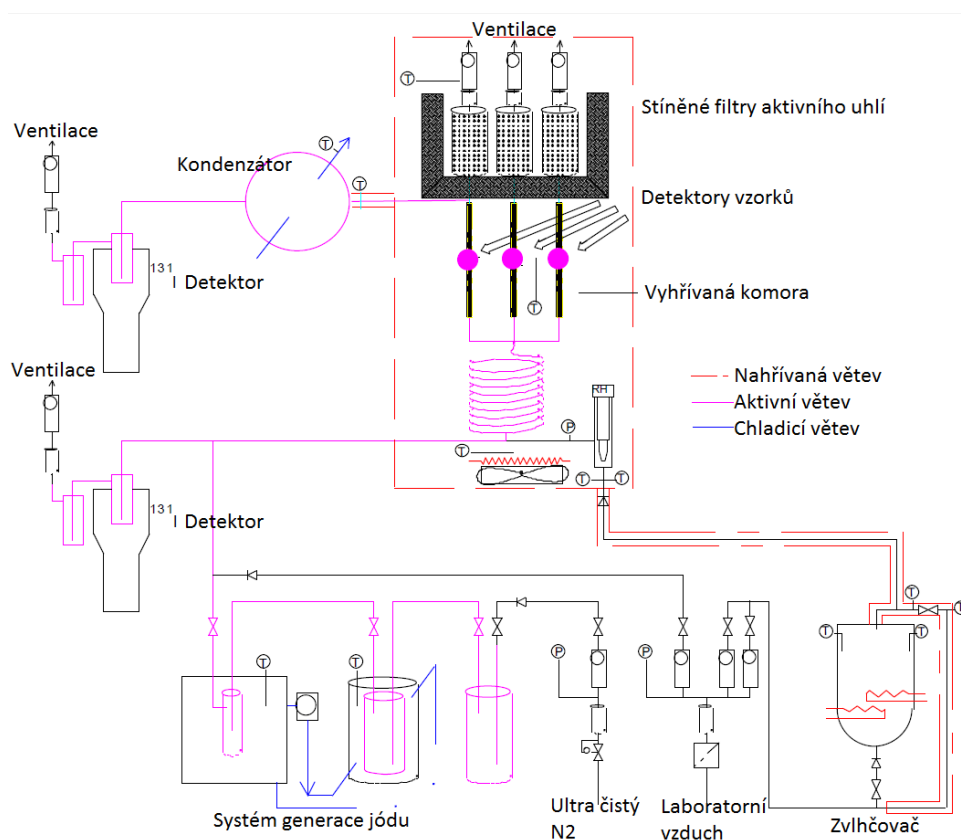
Obr. 8 Adsorpce jódu ve vodním prostředí, test AECL-11



Obr. 9 Adsorpce jódu ve vodním prostředí, test AECL-12

4.3.1.2 Adsorpční studie v plynné fázi

Adsorpce a desorpce jódu v plynné fázi byla zkoumána jako funkce koncentrace jódu v nosném plynu, relativní vlhkosti a teploty. Sorpční experimenty byly realizovány v zařízení RAA (Radioiodine Adsorption Apparatus) (viz Obr. 10). V případě typického testu byly umístěny tři vzorky ve skleněných celách, v nichž proudil vzduch nesoucí I_2 značený ^{131}I (1×10^{-8} M). Následovalo čištění vzduchem. Aktivita jódu kumulovaná na každém vzorku byla kontinuálně monitorována během zakládání a čištění pomocí gama čítače. Malé množství vstupujícího a vystupujícího vzduchu bylo filtrováno pomocí aktivního uhlí. Aktivity kumulované v těchto filtrech byly kontinuálně monitorovány pro určení vstupujícího a vystupujícího jódu. [40]



Obr. 10 Schéma zařízení RAA (Radioiodine Adsorption Apparatus), upraveno z [40]

Vzorky jsou během testů uloženy v adsorpčních buňkách, které se nacházejí ve vyhříváných komorách pro kontrolu teploty. Testovací aparát je schopen pojmout až tři takové testovací buňky, přičemž každá z nich může být během testování vyňata. Buňky jsou vyrobeny z borosilikátového skla kvůli minimalizaci adsorpce jódu na vlastních površích. Pro určení množství adsorbovaného jódu byly poblíž buněk (vně vyhřívané komory) umístěny gama detektory. Na konci každého testu byly adsorpční buňky rozebrány a důkladně vyčištěny.

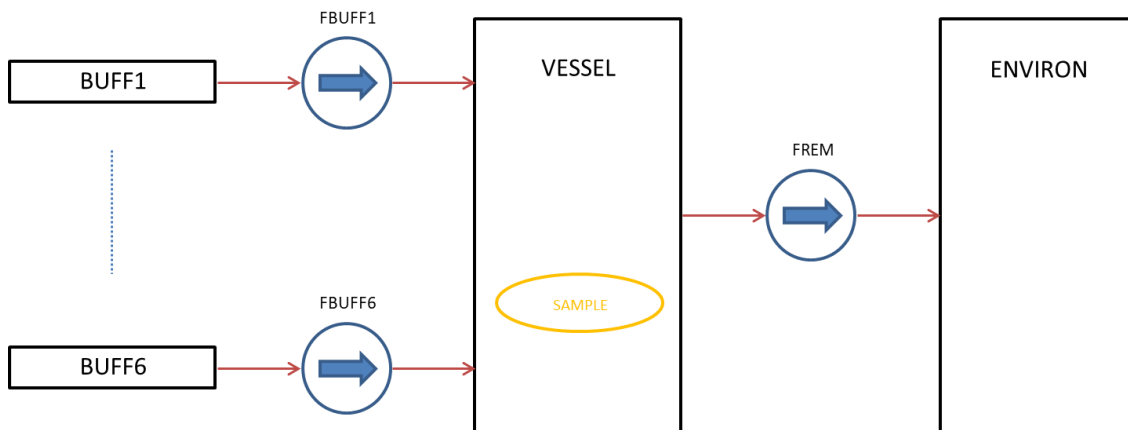
Nodalizace

Pro potřeby výpočtů byl na základě dostupné dokumentace vytvořen výpočetní model v programu COCOSYS, který sestává z několika kontrolních objemů a systémů ventilace zajišťujících cirkulaci hmoty.

Základním kamenem nodalizace je kontrolní objem reprezentující experimentální komoru se vzorkem (VESSEL). Dále jde o zónu okolí (ENVIRON) a zóny BUFF1 až BUFF6. Tyto zóny slouží jako zásobníky vzduchu o definované vlhkosti, teplotě, tlaku a koncentraci jódu (pouze u objemů se sudým číslem, tj. BUFF2, BUFF4 a BUFF6) pro vstřik hmoty do experimentální jednotky VESSEL. Tento transfer hmoty je zajištěn pomocí ventilačních systémů FBUFF1 až FBUFF6. Počet použitých systémů závisí na typu vstřiku hmoty. Čas běhu jednotlivých systémů závisí na scénáři daného experimentu. Většina experimentů si vystačí se dvěma systémy. Obdobný systém je použit pro odtah hmoty ze zóny VESSEL do ENVIRON, konkrétně se jedná o systém FREM.

Z tepelných struktur je vzhledem k povaze experimentu modelován pouze vzorek pro adsorpci jódu. Grafické schéma modelu lze nalézt na Obr. 11.

Pro potřeby simulace šíření jódu bylo nutné provést speciální rozdělení do objemů, kompartmentizaci, která je v tomto případě totožná s termohydraulickou nodalizací. Vzorek je v rámci objemu IVESEL (reprezentujícím VESSEL) definován barvenou plochou, která odpovídá ploše vzorku.



Obr. 11 Schéma nodalizace experimentu IA v plynném prostředí

Přehled výpočtů a jejich počátečních a okrajových podmínek

Kompletní přehled realizovaných testů v rámci experimentu, potažmo výpočtů, je uvedeno v Tab. 9. Součástí uvedených dat jsou kompletní počáteční a okrajové podmínky jednotlivých testů a příslušných výpočtů.

Tab. 9 Přehled experimentů provedených v plynné fázi [40]

Výpočet	Test #	Materiál	Koncentrace plynného I ₂ [mol/dm ³]	Teplota [°C]	Relativní vlhkost [%]	Doba testu [h]	Časové rozložení [s]	
gc01	G-1	Ocel ThAl 316Ti	10 ⁻⁸	70	70	136.85	0 64303 158071 233606 492660	1.adsorpce 1.čištění 2. adsorpce 2. čištění konec
gc02	G-2	RMI typ A	10 ⁻⁸	70	70	90.95	0 78602 160349 235378 327420	1.adsorpce 1.čištění 2. adsorpce 2. čištění konec
gc03	G-3	RMI typ B	10 ⁻⁸	70	70	94.94	0 75033 172225 247256 341784	1.adsorpce 1.čištění 2. adsorpce 2. čištění konec
gc04	G-4	Stařený Ripolin	10 ⁻⁸	70	70	189.76	0 334511 683136	adsorpce desorpce konec
gc05	G-5	Stařený Amerlock	10 ⁻⁸	70	15-40-60	68.97	0 68262 75688 154741 161870 240926 248292	1.adsorpce, φ = 15% 1.čištění 2. adsorpce, φ = 40% 2. čištění 3. adsorpce, φ = 60% 3. čištění konec
gc06	G-6	Stařený Ripolin	10 ⁻⁸	70	15-40-60	70.46	0 75696 83201 162520 169818 249152 253656	1.adsorpce, φ = 15% 1.čištění 2. adsorpce, φ = 40% 2. čištění 3. adsorpce, φ = 60% 3. čištění konec
gc07	G-7	Epigrip Epoxy (1994)	10 ⁻⁸	70	70	115.34	0 72208 415224	adsorpce desorpce konec
gc08	G-8	Stařený Amerlock	10 ⁻⁸	30	70	98.46	0 86679	adsorpce desorpce

Výpočet	Test #	Materiál	Koncentrace plynného I ₂ [mol/dm ³]	Teplota [°C]	Relativní vlhkost [%]	Doba testu [h]	Časové rozložení [s]	
							354456	konec
gc09	G-9	Stařený Amerlock	10 ⁻⁸	50	70	100.60	0 255842 362160	adsorpce desorpce konec
gc10	G-10	RMI typ C	10 ⁻⁸	70	70	94.55	0 68616 162216 241668 340380	1.adsorpce 1.čištění 2. adsorpce 2. čištění konec
gc11	G-11	RMI typ D	10 ⁻⁸	70	70	94.55	0 68616 162216 241668 340380	1.adsorpce 1.čištění 2. adsorpce 2. čištění konec
gc12	G-12	Čerstvý Amerlock	10 ⁻⁸	70	70	169.82	0 338767 611352	adsorpce desorpce konec
gc13	G-13	Ocel ThAl 316Ti	10 ⁻⁸	70	70	194.00	0 75779 171620 250992 698400	1.adsorpce 1.čištění 2. adsorpce 2. čištění konec
gc14	G-14	Stařený Amerlock	10 ⁻⁸	50	15-40-60	69	0 61543 72462 148516 159651 231810 248400	1.adsorpce, φ = 15% 1.čištění 2. adsorpce, φ = 40% 2. čištění 3. adsorpce, φ = 60% 3. čištění konec
gc15	G-15	Stařený Ripolin	10 ⁻⁸	50	15-40-60	68.59	0 61360 74340 146477 159790 231929 246924	1.adsorpce, φ = 15% 1.čištění 2. adsorpce, φ = 40% 2. čištění 3. adsorpce, φ = 60% 3. čištění konec
gc16	G-16	Epigrip (1998)	10 ⁻⁸	70	70	93.33	0 68640 335988	adsorpce desorpce konec
gc17	G-17	Čerstvý Epigrip	10 ⁻⁸	70	70	189.09	0 404244 680724	adsorpce desorpce konec
gc19	G-19	Stařený Amerlock	10 ⁻⁸	30	80	44.24	0 61360 159264	adsorpce desorpce konec

Výpočet	Test #	Materiál	Koncentrace plynného I ₂ [mol/dm ³]	Teplota [°C]	Relativní vlhkost [%]	Doba testu [h]	Časové rozložení [s]	
gc20	G-20	Stařený Amerlock	10 ⁻⁸	50	27.5	48.22	0 79610 173592	adsorpce desorpce konec
gc21	G-21	Stařený Amerlock	10 ⁻⁸	70	10.89	92.96	0 65086 334656	adsorpce desorpce konec

Zhodnocení výsledků

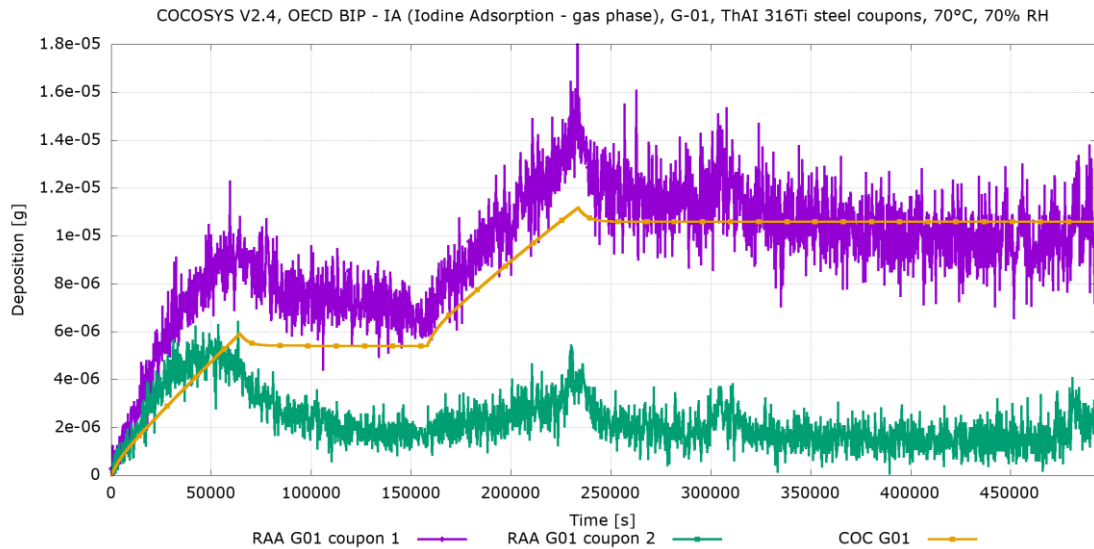
Vzhledem k rozsahu práci nejsou uvedeny kompletní grafické výsledky všech výpočtů, nicméně pro ilustraci jsou uvedeny ty nejzásadnější.

Celkové zhodnocení výsledků získaných pomocí výpočtů a jejich porovnáním s experimentem lze rozdělit do několika oblastí, zejména dle materiálu povrchu, na němž docházelo k depozici. Dle zmíněných kritérií lze konečné poznatky formulovat následovně:

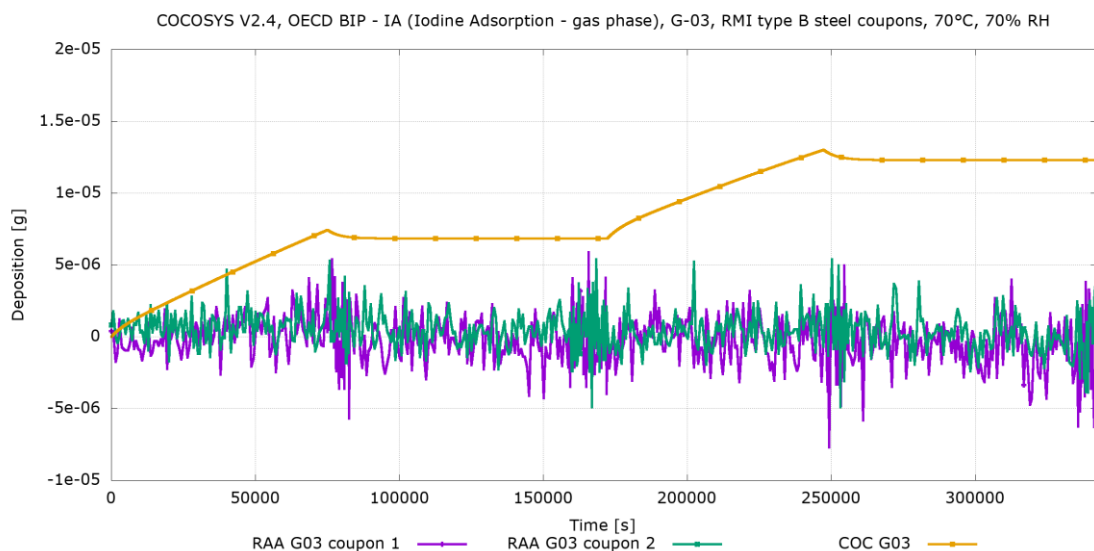
Vzorky získané z reflektivní izolace G-02, G-03 (Obr. 13), G-10 a G-11 vykazovaly nižší hodnoty depozice nežli jim příslušné výpočty. Tento jev je ovlivněn naladěním modelu na ocel AISI 316Ti.

- Ocelové vzorky G-01 (Obr. 12) a G-13 z oceli AISI 316Ti z experimentu ThAI jsou v dobré shodě s napočtenými hodnotami. Zejména první z testů potvrzuje validitu modelu implementovaném ve výpočetním kódu COCOSYS. Druhý z testů pak vykazoval shodu pouze v první fázi, dále byl zjištěn značný rozdíl. Je však nutné podotknout, že experimentální výsledky byly v druhé fázi nejspíše chybné.
- Důležitý rozdíl mezi napočtenými a experimentálními hodnotami, který byl pozorován u ocelových byla nižší desorpce jódu z ocelového povrchu. Tento efekt je zapříčiněn nesprávným poměrem mezi chemicky a fyzikálně vázaným jódem ve prospěch prvního zmíněného.
- U barvených povrchů lze pozorovat neshodu v oblasti desorpce barvy z povrchu. Oproti ocelovým povrchům je tento efekt ještě patrnější a desorpce je v porovnání s experimentálními daty velmi pomalá, prakticky zanedbatelná.
- Výpočty vůči vzorkům s barvou Amerlock (Obr. 15) vykazují, až na jednu výjimku, nižší predikované hodnoty nežli v případě experimentu. Trendy depozice však zůstávají shodné či velice blízké.
- Opačné výsledky vykazuje porovnání s nátěrem Epigrip (Obr. 16), který zejména v případě stařených vzorků, dosahuje výrazně nižší depozice nežli výpočet. Trendy obojího, opět až na velikost, odpovídají.

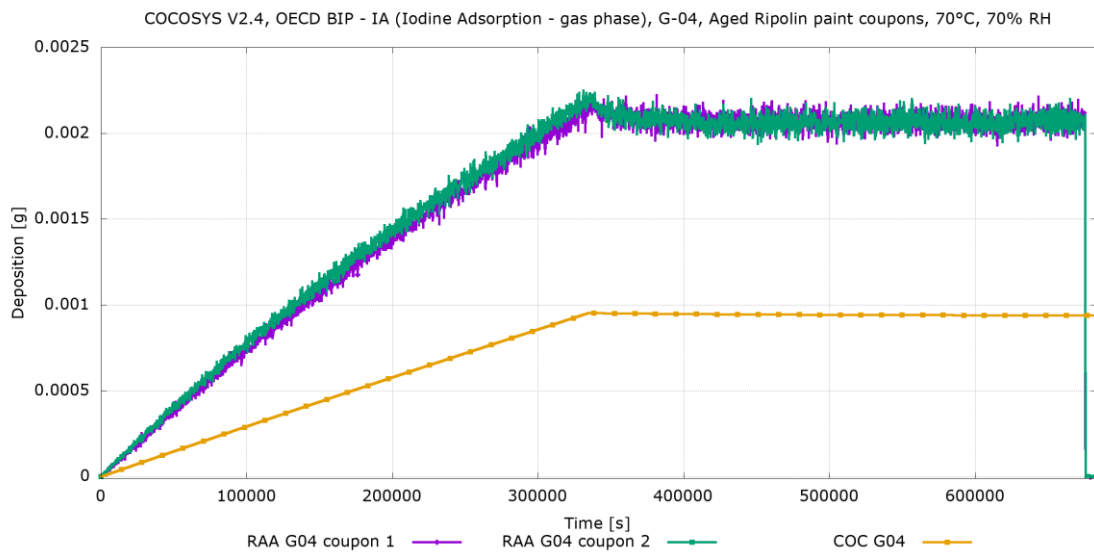
- U vzorků barvy Ripolin byly získány ambivalentní výsledky, kdy v případě testu s neměnnou vlhkostí došlo ke konzervativnímu odhadu adsorpce jódu (Obr. 14), v případě proměnné vzdušné vlhkosti byl výsledek nadhodnocený. Chování tohoto nátěru by bylo vhodné zkoumat na širším spektru vzorků.



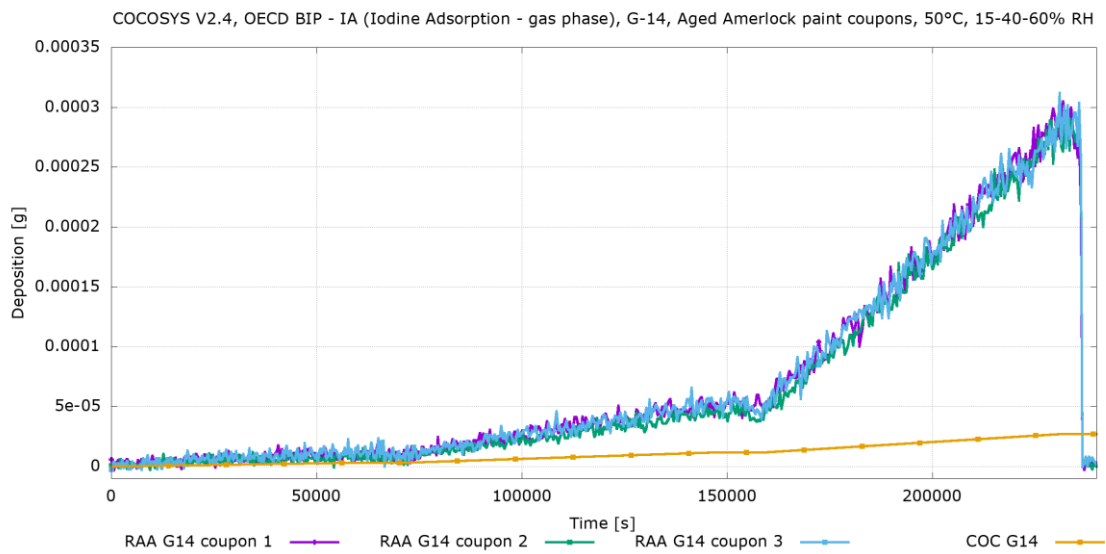
Obr. 12 Adsorpce jódu v plynném prostředí, test G-01



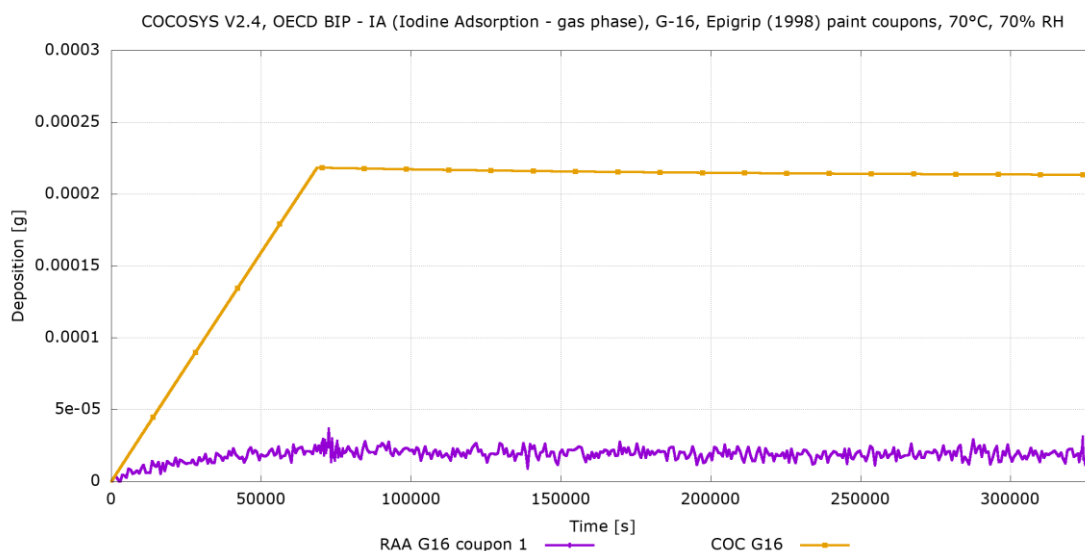
Obr. 13 Adsorpce jódu v plynném prostředí, test G-03



Obr. 14 Adsorpce jódu v plynném prostředí, test G-04



Obr. 15 Adsorpce jódu v plynném prostředí, test G-14

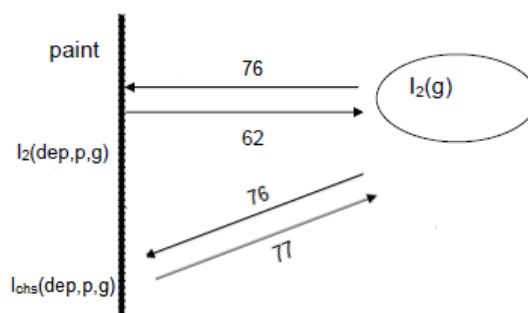


Obr. 16 Adsorpce jódu v plynném prostředí, test G-16

4.3.1.3 Adjustace modelu na suchém barveném povrchu

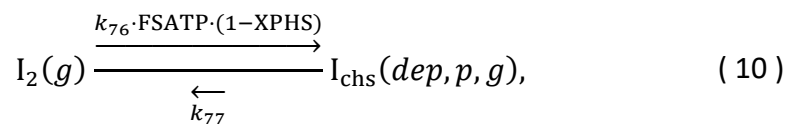
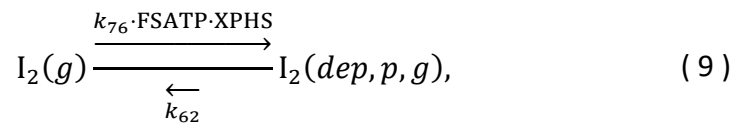
Přestože výsledky přinesly požadovaný konzervativní odhad, bylo přistoupeno k adjustaci modelu s cílem snížit přehnaně pesimistický odhad adsorpce. U výpočtů se vycházelo z již existujících modelů z předchozí kapitoly. Vzhledem k jednoduchosti zkoumaného efektu, byla požadovaná adjustace využita jako náplň výzkumného úkolu vedeného autorem této práce.

Kapitola 4.3.1 přinesla základní náhled na výpočetní model adsorpce jódu na suchém barveném povrchu. Schéma interakcí uvažovaných reakcí je uvedeno na Obr. 17. Pro potřeby dalšího bádání je však nutné model prozkoumat podrobněji. Rovnice uvedené v této kapitole vycházejí z dokumentace [26].



