

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**  
**ÚSTAV JADROVÉHO A FYZIKÁLNEHO INŽINIERSTVA**

**Ing. Andrej Slimák**

Autoreferát dizertačnej práce

**PRETAVOVANIE KONTAMINOVANÝCH KOVOVÝCH  
MATERIÁLOV V PROCESSE VYRAĐOVANIA  
JADROVÝCH ZARIADENÍ Z PREVÁDZKY**

**na získanie akademického titulu philosophiae doctor**

**v doktorandskom študijnom programe:**

**5.2.31 Jadrová energetika**

**Bratislava, jún 2015**

**Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave jadrového a fyzikálneho inžinierstva, Fakulty elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave.**

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

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

**Oponenti:** **RNDr. Peter Gerhart, PhD.**  
Jadrová a vyrad'ovacia spoločnosť, a.s.,  
Tomašíkova 22, 821 02 Bratislava

**doc. RNDr. Karol Holý, CSc.**  
Univerzita Komenského v Bratislave,  
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky,  
Katedra jadrovej fyziky a biofyziky,  
Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

**Autoreferát bol rozoslaný:.....**

**Obhajoba dizertačnej práce sa koná.....o.....h.  
na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, Ilkovičova 3, 812 19,  
Bratislava v zasadačke ÚJFI, blok A, 6. poschodie, miestnosť 616.**

prof. Dr. Ing. Miloš Oravec  
dekan fakulty  
Slovenská technická univerzita v Bratislave,  
Fakulta elektrotechniky a informatiky,  
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

<b>ÚVOD</b> .....	4
<b>1. SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY</b> .....	5
<b>2. CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE</b> .....	7
<b>3. ZVOLENÁ METÓDA SPRACOVANIA</b> .....	8
3.1 Definícia základných vstupných parametrov .....	9
3.1.1 <i>Všeobecné vstupné predpoklady</i> .....	9
3.1.2 <i>Popis vykonávaných činností v procese pretavovania</i> .....	10
3.2 Metóda tvorby modelu pre hodnotenie rádiologických vplyvov.....	11
3.2.1 <i>Stanovenie nuklidového vektora</i> .....	11
3.2.2 <i>Popis jednotlivých ciest ožiarovania</i> .....	13
3.2.3 <i>Popis výpočtových prostriedkov zvolených pre vykonanie jednotlivých analýz</i> .....	14
3.3 Stanovenie množstva kovových materiálov vhodných na pretavenie .....	14
<b>4. VÝSLEDKY DIZERTAČNEJ PRÁCE S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKOV</b> ...	15
4.1 Hodnotenie radiačných vplyvov procesu pretavovania.....	15
4.1.1 <i>Hodnotenie radiačných vplyvov na pracovníkov</i> .....	15
4.1.2 <i>Hodnotenie radiačných vplyvov na ŽP a obyvateľstvo</i> .....	16
4.2 Stanovenie množstva kovových rádioaktívnych materiálov pochádzajúcich z vyradovania JE A1 a JE V1 vhodných na pretavenie .....	18
4.2.1 <i>Stanovenie množstva kovových rádioaktívnych materiálov pre definované scenáre</i> .....	18
4.2.2 <i>Analýza hodnotenia zisku/nákladov</i> .....	20
4.3 Produkcia sekundárnych RAO .....	21
4.4 Návrh limitov prijateľnosti na pretavenie.....	22
<b>5. SÚHRN VÝSLEDKOV A NOVÝCH POZNATKOV, ZÁVERY PRE PRAX A ĎALŠÍ ROZVOJ VEDNEJ DISCIPLÍNY</b> .....	24
<b>POUŽITÁ LITERATÚRA</b> .....	27
<b>PUBLIKOVANÉ PRÁCE</b> .....	29
<b>SUMMARY</b> .....	33

## ÚVOD

V súčasnosti zohrávajú jadrové zariadenia (JZ) významnú úlohu v rôznych oblastiach priemyslu, energetiky, vedy, medicíny, ako aj výskumu. Medzi najrozšírejšie jadrové zariadenia patria jadrové elektrárne (JE), ktoré patria k významným a spoľahlivým producentom elektrickej energie vo svete. Avšak ako každé technologické zariadenie, tak aj jadrové zariadenia sú limitované dobou svojej životnosti, a preto po jej uplynutí je potrebné zaoberať sa problematikou ich bezpečného a ekonomického vyradenia. Neoddeliteľnou súčasťou každého jadrového zariadenia je teda jeho vyradenie z prevádzky, avšak v porovnaní s inými priemyselnými zariadeniami je tento proces špecifický z dôvodu prítomnosti rádioaktivity. V súčasnosti je vo svete v prevádzke viac ako 400 energetických reaktorov, pričom životnosť väčšiny z nich dosiahla už viac ako 25 rokov. Očakáva sa, že v časovom horizonte niekoľko desiatok rokov bude potrebné vyradiť stovky energetických jadrových reaktorov a celý rad jadrových výskumných zariadení. Veľkým problémom počas vyradenia jadrových zariadení je produkcia veľkého množstva veľmi nízkoaktívnych odpadov, ako je kovový šrot a betónová sutina. Odhaduje sa, že v najbližších desaťročiach vznikne približne 5 miliónov ton kovového šrotu vhodného na recykláciu a opätovné využitie iba počas vyradenia energetických reaktorov. Berúc do úvahy aj ostatné jadrové zariadenia, množstvo takéhoto šrotu sa odhaduje na 30 miliónov ton. Takéto veľké množstvá iba mierne kontaminovaných kovov môžu významne negatívne ovplyvniť stratégiu nakladania s rádioaktívnymi odpadmi (RAO), pretože v súčasnosti prevádzkované úložiská nedokážu prijať takéto odpady veľmi veľkého objemu. Preto ako vhodným spôsobom zaobchádzania s takýmito materiálmi sa javí ich dekontaminácia s následnou recykláciou a opätovným využitím.

Jednou z množstva technológií na dekontamináciu kovových rádioaktívnych materiálov je ich pretavenie v kontrolovanom pásme v špeciálnych zariadeniach. Súčasná skúsenosti a praktiky vo svete dokazujú, že pretavovanie kovového šrotu môže pozitívne ovplyvniť stratégiu nakladania s rádioaktívnymi odpadmi, pretože kovy môžu byť po pretavení neobmedzene využité, resp. využité obmedzene mimo, ako aj v rámci jadrového priemyslu, čím sa ušetrí náklady spojené s ich spracovaním, úpravou a ukladaním v kategórii rádioaktívny odpad.

Dizertačná práca sa zaoberá vytvorením metodiky pre hodnotenie procesu pretavovania zaradeného do manažmentu nakladania s rádioaktívnymi kovmi. V práci je popísaný postup hodnotenia rádiologických vplyvov pretavovania kontaminovaných kovov na pracovníkov, životné prostredie (ŽP) ako aj obyvateľstvo. Dôležitou súčasťou je aj stanovenie množstva kontaminovaných kovov vhodných na pretavenie a ocenenie zisku nákladov. Hodnotenie procesu pretavovania bolo aplikované pre kontaminované kovy vzniknuté vyradením JE A1 a JE V1.

Dizertačná práca bola čiastočne riešená v rámci výskumných grantových projektov VEGA 1/0796/13 a CONRELMAT.

# 1. SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Vyrad'ovanie z prevádzky predstavuje záverečnú fázu životného cyklu jadrového zariadenia, ktorá je tématicky rozsiahla, organizačne zložitá a finančne značne náročná. Dôsledná príprava tohto procesu je predpokladom jeho zabezpečenia po finančnej, materiálovej ako aj organizačnej stránke tak, aby sa vyrad'ovanie JZ uskutočnilo optimálnym spôsobom [1].

V procese vyrad'ovania jadrového zariadenia vzniká značné množstvo aktívnych, ako aj neaktívnych materiálov rôznych skupenstiev, materiálového zloženia a s rôznou úrovňou a charakterom v nich viazanej aktivity. Za hodnotný materiál možno považovať kovy, preto sa ako vhodný spôsob ich nakladania javí dekontaminácia a uvoľnenie do ŽP, ak je to možné. V súčasnosti existuje viacero technológií na dekontamináciu kontaminovaných kovových materiálov, z ktorých sa ako vhodná javí technológia pretavovania.

Pretavovanie kovov predstavuje vysokoteplotný proces, počas ktorého je kovový komponent zahriaty nad jeho teplotu topenia. Počas tohto procesu sú jednotlivé prvky, ako aj ich rádioaktívne izotopy prerozdelené medzi 3 zložky [2]-[5]:

- ingot: Primárny produkt pretavovania. S ingotom sa ďalej zaobchádza podľa jeho rádiologickej charakterizácie.
- troska: Predstavuje sekundárny pevný RAO, ktorý je potrebné upraviť a uložiť ako RAO.
- prach/pecné plyny: Sekundárny RAO, ktorý je zachytený na vzduchotechnických filtroch.

Distribúcia rádionuklidov počas pretavovania predstavuje zložitý proces, ktorý závisí od vlastností pretavovaného kovu a kontaminantov (chemické zloženie, rozpustnosť kontaminantu v roztavenom kove, hustota oxidov, zloženie a zásaditosť troskotvorného činidla), ako aj vlastností pece (teplota pretavovania, typ pece). Prchavé kontaminanty, ako sú napr. cézium, jód a trícium, prechádzajú najmä do pecných plynov a sú zachytávané na filtračnom systéme. Kontaminanty chemicky podobné železu (napr. kobalt, nikel, chróm, zinok a mangán) zostávajú v tavenine. Transurány a niektoré štiepne produkty prechádzajú do trosky, ktorá je následne z povrchu taveniny odstránená [2].