Obr. 17: Modelování chování jódu za podmínek bez kondenzace [26]

Molekulární atmosférický jód může podléhat interakci s barveným povrchem dvěma způsoby, přičemž oba jevy probíhají souběžně. Prvním je fyzikální adsorpce. Tato vazba není trvalá a může dojít k opětovné desorpci do volného objemu, viz rovnice (9). Kromě fyzikální adsorpce může také dojít ke vzniku pevné chemické vazby (chemisorpci). U této reakce se neuvažuje možnost desorpce zpět do volného objemu (reakční konstanta k_{77} je rovna 0), viz rovnice (10).



kde FSATP je bezrozměrná funkce značící absolutní hustotu páry (regulace vlivu vlhkosti a teploty na reakci chemisorpce, nelze ovlivnit uživatelem);

XPHS je rozdělovací faktor (splitting factor) určující frakci deponovaného a chemisorbovaného I_2 z celkového adsorbovaného množství,

$I_2(g)$ je koncentrace molekulárního jódu v plynné fázi, [mol l^{-1}],

$I_2(dep, p, g)$ je množství molekulárního jódu deponovaného na barvený povrch z plynné fáze, [mol m^{-2}],

$I_{chs}(dep, p, g)$ je množství jodidu vzniklého na povrchu reakcí jódu v plynné fázi a barvy (chemisorbovaný jód), [mol m^{-2}],

k_{76} , k_{62} a k_{77} jsou reakční konstanty jednotlivých chemických reakcí.

Rovnice pro výpočet teplotní závislosti reakční konstanty vychází z Arrheniovy rovnice (11):

$$k_i = BAS_i \cdot \exp \left[EAKT_i \left(\frac{T - 298,15}{RT \cdot 298,15} \right) \right] \quad (11)$$

Kde BAS_i představuje frekvenční faktor, $EAKT_i$ je aktivační energie, R molární plynová konstanta [$8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$], T teplota [K]. Hodnoty parametrů BAS_i a $EAKT_i$ jsou v případě potřeby modifikovatelné uživatelem.

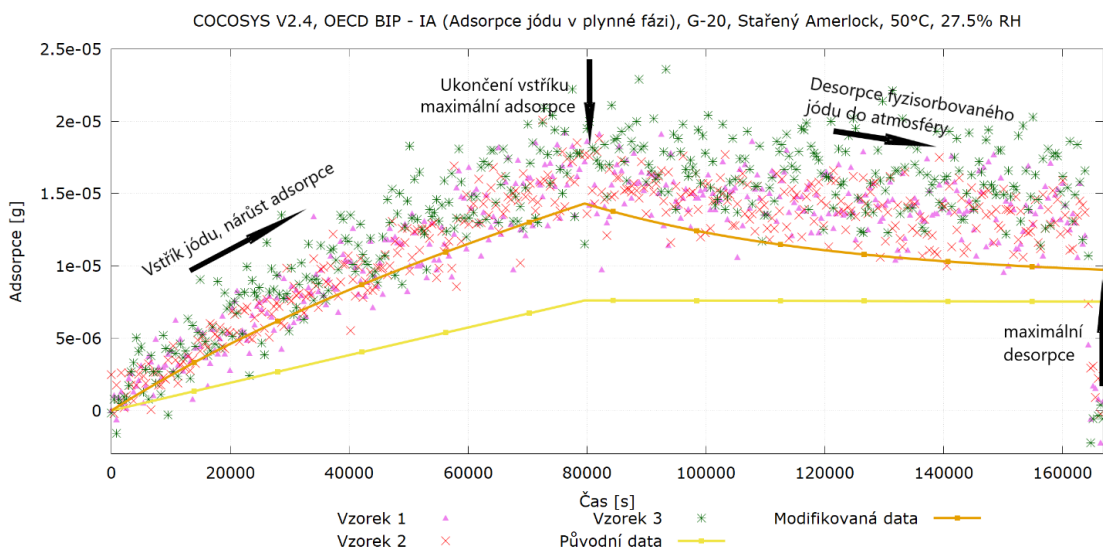
Modifikací hodnot BAS, EAKT a XPHS je možno adjustovat výpočetní model na konkrétní typ epoxidového nátěru, tj. získat výsledky blízké experimentálním hodnotám. Adjustace modelu byla zaměřena na nátěr Ameron Amerlock, který je použit na vnitřní plochy kontejnmentu ETE [43].

Vzhledem k rozmanitosti termohydraulických podmínek, které byly reprezentovány různými experimenty v rámci BIP IA, bylo potřeba najít takové hodnoty výpočetních parametrů, které by byly schopny vystihnout průběh adsorpce a desorpce I₂ ve všech případech s určitou mírou konzervativismu a dostatečnou reprezentací reality i přes omezení způsobená samotnou definicí modelu.

Jak je patrné z Obr. 18, původní křivka významně podhodnocuje celkovou adsorpci na zkoumaném vzorku. Kromě toho, je patrný i jiný trend adsorpce a desorpce, která je v případě původního výpočtu prakticky zanedbána.

Série ladicích výpočtů na všech experimentech dostupných s nátěrem Ameron Amerlock nakonec vedla k získání nové sady výpočetních parametrů, s jejichž použitím je dosaženo lepší reprezentace zkoumaného fenoménu.

Přehled o nastavení výpočetních parametrů BAS₁ a XPHS a porovnání hodnot těchto parametrů s původními hodnotami doporučenými návodem ke kódu COCOSYS je uvedeno v Tab. 10.



Obr. 18: Adsorpce jódu v plynném prostředí, test G-20, porovnání nastavení výpočetních modelů

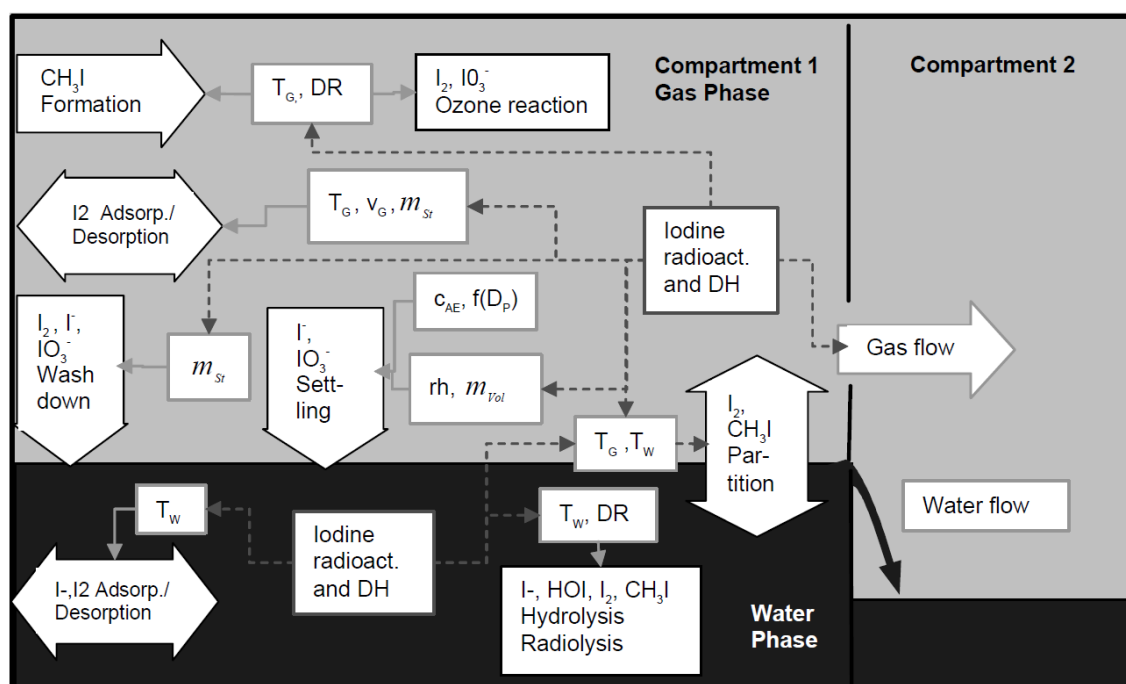
Tab. 10: Porovnání výchozích [26] a modifikovaných [44] hodnot parametrů BAS₁ a XPHS

Parametr	BAS ₁ (76)	BAS ₁ (62)	XPHS
Výchozí hodnota	1,0E-5	5,0E-9	0,1
Modifikovaná hodnota	7,5E-3	2,0E-6	0,6

4.3.2 Chemie jódu v jímce a fázový transport

Chemické chování jódu v jímce a na fázovém rozhraní představuje rozsáhlý problém, jehož popis vyžaduje množství chemických reakcí, která závisí nejen na chemických podmínkách uvnitř řešených objemů, ale i na geometrických faktorech jakými je plocha hladiny či dalších fyzikálních podmínkách jako je tlak, teplota či dávkový příkon od gama záření.

Existuje široké spektrum publikací zabývajících se separátními jevy či komplexním chováním jódu [46] - [51]. Základní náhled na komplexní problematiku je možné získat z Obr. 19



Obr. 19 Schéma chování jódu uvnitř objemu v závislosti na podmínkách [46]

4.3.2.1 Experiment RTF

Experimentální zařízení RTF bylo vybudováno v AECL Whiteshell Laboratories v Kanadě. Výstavba byla započata v roce 1986 a zařízení bylo spuštěno do provozu roku 1988. Poslední test byl proveden v listopadu 1998. V následujících letech došlo k vyřazení zařízení z provozu. [52], [53]

Zkoumané podmínky v rámci testů byly zaměřeny na určení volatility jódu, přičemž se jednalo o přítomnost pole ionizujícího záření, teplotu plynu, vodní fáze a povrchů, cirkulace plynné a vodní fáze, ventilace plynné fáze, vliv povrchových úprav, přítomnost různých chemikálií, pH a přítomnost kondenzačních podmínek. [52], [53]

Popis technologie

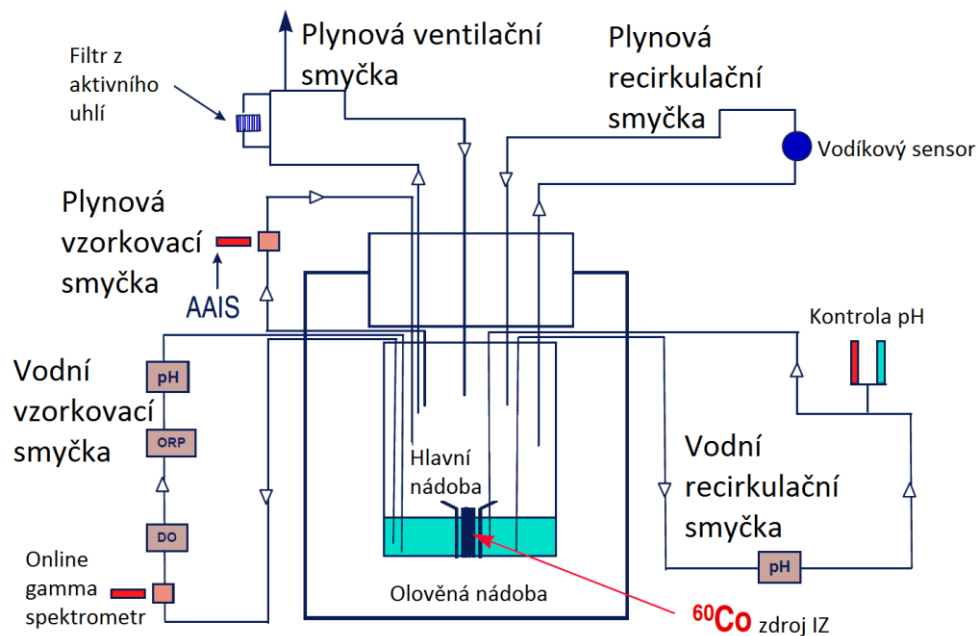
Zařízení RTF (Radioiodine Test Facility) sestává z vyměnitelné cylindrické nádoby z části vyplněné vodou, do níž může být umístěn zdroj ionizujícího záření, a dalších instrumentačních systémů, které jsou k ní připojeny. Samotná nádoba je vyrobena z uhlíkaté nebo nerezové oceli. V případě uhlíkaté oceli byly povrchy nádoby pokryty vrstvou různých materiálů tak, aby simulovaly povrchy přítomné uvnitř kontejneru. Nerezavějící ocelová nádoba byla ponechána bez dalších vrstev, pouze v některých případech bylo provedeno elektrošetění pro minimalizaci interakcí mezi jódem a povrchem. [52], [53]

Při typických RTF experimentech bylo do nádoby nalito 25 dm³ vody, přičemž zbývalo 315 dm³ pro plynnou část. Konkrétní hodnoty pro jednotlivé experimenty jsou uvedeny v příslušných zprávách a mohou se oproti standardním hodnotám lišit. [52], [53]

Samotná instrumentace zařízení se nachází uvnitř i vně hlavní nádoby. V jejím okolí jsou umístěné ohříváky pro kontrolu teploty vody (až 90 °C) a povrchu (až 110 °C). Kromě ohřevu bylo v některých případech možno povrch zvenčí chladit pomocí cirkulujícího média v obtočených trubkách. [52], [53]

Hlavní nádoba je napojena na několik smyček s různými účely použití. Primárním cílem však bylo zajištění dostatečné recirkulace materiálu uvnitř nádoby. Komponenty smyček byly vyrobeny s ohledem na maximální inertnost vůči jódu. Prvotní pokusy s ocelí 316L poukázaly na značné množství jódu v nich zachyceném, tudíž byla nahrazena ocelí se skleněnou vystýlkou. V případě testů realizovaných při vyšší teplotě (nad 25 °C) byly smyčky mírně nahřívány tak, aby nedošlo ke kondenzaci. Průtoky smyčkami byly variabilní pro jednotlivé experimenty. Kompletní termohydraulické podmínky testů jsou uvedené v příslušných zprávách [54] - [58].

Pro podrobnější zkoumání vlivu ionizujícího záření bylo zařízení vybaveno kobaltovými gama zářiči. Ty byly ve formě tyček zapouzdřených v obalu z nerezavějící oceli 316L. Zdroje bylo možné umístit do středu nádoby ve vertikální poloze do speciálního držáku. Tyčky měly délku 452 mm a vnější průměr 11 mm. Vydatnosti zdrojů ionizujícího záření byly dodavatelem k 27 březnu 1986 specifikovány na 3,010 Ci, 3,191 Ci, 3,240 Ci a 3,200 Ci s možnou odchylkou 5 %. Na základě výpočtů byl určen dávkový příkon od těchto zdrojů přibližně 2,0 kGy/h k březnu 1989. Neurčitost je v tomto případě neznámá, nicméně byla provedena řada dozimetrických měření v témže období dokazujících dobrou shodu s výpočty. [52]



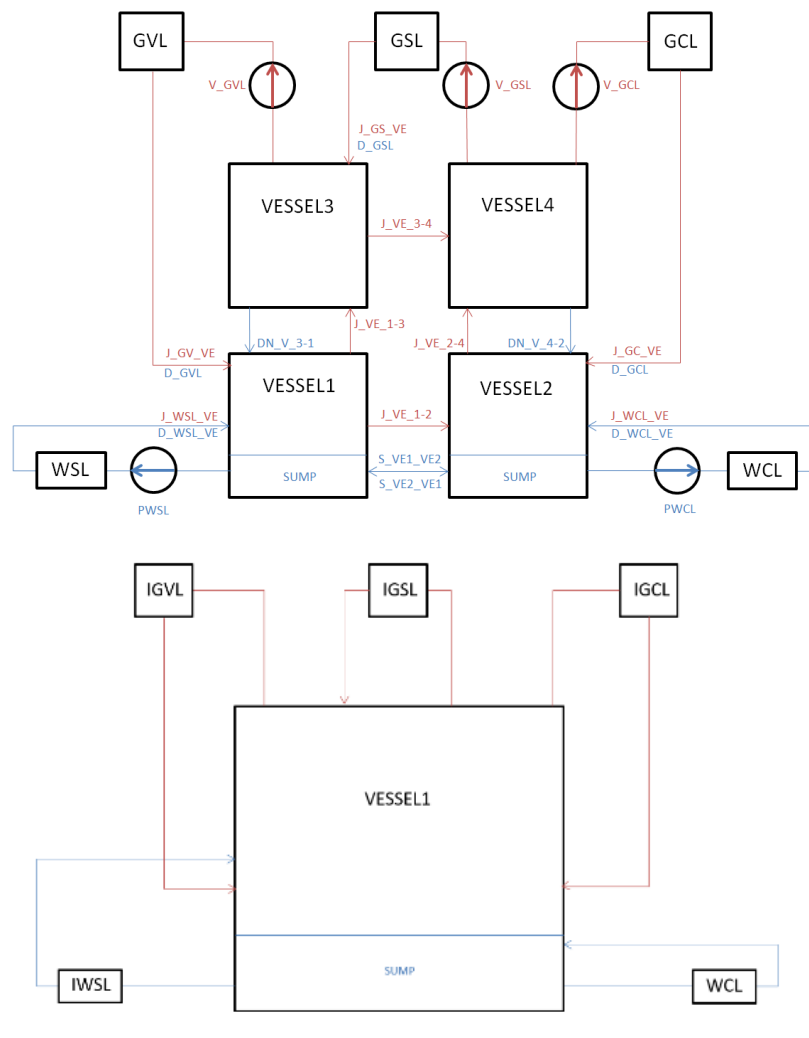
Obr. 20 Schéma zařízení RTF (upraveno z [53])

Nodalizace experimentu RTF v programu COCOSYS

Experimentální zařízení RTF bylo v rámci programu COCOSYS modelováno s maximálním ohledem na skutečné uspořádání. V souladu s doporučeními a praktickými zkušenostmi z modelování termohydraulické části byl hlavní objem zařízení rozdělen do čtyř samostatných objemů, které jsou mezi sebou propojeny spojkami pro vodu a atmosféru. Cílem této nodalizace je zajištění odpovídajícího proudění uvnitř objemu hlavní nádoby. Dále jsou připojeny technologické smyčky zajišťující proudění vody a atmosféry. Tok hmoty ve smyčkách je realizován komponentami simulujícími čerpadla a ventilační zařízení. Kromě samotného experimentu byly modelovány dva nody simulující okolí experimentu a sloužící zároveň jako okrajová podmínka úlohy. Pro přehlednost nejsou na Obr. 21 uvedeny.

Kromě objemů, spojek, čerpadel a ventilačních systémů byly dále modelovány i tepelné struktury.

Pro potřeby výpočtů chování jódu a jeho sloučenin bylo provedeno rozdělení modelovaného objemu do kompartmentů. Dle doporučení manuálu výpočetního kódu a na základě zkušeností z jiných modelů a výpočtů došlo ke sloučení zón VESSEL 1 až 4 do jediného kompartmentu IVESEL. Technologické okruhy simulující systémy pro cirkulaci vody a plynu jsou modelovány samostatnými kompartmenty. Dále byl definován kompartment simulující okolí zařízení (IENVI), do něhož jsou zařazeny dva termohydraulické nody, které fungují jako okrajová podmínka úlohy. Kompletní nodalizace je patrná z Obr. 21.



Obr. 21 Nodalizace zařízení RTF (nahore termohydraulická nodalizace, dole nodalizace pro transport jódu)

Phase 9 Test 1

Experiment byl prováděn s kobaltovým zářičem, který byl umístěn do nádoby zhruba týden před začátkem měření. V rámci příprav byla nádoba propojena s instrumentací a taktéž došlo k naplnění vodou pro otestování těsnosti a tlaku. Následně byly provedeny testy instrumentace a její kalibrace. Kompletní počáteční a okrajové podmínky během experimentu jsou uvedeny v Tab. 11. Další informace včetně scénáře testu lze dohledat v Tab. 12 až Tab. 14.

Tab. 11 Počáteční a okrajové podmínky Phase 9 Test 1 [56]

Podmínka	Hodnota
Materiál nádoby	Nerezavějící ocel 316L
Provozní teplota	Jímka 60 ± 2 °C, neponořené stěny $55 - 60 \pm 2$ °C
Vstřikovaná forma jódu	6.5×10^{-6} M CsI
Počáteční pH	~10 (kontrolované)
Průtok vodní cirkulační smyčkou	10 l/min
Průtok vodní vzorkovací smyčkou	1 l/min
Průtok plynovou cirkulační smyčkou	20 l/min
Průtok plynovou ventilační smyčkou	10 l/min
Průtok plynovou vzorkovací smyčkou	~1 – 2 l/min
Dávkový příkon	0.78 kGy/h⁴
Objem vody	38.5 l
Objem plynu	301.5 l
Plocha rozhraní voda/plyn	37.2 dm²
Vzorky ve vodě	3 válečky (každý 5.7 cm²)
Vzorky v plynu	3 válečky (každý 5.7 cm²)

Tab. 12 Suché povrchy Phase 9 Test 1 [56]

Komponenta	Materiál povrchu	Povrch [dm ²]
Nádoba	Nerezavějící ocel 316L	221.1
Koš zdroje IZ	Nerezavějící ocel 316L	20.1
Držák zdroje IZ	Nerezavějící ocel 316L	17.8
Plynová recirkulační smyčka	Nerezavějící ocel	18
Plynová ventilační smyčka	Nerezavějící ocel	33.5
Plynová vzorkovací smyčka	Nerezavějící ocel se skleněnou vystýlkou	16

⁴ Dávkový příkon byl při výpočtu uvažován jak v plynné, tak v kapalně části objemu nádoby.

Tab. 13 Smáčené povrchy Phase 9 Test 1 [56]

Komponenta	Materiál povrchu	Povrch [dm ²]
Nádoba	Nerezavějící ocel 316L	51.5
Koš zdroje IZ	Nerezavějící ocel 316L	3.9
Držák zdroje IZ	Nerezavějící ocel 316L	5.5
Vodní recirkulační smyčka	Nerezavějící ocel	27.2
Vodní vzorkovací smyčka	Nerezavějící ocel	13.3

Tab. 14 Scénář Phase 9 Test 1 [56]

Čas [h]	Událost
-3.5	Začátek čištění vzduchu
-3.25	Přidání čisté vody do nádoby Začátek cirkulace ve smyčkách
-2.5	Konec čištění vzduchu
-2.25	Kontrola a kalibrace I&C
0	Vstřík jódu
71	Snížení pH na 9
117	Snížení pH na 8
192	Snížení pH na 7
235	Snížení pH na 6.5 (pH čidlo 1 vyměněno)
286	Snížení pH na 6
336	Snížení pH na 5
432	Zvýšení pH na 9
433	Selhání pumpy vodní vzorkovací smyčky (hodnoty pH na čidle 2 diskutabilní)
441	pH čidlo 1 odpojeno
458	Selhání vodíkového detektoru (kondenzace v těle čidla)
500	Ukončení testu

Výsledky a porovnání

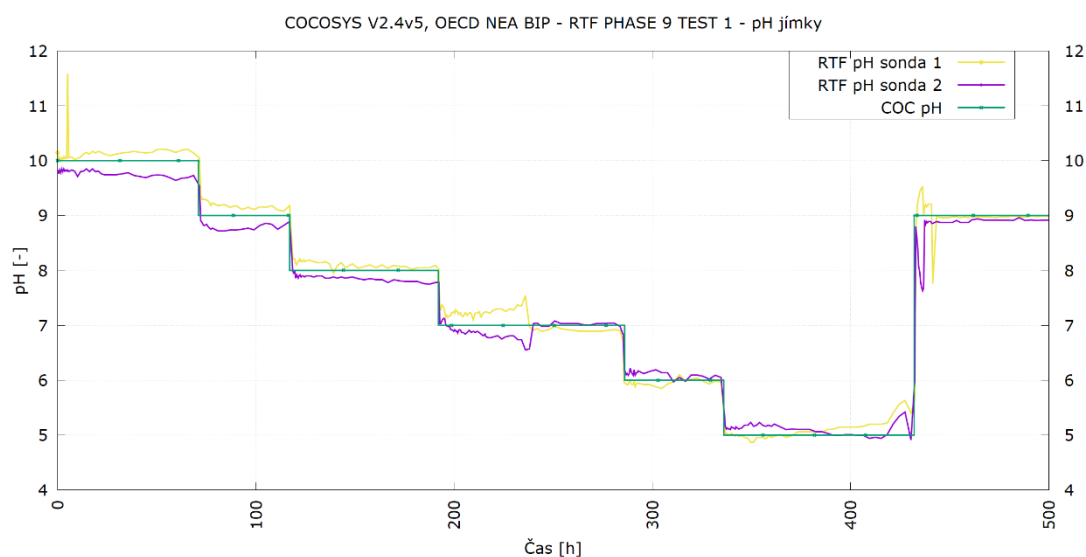
V rámci vyhodnocování výsledků byl kladen důraz na porovnání hodnot se samotným experimentem. Porovnávány jsou tedy následující veličiny:

- Atmosféra
 - Celková koncentrace jódu⁵
 - Koncentrace I₂

⁵ Z dostupné dokumentace nebylo možné určit, které formy jsou v celkovém součtu uvažovány. Na základě porovnání výsledků a sledování chování bylo rozhodnuto, že u výpočtů bude z této sumy odstraněna komponenta organických sloučenin.

- Jímka
 - Celková koncentrace jódu (všechny uvažované formy)
 - Koncentrace I_2 , I^- , IO_3^- a organických forem

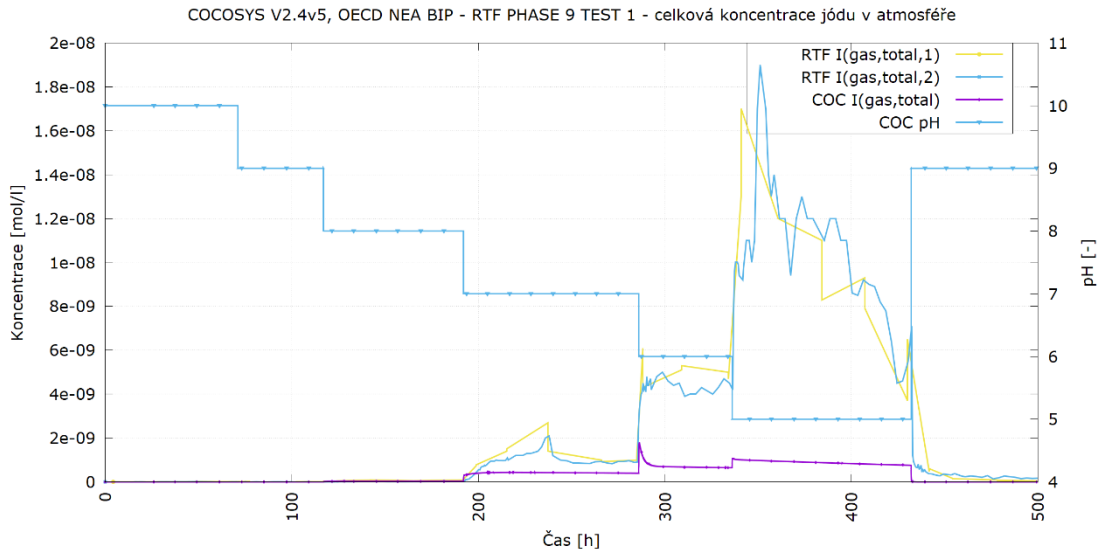
Průběh pH v jímce byl extrahován z dostupných experimentálních dat a posloužil tak jako okrajová podmínka úlohy. Grafickou interpretaci lze vidět na Obr. 22.