Jednou z veľkých výhod pretavby rádioaktívneho kovového šrotu je, že vo výslednom ingote sú inkorporované takmer iba prvky podobné železu, ktoré sú prevažne krátkožijúce. Dominantným rádioizotopom (pre väčšinu šrotu pochádzajúceho z vyrad'ovania JZ obsahujúcich jadrový reaktor) je  $^{60}\text{Co}$ , ktorý má dobu polpremeny 5,27 roka. Takmer všetky ostatné rádionuklidy inkorporované v ingote majú kratšiu dobu polpremeny ( $^{55}\text{Fe}$  – 2,73 roka,  $^{54}\text{Mn}$  – 312 dní,  $^{57}\text{Co}$  – 272 dní) [3], výnimku tvoria iba rádioizotopy niklu  $^{63}\text{Ni}$  – 100 rokov a  $^{59}\text{Ni}$  – 76 000 rokov. Pretavba všeobecne poskytuje maximálne možnú hranicu objemovej redukcie (objemový redukčný faktor 80 - 90) a spomínaná dekontaminačná účinnosť dosahuje pre vybrané nuklidy hodnoty až do  $10^3$  [4]. Finálna matrica – kovový ingot sa vyznačuje výbornými vlastnosťami týkajúcimi sa pevného viazania inkorporovaných rádionuklidov v kovovej mriežke a dlhodobej fyzikálnej aj chemickej stability. Tým sa vytvára predpoklad pre dlhodobé a bezpečné uloženie, respektíve opätovné využitie ingotu.

Hlavné výhody pretavovania kontaminovaných kovových materiálov možno zhrnúť nasledovne:

- v súčasnosti rozsiahle preskúmaná oblasť,

- dekontaminácia pretavovaného kovu dosiahnutá efektívnou separáciou niektorých rádionuklidov (štiepne produkty, transurány a prchavé látky), ktoré prechádzajú do trosky a pecných plynov,
- homogenizácia kovu a aktivity v ingote, čo výrazne zjednodušuje stanovenie zvyškovej aktivity ingotu,
- vysoká redukcia objemu (ak sa uvažuje s pretavením na zníženie objemu pred uložením do úložiska),
- Ingoty je možné po pretavení uvoľniť do ŽP, resp. jednoducho skladovať určitú dobu pokiaľ ich aktivita neklesne pod uvoľňovaciu úroveň.

Malé množstvá železného šrotu z jadrových zariadení boli v minulosti uvoľnené a pretavené v komerčných pretavovacích zariadeniach. Tieto množstvá, ako aj limity rádioaktivity sa v jednotlivých krajinách líšili. Za posledných 25 rokov sa pretavovanie kovového rádioaktívneho šrotu vyvinulo ako nové priemyselné odvetvie, pričom pre minimalizáciu množstva kontaminovaného železa sa používajú overené technológie a metódy. V súčasnosti je vo svete niekoľko zariadení na recykláciu kovového RAO pomocou pretavby [6]-[19]:

- Studsvik, Švédsko (1987),
- CARLA, Nemecko (1989),
- INFANTE, Francúzsko (1992),
- SEG, Oak Ridge, USA (1992),
- Capenhurst, Veľká Británia (1994),
- CENTRACO, Francúzsko (1999),
- ECOMET-S, Ruská Federácia (2002).

Najbohatšie skúsenosti v oblasti pretavovania kontaminovaných kovov majú vo Švédskom zariadení Studsvik a Nemeckom zariadení „CARLA“, ktoré sú v prevádzke už viac ako 25 rokov. Zariadenie „INFANTE“ vo Francúzsku slúžilo najmä na pretavovanie kovov z vyradovania reaktorov G2 a G3 v areáli Marcoule a v súčasnosti už nie je v prevádzke. V Spojených štátoch amerických bolo sprevádzkované pretavovacie zariadenie v Oak Ridge, kde sa kov recykloval najmä v rámci jadrového priemyslu. Vzhľadom na skutočnosť, že v USA je ukladanie RAO relatívne lacné, je pretavovanie kovov za účelom uvoľňovania finančne nevýhodné. Vo Veľkej Británii bolo v rámci vyradovania obohacovacieho závodu v areáli Capenhurst sprevádzkované pretavovacie zariadenie, ktoré okrem železných kovov pretavovalo aj farebné kovy. Vo Francúzsku v súčasnosti neexistuje koncept uvoľňovania materiálov z JZ, preto pretavovacie zariadenie „CENTRACO“ pretavuje a recykluje kovy iba v rámci jadrového priemyslu (sudy pre ukladanie RAO). V Ruskej Federácii bolo zariadenie na pretavovanie kovov sprevádzkované najmä za účelom dekontaminácie a uvoľňovania veľkého množstva naakumulovaných kontaminovaných kovov. Detailne sú jednotlivé zariadenia popísané v dizertačnej práci.