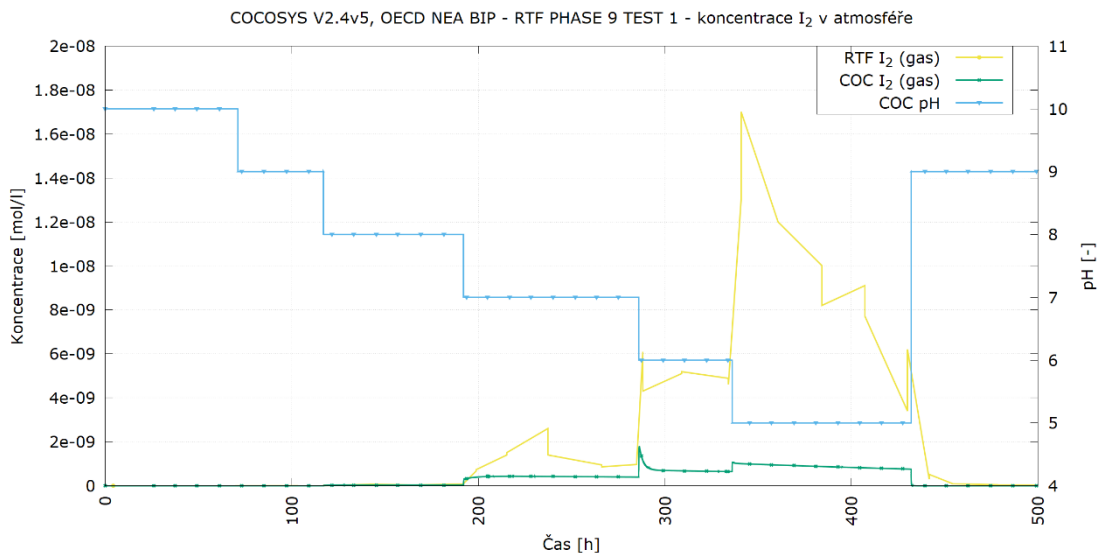
Obr. 22 P9T1 - pH jímky, 0 - 500 h, kompartment IVESSEL

Atmosféra

Z výsledků uvedených na Obr. 23 a Obr. 24 je patrné, že vypočtená koncentrace plynného jódu je v obou případech silně podhodnocena (prakticky veškerý plynný jód je ve formě I_2). Je však zároveň viditelné, že změny v koncentraci vznikají ve stejných časech a korespondují se změnami pH. K formaci plynných sloučenin jódu dochází zejména při pH v rozsahu 5 až 7, přičemž s rostoucím pH dochází ke snížení koncentrace v plynném objemu.



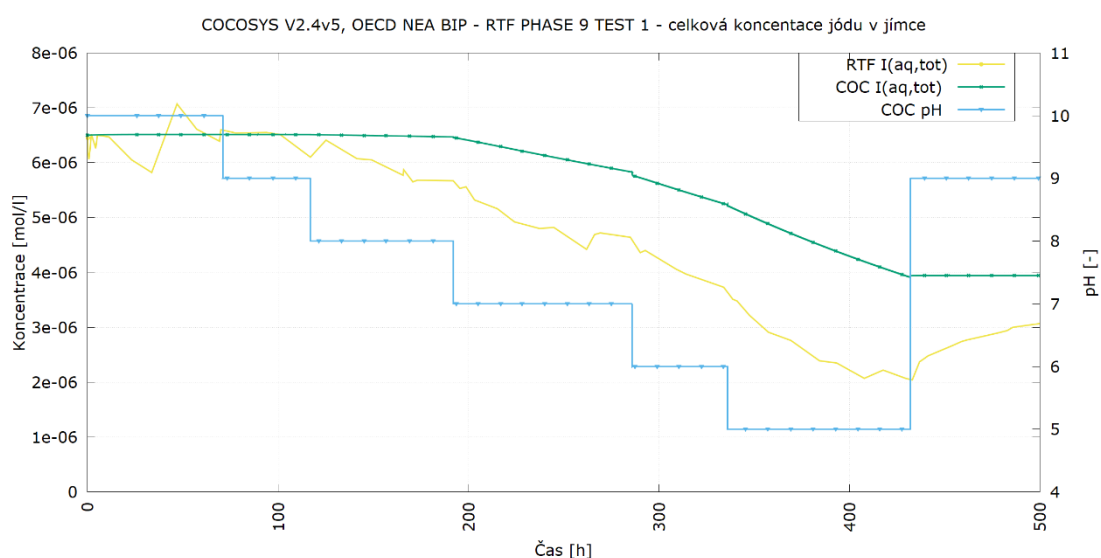
Obr. 23 P9T1 - celková koncentrace jódu, pH, atmosféra, 0 - 500 h, kompartment IVESSEL



Obr. 24 P9T1 - koncentrace I₂, pH, atmosféra, 0 - 500 h, kompartment IVESSEL

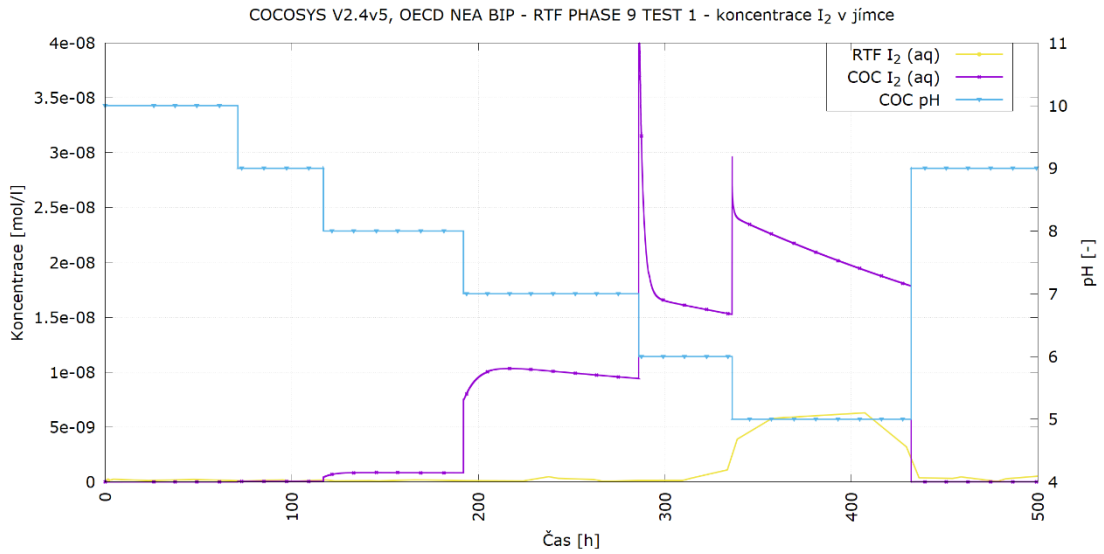
Jímka

Celková koncentrace jódu v jímkové části vykazuje ve větší části výpočtu shodný průběh s celkově vyšší napočtenou koncentrací ve větší části časového úseku. Rozdíly jsou pak patrné od ca 430 hodin, kdy jsou napočtené výsledky podhodnoceny. Současně neodpovídá ani rostoucí trend. Chování jódu by, dle dostupných experimentálních výsledků mělo reagovat na měnící se pH. Při klesajícím pH dochází k poklesu celkové koncentrace (přestup do jiných forem – plynných, depozice), avšak při jeho nárůstu by mělo taktéž docházet k nárůstu koncentrace. Tento efekt bude potřeba do budoucna dále podrobněji prozkoumat. Výsledky jsou patrné z Obr. 25.



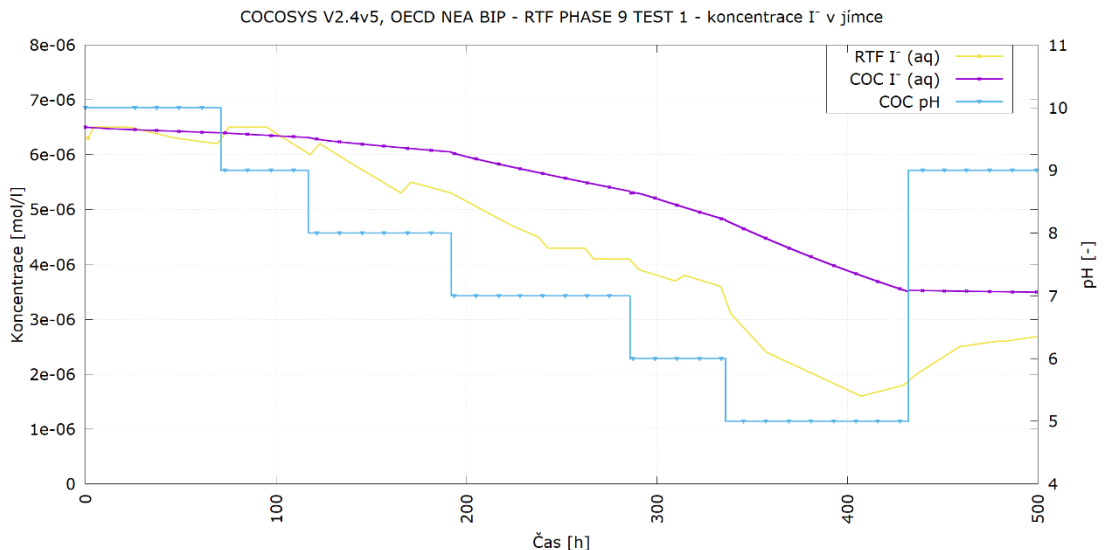
Obr. 25 P9T1 – celková koncentrace jódu, pH, jímka, 0 - 500 h, kompartment IVESSEL

Koncentrace elementárního jódu v jímce je v případě výpočtu silně nadhodnocena zejména do zhruba 330 hodin, následně jsou výsledky bližší naměřeným hodnotám, avšak trendy nekorespondují. Na výsledcích je zároveň patrný značný vliv pH, který je v případě výpočtu silně nadhodnocen. Při porovnání s podhodnocenou koncentrací I_2 v atmosféře lze předpokládat, že nadhodnocená koncentrace I_2 v jímce souvisí s podhodnocením koncentrace I_2 v atmosféře. Tento efekt bude potřeba dále důkladně prozkoumat. Grafickou interpretaci výsledků lze pozorovat na Obr. 26.



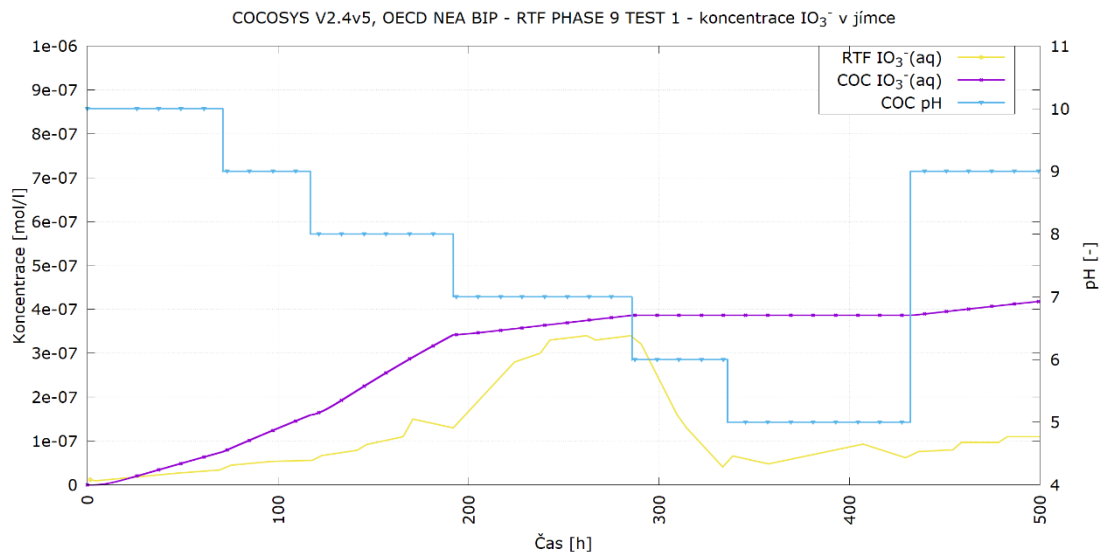
Obr. 26 P9T1 - koncentrace I_2 , jímka, 0 - 500 h, kompartment IVESSSEL

Koncentrace I^- v jímce je celkově nadhodnocena. Trend koncentrace je až do přibližně 400 hodin blízký experimentálním datům, nicméně v pozdější fázi dochází ke zdatelné odchylce. Obecně lze konstatovat, že podobný efekt byl pozorován i u celkové koncentrace, jelikož I^- zde představuje hlavní sloučeninu jódu. Grafické zhodnocení výsledků je uvedeno na Obr. 27.



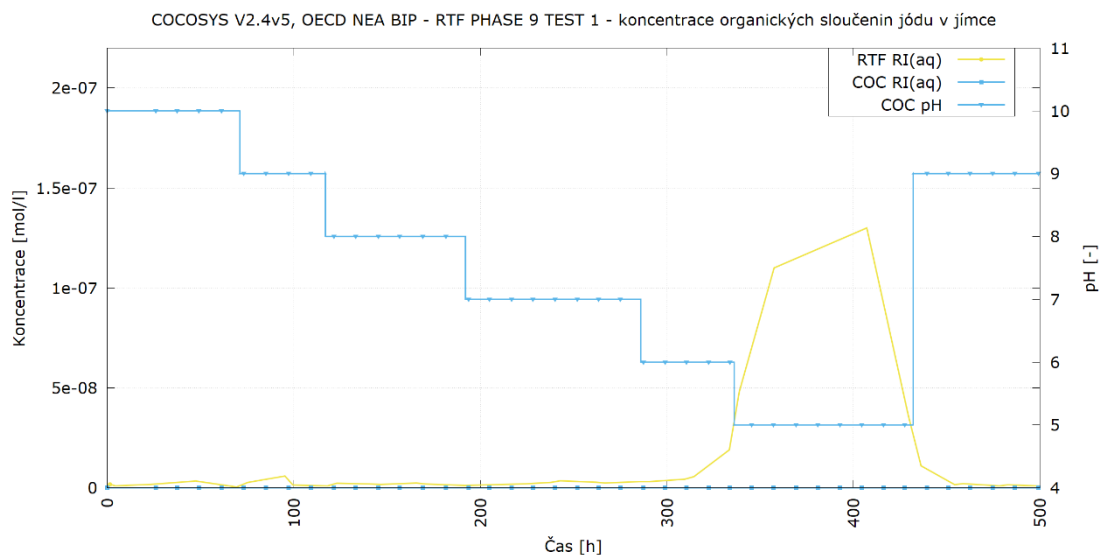
Obr. 27 P9T1 - koncentrace I^- , jímka, 0 - 500 h, kompartment IVESSSEL

Koncentrace IO_3^- v jímcce je v případě výpočtu mírně nadhodnocena do zhruba 300 hodin. Následně dochází k odhadu odlišného trendu v časovém horizontu do zhruba 330 hodin, přičemž v pozdější fázi trendy odpovídají. Patrný je zejména rozdíl v koncentraci od zmíněných 300 hodin, kdy výpočet významně nadhodnocuje koncentraci. Výsledky jsou patrné z Obr. 28.



Obr. 28 P9T1 - koncentrace IO_3^- , jímkca, 0 - 500 h, kompartment IVESEL

Koncentrace organických sloučenin jódu je v případě výpočtu kódem COCOSYS nezachytitelná, jelikož v počátečních podmínkách nebyl definován žádný materiál, ze kterého by mohly vzniknout. Je otázkou, z čeho se organické formy zformovaly v případě experimentu. Výsledky jsou patrné z Obr. 29.



Obr. 29 P9T1 - koncentrace organických jódových sloučenin, jímkca, 0 - 500 h, kompartment IVESEL

Celkové zhodnocení výsledků přepočtu experimentů RTF

Napočtené výsledky odhalily nesoulad v několika oblastech. Tou první je koncentrace v atmosféře, kde napočtené hodnoty jsou prakticky o řád nižší. Tento problém tkví zejména v přestupu I_2 mezi kapalnou a plynnou oblastí. Druhý zásadní rozdíl představuje koncentrace IO_3^- v jímce, kdy není reflektován prudký pokles při nízkých hodnotách pH. Další neshody byly odhaleny zejména v nadhodnocené koncentraci I_2 v jímce a taktéž v případě I^- , jehož koncentrace byla obecně nadhodnocená a nevhodně reflektovala na rostoucí pH ke konci výpočtu. Zásadní rozdíl byl dále zaznamenán v případě organických sloučenin, zde jde však o problémy způsobené počátečními a okrajovými podmínkami, případně nevhodným měřením u experimentu. Řešení zmíněných problémů lze nalézt v přenastavení reakčních konstant v rovnicích definujících chování jódu, zejména v oblasti přestupu z jímky do atmosféry a adsorpce na površích. Další vliv by mohl být zapříčiněn i parazitní adsorpcí jódu na površích cirkulačních smyček.

Získané zkušenosti a výsledky lze shrnout následovně

- Jímka
 - Koncentrace I_2 je ve všech případech nadhodnocena, z čehož lze uvažovat, že nedochází k odpovídajícímu přestupu do plynné části objemu.
 - Koncentrace I^- je obvykle nadhodnocena či nedochází k odpovídajícímu poklesu, tj. nedochází k odpovídající přeměně na další chemické formy jódu či depozici na površích.
 - Koncentrace organických sloučenin je vždy silně podhodnocena, tj. nedochází k jejich odpovídajícímu uvolňování z natřených povrchů.
 - Shoda v oblasti koncentrace IO_3^- závisí na zkoumaném případě, často dochází k nadhodnocení, které je povětšinou pod úrovní jednoho řádu, v některých případech bylo dosaženo shody.
- Atmosféra
 - Koncentrace I_2 v atmosféře obecně dobře reflektuje změny pH. Testy s barvenými povrchy obecně vykazují lepší shodu.
 - Celková koncentrace jódu v atmosféře je v případě testů s ocelovým povrchem podhodnocena přibližně o 1,5 řádu, u testů s barveným povrchem je tento rozdíl menší.

4.3.3 Transport štěpných produktů a termohydraulika kontejnmentu

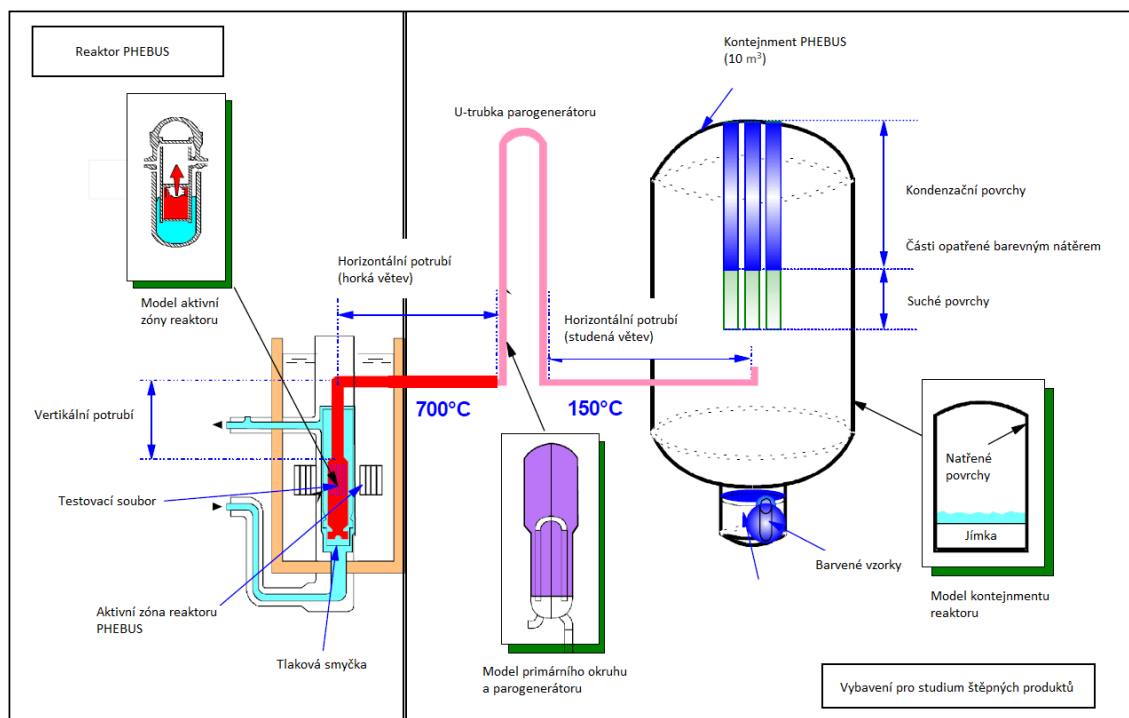
Poslední ze zmíněných validačních úloh je integrální experiment PHEBUS zaměřený na celkové chování kontejnmentu během havárie s únikem chladiva. V případě této úlohy je zkoumána jak termohydraulická odezva ochranné obálky během přechodového procesu, tak i transportní procesy spojené se širokým spektrem štěpných produktů významných z pohledu LOCA havárie, mezi které patří jód, aerosoly a vzácné plyny.

4.3.3.1 Experiment PHEBUS

Popis vychází ze zpráv [59] - [63].

Zařízení sestává z následujících základních částí: řídicího jádra a chladicího okruhu, tlakové vodní smyčky, svazku palivových tyčí, vstřikovacího okruhu, experimentálního vybavení pro studium štěpných produktů a nádoby kontejnmentu.

Jaderné palivo uložené uvnitř řídicího reaktoru je umístěno v reaktoru a celá smyčka je uzavřena a tlakována. Po dosažení podmínek, kdy dojde k poruše hermetičnosti paliva, unikají štěpné produkty dále skrze potrubí simulující primární okruh včetně u-trubky parogenerátoru až do kontejnmentu.

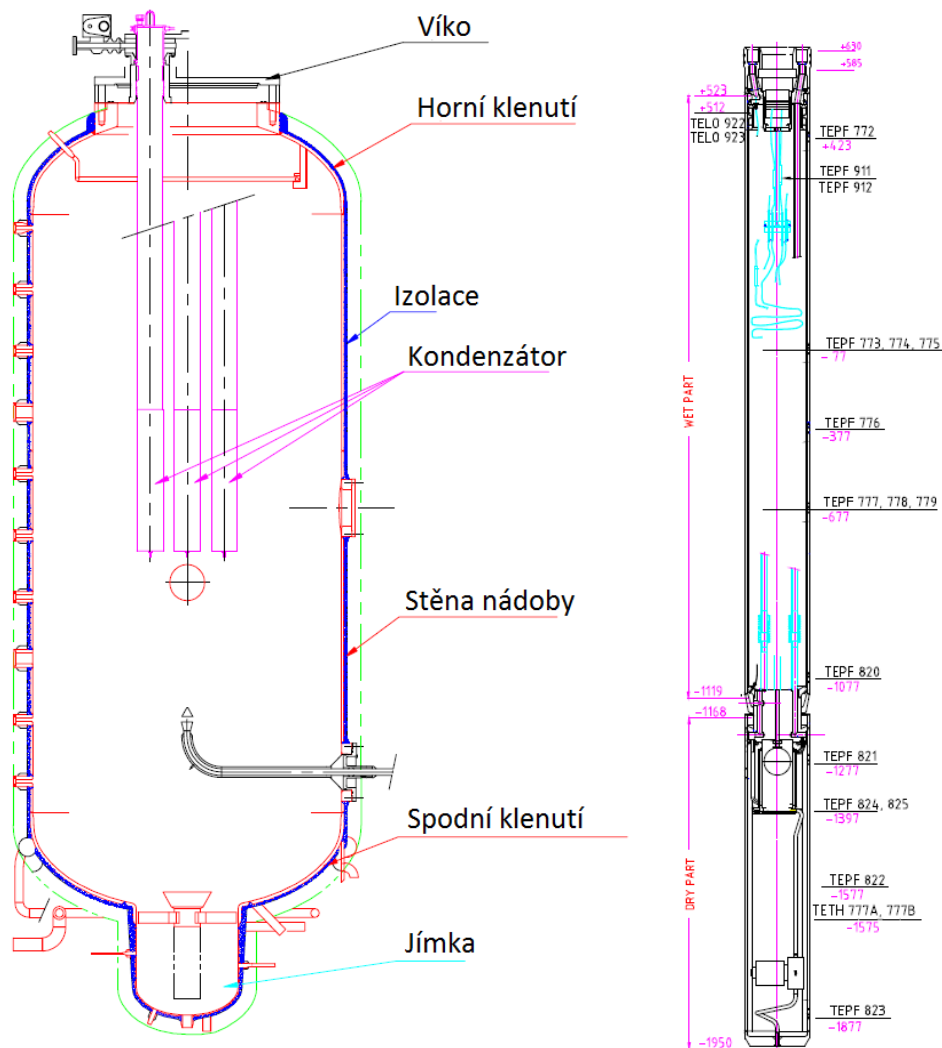


Obr. 30 Schéma zařízení PHEBUS FPT (upraveno z [59])

Kontejnment

Kontejnment jaderné elektrárny je simulován za pomoci válce o objemu 10 m^3 , který je přímo napojen na poslední část horizontální trasy reprezentující studenou smyčku primárního okruhu. V objemu kontejnmentu dochází k hromadění aerosolů, plynů, vodíku a páry. Experimentální trasa vstupuje do objemu kontejnmentu ve spodní část nad prostorem jímky a končí injekčním kuželem orientovaným na kondenzátor. Stěny kontejnmentu jsou vyrobeny z elektroleštěné oceli AISI 316 L. Tyto stěny jsou dále vybaveny třemi nezávislými systémy pro regulaci teploty: pro vertikální stěny a kupoli; pro eliptické dno; pro stěny jímky. Stěny jímky jsou nahřívány kvůli zamezení kondenzace a depozice aerosolů. Jímka ve spodní části kontejnmentu je vybavena vodní recirkulační smyčkou. Gravitační usazování aerosolů je očekáváno na eliptickém dně kontejnmentu a na povrchu jímky. Spodní část kontejnmentu je vybavena sprchovacím systémem pro smývání usazených aerosolů z eliptického dna a do jímky s využitím vody z jímky.

Kupole je vybavena skupinou tří kondenzátorů natřených epoxidovou barvou RIPOLIN, využívanou ve francouzských jaderných elektrárnách. Ty slouží ke kontrole kondenzace, a tudíž simulaci studených struktur budovy kontejnmentu. Kondenzační prostor je rozdělen do dvou sekcí: kondenzační „vlhká“ část o ploše $0,775 \text{ m}^2$ na kondenzátor; nekondenzační „suchá“ část o ploše $0,336 \text{ m}^2$ na kondenzátor. Spodní část každého kondenzátoru je udržována suchá pomocí ohříváků a je opatřena vybavením pro zachytávání kondenzátu z vrchní, studenější části. Jakmile dojde k naplnění zachytávačů kondenzátu, jsou sekvenčně vypouštěny do jímky.