Dlhodobé prevádzkové skúsenosti (v zariadení CARLA) ukázali, že individuálna efektívna dávka obdržaná pracovníkmi je menšia ako 1 mSv ročne a výpuste do atmosféry predstavujú menej ako 1% z povolených limitov.

V Slovenskej republike v súčasnosti nie je vybudované zariadenie na pretavovanie kontaminovaných kovových materiálov, avšak v blízkej budúcnosti sa plánuje so sprevádzkovaním takéhoto zariadenia (január 2018).

## 2. CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Základným cieľom dizertačnej práce je vypracovanie komplexnej metodiky a nástrojov, ktoré majú prispieť k riešeniu problematiky dekontaminácie a recyklácie kontaminovaných kovových materiálov pomocou technológie pretavovania. Jednotlivé úlohy vedúce k splneniu cieľov doktorandskej práce je možné zhrnúť do nasledovných bodov:

1. Vypracovanie podrobnej analýzy procesu pretavovania kovových rádioaktívnych materiálov pochádzajúcich z vyradovania JZ. Popis doterajších prevádzkových skúsenosti v oblasti pretavovania kovových RAO vo svete a popis jednotlivých zariadení využívajúcich danú technológiu.
2. Popísať možnosti využitia technológie pretavovania na území Slovenskej republiky.
3. Vypracovanie metodiky pre hodnotenie procesu pretavovania kontaminovaných kovových materiálov.
4. Komplexné posúdenie rádiologických vplyvov na pracovníkov, životné prostredie a obyvateľstvo počas procesu pretavovania kontaminovaného kovového šrotu z elektrární A1 a V1.
5. Určenie množstva kovových rádioaktívnych materiálov vhodných na pretavenie a opätovné využitie pochádzajúcich z vyradovania jadrových elektrární A1 a V1.
6. Vypracovanie analýzy ocenenia nákladov spojených s pretavovaním (vrátane nákladov na vybudovanie pretavovacieho zariadenia) a následným uvoľnením kovových RA materiálov v porovnaní s ich spracovaním, úpravou a uložením ako RAO.
7. Návrh limitov prijateľnosti kontaminovaných kovových materiálov na pretavenie.
8. Aplikácia vytvorenej metodiky pre modelové hodnotenie procesu pretavovania vybraných komponentov.

### 3. ZVOLENÁ METÓDA SPRACOVANIA

Predkladaná práca podrobne skúma možnosť využitia pretavovania ako vhodnej technológie pre dekontamináciu a zníženie objemu kovových RA materiálov vzniknutých počas vyradovania JE v SR. Dôraz je kladený na ohodnotenie rádiologických vplyvov procesu pretavovania na pracovníkov, ktorý prichádzajú do kontaktu s kovom určeným na pretavenie. Taktiež sú v práci ohodnotené vplyvy na životné prostredie a obyvateľstvo žijúce v okolí pretavovacieho zariadenia. Dôležitou požiadavkou pre stanovenie jednotlivých rádiologických vplyvov predstavuje súbor technických informácií z praxe zaoberajúci sa procesom pretavovania, ako aj parametrami pretavovacieho zariadenia. Dôležitou súčasťou práce je taktiež určenie množstva kovových RA materiálov vhodných na pretavenia a na základe stanoveného množstva vypracovanie analýzy ocenenia nákladov spojených s pretavovaním a následným uvoľnením dekontaminovaného kovu do ŽP v porovnaní s ich spracovaním, úpravou a uložením ako RAO. Takisto je potrebné vopred odhadnúť predpokladané množstvo sekundárnych RAO vzniknutých počas pretavovania kontaminovaných kovov. Súbor potrebných vstupných parametrov spolu s detailným popisom procesu pretavovania, ako aj pretavovacieho zariadenia, tvorí zvolenú metódu spracovania, ktorá je popísaná v nasledujúcich kapitolách.

Vzhľadom na skutočnosť, že pretavovanie kovov je náročná technológia ako z technickej stránky, tak aj z ekonomickej, je potrebné poznať možnosť využitia danej technológie v podmienkach Slovenskej republiky. V súčasnosti sú v SR v procese vyradovania dve jadrové elektrárne, JE A1 a JE V1 nachádzajúce sa v areáli Jaslovské Bohunice.

Jadrová elektrárň A1 bola uvedená do prevádzky v roku 1972. Išlo o JE s reaktorom moderovaným ťažkou vodou a chladeným plynom (typ HWGCR), ktorý ako palivo používal prírodný kovový urán. Počas jej päťročnej prevádzky došlo k dvom haváriám, pričom po havárii v roku 1977 označenej stupňom 4 na medzinárodnej stupnici INES bola odstavená. Počas havárie došlo k poškodeniu palivových článkov a kontaminácie celého primárneho okruhu a následne prostredníctvom netesností parogenerátorov aj niektorých častí sekundárneho okruhu. V poradí druhou elektrárnou v procese vyradovania je JE V1. Ide o dvojblok s reaktorom typu VVER-440 uvedeným do prevádzky v roku 1978 (1. blok), resp. 1980 (2. blok). Elektrárň bola odstavená po 28 rokoch štandardnej prevádzky, počas ktorej nedošlo k žiadnej udalosti, ktorá by viedla ku kontaminácií primárneho okruhu štiepnymi produktmi [20].

Obidve elektrárne predstavujú potenciálny zdroj kovových RAO s veľkým objemom a relatívne nízkou aktivitou, ktoré budú vhodné na dekontamináciu a opätovné využitie. Ako vhodná technológia na ich dekontamináciu, respektíve zníženie objemu sa javí pretavba. V súčasnosti však nie je v Slovenskej republike vybudované zariadenie na pretavovanie kontaminovaných kovových materiálov, avšak v blízkej budúcnosti sa plánuje sprevádzkovanie takéhoto zariadenia. Očakáva sa, že zaradenie pretavby do manažmentu nakladania s kovovými RAO významne zníži objem kovových materiálov, ktoré musia byť uložené ako RAO, čo by sa v konečnom dôsledku malo prejavíť na znížení celkových nákladov na nakladanie s kovovými RAO.

Pre nakladanie s kovými rádioaktívnymi materiálmi bolo v Slovenskej republike vybudované špecializované precovisko na fragmentáciu a dekontamináciu umiestnené v bývalej strojovni JE A1. Na fragmentáciu kovov sú využívané ako tepelné, tak aj mechanické metódy a na ich dekontamináciu suchý spôsob (otryskávanie) a mokrý spôsob (velkokapacitná dekontaminačná linka – ultrazvuková vaňa). Pretavovacia pec by mala byť umiestnená



v spomínanej strojovni pričom pôjde o rozšírenie fragmentačného a dekontaminačného pracoviska. Vzhľadom na skutočnosť, že fragmentácia a dekontaminácia kovových materiálov sa bude vykonávať bez ohľadu na to, či bude pretavovacia linka sprevádzkovaná, predkladaná dizertačná práca sa detailne zaoberá iba samotným procesom pretavovania.

### **3.1 Definícia základných vstupných parametrov**

Zostavenie scenára pre pretavovanie kontaminovaných kovových rádioaktívnych (RA) materiálov vychádza z dostupných informácií z praxe, resp. z postupov a parametrov uvedených v dokumentoch zaoberajúcich sa podobnou problematikou. V nasledujúcich riadkoch sú popísané jednotlivé vstupné parametre použité pri analýze pretavovania.

#### **3.1.1 Všeobecné vstupné predpoklady**

Predkladaná dizertačná práca okrem iného hodnotí aj rádiologické vplyvy pretavovania kontaminovaného kovového šrotu vzniknutého počas vyradovania JE A1 (kontaminovanej najmä štiepnymi produktmi), ako aj JE V1, ktorá je kontaminovaná najmä aktivačnými produktmi. Dôležitým parametrom pre hodnotenie rádiologických vplyvov je aktivita pretavovaného kovového šrotu. Technológia pretavovania efektívne dekontaminuje šrot kontaminovaný najmä štiepnymi produktmi a transuránmi, pričom vo výslednom produkte, ingote, sa homogenizujú kontaminanty chemicky podobné železu (najmä aktivačné produkty). Vzhľadom na rôzny dekontaminačný faktor pre pretavovanie šrotu z JE A1 a JE V1 sa predpokladá, že aktivita pretavovaného kovu bude v praxi značne odlišná. Avšak pre lepšie porovnanie rádiologických vplyvov bola stanovená vstupná (referenčná) aktivita pre oba nuklidové vektory na 1 Bq/g.

Vzhľadom na náročnosť procesu je ďalším dôležitým parametrom zadefinovanie odstraňovania trosky, pričom je ju možné odstrániť viacerými spôsobmi. Prvým spôsobom je odstraňovanie trosky štandardnými metódami a nástrojmi priamo z pece z povrchu taveniny. Tento spôsob bude nižšie označený ako „T1 – ručne“. Ďalším spôsobom odstránenia trosky je jej odstránenie priamo z pece pomocou špeciálne prispôbeného manipulátora, ktorý ovláda operátor pece z riadiacej miestnosti (nižšie označené ako „T2 – manipulátor“), trosku ju možné ďalej odliat' spolu s kovom do kokíl a po stuhnutí odstrániť (nižšie označené ako „T3 – odlievanie s kovom“). Ďalej je možné roztavený kov spolu s troskou preliat' do liacej panvy, na ktorej dne je umiestnený odlievací otvor s uzáverom, cez ktorý sa odleje najprv kov a následne troska (nižšie označené ako „T4 – liaca panva“). Vo výpočtoch rádiologických vplyvov na pracovníkov boli hodnotené všetky uvedené spôsoby.

Vo výpočtoch sa uvažovalo s kapacitou pretavovacej pece 2 tony kovového šrotu, pričom sa uvažuje s pretavením 1 000 ton šrotu ročne.