Obr. 31 Vertikální řez kontejnmentem (vlevo) a kondenzátorem (vpravo) (upraveno z [59])

Pro potřeby výpočtu ve výpočetním programu COCOSYS je potřeba provést odpovídající nodalizaci, která sestává z definice kontrolních objemů, spojek pro proudění hmoty a energie, tepelných struktur, inženýrských systémů, vstřiků hmoty a samozřejmě počátečních a okrajových podmínek. Zároveň byla provedena i odpovídající zjednodušená nodalizace pro simulaci šíření jódu.

Termohydraulická nodalizace

Vzhledem k umístění čidel monitorujících teplotní profil uvnitř nádoby a taktéž vlhkost, bylo zvoleno podrobné rozdělení celého objemu jak po výšce, tak i po průměru (ZC – centrální objemy, ZW objemy u stěny nádoby, ZM – objemy mezi ZC a ZW). Vertikální členění objemů je voleno tak, aby měřicí čidla se nacházela přibližně ve středu vertikální sekce. Zároveň je kladen důraz i na existenci kondenzátorů. Každá horizontální sekce je

rozdělena do vnější, střední a vnitřní části. Jímka je modelována jako samostatný objem s definovaným objemem vody.

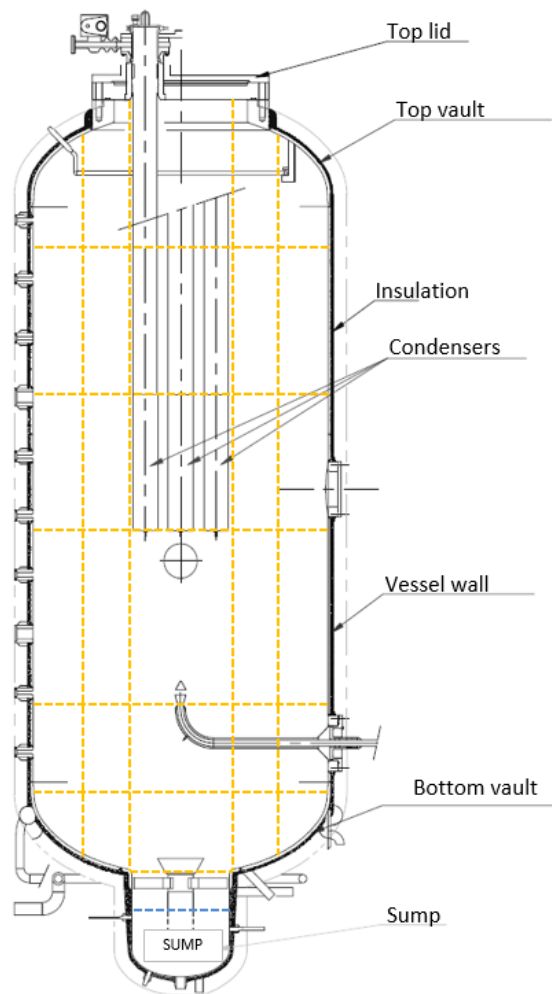
Kromě termohydraulických objemů byly dále definovány i tepelné struktury. Jedná se zejména o stěny nádoby kontejnmentu, jímky a kondenzátory. Stěny kontejnmentu byly rozděleny vertikálně dle dostupné dokumentace a přidruženy k odpovídajícím zónám. Tepelné vedení kondukcí nebylo mezi jednotlivými strukturami uvažováno. U všech tepelných struktur je uvažována kontrola teplot podobně jako v reálném experimentu. Pro potřeby výpočtu byla zvolena jako okrajová podmínka teplota na stěně mimo kontejnment s konstantním součinitelem přestupu tepla.

Samostatnou kapitolou je modelování kondenzátorů. Ty se nacházejí v centrálních zónách a k jejich řešení bylo přistupováno následovně. Všechny tři kondenzátory byly v rámci jedné úrovně sloučeny do jedné tepelné struktury, přičemž celkový povrch a charakteristické rozměry odpovídají realitě a doporučení manuálu k programu. V horizontálním směru došlo k rozdělení na tři části, tj. dvě vlhké a spodní, suché. Mezi oběma vlhkými částmi kondenzátoru je uvažováno stékání kondenzátu. Kondenzát stékající se následně hromadí v uměle definované jímcce, která simuluje nádoby pro sbírání kondenzátu. Pokud je dosaženo určité hladiny kondenzátu, je tento přesunut spojkou pro vodu do jímky podobně jako v experimentu.

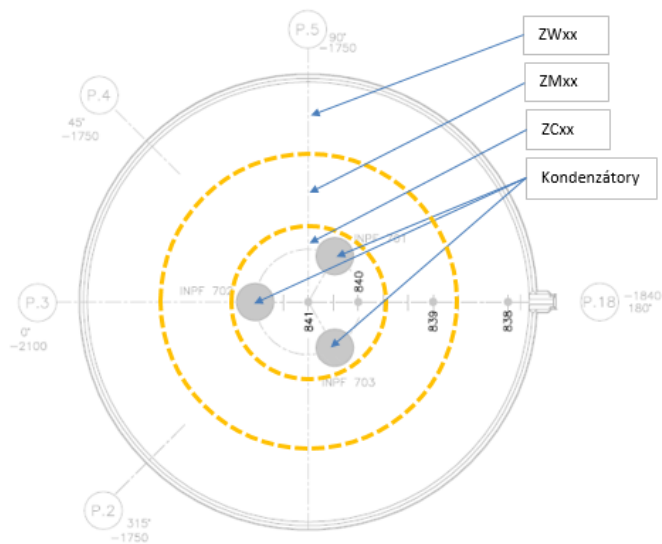
Pro zajištění proudění hmoty v rámci objemu byly definovány atmosférické a vodní spojky.

V zóně ZC16 byl definován vstřik hmoty z primárního okruhu a v zóně ZW25 pak odtah vzorkovacích systémů.

Tento nodalizační postup vychází ze zkušeností z dříve zpracovaných úloh a doporučení uvedených v manuálu programu.



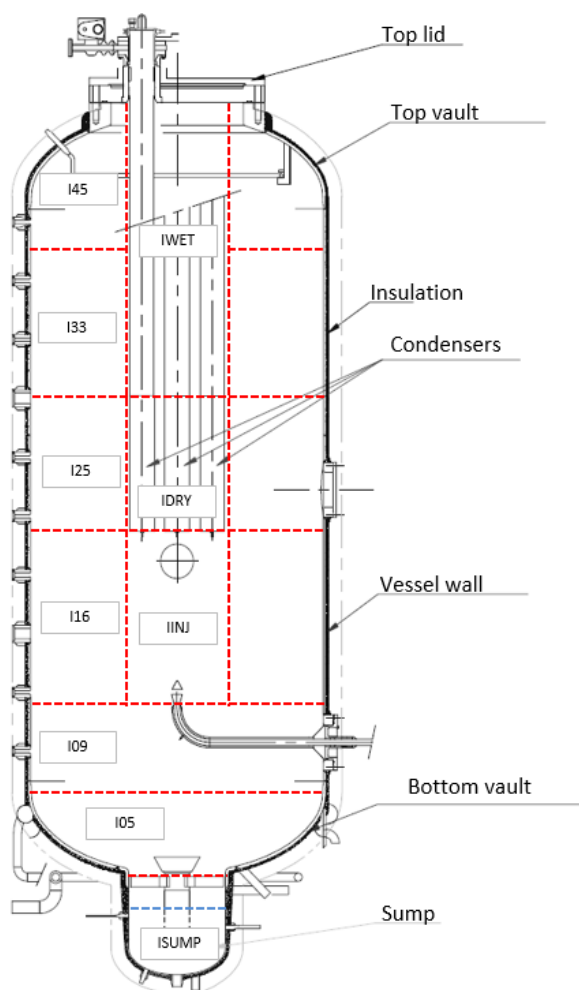
Obr. 32 Nodalizace kontejneru PHEBUS FP - vertikální řez (převzato a doplněno z [59])



Obr. 33 Nodalizace kontejneru PHEBUS FP - horizontální řez v úrovni kondenzátoru (převzato a doplněno z [59])

Kompartimentizace pro simulaci šíření jódu

Pro simulaci šíření jódu je v programu COCOSYS zapotřebí vytvořit zjednodušené rozdělení do tzv. kompartimentů, v nichž je podrobně řešen transport jódu a dalších štěpných materiálů. Zjednodušení bylo vybíráno s ohledem na obdobné termohydraulické podmínky a konstrukční omezení, zejména kondenzátory pro usazování štěpných produktů. Vizualizaci výsledného modelu lze vidět na Obr. 34.



Obr. 34 Nodalizace kontejneru PHEBUS - vizualizace speciální nodalizace pro výpočty šíření jódu – vertikální řez (upraveno z [59])

PHEBUS FPT 1

Počáteční a okrajové podmínky vycházejí z dokumentace experimentu [59]. Výpočet byl orientován na první dvě fáze experimentu, tj. degradační a aerosolovou, při které došlo k izolaci kontejneru od primárního okruhu. V následujících kapitolách lze nalézt shrnutí počátečních a okrajových podmínek a porovnání napočtených výsledků s naměřenými hodnotami.

Počáteční a okrajové podmínky

Počítaná událost začíná v čase -3 000 s z důvodu nastolení stabilních termohydraulických podmínek. V čase 34.9 s dochází ke vstřiku páry, která vzniká v aktivní zóně reaktoru a je dále distribuována chladicím okruhem až do prostoru kontejnmentu. Průtok je uvažován blízký hodnotě 1.8 g/s. Ten je následně snížen na 0.5 g/s v čase 2100 s. V čase 8 780 s dochází k nárůstu vstřiku páry a zároveň vstřiku vodíku z reakce se zirkoniovým pokrytím. V čase 10 800 s dochází k úniku štěpných produktů z poškozeného paliva. Degradací fáze je ukončena v čase 18 600 s, kdy je kontejnment izolován od primárního okruhu a začíná fáze aerosolová, během níž jsou udržovány konstantní termohydraulické podmínky. V čase 230 000 s je výpočet ukončen. Kompletní scénář je shrnut v Tab. 15.

Důležitým faktorem ohledně jódu je chemická kompozice vstřiku. Pro výpočty bylo uvažováno, že 96 % celkové frakce tvoří partikulární jód (CsI), zbylá 4 % jsou tvořena jodem elementárním (I₂).

Termohydraulické podmínky uvnitř kontejnmentu jsou řízeny za pomoci teplot tepelných struktur. Teploty stěn kontejnmentu a kondenzátorů vycházejí z měření během experimentu. Stabilní teplota je udržena zvolenými okrajovými podmínkami, kde je pevně zadán součinitel přestupu tepla na stěně mimo kontejnment a pevně zadán průběh teploty v přiléhající zóně. Tímto postupem je zajištěna odpovídající termohydraulická odezva tepelné struktury.

Tab. 15 Scénář testu FPT 1 [59]

Čas [s]	Událost
- 3 000	Start výpočtu Počátek vstřiku N ₂ – čištění zařízení OLAM – 2,52E-6 kg/s Počátek vstřiku N ₂ – čištění zařízení CAROLE – 5,82E-6 kg/s
34.9	Počátek vstřiku páry do kontejnmentu ~ 1,8 g/s, 135 °C
2100	Snížení hmotnostního vstřiku páry ~ 0,5 g/s, 135 °C
8780	Počátek vstřiku vodíku z reakce H ₂ O + Zry
10800	Počátek vstřiku štěpných produktů
18600	Ukončení vstřiku páry
18600	Izolace kontejnmentu Ukončení vstřiku N ₂ – čištění zařízení OLAM – 2,52E-6 kg/s
230 000	Konec výpočtu

Tab. 16 Počáteční TH podmínky výpočtu testu FPT 1 [59]

Parametr	Popis	Hodnota
Složení atmosféry	N ₂	95 %
	O ₂	5 %
	H ₂ O	Relativní vlhkost 49 %
Tlak	Kontejnment	206 kPa

Parametr	Popis	Hodnota
	Okolí	101,15 kPa
Teplota	Atmosféra	108 °C
	Atmosféra jímky	95 °C
	Voda v jímce	89,7 °C
	Stěny jímky	89,3 °C
	Stěny kontejnmentu	108,5 – 112,5 °C
	Suchá část kondenzátoru	120 °C
	Vlhká část kondenzátoru	92,5 °C

Termohydraulické výsledky

Na následujících stránkách jsou uvedeny termohydraulické výsledky přepočtu experimentu porovnané s naměřenými hodnotami. Jak již bylo uvedeno dříve, přepočet uvažoval první dvě fáze experimentu, tj. fázi degradační, při které dochází k destrukci paliva a k transportu parovzdušné směsi a štěpných produktů skrze primární okruh do kontejnmentu a fázi aerosolovou, při které je kontejnment izolován.

Experimentální data uvedená v této kapitole pocházejí z dokumentace [59].

Degradační fáze – 3 000 až 24 000 s

Na následujících stránkách jsou postupně uvedeny TH výsledky degradační fáze. Zkoumaná událost začíná v čase -3 000 s pro nastolení termohydraulické rovnováhy. V čase 0 s dochází k počátku vstřiku vodní páry. Konec fáze nastává v čase 18 600 s, kdy dochází k izolaci kontejnmentu.

Porovnáním naměřených dat a napočtených výsledků lze konstatovat, že bylo dosaženo dobré shody v případě tlaku uvnitř kontejnmentu. S naměřenými daty z tlakových čidel byla porovnávána data napočtená v rámci zón Zx33. Celkový tlak uvnitř kontejnmentu je v mezích naměřených hodnot a zároveň odpovídá i z hlediska trendu. Více viz Obr. 35.

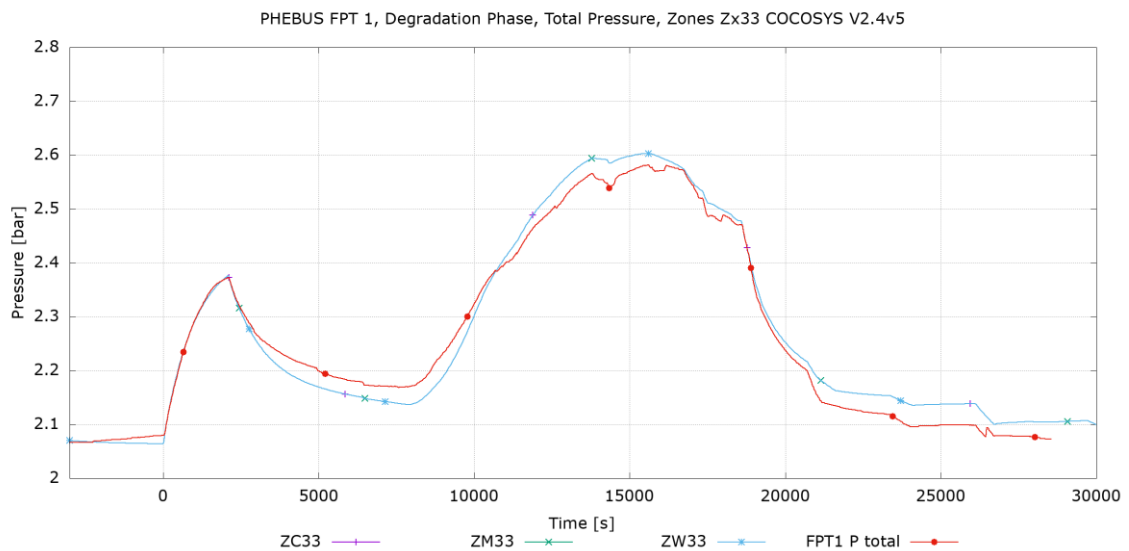
Relativní vlhkost byla vyhodnocena pro objemy, do nichž geometricky náleží uvedená čidla, tj. čidlo HUPF700A pro zóny Zx16 a HUPF701A pro zóny Zx33. Výsledky jsou opět v dobré shodě jak hodnotou, tak i trendem. Více viz Obr. 36.

Porovnávání napočtených a naměřených teplot je provedeno vždy pro sady jednotlivých teploměrů, tj. takových, které se nacházejí v různé vzdálenosti od stěny kontejnmentu, avšak ve stejné výšce. Naměřené teploty v porovnání s experimentálními daty vykazují ve většině případů dobrou shodu jak hodnotově, tak i v případě trendu. Zde je potřeba podotknout, že vlivem nodalizace, tj. zjednodušení kontejnmentu do diskretních objemů se středovanými parametry, nelze dosáhnout krajních, tj. nejvyšších a nejmenších hodnot. Z toho důvodu se napočtené hodnoty nacházejí obvykle ve středním pásmu hodnot naměřených po poloměru a nepokrývají celý rozsah naměřených teplot.

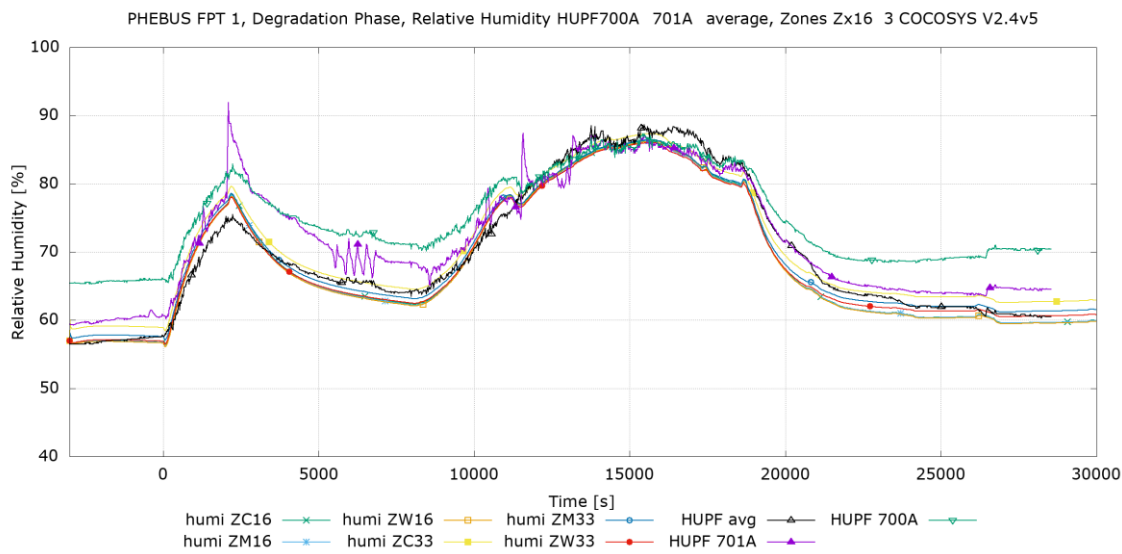
Čidla ve spodní části kontejnmentu, v úrovni vstupní trubky z primárního okruhu a odpovídající objemům Zx09, vykazují vyšší naměřené hodnoty nežli v případě výpočtu. Tento efekt je za zapříčiněn tím, že použitý model neuvažuje existenci vyhřívané tepelné struktury simulující tuto vstupní trubku. Více viz Obr. 37.

Výsledky napočtené v zónách Zx16 vykazují dobrou shodu s experimentem. Napočtené výsledky nepokrývají takový rozsah hodnot jako jednotlivá čidla, což může být zapříčiněno nodalizačním přístupem, který průměruje hodnoty termohydraulických parametrů přes objem a neumožňuje tak získat extrémní hodnoty. Více viz Obr. 38.

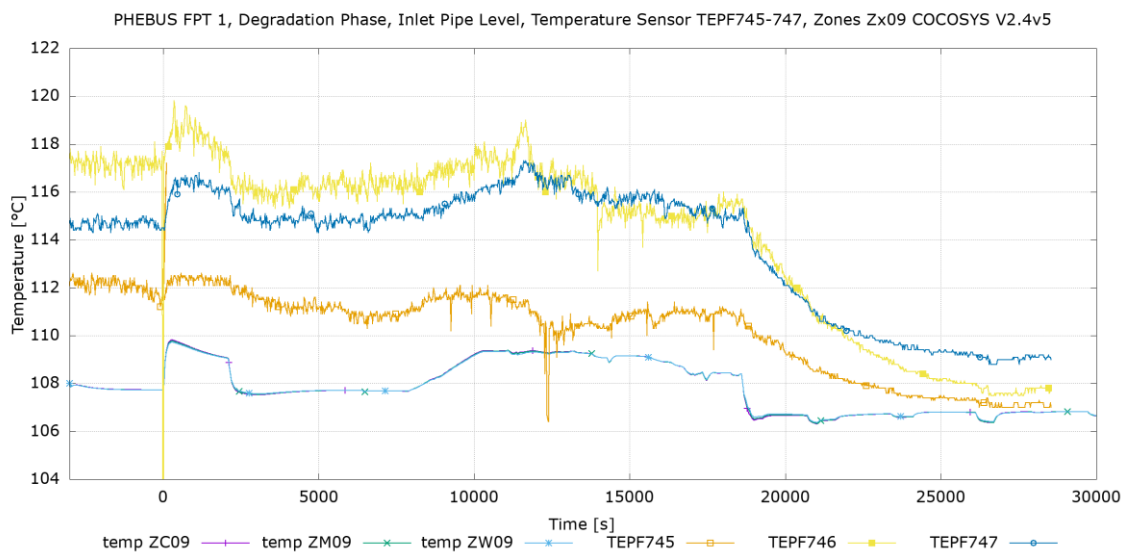
Zbylé napočtené výsledky vykazují dobrou shodu s experimentem, přičemž je pozorováno držení napočtených hodnot ve středu spektra či mírné podhodnocení zejména ve vrchní části zařízení. Tyto odchylky jsou však v rozsahu maximálně dvou stupňů. Více viz Obr. 39 až Obr. 42.



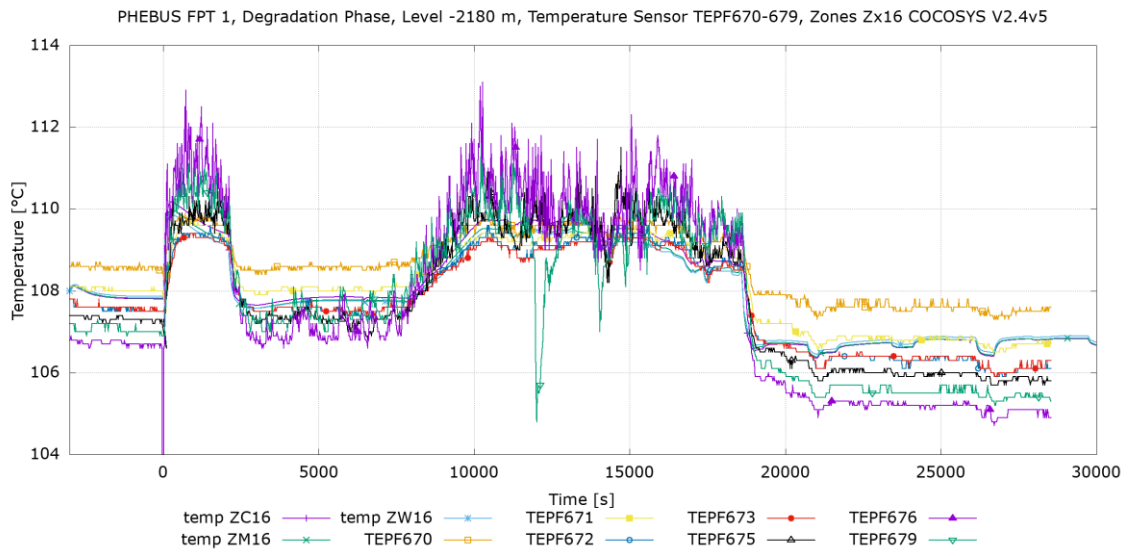
Obr. 35 PHEBUS FPT 1 - Průběh tlaku, degradační fáze



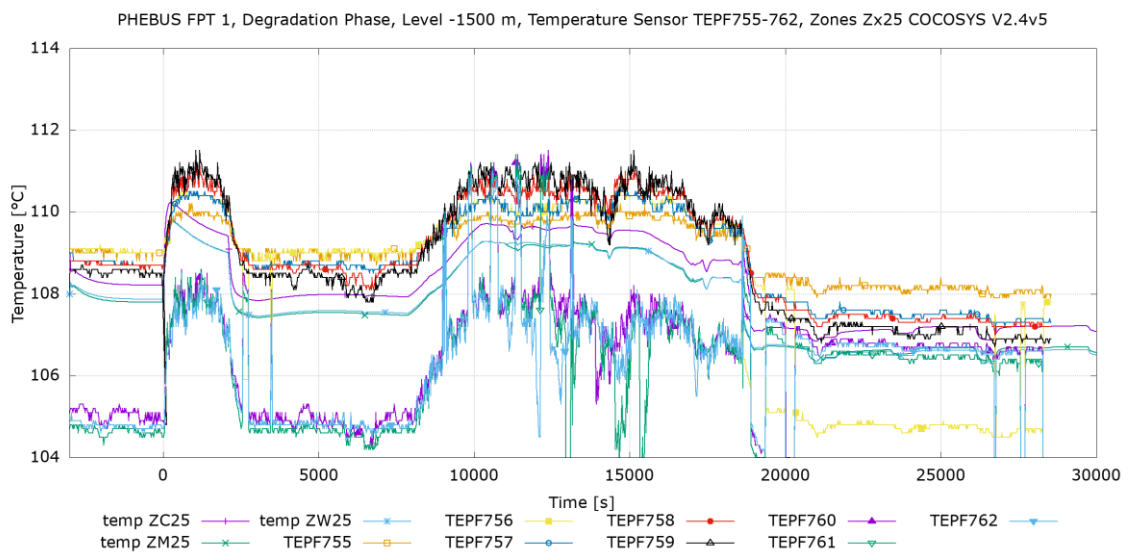
Obr. 36 PHEBUS FPT 1 - Průběh relativní vzdušné vlhkosti, různé úrovně, degrační fáze



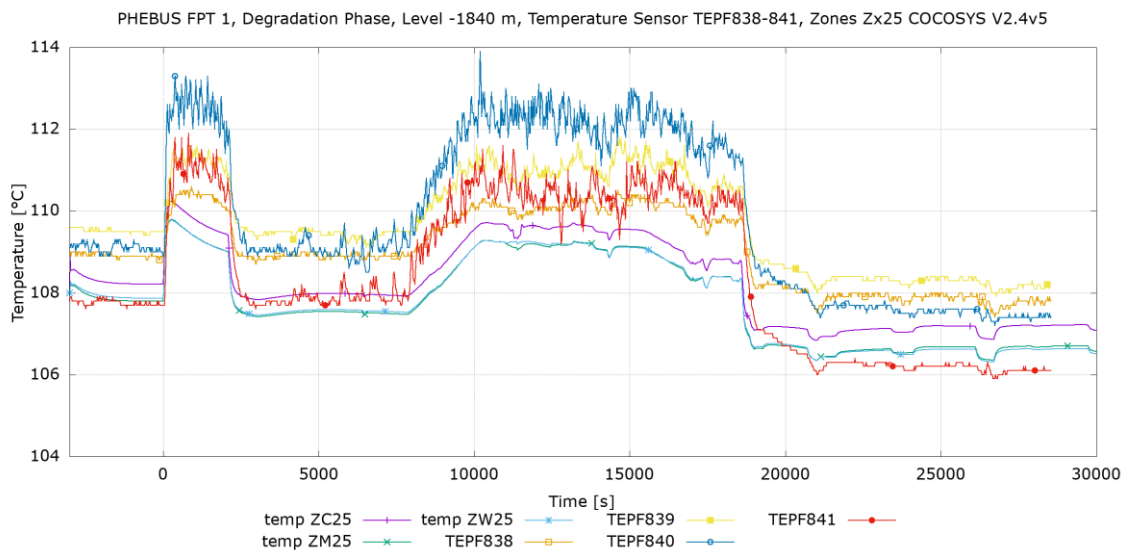
Obr. 37 PHEBUS FPT 1 - Průběh teploty v úrovni vstupní trubky, zóny Zx09, degrační fáze