Pretavovacia pec predstavuje zdroj emisií tuhých znečisťujúcich látok a škodlivín z procesu tavenia kovových RAO. Uvažuje sa, že obslužný priestor pracoviska bude odsávaný autonómnym filtračným zariadením. Takto prefiltrovaný vzduch bude privedený do centrálného odsávacieho systému. Pri výstavbe pretavovacieho zariadenia bude využívaná kombinovaná filtrácia (filtračné zariadenie na pracovisku a centrálny odsávací systém), pričom sa predpokladá, že kombinovaná filtrácia bude mať dostatočnú účinnosť, ktorá minimalizuje nežiadúci vplyv na ŽP.

### 3.1.2 Popis vykonávaných činností v procese pretavovania

Pre účely ohodnotenia predpokladaných vplyvov prevádzky pece bolo vytvorených niekoľko scenárov pre pracovníkov, ktoré sú charakterizované nižšie.

Scenár prevádzka pece modeluje potenciálnu dávku pre pracovníka, ktorý prevádzkuje pec a riadi celý proces tavenia od zavážania pece až po odlievanie ingotov. Predpokladá sa, že operátor pece okrem iného ovláda aj žeriav, ktorým zaváža pec kovovým šrotom. Počas celej doby svojej činnosti sa operátor pece nachádza v riadiacej miestnosti v blízkosti pece, ktorá je od okolitého priestoru oddelená.

Scenár odstraňovanie a manipulácia s troskou modeluje pracovníka, ktorý odstraňuje trosku z pece vybraným spôsobom a manipuluje s MEVA sudom, v ktorom sa troska nachádza. Rôzne metódy odstraňovania trosky sú popísané vyššie, pričom hodnotené boli všetky štyri. V prípade manuálneho odstraňovania trosky sa pracovník nachádza tesne pri otvorenej peci a pomocou štandardných nástrojov odstraňuje trosku do suda umiestneného vedľa pece. V prípade odstraňovania trosky pomocou manipulátora sa v priestore pece nenachádza žiaden pracovník, pričom manipulátor obsluhuje operátor z riadiacej miestnosti a trosku presúva do suda umiestneného vedľa pece. Pri odstraňovaní stuhnutej trosky, ktorá bola odliata do kokíl spolu s kovem sa pracovník nachádza v tesnej blízkosti kokíl. Troska odstránená z kokily je umiestnená do suda. V prípade posledného spôsobu odstraňovania trosky – pomocou liacej panvy – sa pracovník nachádza v blízkosti panvy, pomocou ktorej odlieva roztavený kov do kokíl, pričom po odliatí kovu odleje trosku. Po zatuhnutí je troska následne umiestnená do suda. Troska uzavretá v sude je ďalej transportovaná do skladu RAO, resp. spracovateľského zariadenia.

Scenár odlievanie ingotov modeluje potenciálnu dávku pracovníkovi, ktorý obsluhuje liace pole. V závislosti od spôsobu odstraňovania trosky je roztavený kov odliaty do kovových kokíl po odstránení trosky z pece, resp. odliaty spolu s troskou alebo sa roztavený kov preleje do liacej panvy, z ktorej je následne cez otvor na dne panvy odliavaný do kokíl. Výsledný ingot má hmotnosť cca 400 kg. Počas odlievania ingotov sa pracovník nachádza v blízkosti kokíl, do ktorých je tavenina odliavaná.

Scenár manipulácia s ingotmi predstavuje pracovníka, ktorý manipuluje s už vychladnutými ingotmi. Po stuhnutí sú ingoty vyberané z kokíl a premiestňované do 200 l sudov. Ich zvyšková aktivita je premeraná na gama skeneri. Počas manipulácie s ingotmi sa pracovník nachádza v blízkosti ingotov.

Scenár preprava a skladovanie ingotov modeluje pracovníka, ktorý pomocou vozíka prepravuje ingoty umiestnené v sudoch na palete do skladu. Po stanovení zvyškovej aktivity sú ingoty uvoľnené do životného prostredia, resp. umiestnené do skladu v prípade, ak nespĺňajú limity pre uvoľnenie. Počas vykonávania spomínanej činnosti pracovník obsluhuje vozík, pomocou ktorého transportuje a ukladá sudy s ingotmi v sklade.

Scenár oprava pece predstavuje pracovníka, ktorý v pravidelných intrervaloch opravuje výmurovku pece, ktorá používaním podlieha degradácií. Pracovník sa počas opravy pece nachádza v tesnej blízkosti výmurovky kontaminovanej počas prevádzky.

Scenár výmena výmurovky predstavuje pracovníka, ktorý sa nachádza v okolí pece počas výmeny výmurovky. Prevádzkou pece dochádza k postupnej degradácii výmurovky, ktorú je potrebné v pravidelných časových intervaloch vymeniť. K výmene výmurovky dochádza

naklonením pecného telesa (ako pri odlievaní ingotov) s následným vytlačením celej výmurovky cez malý otvor umiestnený na spodnej časti pecného telesa.