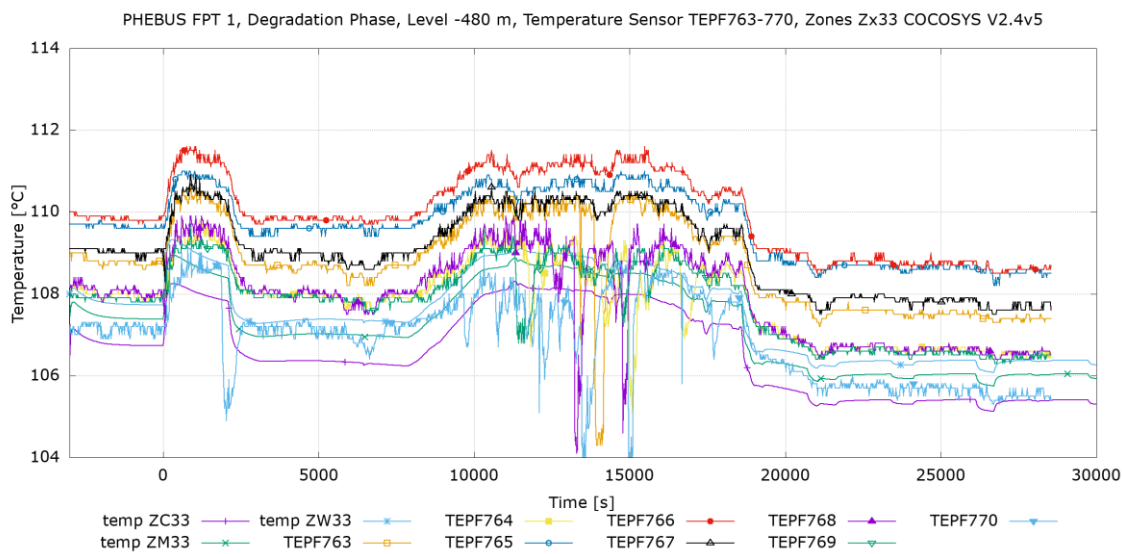
Obr. 38 PHEBUS FPT 1 - Průběh teploty na úrovni – 2 180 mm, zóny Zx16, degradační fáze



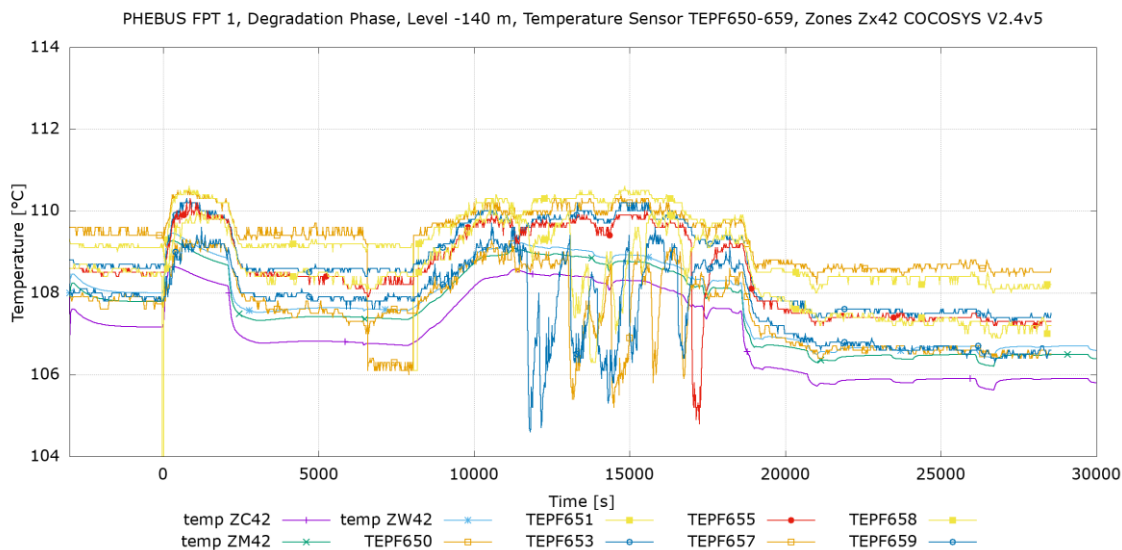
Obr. 39 PHEBUS FPT 1 - Průběh teploty na úrovni – 1 500 mm, zóny Zx25, degradační fáze



Obr. 40 PHEBUS FPT 1 - Průběh teploty na úrovni – 1840 mm, zóny Zx25, degrační fáze



Obr. 41 PHEBUS FPT 1 - Průběh teploty na úrovni – 480 mm, zóny Zx33, degrační fáze

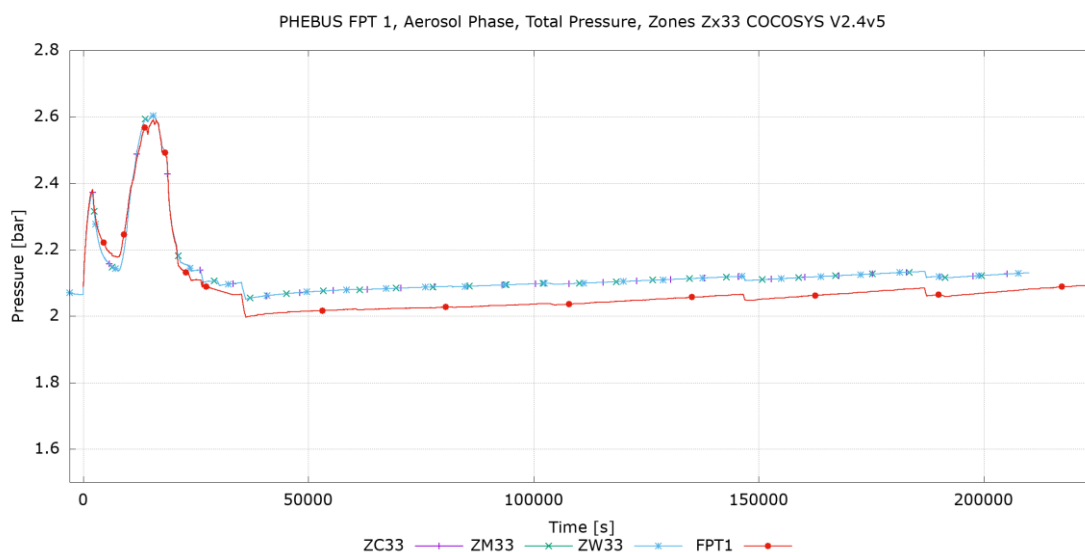


Obr. 42 PHEBUS FPT 1 - Průběh teploty na úrovni – 140 mm, zóny Zx42, degrační fáze

Aerosolová fáze 24 000 až 150 000 s

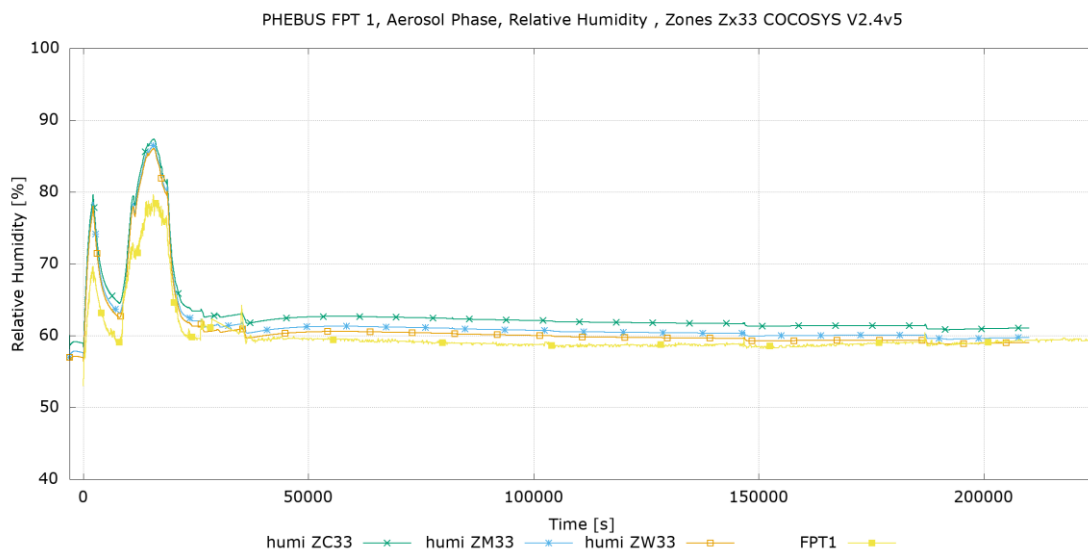
Na následujících stránkách jsou uvedeny výsledky a diskuse aerosolové fáze, která začíná okamžikem izolace kontejnmentu od primárního okruhu v čase 18 600 s a končí v čase 230 000 s. V této fázi jsou termohydraulické podmínky ovlivněny pouze teplotami stěn, dna a stropu kontejnmentu a teplotami vlhké a suché části kondenzátoru.

Vypočtený celkový tlak uvnitř kontejnmentu vyšetřovaný v úrovni umístění tlakových čidel vykazuje dobrou shodu s naměřenými daty, a to jak z pohledu trendu, tak i hodnot, přičemž je patrné mírné nadhodnocení v čase od 25 000 s. Více je patrné na Obr. 43.



Obr. 43 PHEBUS FPT 1 - Průběh tlaku, aerosolová fáze

Naměřená a napočtená vlhkost vykazuje v dlouhodobém hledisku dobrou shodu s experimentem, nicméně je patrné mírné nadhodnocení oproti experimentu od přibližně 25 000 s. Paradoxem je, že vlhkosti v degradační fázi dobře korespondují s experimentálními daty, viz Obr. 36, nicméně výsledky uvedené v Obr. 44 pro aerosolovou i degradační fázi mají pro úvodní degradační část nižší hodnoty nežli hodnoty uvedené v Obr. 36. Tyto rozdíly mohou mít původ v chybách měření ostatních termohydraulických veličin, porovnáváním s průměrnou hodnotu vlhkosti v rámci kontejnmentu a samozřejmě ve výpočetním přístupu.

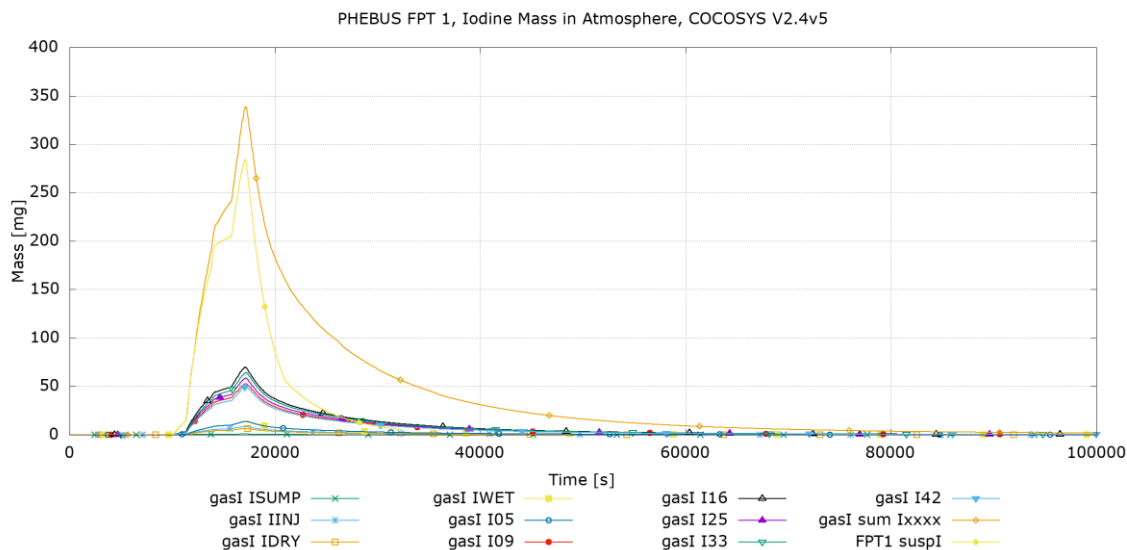


Obr. 44 PHEBUS FPT 1 - Průběh relativní vzdušné vlhkosti, různé úrovně, aerosolová fáze

Šíření jódu

Vyhodnocení výpočtů je zaměřeno na hodnoty, které jsou přímo porovnatelné s výsledky experimentů, tj. bude vyhodnocena koncentrace jódu v atmosféře.

Z pohledu koncentrace v atmosféře je patrné, že maximální dosažená hodnota je z hlediska výpočtu nadhodnocena. Rozdíl v maximu činí zhruba 20 %. Zároveň je dobře zachycen trend růstu. Trend poklesu je u výpočtu pomalejší nežli u experimentu, Uvedené rozdíly mohou být zapříčiněny celou řadou faktorů, počínaje nedokonalostmi v definici vstřiku hmoty, nepřesné definici chemické kompozice vstřiku a taktéž vlivem mírně odlišně napočtených termohydraulických podmínek. Obecně lze konstatovat, že bylo dosaženo dobré shody s konzervativnějším odhadem vůči koncentraci v atmosféře. Více viz Obr. 45.



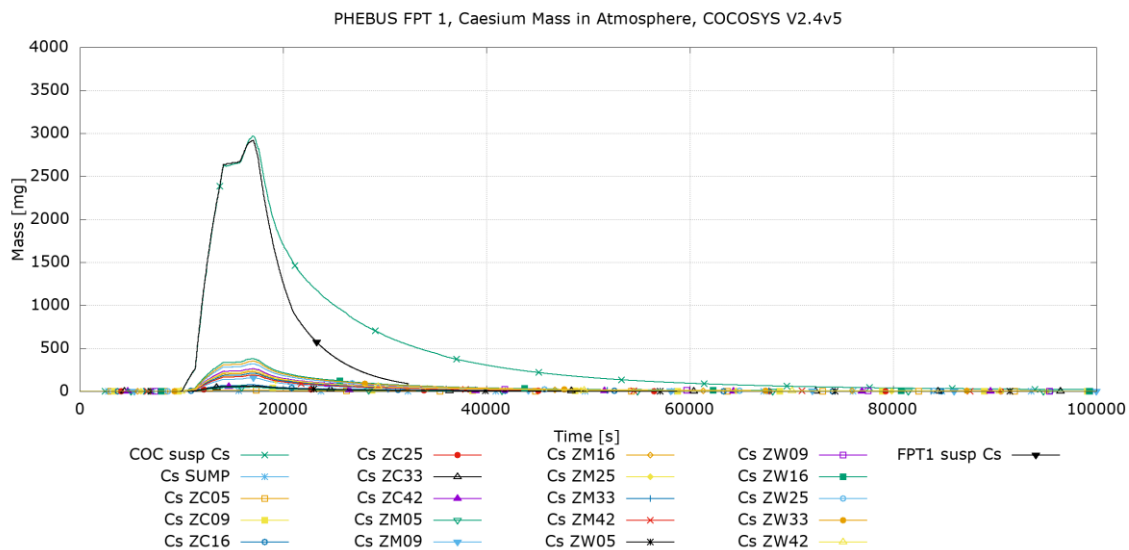
Obr. 45 PHEBUS FPT 1 - Průběh hmotnosti jódu v atmosféře experimentu – aerosolová fáze

Šíření aerosolových štěpných produktů

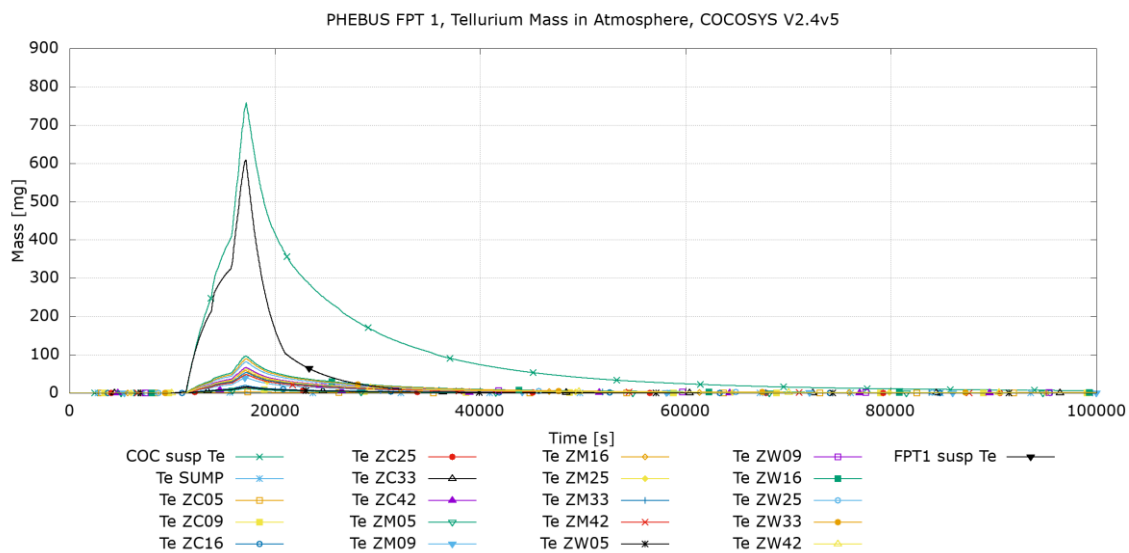
Analýza je zaměřena na chování telluru a cesia. Pro uvedené štěpné produkty je zkoumána koncentrace v atmosféře. V případě cesia je patrný velice blízký odhad koncentrace v atmosféře, zejména s ohledem na maximální dosaženou hodnotu. Postupně dochází k poklesu, který však v případě výpočtu je významně pomalejší. Více viz Obr. 46.

V případě telluru jsou rozdíly patrné již během nárůstu koncentrace v objemu, kdy výpočet v maximu nadhodnocuje tyto koncentrace o zhruba 25 %. Následně dochází k poklesu, který je však významně pomalejší nežli u experimentu. Více viz Obr. 47.

V obou uvedených případech lze konstatovat dobrý odhad celé problematiky s dostatečnou mírou konzervativnosti vůči koncentraci v atmosféře, která významně ovlivňuje množství unikajících štěpných produktů do životního prostředí v případě havárií s únikem chladiva na jaderné elektrárně.



Obr. 46 PHEBUS FPT 1 - Průběh hmotnosti cesia v atmosféře experimentu – aerosolová fáze



Obr. 47 PHEBUS FPT 1 - Průběh hmotnosti telluru v atmosféře experimentu – aerosolová fáze

Zhodnocení výsledků

Validace výpočetního kódu COCOSYS 2.4v5 na kontejnmentové části integrálního experimentu PHEBUS přinesly zajímavé výsledky a poznatky. Jedním z hlavních přínosů bylo vytvoření výpočetního modelu, který bude dále využit i pro přepočty dalších testů provedených na experimentu PHEBUS.

Výsledky validace lze shrnout následovně:

- Celkově lze konstatovat, že výsledky jsou v dobré shodě, a to jak z pohledu termohydraulického, tak i z pohledu šíření štěpných produktů.
- Rozdíly ve výsledcích mohou být ovlivněny mnoha faktory, mezi které patří neurčitosti v oblasti zadání počátečních a okrajových podmínek, které vycházejí z měření a jsou ovlivněny právě jejich neurčitosti v měření.
- Rozdíly v dosažení krajních hodnot termohydraulických podmínek jsou zapříčiněny výpočetním přístupem daným zjednodušenou nodalizací a tudíž středováním parametrů v zónách.
- Odchylky v případě šíření štěpných produktů jsou ovlivněny mnoha faktory, počínaje nepřesným určením chemického složení zdroje jódu do kontejnmentu a kupříkladu i odlišnými modely pro depozici, které jsou naladěny na jiný typ barvy či oceli.

5 Určení zdrojového členu pro událost LB LOCA na VVER-1000/V-320

Určení zdrojového členu sestává z několika na sebe navazujících operací. V první řadě jde o přípravu výpočetního modelu s odpovídajícím scénářem. Pro potřeby simulací transportu štěpných produktů bylo potřeba doplnit stávající model využívaný pro termohydraulické analýzy o specifické části, které jsou vyžadovány při využití modulu AFP.

Další nutnou částí je příprava počátečních a okrajových podmínek, kam spadá hned několik významných činností. V první řadě jde o určení úniku chladiva z primárního okruhu, které je spočteno za pomoci kódu RELAP. Součástí počátečních a okrajových podmínek je i určení vnitřního kontejnmentového zdrojového členu, který vychází z inventáře aktivní zóny a nové metodiky popsané v kapitole 3. Poslední významnou složkou jsou počáteční a okrajové podmínky kontejnmentu, pro které byla provedena citlivostní studie s cílem prokázat jejich legislativně vyžadovanou konzervativní volbu.

5.1 Model kontejnmentu VVER-1000/V-320

Model prostoru uvnitř ochranné obálky vychází z účelu, pro který je vyvíjen a tím jsou bezpečnostní analýzy a analýzy radiačních následků projektových nehod s únikem primárního nebo sekundárního chladiva. Pro tvorbu vstupních dat byly využity poznatky uvedené ve zprávách [67] a [68].

Základní ideou modelu proto bylo rozčlenění prostoru ochranné obálky do menšího množství modelových zón tak, aby model dobře odpovídal logické vnitřní stavbě ochranné obálky, ale přitom nebyl zbytečně podrobný. Místnosti a prostory s propojením o velkém průřezu byly proto spojovány do jediné modelové zóny, tak aby byly zachovány termohydraulické charakteristiky.

V současné podobě se model ETE_CNT_ma01.07 skládá z celkem 24 zón, které jsou propojeny více než 110 atmosférickými a vodními spojkami, 9 spojek modelujících technologické systémy (sprchy) a 186 tepelnými strukturami.

Na Obr. 48 je zachyceno nodalizační schéma ochranné obálky. Vnitřní prostor ochranné obálky JE Temelín byl proto rozdělen na celkem 18 zón a další dvě zóny ENVIRON a

RBLDG zastupují okolní prostředí a obestavbu ochranné obálky. Data pro zóny ENVIRON a RBLDG, byla zvolena uměle tak, aby tvořila okrajové podmínky pro ostatní nody.

Z místností ležících mimo ochrannou obálku byla modelována jímka sprchových vod GA201, která je nedílnou součástí hermetické zóny a dále pak potrubí odvodního ventilačního systému TL22. Další 4 zóny byly použity k simulaci potrubí sprchových systémů.

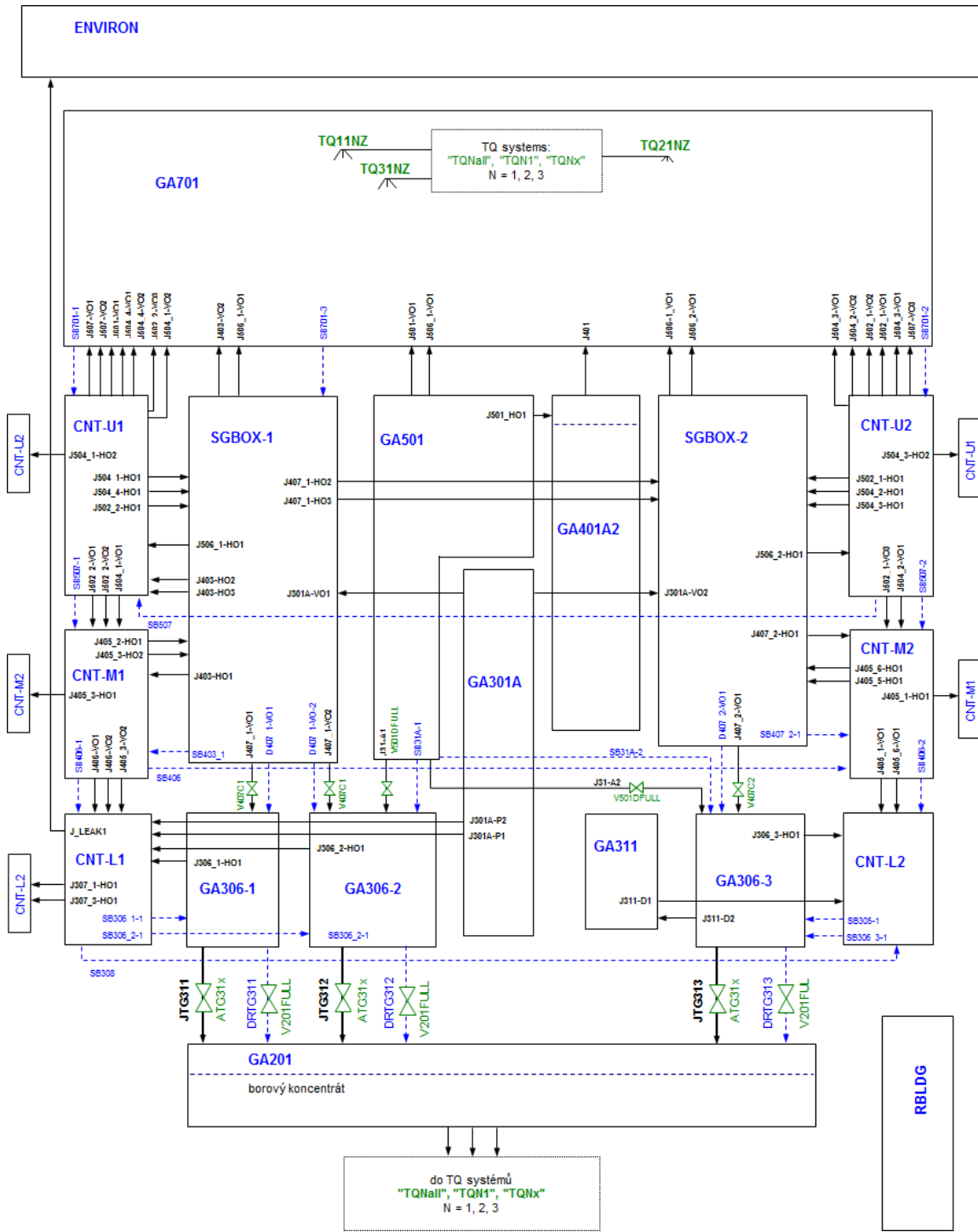
Modelovány jsou také všechny tři vzájemně nezávislé sprchové systémy TQ, a to prostředky, které má program COCOSYS k dispozici, tedy s využitím systémových komponent PUMP_SYS pro čerpadla, COOLER pro výměník, VALVE pro řídicí ventily a NOZZLE pro sprchové trysky.