Scenár manipulácia s prachom predstavuje pracovníka, ktorý manipuluje s prachom. Prach produkovaný počas prevádzky je zachytávaný na vzduchotechnických filtroch a priebežne zberaný v sudoch. Spomínaná činnosť (scenár) sa zaoberá výmenou naplneného sudu za prázdny a jeho premiestnením na ďalšie spracovanie a úpravu.

### **3.2 Metóda tvorby modelu pre hodnotenie rádiologických vplyvov**

V nasledujúcich podkapitolách je podrobne popísaná metodika a spôsob zvolený pri vypracovaní hodnotenia rádiologických vplyvov pretavovania kontaminovaného kovového šrotu na pracovníkov, životné prostredie a obyvateľstvo. Metodika vytvorená pre hodnotenie rádiologických vplyvov procesu pretavovania vychádza z medzinárodných odporúčaní [21] a pozostáva z nasledovných krokov:

1. Definícia nuklidového vektora kontaminácie obsiahnutého v kovovom šrote určenom na pretavenie (jednotlivé rádionuklidy a ich zastúpenie).
2. Určenie nevyhnutných parametrov súvisiacich s pretavovaním kovov a zadefinovanie jednotlivých scenárov pre pracovníkov vykonávajúcich činností spojené s pretavovaním.
3. Vytvorenie modelu obsahujúceho geometriu, materiálové a rádiologické parametre vychádzajúce zo získaných údajov a parametrov z praxe.
4. Výpočet ročných individuálnych efektívnych dávok pre definované scenáre pracovníkov vzťahnutých na jednotkovú aktivitu 1 Bq/g kovového šrotu určeného na pretavenie.
5. Vypočítanie ročných IED pre konzervatívne stanovenú aktivitu kovového šrotu určeného na pretavenie (1 000 Bq/g) pre pracovníkov.
6. Výpočet ročných výpustí do ŽP a IED pre obyvateľov žijúcich v okolí JZ pre konzervatívne stanovenú aktivitu kovového šrotu.
7. Porovnanie konzervatívne vypočítaných ročných IED s limitmi pre pracovníkov a obyvateľov žijúcich v okolí JZ, resp. porovnanie ročných výpustí do atmosféry s ročnými limitmi.
8. Na základe dosiahnutých výsledkov navrhnuť limity prijateľnosti kovového šrotu na pretavenie resp. navrhnuť optimalizáciu celého procesu.

#### **3.2.1 Stanovenie nuklidového vektora**

Z hľadiska určenia rádiologického vplyvu na pracovníkov, resp. ŽP a obyvateľstvo je nutné poznať zdroj žiarenia, teda rádionuklidy, ktoré sa nachádzajú v kovovom šrote určenom na pretavenie. Stanovenie nuklidového vektora obsiahnutého v šrote vychádza z rádiologickej charakterizácie JE A1 a JE V1.

Ako bolo už spomenuté, počas procesu pretavovania dochádza k prerozdeleniu rádionuklidov medzi taveninu, trosku a pecné plyny, čo je skutočnosť, ktorú treba pri anlyzách brať do úvahy. Distribučné koeficienty sa líšia v závislosti od chemických vlastností samotného kontaminantu, ako aj od vlastností pece, resp. činidiel pridávaných na separáciu nuklidov do trosky. Jednotlivé distribučné koeficienty boli prebrané zo skúseností dosiahnutých v pretavovacom zariadení CARLA, Nemecko [10] a z dokumentu NUREG-1640 [22]. Nuklidové vektory po pretavbe, teda zastúpenie jednotlivých rádionuklidov v tavenine, resp. ingotoch je uvedené Tab. 3.1 a Tab. 3.2. Výsledné nuklidové vektory uvažujú s rádiologickou

charakterizáciou JE A1 a JE V1, ako aj s distribučnými koeficientami počas pretavby. Zastúpenie jednotlivých rádionuklidov v nuklidovom vektore pred pretavením (pre kovový šrot) sa uvažuje k januáru 2018, teda k dátumu, kedy sa predpokladá sprevádzkovanie pretavovacieho zariadenia.