Vzhledem k tomu, že tepelné výměníky havarijního dochlazování jsou společné pro sprchový systém a systémy nízkotlakého a vysokotlakého nouzového dochlazování aktivní zóny, bylo nutno sprchový systém modelovat s respektováním tohoto uspořádání.

Z ventilačních systémů jsou modelovány přívodní a odvodní systémy TL42 a TL22. Jejich modelování je nezbytné pro účely určení úniků z ochranné obálky ventilačními systémy v úvodních fázích LOCA nehod (do hermetizace příslušných tras). Simulovány jsou i vnitřní cirkulační vzduchotechnické systémy TL01, TL04 a TL05.

Podrobnější informace o modelu lze nalézt ve zprávě [69].

Pro výpočty šíření aerosolových štěpných produktů (Cs, Rb, etc.) je v programu COCOSYS využita termohydraulická nodalizace, která je doplněna o sadu geometrických faktorů jednotlivých zón, které ovlivňují sedimentaci štěpných produktů. Tyto geometrické faktory jsou definovány jako poměry stěn, stropů a podlah k objemu dané zóny. Pro model ochranné obálky ETE_CNT_ma01af1v02 byly tyto faktory vypočítány z geometrických charakteristik jednotlivých zón a jsou uvedeny v Tab. 17.



Obr. 48 Nodalizace ochranné obálky ETE_CNT_ma01.07 [69]

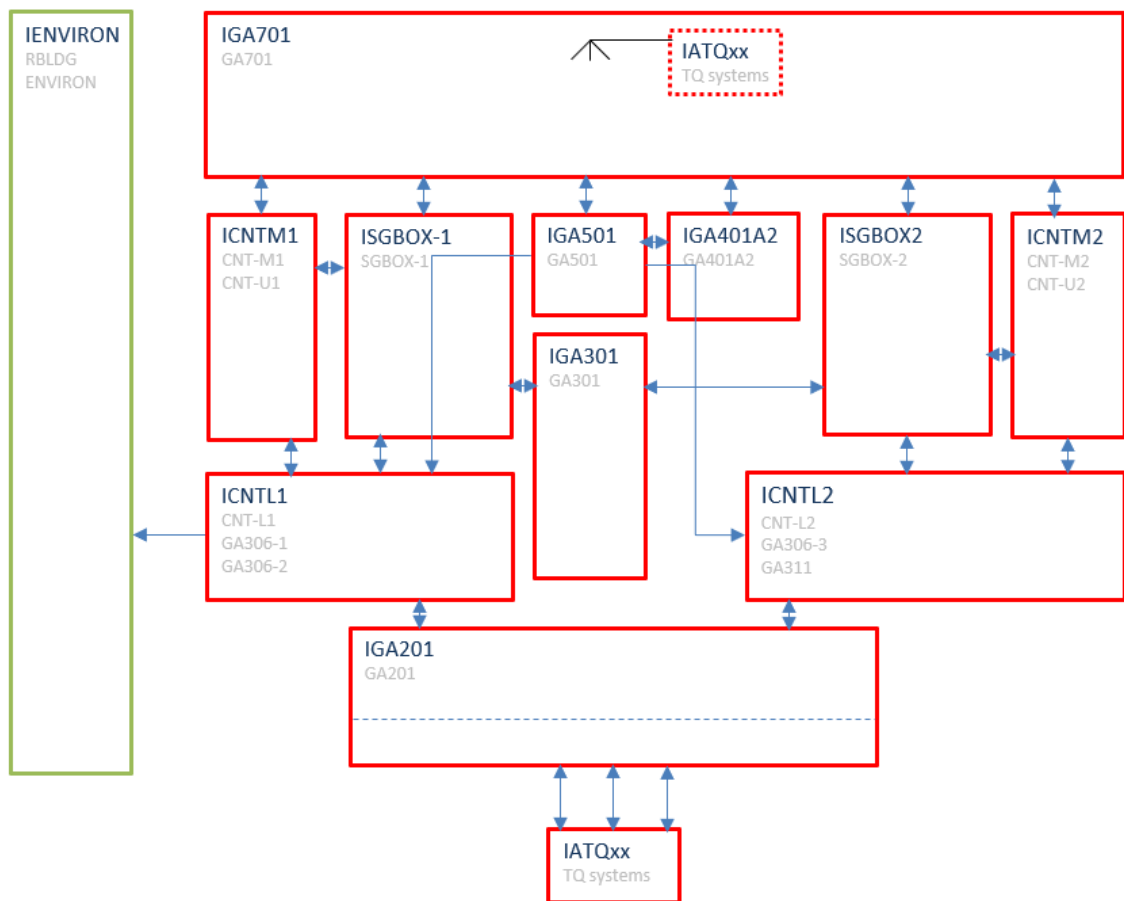
Tab. 17 Přehled geometrických faktorů zón

Zóna	Popis	Poměr plochy stropu k objemu zóny ACELV [m ⁻¹]	Poměr plochy podlahy k objemu zóny AFLRV [m ⁻¹]	Poměr plochy stěn k objemu zóny AWALV [m ⁻¹]
GA701	Reaktorový sál	0.07	0.02	0.64
CNT-U2		0.05	0.06	3.05
ENVIRON	Okolí	0.00	0.00	0.00
TL22P	Ventilační systém TL22	0.00	0.00	0.00
CNT-U1		0.06	0.10	3.26
TL01SP		0.00	0.00	0.00
GA401A2		0.07	0.20	0.00
SGBOX-1		0.06	0.04	1.11
SGBOX-2		0.08	0.07	1.01
GA501		0.00	0.03	2.89
CNT-M2		0.10	0.08	3.35
CNT-M1		0.17	0.16	3.59
RBLDG		0.01	0.00	0.02
GA301A		0.00	0.30	4.92
CNT-L1		0.12	0.22	4.47
CNT-L2		0.16	0.16	1.39
GA311		0.27	0.20	3.26
GA306-2		0.24	0.24	5.82
GA306-1		0.11	0.27	5.72
GA306-3		0.24	0.23	4.81
GA201	Jímka sprchových vod	0.27	0.66	0.06
TQX		0.00	0.00	0.00
TQ3pipe		0.00	0.00	0.00
TQ1pipe		0.00	0.00	0.00
TQ2pipe		0.00	0.00	0.00
ENV-X		0.00	0.00	0.00

Pro výpočty šíření jódu je třeba zavést specifickou kompartmentizaci, tj. rozdělení objemu do kompartmentů, která může být v mnoha případech odlišná a hrubší nežli nodalizace pro termohydraulické výpočty. Tento postup je v souladu s dokumentací programu a taktéž v souladu se zkušenostmi z provedených validačních experimentů. Cílem je vytvořit větší objemy, v nichž zůstávají velmi blízké či téměř identické termohydraulické podmínky. Zároveň je zde požadavek na atmosférické propojení zón, pokud jsou modelovány jedním kompartmentem. Toto omezení prakticky eliminuje možnost simulovat TQ systémy pouze jedním kompartmentem.

Celkem byl objem hermetického prostoru včetně TQ systémů rozdělen do 17 kompartmentů, přičemž boxy parogenerátorů jsou modelovány separátně právě díky nutnosti velmi blízkých termohydraulických podmínek. Okolí jaderné elektrárny ENVIRON a budova obestavby RBLDG jsou charakterizovány společným kompartmentem IENVI. Náhled na vytvořený model je možné získat z Obr. 49.

Každý kompartment je charakterizován jednak zónami, které zahrnuje, dále pak geometrickými faktory, které zohledňují plochy, uvnitř těchto objemů. Ty se rozdělují jednak dle typu povrchu (epoxidová barva, ocel, beton) a dále podle toho, zda se vyskytují v kapalně části objemu či v objemu plynném. Kompletní shrnutí těchto geometrických faktorů jednotlivých kompartmentů je uveden v Tab. 18.



Obr. 49 Schéma kompartmentizace pro šíření jódu

Tab. 18 Přehled modelovaných kompartmentů

Název kompartmentu	Obsažené zóny	Celková sedimentační plocha FSED [m ²]	Barvená plocha v plynné části FOFGP [m ²]	Ocelová plocha v plynné části FOFGS [m ²]	Barvená plocha ve vodní části FOFWP [m ²]	Ocelová plocha ve vodní části FOFWS [m ²]
IGA701	GA701	27692,11	26825,79	0	0	866,32
ISGBOX1	SGBOX-1	4624,799	4465,699	0	0	159,1
ISGBOX2	SGBOX-2	3940,489	3699,959	0	0	240,53
IGA201	GA201	666,78	0	220,58	0	446,2
IGA401A2	GA401A2	343,215	88,865	0	0	254,35
IGA501	GA501	3220,254	3187,204	0	0	33,05
IATQ1	TQ1pipe	0,1 ⁶	0	0	0	0
IATQ2	TQ2pipe	0,1	0	0	0	0
IATQ3	TQ3pipe	0,1	0	0	0	0
IATQX	TQX	0,1	0	0	0	0
ICNTL1	CNT-L1, GA306-1, GA306-2	13305,31	12731,12	0	0	574,19
ICNTL2	CNT-L2, GA306-3, GA311	8411,3	7830,58	0	0	580,72
ICNTM1	CNT-M1, CNT-U1	17890,99	17284,07	0	0	606,92
ICNTM2	CNT-M2, CNT-U2	17351,54	16996,81	0	0	354,73
ITL01SP	TL01SP	0,1	0	0	0	0
ITL22P	TL22P	0,1	0	0	0	0
IGA301A	GA301A	563,678	157,978	373,61	0	32,09
IENVX	ENVIRON, RBLDG	0,1	0	0	0	0

⁶ Přestože jsou všechny povrchy konzervativně uvažovány jako nulové, je pro chod kódu nutné definovat alespoň minimální plochu pro sedimentaci.

5.2 Počáteční a okrajové podmínky výpočtů

5.2.1 Definice iniciační události

Iniciační událost je specifikována jako gilotinové roztržení studené větve č. 4 v koncové části u reaktoru (cca 2 m od vstupu do reaktoru) s plným oboustranným výtokem do prostoru ochranné obálky při provozu bloku VVER 1000 / V-320 JE Temelín s výkonem 3425 MWt (nominální výkon 3120 MWt konzervativně zvýšený na 104 %, viz [70]).

Ekvivalentní průměr únikových otvorů je 2 x D850 mm, výtokové koeficienty použité pro únikové otvory jsou rovny 1,20 [70].

5.2.2 Primární a sekundární okruh

Podrobný popis počátečních a okrajových podmínek použitých ve výpočtu primárního a sekundárního okruhu programem RELAP je uveden v kapitole 2 zprávy [70]. Zde uvedeme jen ty okrajové podmínky, které budeme uvažovat i při výpočtu chování kontejnmentu programem COCOSYS:

- Předpokládá se ztráta elektrického napájení vlastní spotřeby (LOOP) v čase iniciační události.
- Maximálně dlouhý náběh dieselgenerátorů (35 s) pro maximální zpoždění iniciace HSCHZ vstřikování (VTTQ v 5. s a NTTQ v 10. s ELS).
- Minimální počet dostupných systémů HSCHZ – 1/3 VTTQ (TQ13), 2/4 HA (jeden HA doplňuje chladivo do horní a druhý do dolní směšovací komory), 1/3 NTTQ (TQ12).
- Konzervativně nízké charakteristiky čerpadel HSCHZ.
- Maximální teplota v nádržích a potrubích HSCHZ (jímka 61 °C, TQ13B01 60 °C).
- Minimální objem chladiva v nádržích HSCHZ.
- Maximální teplota TVD (33 °C) používané pro chlazení výměníku TQ10,20,30W01.
- V uvažovaném časovém úseku havárie není uvažován žádný zásah operátora

5.2.3 Vnitřní kontejnmentový zdrojový člen

Inventář štěpných produktů aktivní zóny je převzat ze zprávy [88]. Je uvažován únik radionuklidů jednak z chladiva primárního okruhu, kde se vyskytují štěpné produkty v limitní koncentraci a taktéž z palivových proutků. Ve shodě s metodikou popsanou v kapitole 3.5 a předchozími výpočty této události [88] byla pro výpočet zdrojového členu při události postulována dehermetizace 100 % palivových proutků v AZ a následný únik štěpných produktů z mezery palivo pokrytí.

Z předběžného termohydraulického výpočtu události plyne, že celý obsah primárního okruhu vyteče do kontejnmentu v prvních 20 s po iniciační události, a přitom se vypaří průměrně 41 % z celkového množství chladiva z primárního okruhu, které vytéká do kontejnmentu. Cesta přes potrubí ventilačního systému je přitom uzavřena v čase 12 s po iniciační události.

Únik radionuklidů z chladiva je proto uvažován v časovém intervalu 0 – 12 s a konzervativně se předpokládá, že během této doby unikne veškerý inventář štěpných produktů obsažený v chladivu. Ve shodě s metodikou [72] je předpokládán koeficient přestupu štěpných produktů do vodní páry 0,1. Do atmosféry kontejnmentu je tak distribuováno pouze 4,1 % štěpných produktů, zbylá část je ponechána v kapalně fázi. Současně není konzervativně uvažována žádná retence radionuklidů uvnitř primárního okruhu.

Štěpné produkty z dehermetizovaných palivových proutků (únik z mezery palivo pokrytí) jsou uvolňovány podle [72] v souladu s R.G. 1.183 [18] v časovém intervalu 30 – 1 800 s po iniciační události a je postulována dehermetizace celkem 100 % palivových proutků v AZ. Štěpné produkty z dehermetizovaných palivových proutků jsou konzervativně distribuovány přímo do atmosféry kontejnmentu. Konzervativně není uvažována žádná retence radionuklidů uvnitř primárního okruhu.

Fyzikálně chemické rozdělení forem jódu unikajícího z chladiva i paliva je bráno dle RG 1.183 [18] a uvažuje rozdělení jódu na 95 % aerosolové formy (CsI), 4,85 % formy elementární (I₂) a 0,15 % organické formy (CH₃I).

Přehled uvažovaných štěpných produktů a jejich uvolněných frakcí je uveden v Tab. 19, celkové množství štěpných produktů řešených v analýze, vzhledem k citlivosti těchto údajů, není uvedeno.

Tab. 19 Přehled frakcí uniklých štěpných produktů z paliva

Prvek	Uvolněná frakce během fáze úniku z mezery palivo pokrytí (30 – 1800 s) [-]
I, Br	0,05
Xe, Kr	0,05
Cs, Rb	0,05
Te, Sb, Se	0,00
Ba, Sr	0,00
Ru, Rh, Pd, Mo, Tc, Co	0,00
La, Zr, Nd, Eu, Nb, Pm, Pr, Sm, Y, Cm, Am	0,00
Ce, Pu, Np	0,00

5.2.4 Citlivostní studie počátečních a okrajových podmínek výpočtu kontejnmentu

Počáteční a okrajové podmínky kontejnmentu musejí, dle platné metodiky výpočtu zdrojového členu prezentované v kapitole 3.5, uvažovat konzervativní přístup. Dřívější výpočty kontejnmentu byly zaměřeny konzervativně vůči maximálnímu úniku parovzdušné směsi do životního prostředí, přičemž bylo předpokládáno, že tyto podmínky povedou i k maximalizaci zdrojového členu. Tento přístup vycházel z výpočetního postupu, který uvažoval určení zdrojového členu na základě separátního termohydraulického výpočtu kontejnmentu. Ten byl využit jako počáteční a okrajová podmínka samotného výpočtu zdrojového členu.

Nový postup s využitím výpočetního kódu COCOSYS, který byl vyvíjen v rámci projektu TAČR TH02021010, umožňuje komplexní simulaci celého procesu. S ohledem na zkušenosti získané v rámci validace výpočetního kódu bylo přistoupeno k podrobné citlivostní studii počátečních a okrajových podmínek s cílem určení takové sady počátečních a okrajových podmínek, která povede k maximalizaci zdrojového členu. Významným rozdílem oproti předchozímu přístupu je uvažování chemických reakcí ovlivněných pH a uvažováním dávkového příkonu v zónách díky přítomnosti štěpných produktů. Z toho důvodu bylo nutné prozkoumat i prozatím neznámý vliv těchto počátečních a okrajových podmínek.

Provedená citlivostní studie zkoumala únik tří základních skupin štěpných produktů, tj. vzácných plynů, aerosolů a jódu. Vzhledem k odlišné fyzikálně chemické povaze zmíněných štěpných produktů, byla pozorována i odlišná citlivost na počáteční a okrajové podmínky. Shrnutí pozorovaných vlastností je uvedeno v Tab. 20.

Tab. 20 Výsledky citlivostní studie konzervativních počátečních a okrajových podmínek

Informace	Aerosoly	Vzácné plyny	Jód	Hodnota pro konzervativní analýzu
pH v jímkách kompartmentů	Bez vlivu	Bez vlivu	Min	Min
Počáteční teplota atmosféry v zónách	Max	Max	Max	Max
Počáteční teplota vody v jímkách	Max	Max	Max	Max
Počáteční relativní vzdušná vlhkost v zónách	Max	Min	Max	Max
Atmosférický tlak okolí	Min	Min	Min	Min
Dávkový příkon v zónách	Max	Bez vlivu	Max	Max

5.3 Výpočet a vyhodnocení

Masivní únik hmoty a energie do prostoru kontejnmentu po iniciační události vede k prudkému zvýšení tlaku a teploty atmosféry. Přetlaku v kontejnmentu 360 Pa, který podle zvolených předpokladů vede se zpožděním k iniciaci algoritmů PRPS TLS01, TLS02 a TLS03, je dosaženo už v první desetíně sekundy po iniciační události. K vlastnímu zformování „signálu“ +300 Pa algoritmů PRPS TLS01, TLS02 a TLS03 dochází vlivem uvažovaného zpoždění elektroniky o 2 s později v čase 2,02 s. V tomto okamžiku začíná uzavírání tras vzduchotechnických systémů TL22 a TL42 na jejich hermetické hranici.

Jelikož dobu uzavírání RZV ventilů systémů TL22 a TL42 konzervativně uvažujeme 10 s, jsou potrubní trasy obou systémů zcela uzavřeny v čase 12,02 s po iniciační události. Tím dojde i k ukončení úniku parovzdušné směsi trasou vzduchotechnických systémů TL22 a TL42 z ochranné obálky do životního prostředí.

Maximum teploty v kontejnmentu je dosaženo v čase 12,7 s v prostoru reaktorového sálu (zóna GA701) a má hodnotu 186,5 °C. Maximální přetlak v ochranné obálce je 280,4 kPa (maximální tlak 380,4 kPa^{abs}) a bylo ho dosaženo v čase 14,9 s v prostoru jímký GA201. Kritérium přijatelnosti K10 pro maximum přetlaku je ve výpočtu splněno s velkou rezervou.

Vzhledem k tomu, že je uvažován ZPRZEN v okamžiku iniciační události nastává start jediného dostupného sprchového čerpadla až po iniciaci automatiky postupného spouštění ve 2. s a následném náběhu dieselgenerátorů v 10. s APS, tedy až v čase 32 s po iniciační události. Plného průtoku sprchovými tryskami je pak dosaženo po rozběhu čerpadel a zaplnění výtlačných tras v čase 107 s.

Po úvodním rychlém poklesu tlaku na úroveň cca 270 kPa asi 140 s po iniciační události dochází k opětovnému vzrůstu tlaku a ke zformování druhého lokálního maxima přetlaku, které je ale výrazně nižší než absolutní maximum v úvodu nehody. Nastává

v čase 1200 s a jeho hodnota činí 227,5 kPa (327,5 kPa^{abs}). Únik vody a zejména páry do prostoru ochranné obálky je v tuto dobu natolik silný, že jedno pracující sprchové čerpadlo nedokáže zabránit opětovnému nárůstu tlaku v ochranné obálce. Po druhém lokálním maximu tlaku přetlak v kontejnmentu už pomalu klesá až do konce výpočtu nehody.

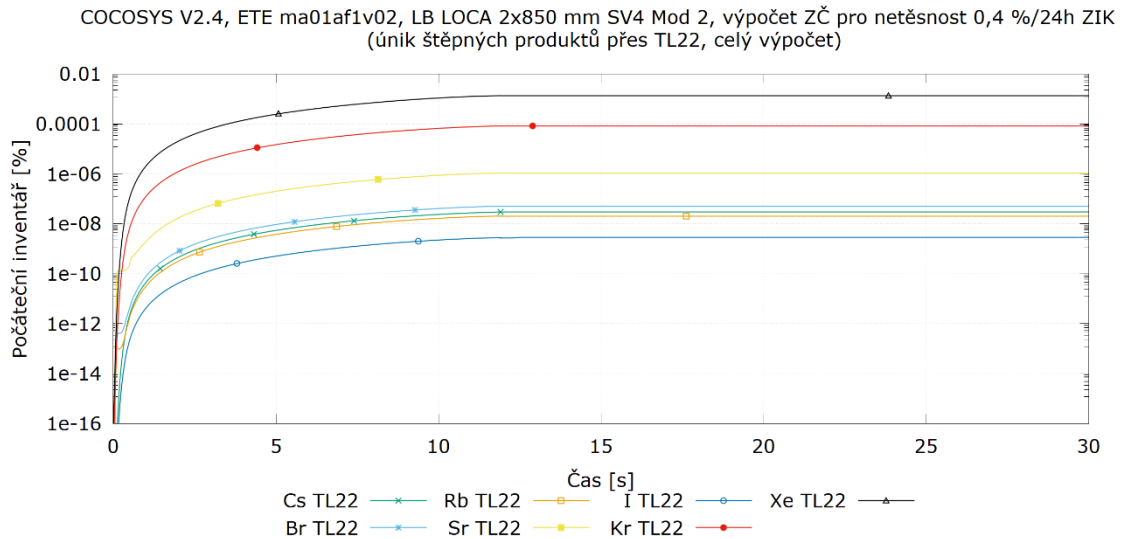
Ukončení události z hlediska radiačních následků znamená ukončit nekontrolovaný únik netěsnostmi, a tedy dosáhnout v kontejnmentu podtlaku vůči okolí. Plnotlaký kontejnment ale není projektovaný na pasivní dosažení podtlaku (bez zásahu aktivních systémů) po nehodách se ztrátou chladiva. Podle metodiky [72] má termohydraulický výpočet úniku z kontejnmentu do životního prostředí pokrývat dobu dosažení podtlaku nebo minimálně dobu, po které dojde k snížení úrovně přetlaku v kontejnmentu na hodnotu, která umožní spuštění vnitřních cirkulačních ventilačních systémů na odvod tepla a snížení obsahu aktivity.

V čase 53 661 s (14 h 54 min 21 s) po iniciační události poklesne přetlak trvale pod hodnotu 20 kPa, což znamená, že po této době může obsluha zahájit likvidaci nehody dodatečným chlazením vnitřního prostoru ochranné obálky.

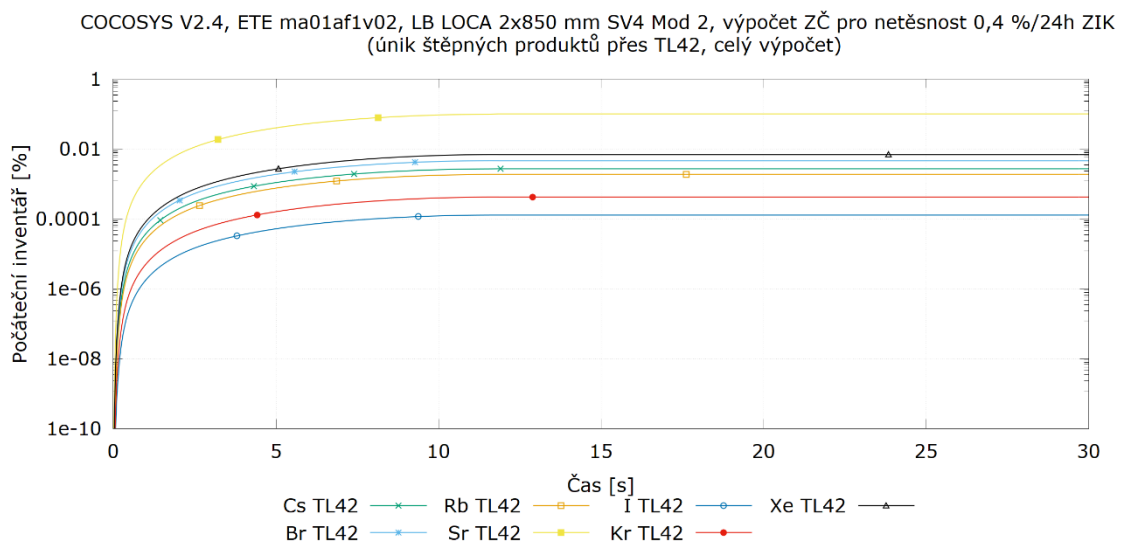
5.3.1 Únik štěpných produktů

Únik štěpných produktů z prostoru kontejnmentu je vždy řešen skrze tři cesty – netěsnostmi kontejnmentu a ventilačními systémy TL22 a TL42. Vyhodnocení je tabulkově provedeno pro všechny uvažované štěpné produkty. Grafické zhodnocení je pro přehlednost provedeno pouze pro štěpné produkty, které se uvolňují z paliva i chladiva a představují tak významnou hmotu štěpných produktů ve výpočtu. Konkrétně se jedná o krypton, xenon, cesium, rubidium, brom a jod. Navíc je řešeno stroncium, které reprezentuje i ostatní štěpné produkty, které se uvolňují pouze z chladiva.

Úniky skrze ventilační systémy probíhají pouze v prvních vteřinách havárie, tj. do uzavření těchto systémů vlivem signálů od přetlaku v čase 12,02 s. Štěpné produkty, které v tuto chvíli unikají do životního prostředí mají původ pouze v chladivu primárního okruhu. Průběhy úniku pro oba systémy jsou uvedeny na Obr. 50 a Obr. 51. Řádově nižší úniky přes TL 22 oproti TL42 jsou dány přítomností aerosolových a jódomých filtrů.

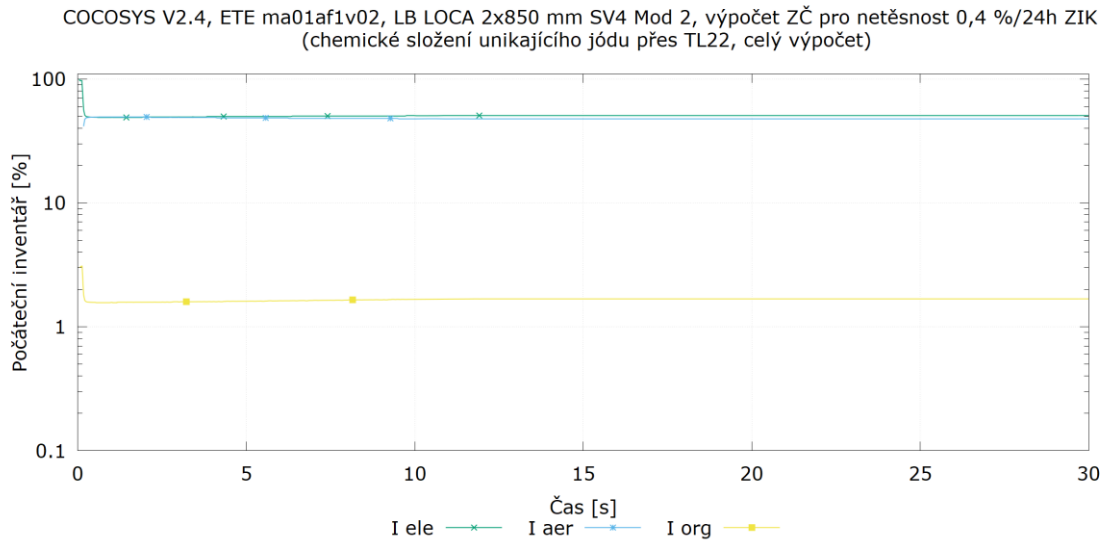


Obr. 50 Úniky vybraných štěpných produktů přes systém TL 22, 0 – 30 s

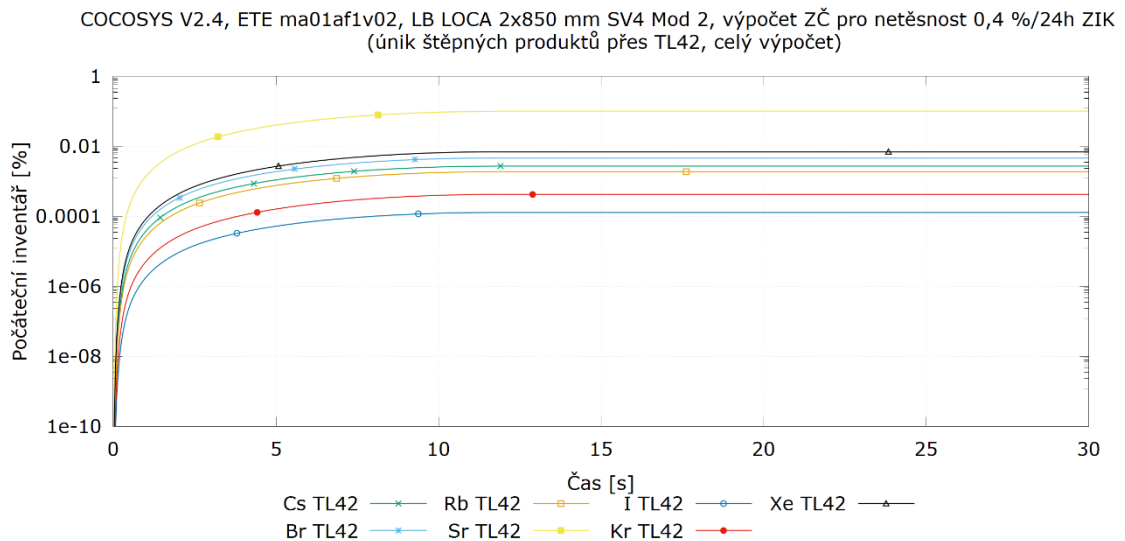


Obr. 51 Úniky vybraných štěpných produktů přes systém TL 42, 0 – 30 s

Kromě množství unikajících štěpných produktů je zásadní i fyzikálně chemické složení úniku jódu. V případě systému TL22 je dominantní aerosolová a elementární složka, viz Obr. 52. Vliv zde má zajisté přítomnost filtru s různou účinností pro jednotlivé fyzikálně chemické formy. V případě TL42 dominuje ve sledovaném úseku elementární forma, viz Obr. 53.



Obr. 52 Formy jódu v úniku skrze systém TL22 do životního prostředí, 0 – 30 s

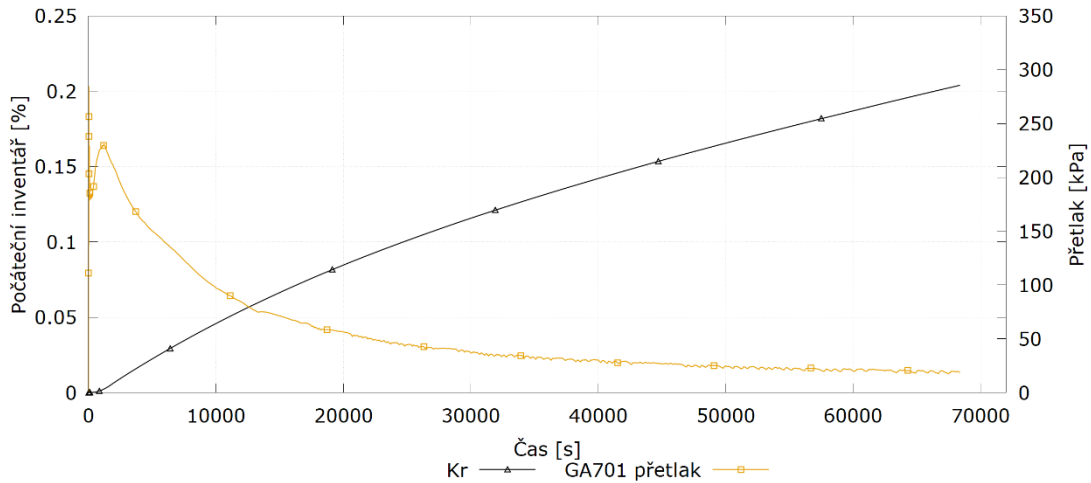


Obr. 53 Formy jódu v úniku skrze systém TL42 do životního prostředí, 0 – 30 s

Únik přes netěsnosti kontejnmentu probíhá po celou dobu události a zahrnuje v sobě štěpné produkty jak z chladiva, tak i z paliva. Trendy úniků lze klasifikovat dle skupiny štěpných produktů.

Typickým chováním u vzácných plynů je téměř konstantní rychlost úniku během celé události, což je zapříčiněno jejich fyzikálně chemickými vlastnostmi, tj. nemožností kondenzovat v paroplynové směsi a chemickou inertností. Průběh úniku kryptonu je možné pozorovat na Obr. 54.

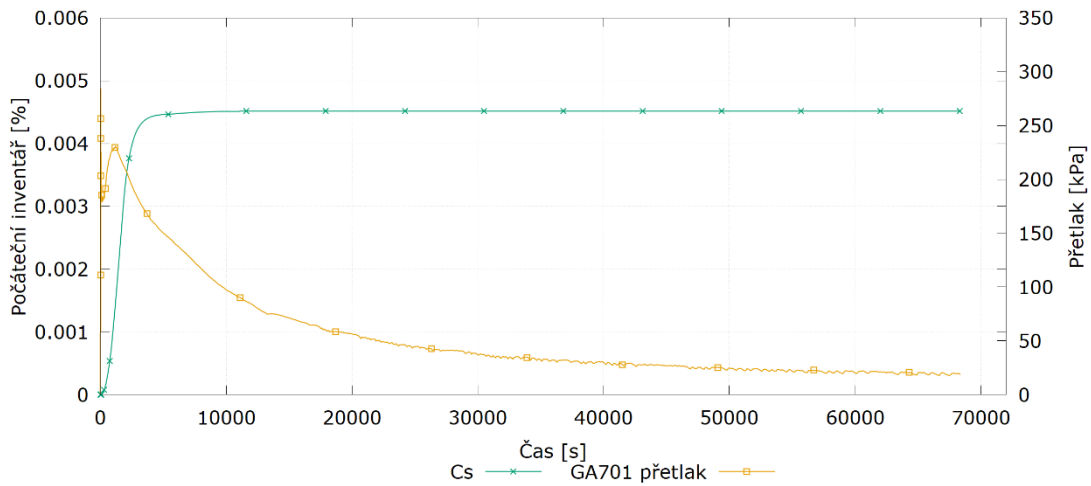
COCOSYS V2.4, ETE ma01af1v02, LB LOCA 2x850 mm SV4 Mod 2, výpočet ZČ pro netěsnost 0,4 %/24h ZIK
(únik kryptonu přes netěsnost, celý výpočet)



Obr. 54 Únik kryptonu skrze netěsnosti do životního prostředí, celý výpočet

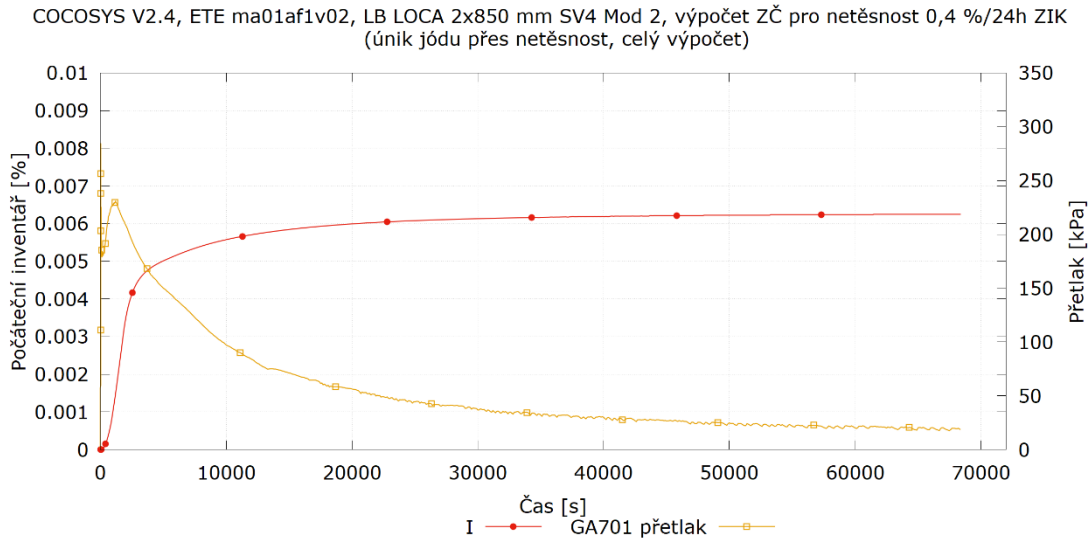
Aerosolové štěpné produkty vykazují rychlejší únik během prvních zhruba 4 000 s, následně je únik významně zpomalen. Tento jev je pro aerosoly charakteristický, jelikož většina aerosolové hmoty, díky depozičním a dalším procesům uvnitř kontejnmentu, je v pozdější fázi havárie v kapalně fázi v jímce kontejnmentu, a tudíž nemůže docházet k jejich úniku. Charakter úniku lze, pro cesium, pozorovat na Obr. 55.

COCOSYS V2.4, ETE ma01af1v02, LB LOCA 2x850 mm SV4 Mod 2, výpočet ZČ pro netěsnost 0,4 %/24h ZIK
(únik cesia přes netěsnost, celý výpočet)



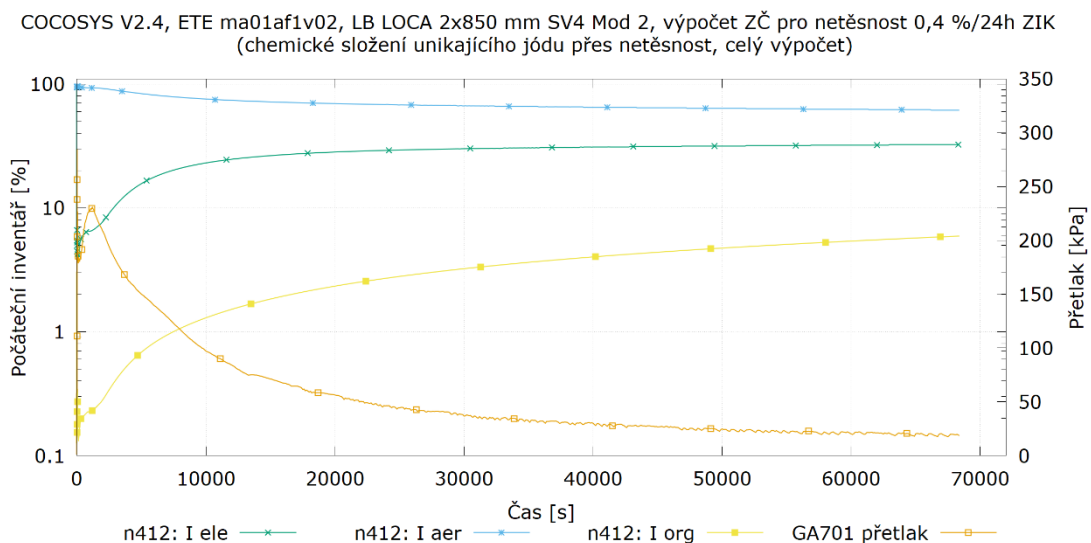
Obr. 55 Únik cesia skrze netěsnosti do životního prostředí, celý výpočet

Z hlediska radiačních následků je nejvýznamnějším štěpným produktem jódu. Ten, vzhledem k uvažovanému chemickému složení při úniku z primárního okruhu do kontejntentu, vykazuje chování mírně odlišné než v předchozích případech. Je zde pomalejší saturace nežli u aerosolů, nicméně není dosaženo téměř konstantní rychlosti úniku jako v případě vzácných plynů, což lze pozorovat na Obr. 56.



Obr. 56 Únik jódu skrze netěsnosti do životního prostředí, celý výpočet

Důležitým faktorem u jódu je chemické složení úniku, tj. rozdělení mezi elementární, organickou a partikulární formu, které se s časem mění. Dominantní formou je, po celou dobu výpočtu, aerosolová složka. Organická složka zaujímá řádově procenta. Průběh chemického složení úniku je možné vysledovat z Obr. 57.



Obr. 57 Formy jódu v úniku skrze netěsnosti do životního prostředí, celý výpočet

5.4 Porovnání s referenčním výpočtem ŠKODA JS

Pro porovnávací úlohu byla zvolena LB LOCA na VVER-1000/V-320. V rámci porovnání budou sledovány celkové úniky vybraných štěpných produktů do životního prostředí, konkrétně jódu, cesia a kryptonu.

Pro výpočet zdrojového členu je v rámci výpočtu ŠKODA JS využito několika na sebe navazujících výpočetních kódů. Je vhodné podotknout, že tyto kódy nejsou schopné řešit termohydrauliku kontejnmentu. Ta je doplněna z výpočtu kódem COCOSYS. Výpočetní schéma je uvedeno taktéž v kapitole 1.1.

Prvním z kódů je PRADIO, který počítá dekontaminační faktory pro odstraňování aerosolů a elementárního jódu sprchami a usazováním v hermetickém prostoru. Podrobnější popis funkce včetně metody předání a zpracování dat mezi kódy je uveden ve zprávě [93].

Druhým z programů je CONTG, který řeší časový průběh aktivit ŠP v palivu a jednotlivých objemech hermetických prostorů na jaderné elektrárně v případě havárie spojené s poškozením hermetičnosti palivových článků. Kromě toho dovoluje výpočet časového průběhu integrálu aktivit v jednotlivých prostorech. Přehledný popis bilancí aktivit štěpných produktů v jednotlivých prostorech provádí pomocný program PRINVCONG. Střední rychlosti úniku v maximálně čtyřech časových intervalech jsou získány za pomoci programu PROSMOGB. Podrobný popis programu lze získat ve zprávě [93].

5.4.1 Porovnání předpokladů a výpočetních postupů

Počáteční a okrajové podmínky v kontejnmentu byly volené totožné pro oba výpočty. Oproti výpočtu transportu štěpných produktů provedených programem COCOSYS v této práci, je nutno zmínit následující odchylky v přístupu k řešení:

- Termohydraulický výpočet kódem COCOSYS, na kterém zakládá výpočet ŠKODA JS, uvažuje počáteční a okrajové podmínky zaměřené konzervativně vůči maximálnímu přetlaku. Tyto počáteční a okrajové podmínky však nejsou v souladu s počátečními a okrajovými podmínkami pro maximální únik štěpných produktů (aerosolů a jódu) v případě výpočtu transportu štěpných produktů kódem COCOSYS.

- Výpočet ŠKODA JS uvažuje rozpad radionuklidů, COCOSYS toto neuvažuje a počítá po celou dobu s původním inventářem.
- Časový horizont úniku štěpných produktů z chladiva do prostoru kontejnmentu není u výpočtu ŠKODA JS explicitně definovaný, nicméně bude nejspíš odpovídat časovému horizontu 0 – 1800 s, předkládaný výpočet programem COCOSYS konzervativně uvažuje časový horizont úniku do prostoru kontejnmentu 0 – 120 s.
- Časové kroky výpočtu ŠKODA JS jsou významně delší než u výpočtů kódem COCOSYS. Porovnání je prováděno vždy na konci časového kroku výpočtu ŠKODA JS.

5.4.2 Výsledky a porovnání

Předložené porovnání je zaměřeno na určení hodnoty úniku štěpných produktů do životního prostředí a na určení odchylky mezi novým výpočtem kódem COCOSYS a původním výpočtem ŠKODA JS. Záměrně nejsou uváděny přesné hodnoty, jelikož pro potřeby tohoto porovnání nejsou konkrétní hodnoty úniku směrodatné. Výsledky jsou uvedeny jako frakce počátečního inventáře.

Vyhodnocení bylo provedeno pro následující štěpné produkty:

- Jód
 - Jedná se o prvek s největší bioaktivitou, který má největší vliv na dávkový příkon na obyvatelstvo. Zároveň je typický složitým chemickým chováním v plynné a kapalné fázi a na jejím rozhraní. Jód se do volného objemu kontejnmentu dostává jak z paliva, tak z chladiva.
- Cesium, Rubidium, Brom
 - Jde o aerosolové štěpné produkty, které se do prostoru kontejnmentu dostávají z paliva i chladiva.
- Selen
 - Tento prvek byl vybrán jako referenční štěpný produkt v rámci výpočtu COCOSYS pro reprezentaci všech aerosolových štěpných produktů, které se během havárie typu LB LOCA dostanou do objemu kontejnmentu pouze díky přítomnosti v chladivu. Jejich únik z matrice paliva není v tomto případě uvažován. V porovnání s ostatními štěpnými produkty je jejich hmota o několik řádů nižší.

- Krypton a Xenon
 - Jedná se o vzácné plyny, které se do volného objemu kontejneru dostávají jak z paliva, tak chladiva.

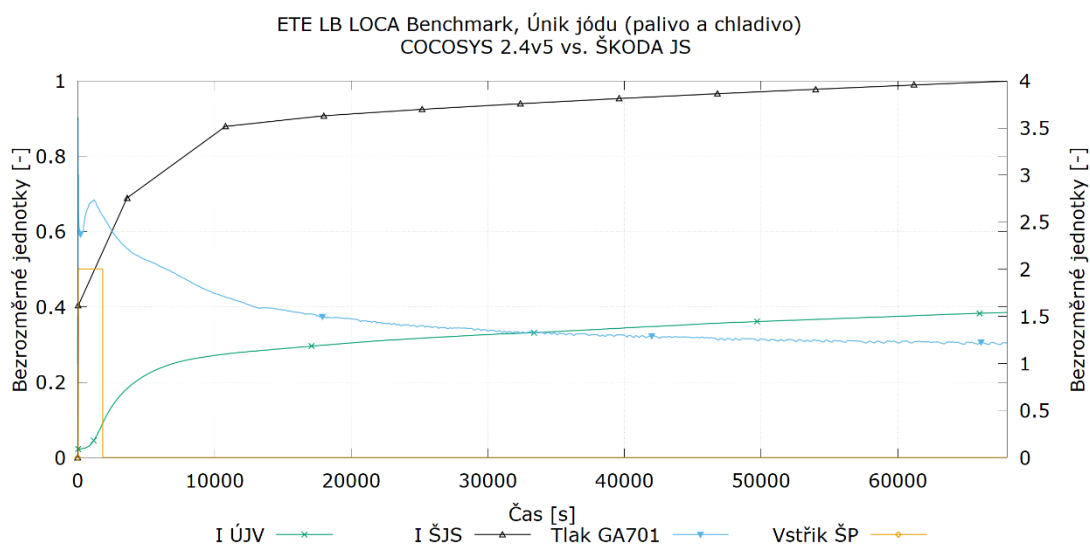
Pro potřeby porovnání výsledků bylo nutné provést přepočítání dat. Výsledky ŠKODA JS jsou uváděny v becquerelech. Pro porovnání se ŠKODA JS došlo k přepočtu na hmotnost dle vzorce [94]

$$m \cong \frac{A N}{N_a \lambda}$$

Kde $m [g]$ je celková hmotnost izotopu, $A [Bq]$ je aktivita izotopu, $N [-]$ je počet nukleonů v jádře izotopu, $N_a [mol^{-1}]$ je Avogadrova konstanta ($N_A = 6,022\ 140\ 76 \times 10^{23} mol^{-1}$) a $\lambda [s^{-1}]$ je rozpadová konstanta izotopu.

5.4.2.1 Jód

Napočtené úniky jódu jsou v porovnání s referenčním výpočtem ŠKODA JS významně nižší. Odchylna se pohybuje v dlouhodobém hledisku nad 61 %. Trendy úniku jsou v dobré shodě. Porovnání pro vybrané časové kroky (s ohledem na výpočet ŠKODA JS, který výsledky udává pouze v několika málo časových krocích) je uvedeno v Obr. 58. Porovnání hodnot ve vybraných časových úsecích je uvedeno v Tab. 21.



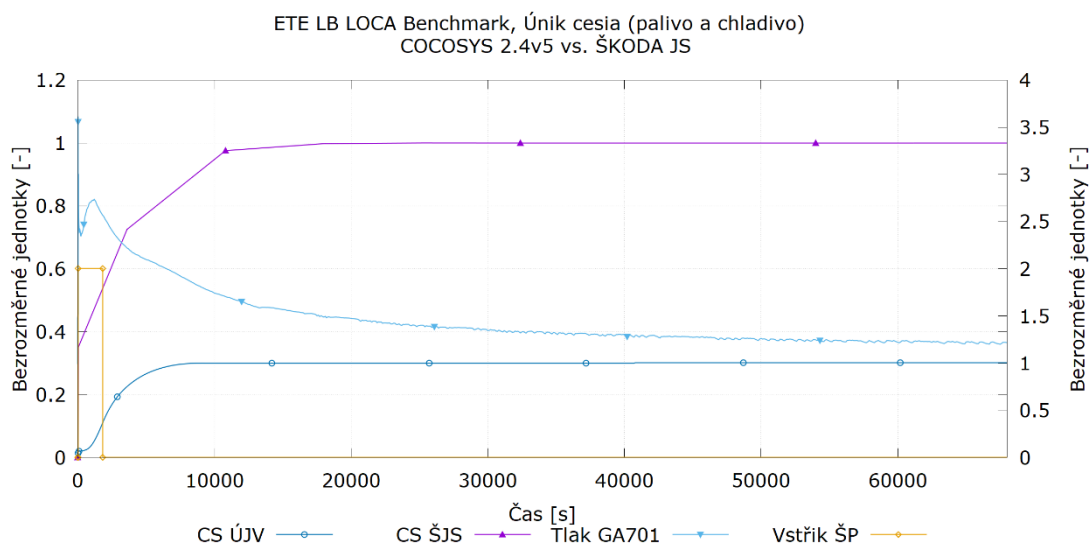
Obr. 58 Únik jódu (porovnání výpočtu kódem COCOSYS se ŠKODA JS)

Tab. 21 Únik jódu ve vybraných časových krocích, porovnání výpočtu kódem COCOSYS se ŠKODA JS

Čas	ŠKODA JS	COCOSYS	Odchylka výpočtu COCOSYS od ŠKODA JS
[s]	[-]	[-]	[%]
0	0.00	0.00	0.00
30	0.40	0.02	-94.39
3600	0.69	0.18	-73.44
10800	0.88	0.27	-68.74
18000	0.91	0.30	-67.10
25200	0.92	0.32	-65.71
32400	0.94	0.33	-64.86
39600	0.95	0.34	-63.99
46800	0.97	0.36	-63.06
54000	0.98	0.37	-62.50
61200	0.99	0.38	-61.93

5.4.2.2 Cesium

Napočtené úniky cesia jsou v porovnání s referenčním výpočtem ŠKODA JS opět významně nižší. Odchylka se pohybuje v dlouhodobém hledisku do 70 %, trendy úniku jsou v dobré shodě. Grafické porovnání je patrné na Obr. 59. Porovnání hodnot ve vybraných časových úsecích je uvedeno v Tab. 22.



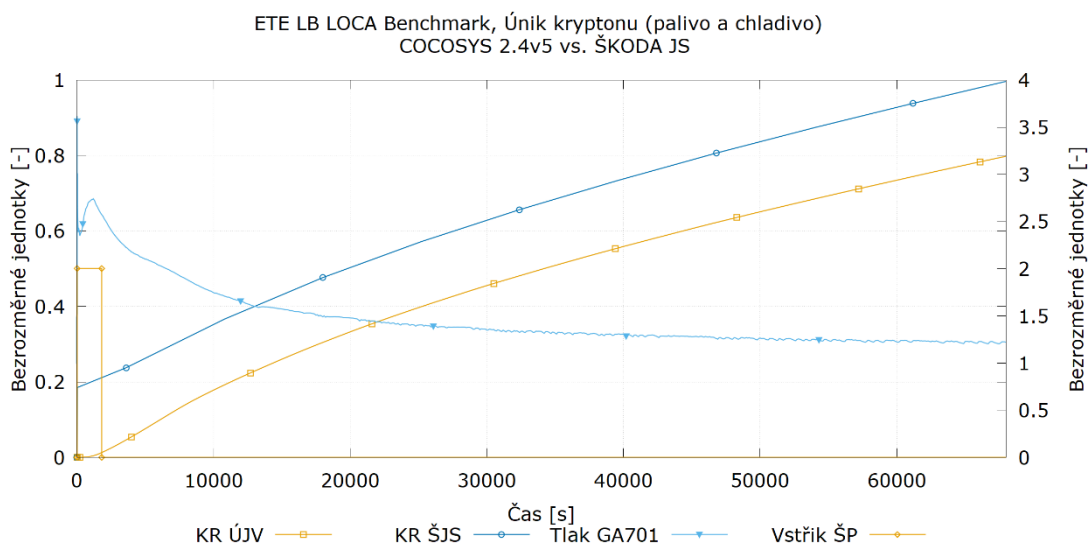
Obr. 59 Únik cesia (porovnání výpočtu kódem COCOSYS se ŠKODA JS)

Tab. 22 Únik cesia ve vybraných časových krocích, porovnání výpočtu kódem COCOSYS se ŠKODA JS

Čas	ŠKODA JS	Konzervativní varianta	Odchylka výpočtu COCOSYS od ŠKODA JS
[s]	[-]	[-]	[%]
0	0.00	0.00	0.00
30	0.35	0.02	-94.42
3600	0.73	0.23	-68.93
10800	0.98	0.30	-69.22
18000	1.00	0.30	-69.89
25200	1.00	0.30	-69.95
32400	1.00	0.30	-69.96
39600	1.00	0.30	-69.95
46800	1.00	0.30	-69.95
54000	1.00	0.30	-69.95
61200	1.00	0.30	-69.94

5.4.2.3 Krypton

Napočtené úniky kryptonu jsou v porovnání s referenčním výpočtem ŠKODA JS nižší. Odchylka se pohybuje v dlouhodobém hledisku nad 20 %. Tato odchylka je odlišná od předchozích případů. Nižší rozdíl v úniku je zapříčiněn volbou počátečních a okrajových podmínek, které byly voleny konzervativně vůči maximálnímu tlaku. Grafické porovnání je uvedeno na Obr. 60. Porovnání hodnot ve vybraných časových úsecích je uvedeno v Tab. 23.



Obr. 60 Únik kryptonu (porovnání výpočtu kódem COCOSYS se ŠKODA JS)

Tab. 23 Únik kryptonu ve vybraných časových krocích, porovnání výpočtu kódem COCOSYS se ŠKODA JS

Čas	ŠKODA JS	Konzervativní varianta	Odchylka výpočtu COCOSYS od ŠKODA JS
[s]	[-]	[-]	[%]
0	0.00	0.00	0.00
30	0.19	0.00	-99.84
3600	0.24	0.05	-80.52
10800	0.37	0.19	-47.56
18000	0.48	0.30	-36.05
25200	0.57	0.40	-30.16
32400	0.66	0.48	-26.69
39600	0.73	0.55	-24.41
46800	0.81	0.62	-22.81
54000	0.87	0.69	-21.62
61200	0.94	0.74	-20.67

5.4.3 Shrnutí dosažených výsledků

Provedený benchmark potvrdil vhodnost aplikace výpočetního kódu COCOSYS na problematiku určení zdrojového členu při haváriích s únikem chladiva. Obecně lze konstatovat, že poskytuje nižší odhady úniku, což je dáno zejména realistickou, s dostatečnou mírou konzervativismu, simulací všech relevantních procesů spojených s transportem štěpných produktů uvnitř kontejmentu.

Prezentované výsledky napočtené výpočetním kódem COCOSYS mohou být v konečném důsledku, při započtení jaderného rozpadu, ještě příznivější. Tento efekt však není možné v současném nastavení výpočtu řešit kódem COCOSYS. O jaderný rozpad v rámci zdrojového členu se stará další kód ve výpočetním řetězci, JRODOS.

6 Závěr

Určení zdrojového členu je nedílnou součástí prokazování bezpečnosti jaderných elektráren nejen v České republice. Jde o soubor činností, které jsou významně regulovány jak ze strany českého jaderného dozoru, tak i z pohledu mezinárodní legislativy. Na druhé straně se jedná o složitou interdisciplinární problematiku, která je řešena týmy odborníků na různé oblasti zainteresované v rámci celého výpočetního řetězce. V posledních letech se problematika určení zdrojového členu opět začala řešit, zejména s ohledem na události ve Fukušimě, které vedly k iniciaci mnoha R&D projektů jako třeba probíhající OECD ESTER [95] zaměřený na revolatilizaci organických sloučenin jódu či evropský projekt R2CA [96] zaměřený na redukci radiačních následků nehod.

Výchozí stav, který byl v České republice před několika lety na počátku této práce, nebyl trvale udržitelný a vyžadoval evoluci. Díky změnám v legislativě se navíc otevřela příležitost pro rozvoj ekonomické činnosti v této oblasti. Zásadní význam měl i projekt TAČR TH02021010 Metodiky a modely výpočtu zdrojového členu pro určení radiologických následků nehod JE, díky kterému bylo možné provést velkou část zde uvedených činností.

Pokud by se měl shrnout přínos této práce, tak v první řadě jde o novou certifikovanou metodiku určování zdrojového členu, která nachází uplatnění v rámci bezpečnostních analýz jaderných elektráren v České republice.

Druhou významnou oblastí je standardizace výpočetního kódu COCOSYS před komisí pro číření štěpných produktů. Historicky byl kód COCOSYS využíván v České republice pouze pro účely termohydraulických analýz, pro které byl taktéž standardizován. Pro standardizaci bylo potřeba adekvátně rozšířit validační matici, což znamenalo provést selekci vhodných validačních experimentů a získání potřebných dat. Následovala jejich podrobná analýza, příprava vstupních dat a modelů, a poté již samotné přepočty. Tyto činnosti však byly často iterovány s cílem získat odpovídající výsledky a zejména zkušenosti, které by byly následně přenositelné na modelování jaderné elektrárny.

Třetí oblastí je úprava existujícího výpočetního modelu, který byl původně určen pouze pro termohydraulické analýzy. Byly provedeny jednak modifikace stávajících termohydraulických částí. Hlavní změna však spočívala v tvorbě kompletně nové separátní kompartmentizace pro potřeby výpočtu transportu jódu. Zde se plně využili zkušenosti z dříve provedené validace.

Čtvrtou oblastí jsou počáteční a okrajové podmínky. Nejenže došlo k určení vnitřního kontejnmentového zdrojového členu, což bylo možné provést jen díky nové metodice, zároveň byla provedena i citlivostní studie, která vyvrátila dřívější názor, že maximalizace úniku štěpných produktů je spojena s maximalizací úniku hmoty z kontejnmentu. Ze

zmíněného lze konstatovat, že v případě využití různých výpočetních nástrojů a modelů mohou být konzervativní počáteční a okrajové podmínky odlišné. Tudíž by citlivostní studie měla být nedílnou součástí aplikace nového modelu či výpočetního kódu.

Pátou, zcela zásadní oblastí je výpočet zdrojového členu. Zde byly aplikovány všechny poznatky a činnosti provedené v předchozích bodech. S ohledem na zadání práce je potřeba konstatovat, že samotným určením zdrojového členu nelze nijak ověřit to, zda je dodrženo kritérium přijatelnosti KP9 na napočtené dávky definované v 1.2.2. Pro ověření splnění tohoto kritéria by bylo potřeba provést navazující výpočet radiačních následků, kupříkladu s využitím výpočetního kódu JRODOS. Jediným kritériem, které bylo splněno a které lze v rámci tohoto výpočtu vyhodnotit, je KP10 na maximální povolený přetlak.

Šestou oblastí je porovnávací výpočet se ŠKODA JS, který, i přes rozdílný přístup k výpočtu, přináší, z hlediska trendu, obdobné výsledky. Navíc se ukázal vliv modernějších výpočetních modelů, které vedly ke snížení konzervativismu u nového výpočetního řešení s využitím samotného kódu COCOSYS.

S ohledem na dosud uvedené lze konstatovat, že všechny vytyčené cíle byly splněny a některé zde prezentované výsledky přesáhly rozsah zadání.

Určení zdrojového členu zažívá neustálý vývoj. Probíhá řada R&D programů, které mají za cíl dále zpřesňovat výsledky a zároveň dochází i k vývoji legislativy, která zapracovává nejnovější poznatky zmíněných R&D projektů a zkušenosti přímo z jaderných elektráren.

Výhled na další vývoj činností prezentovaných v této práci je poměrně jasný. V první řadě jde o rozvoj validační matice o další experimenty, jako je např. ThAI, MARVIKEN či IPRESCA. V druhé řadě se plánuje využití novější verze kódu COCOSYS, která opět posouvá možnosti výpočtu transportu štěpných produktů. S její aplikací souvisí opětovná standardizace pro zamýšlenou oblast použití. V oblasti vývoje metodik je zásadní projekt R2CA, jehož výstupy mohou výhledově ovlivnit stávající metodiku určení zdrojového členu. Vývoj je nutný a nezastavitelný, je však potřeba postupovat evolučně, nikoli revolučně a vše stavět na pevných základech.

Seznam literatury a publikací

- [1] Zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon (ve znění pozdějších předpisů).
- [2] DETERMINISTICKÉ BEZPEČNOSTNÍ ANALÝZY UDÁLOSTÍ ABNORMÁLNÍHO PROVOZU A ZÁKLADNÍCH PROJEKTOVÝCH NEHOD, BEZPEČNOSTNÍ NÁVOD BN-JB-2.10 (Rev. 0.0) - Bezpečnostní návody SÚJB, Účinnost od 1. 7. 2020
- [3] Vyhláška SÚJB č. 408/2016Sb. o požadavcích na systém řízení
- [4] Vyhláška SÚJB č. 422/2016 Sb. o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje (Sbírka předpisů ČR – částka 172/2016 Sb.)
- [5] Vyhláška SÚJB č. 359/2016 Sb. o podrobnostech k zajištění zvládnutí radiační mimořádné události
- [6] Vyhláška SÚJB č. 329/2017 Sb. o požadavcích na projekt jaderného zařízení
- [7] Vyhláška SÚJB č. 162/2017 Sb. o požadavcích na hodnocení bezpečnosti podle atomového zákona
- [8] Ing. Karla Petrová, Kritéria přijatelnosti radiační ochrany SÚJB pro bezpečnostní analýzy jaderných elektráren Dukovany a Temelín. Příloha dopisu SÚJB zde dne 3. 5. 2019, číslo jednací SÚB/RO/9326/2019
- [9] Směrnice k hodnocení výpočtových programů pro posuzování jaderné bezpečnosti. SÚJB, VDS 030
- [10] American Nuclear Standard ANSI/ANS-51.1-1983: Nuclear Safety Criteria for the Design of Stationary Pressurized Water Reactor Plants.
- [11] IAEA Safety Standards, No. SSR-2/1 (Rev. 1), Safety of Nuclear Power Plants: Design, IAEA, Vienna 2016
- [12] IAEA Safety Standards, No. SSG-2, Deterministic Safety Analysis for Nuclear Power Plants, IAEA, Vienna 2009
- [13] IAEA Safety Report Series No. SRS-30, Accident Analysis for Nuclear Power Plants with Pressurized Water Reactors, IAEA 2003
- [14] WENRA Report, Safety Reference Levels for Existing Reactors (Update in relation to lessons learned from TEPCO Fukushima Dai-ichi accident), Issue E, F, September 2014

- [15] Deterministické bezpečnostní analýzy rozšířených projektových podmínek bez vážného poškození jaderného paliva (DEC A). BN-JB-2.2 (Rev.0.0) - Bezpečnostní návody SÚJB, účinnost od 1.11.2019
- [16] PrBZ ETE 1,2 revize 2, verze 17. Společná část Díl 15 – Bezpečnostní rozbor ČEZ - JE Temelín, 31.01. 2017
- [17] Nuclear Fuel Behaviour in Loss-of-coolant Accident (LOCA) Conditions, State-of-the-art Report, NEA OECD, 2009, NEA No. 6846, ISBN 978-92-64-99091-3
- [18] Regulatory Guide 1.183, Alternative Radiological Source Terms for Evaluating Design Basis Accidents at Nuclear Power Reactors, U.S. Nuclear Regulatory Commission, July 2000
- [19] Regulatory Guide 1.195, Methods and Assumptions for Evaluating Radiological Consequences of Design Basis Accidents at Light-Water Nuclear Power Reactors, U.S. Nuclear Regulatory Commission, July 2003
- [20] NUREG-0800: Standard Review Plan (SRP) for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants. Revision 6 – March 2007
- [21] Safety Report Series No.30: Accident Analysis for Nuclear Power Plants with Pressurized Water Reactors. STI/PUB/1162, ISBN 92-0-110603-3, IAEA Vienna, 2003
- [22] Denk, L., Kecek, A.: Metodika výpočtů zdrojového členu z kontejnmentu pro určení radiačních následků nehod JE, ÚJV Z 5300 T, Řež prosinec 2019
- [23] Tinka, I.; Macek, J.: Obecný metodický postup pro provádění bezpečnostních analýz JE. Arch.č. EGP 5014-F-150674, 12/2015.
- [24] W. Klein-Heßling, S. Arndt, H. Nowack, C. Spengler, S. Schwarz, D. Eschricht, S. Beck, COCOSYS V2.4v5 User's Manual, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Cologne, Germany (2018)
- [25] H.-J. Allelein, S. Arndt, W. Klein-Heßling, S. Schwarz, C. Spengler, G. Weber, COCOSYS: "Status of development and validation of the German containment code system", Nuclear Engineering and Design, Volume 238 (Issue 4) (2008)
- [26] Weber G., Funke F.: Description of Iodine model AIM-3 in COCOSYS. Technická zpráva, FRAMATOME 2009
- [27] Kecek, A.; Denk, L.: Validační matice výpočetního kódu COCOSYS, Revize 0, ÚJV Z5346, ÚJV Řež, a. s., červen 2020
- [28] Kecek, A.: Ověření výpočetního kódu COCOSYS na experimentu IA (Iodine Adsorption) v rámci projektu BIP (Behaviour of Iodine Project), Revize 1, ÚJV Z 4640 T, Řež, březen 2020

- [29] Kecek, A.: Ověření výpočetního kódu COCOSYS na experimentu OIF (Organic Iodide Formation from Irradiated Surfaces) v rámci projektu BIP (Behaviour of Iodine Project), Revize 1, ÚJV Z 4641 T, Řež, duben 2020
- [30] Kecek, A.: Ověření výpočetního kódu COCOSYS na experimentu RTF (Radioiodine Test Facility) v rámci projektu BIP (Behaviour of Iodine), Revize 1, ÚJV Z 4829 T, duben 2020
- [31] Kecek, A.: Ověření výpočetního kódu COCOSYS na experimentu FALCON, Revize 1, ÚJV Z 4642 T, Řež, červen 2020
- [32] Kecek, A.: Validace výpočetního kódu COCOSYS na experimentu PHEBUS FPT, Revize 1, ÚJV Z 5117 T, Řež, leden 2020
- [33] Denk, L.: Ověřování programu COCOSYS V2.3 na kontejnmentových experimentech provedených v zařízení EREC BC V-213, ÚJV Z 2445 T, Řež, březen 2009
- [34] Stanovisko odborné hodnotící komise č. 6 č. 6 – pro výpočty šíření ra – produktů k použití programu COCOSYS V2.4 (číslo programu 629) pro uživatele ÚJV Řež, a. s., SÚJB, 19.08. 2020
- [35] Kecek, A.; Denk, L.; Král, P.; Husťáková, H.: Evaluation of Containment Source Term of Various VVER-1000/V-320 Loss of Coolant Accidents; Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe, Bled, Slovenia, September 6-9, 2021
- [36] Zamakhaeva, I.; Kecek, A.: Adsorption of Iodine on Painted Surfaces in Nuclear Power Plants Containment Buildings, Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe, Bled, Slovenia, September 6-9, 2021
- [37] Kecek, A.; Denk, L.; Král, P.: SENSITIVITY STUDY OF A VVER-1000/V-320 CONTAINMENT SOURCE TERM DURING A LARGE BREAK LOCA, Proceedings of The 19th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-19), Brussels, Belgium, March 6–11, 2022
- [38] Kecek, A.. "Validation of COCOSYS 2.4v4 AIM module on various single effect and integral experiments" Kerntechnik, vol. 84, no. 5, 2019, pp. 425-433. <https://doi.org/10.3139/124.190045>
- [39] G. A. Glowa, "Behaviour of Iodine Project Final Summary Report." 2011.
- [40] G. A. Glowa, "Behaviour of Iodine Project: Final Report on Iodine Adsorption Studies." p. 67, 2011.
- [41] G. A. Glowa, "Behaviour of Iodine Project: Data Report for Iodine Adsorption Studies (Year 1)." p. 66, 2010.

- [42] G. A. Glowa, "Behaviour of Iodine Project: Data Report for Iodine Adsorption Studies (Year 2)." p. 51, 2010.
- [43] Paulát, O.: Osobní sdělení; 7. 11. 2019, JE Temelín
- [44] Zamakhaeva, I.; Kecek, A.: Adjustace výpočetních modelů COCOSYS pro adsorpci jódu na suchém barveném povrchu uvnitř kontejneru ETE, Revize 0, ÚJV Z5398 T, Řež, září 2020
- [45] W. (exec ed.). Gerhartz, *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 5th Vol. A. Deerfield Beach, Florida: VCH Publishers, 1989.
- [46] Nuclear energy agency, Committee on the safety of nuclear installations (2007): State of the art report on iodine chemistry, s. 60.
- [47] Lemire R., Paquette J., Torgerson D., Wren D., Fletcher J. (1981): Assessment of iodine behavior in reactor containment buildings from a chemical perspective, s. 84.
- [48] Kaiho, Tatsuo. Iodine chemistry and applications / edited by Dr. Tatsuo Kaiho, Kanto Natural Gas Development Co., Ltd., Brine Resources R&D Division, Chiba, Japan. pages cm Includes index. ISBN 978-1-118-46629-2
- [49] Ashmore C., Gwyther J., Sims H. (rok vydání není uveden): Some effects of pH on iodine volatility in containment, s. 12.
- [50] Lemire R., Paquette J., Torgerson D., Wren D., Fletcher J. (1981): Assessment of iodine behavior in reactor containment buildings from a chemical perspective, s. 84.
- [51] Schmitz G. (1999): Kinetics and mechanism of the iodate-iodide reaction and other related reactions. *Physical chemistry chemical physics*, 1, 1909-1914.
- [52] GLOWA, G. A. The Radioiodine Test Facility. Ontario: AECL. 2009.
- [53] KUPFERSCHMIDT, W. C. H., R. PORTMAN a G. G. SANIPELLI. A Description of the Radioiodine Test Facility (RTF) and Results of Initial RTF Full-System Tests. In: A. C. VIKIS, ed. *Proceedings of the Second CSNI Workshop on Iodine Chemistry in Reactor Safety*. Ontario: AECL, 1988.
- [54] GLOWA, G. A. Radioiodine Test Facility P10T2 Test Report. B.m.: AECL. 2009.
- [55] GLOWA, G. A. Radioiodine Test Facility P11T1 Test Report. B.m.: AECL. 2009.
- [56] GLOWA, G. A. Radioiodine Test Facility P9T1 Test Report. B.m.: AECL. 2010.

- [57] GLOWA, G. A. Radioiodine Test Facility P10T3 Test Report. B.m.: AECL. 2011.
- [58] GLOWA, G. A. Radioiodine Test Facility P9T2 Test Report. B.m.: AECL. 2010.
- [59] D. Jacquemain, S. Bourdon, A. de Braemaeker, and M. Barrachin: Final report FPT-1; Saint-Paul-lez-Durance (F); 2000.
- [60] A.-C. Gregoire, P. March, F. Payot et al.: PHEBUS FP FPT2 Final Report; Saint-Paul-lez-Durance (F); 2008.
- [61] F. Payot, T. Haste, B. Biard et al.: PHEBUS FP FPT3 Final Report; Saint-Paul-lez-Durance (F); 2011.
- [62] A. M. Chrétien: FPT3 Data Book; Saint-Paul-lez-Durance (F); 2007
- [63] P. Chapelot, A-C Gregoire, G. Gregoire: FPT4 Final Report; Saint-Paul-lez-Durance (F); 2004
- [64] Řídící parametry pro chemický režim I. O. Data poskytnutá ÚJV Řež, a. s., platná ke dni 7.11.2019
- [65] Chemický režim – kampaň U1C16. Data poskytnutá ÚJV Řež, a. s., platná ke dni 28.2.2019
- [66] Cline J.E., Volleque P.G., Pelletier C.A., "Study of airborne iodine at TMI-2, sources and filtration", 16th DOE Air Cleaning Conference, Session 20, 1980
- [67] Duspiva, J., Kujal, B.: Vytvoření podrobného výpočtového modelu pro hodnocení vodíkového rizika na JE Temelín. ÚJV Z 1678 T, Řež, srpen 2006
- [68] Duspiva, J.: Detailní model kontejnmentu ETE pro MELCOR Archiv skupiny: ÚJV PADESI 2009 05 017
- [69] Denk, L.; Kecek, A: Model kontejnmentu VVER-1000/V-320 JE Temelín pro program COCOSYS. Draft; prosinec 2020
- [70] Král, P.: Bezpečnostní analýzy JE Temelín s palivem TVSA-T Mod2. Termohydraulická analýza LBLOCA zaměřená na maximální únik radioaktivity. Zpráva ÚJV Z 4432 T, prosinec 2015
- [71] Denk, L.: Výpočty nehod LOCA pro doplnění metodiky analýz radiologických následků JE Temelín. Zpráva ÚJV Z 4238 T, Řež, listopad 2014

- [72] Denk, L.: Metodika výpočtů radiačních následků pro bezpečnostní zprávu. Revize 1. Zpráva ÚJV Z 5085 T, prosinec 2020
- [73] dÚP č. 458 – Zkoušky integrity kontejmentu, část B – souhrnná zpráva, EGP 04/1996
- [74] ČEZ – ETE: 1TL001, ZÁKLADNÍ PROVOZNÍ PŘEDPIS, LIMITY A PODMÍNKY, Revize 7 – 19. 12. 2018, ČEZ JE Temelín
- [75] ČEZ – ETE: 1TL002, ZÁKLADNÍ PROVOZNÍ PŘEDPIS, LIMITY A PODMÍNKY – ZDŮVODNĚNÍ Revize 7 – 19. 12. 2018, ČEZ JE Temelín
- [76] Předprovozní bezpečnostní zpráva 1,2 revize 0, V20. Společná část Díl 15 – Bezpečnostní rozbor – Implementace VPR ETE ČEZ - JE Temelín, 31.12. 2019
- [77] Westinghouse: Primary Reactor Protection System Functional Design Report
TEM-I&C-PRPS-016, Revision 16, Book 1 of 2, February 2010
- [78] Předprovozní bezpečnostní zpráva 1,2 revize 2, V18. Příloha č. 1 Vstupní data pro bezpečnostní analýzy ETE. Kapitola 1 – Primární okruh ČEZ - JE Temelín, 30.12.2018
- [79] Předprovozní bezpečnostní zpráva 1,2 revize 2, V18. Příloha č. 1 Vstupní data pro bezpečnostní analýzy ETE. Kapitola 8 – Systém lokalizace havárie ČEZ - JE Temelín, 31.12.2018
- [80] Předprovozní bezpečnostní zpráva 1,2; revize 0; V20. Společná část Díl 2 – Charakteristiky lokality ČEZ - JE Temelín, 31.12.2019
- [81] Předprovozní bezpečnostní zpráva 1,2; revize 0; V20. Společná část Díl 9 – Pomocné systémy ČEZ - JE Temelín, 31.12.2019
- [82] Předprovozní bezpečnostní zpráva 1,2; revize 0; V20. Společná část Díl 6 – Bezpečnostní systémy ČEZ - JE Temelín, 31.12.2019
- [83] Předprovozní bezpečnostní zpráva 1,2 revize 0, V20. Společná část Díl 6 – Bezpečnostní systémy. Kapitola 6.2.6 – Zkoušení těsnosti ochranné obálky JE Temelín, 31.12.2019

- [84] Lebduška, P.: Temelín I& C Systems Channel Accuracy List. Seznam přesností kanálů I&C systémů na Temelíně. TEM-I&C-PRJ-2570, Revize 5b, 05/2010
I&C Energo a.s. pro ČEZ, a.s., arch. č.: ICE5/ZE00042/TD/PRJ2570/rev.5b
- [85] Valeriánová, A.: Aktualizace PrBZ, projektová a extrémní zatížení. Část 2: Stanovení 10 000leté hodnoty tlaku vzduchu pro lokalitu JE Temelín a JE Dukovany.
Dokument číslo C2806-20-0/Z02, Draft, Jacobs Clean Energy s.r.o., 7.12. 2020
- [86] Plaček, V.; Cabalka, M.; Bartoníček, B.; Pejša, R.; Jiran, J.; Kohout, T.: Monitorování podmínek prostředí jaderné elektrárny Temelín. Zpráva DITI 305/11, ÚJV Řež, a.s., červenec 2006
- [87] Plaček, V.; Tschiesche, J.; Kábrt, J.: Monitorování podmínek prostředí JE Temelín. Zpráva ÚJV DITI 305/117-R1, ÚJV Řež, a.s., listopad 2012
- [88] Hep, J.; Smutný, V.: Radiologické důsledky LBLOCA ETE s palivem TVSA-T.mod 2 v 5-leté ustálené kampani. Zpráva Ae 16868/Dok Rev. 0, ŠKODA JS, Plzeň 2016
- [89] Čarný, P.: Stanovenie radiačných parametrov pre kvalifikáciu zariadení JE Temelín pre palivo TVSA-T a výkon zvýšený na 104% povodného výkonu. ABmerit/2011/UJV/01 rev.02, ABmerit, 2011
- [90] Kecek, A.: Citlivostní studie modelu kontejnmentu ETE pro šíření jódu Zpráva ÚJV Z 5150 T, ÚJV Řež, a. s., prosinec 2019
- [91] Denk, L.: Ověření stanovování úniků netěsnostmi kontejnmentu JE Temelín.
Zpráva ÚJV Z 4904 T, ÚJV Řež, a. s., prosinec 2017
- [92] Husťáková, H.: Analýza radiačních následků nehody LB LOCA JE Temelín. Zpráva ÚJV Z 5577 T, ÚJV Řež, a. s., březen 2021
- [93] HEP, J.; SMUTNÝ, V.: Radiační následky nehod řešených v kapitole 15.6.6 PpBZ1,2 ETE, velká LOCA a malá LOCA. Ae 15337 / Dok, Rev. 0, Plzeň, prosinec 2013
- [94] ULLMANN, V.: On-line odborné pojednání z oblasti jaderné fyziky dostupné z <<http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika2.htm>>; platné ke dni 31. 7. 2020
- [95] OECD NEA Projekt ESTER, dostupné z <https://www.oecd-nea.org/icms/pl_58926/experiments-on-source-term-for-delayed-releases-ester-project> platné ke dni 1. 3. 2022

[96] Horizon 2020 projekt R2CA, dostupné z <<https://cordis.europa.eu/project/id/847656>>, platné ke dni 1. 3. 2022

Příloha 1

Potvrzení o spoluautorství

Já, níže podepsaný Ing. Lubomír Denk, potvrzuji, že výsledky práce doktoranda Ing. et Ing. Adama Kecka jsou autentické. Doktorand během svého působení aktivně vypracovával metodiku určení zdrojového členu pro nehody typu LOCA, prováděl validace výpočetního kódu COCOSYS, rozvíjel stávající výpočetní model VVER-1000/V-320 pro výpočty šíření štěpných produktů včetně nutných úprav termohydraulické části modelu, a v neposlední řadě prováděl samostatné výpočty události LOCA s cílem určení zdrojového členu.

Ke zmíněné činnosti přistupoval Ing. et Ing. Adam Kecek svědomitě a s odpovídajícím vědeckým přístupem.

V Řeži dne 18. 3. 2022



Ing. Lubomír Denk

ÚJV Řež, a. s.

Oddělení bezpečnostních analýz.

Příloha 2

Potvrzení o spoluautorství

Já, níže podepsaná Ing. Iana Zamakhaeva, potvrzuji, že výsledky práce zaměřené na adjustaci výpočetního modelu pro adsorpci na suchém barveném povrchu byly dosaženy společnou prací s Ing. et Ing. Adamem Keckem.

Ve zmíněné činnosti vystupoval Ing. et Ing. Adam Kecek jako vedoucí mého výzkumného úkolu na FJFI ČVUT v Praze, kdy odborně směřoval mé počínání a korigoval výsledky mé vědecké práce, díky čemuž má naprosto zásadní podíl na spoluautorství.

V Řeži dne 18. 3. 2022



Ing. Iana Zamakhaeva

ÚJV Řež, a. s.

Oddělení bezpečnostních analýz