**Tab. 3.1:** Nuklidový vektor JE A1 po pretavbe (pre ingot) a šrotu pred pretavením

Nuklid	Zastúpenie k januáru 2018 po pretavení	Zastúpenie k januáru 2018	Nuklid	Zastúpenie k januáru 2018 po pretavení	Zastúpenie k januáru 2018
<sup>63</sup> Ni	80,96 %	13,26 %	<sup>241</sup> Am	0,09 %	1,29 %
<sup>60</sup> Co	14,79 %	2,48 %	<sup>93</sup> Zr	0,06 %	0,03 %
<sup>90</sup> Sr	2,20 %	32,49 %	<sup>239</sup> Pu	0,04 %	0,62 %
<sup>59</sup> Ni	0,90 %	0,15 %	<sup>238</sup> Pu	0,01 %	0,16 %
<sup>152</sup> Eu	0,20 %	0,73 %	<sup>3</sup> H	<0,01 %	0,05 %
<sup>99</sup> Tc	0,20 %	0,03 %	<sup>137</sup> Cs	0,00 %	48,21%
<sup>93</sup> Mo	0,19 %	0,03 %	<sup>151</sup> Sm	0,00 %	0,38 %
<sup>126</sup> Sn	0,19 %	0,03 %	<sup>129</sup> I	0,00 %	0,03 %
<sup>94</sup> Nb	0,16 %	0,03 %			

**Tab. 3.2:** Nuklidový vektor JE A1 po pretavbe (pre ingot) a šrotu pred pretavením

Nuklid	Zastúpenie k januáru 2018 po pretavení	Zastúpenie k januáru 2018	Nuklid	Zastúpenie k januáru 2018 po pretavení	Zastúpenie k januáru 2018
<sup>63</sup> Ni	47,44 %	47,20 %	<sup>79</sup> Se	<0,01 %	0,12 %
<sup>55</sup> Fe	27,46 %	24,59 %	<sup>90</sup> Sr	<0,01 %	0,22 %
<sup>60</sup> Co	21,60 %	21,98 %	<sup>144</sup> Ce	<0,01 %	<0,01 %
<sup>93</sup> Mo	2,04 %	1,87 %	<sup>241</sup> Am	<0,01 %	0,02 %
<sup>59</sup> Ni	0,63 %	0,63 %	<sup>57</sup> Co	<0,01 %	<0,01 %
<sup>126</sup> Sn	0,24 %	0,22 %	<sup>65</sup> Zn	<0,01 %	<0,01 %
<sup>107</sup> Pd	0,22 %	0,20 %	<sup>151</sup> Sm	0,00 %	0,73 %
<sup>94</sup> Nb	0,20 %	0,23 %	<sup>135</sup> Cs	0,00 %	0,50 %
<sup>125</sup> Sb	0,08 %	0,08 %	<sup>41</sup> Ca	0,00 %	0,28 %
<sup>93</sup> Zr	0,06 %	0,18 %	<sup>137</sup> Cs	0,00 %	0,20 %
<sup>54</sup> Mn	0,01 %	0,02 %	<sup>110m</sup> Ag	0,00 %	<0,01%
<sup>241</sup> Pu	<0,01 %	0,76 %			

Vo výpočtoch je taktiež potrebné uvažovať s troskou a prachom, sekundárnymi RAO vzniknutými počas pretavovania. Nuklidové vektory pre trosku a pecné plyny (prach) sú uvedené v dizertačnej práci. Stanovenie zastúpenia jednotlivých kontaminantov (nuklidových vektorov) v troske, resp. pecných plynch (prachu) uvažuje, ako v prípade stanovenia nuklidového vektora pre ingot, s rádiologickou charakterizáciou JE A1 a JE V1, ako aj s distribučnými koeficientami počas pretavby. Z uvedených analýz vyplýva, že po pretavení kontaminovaného kovového šrotu pochádzajúceho z vyradovania JE A1 budú vo vzniknutej troske majoritnú časť tvoriť rádionuklidy <sup>90</sup>Sr a <sup>137</sup>Cs, pretože sú v procese pretavovania distribuované najmä do trosky a sú v pôvodnom nuklidovom vektore najviac zastúpené. Po pretavení kontaminovaného kovového šrotu prejde do trosky približne 65 % pôvodnej aktivity šrotu. Do prachu, resp. pecných plynch prejde cca 20 % pôvodnej aktivity a najzastúpenejším

kontaminantom bude  $^{137}\text{Cs}$ . V prípade pretavovania kovového šrotu pochádzajúceho z vyradovania JE V1 je majoritná časť aktivity v troske tvorená aktivačnými produktami  $^{63}\text{Ni}$  a  $^{60}\text{Co}$ , pričom do trosky je distribuovaných takmer 10 % pôvodnej aktivity šrotu. Do prachu, resp. pecných plynov je distribuovaných cca 0,7 % pôvodnej aktivity a najzastúpenejšími kontaminantami v pecných plynov sú  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ,  $^{79}\text{Se}$  a  $^{137}\text{Cs}$ . Z uvedených analýz vyplýva, že majoritná časť aktivity po pretavení ostane v ingote.

### 3.2.2 Popis jednotlivých ciest ožiarenia

Vo výpočtoch pre hodnotenie rádiologického vplyvu pretavovania na pracovníkov sa uvažuje ako s vonkajším, tak aj s vnútorným (inhalácia a ingescia) ožiarением pracovníkov. Spôsob hodnotenia dávok zo spomínaných ciest ožiarenia je podrobnejšie popísaný v nasledovných kapitolách. Operátor pece sa pri vykonávaní svojej činnosti nachádza v riadiacej miestnosti, ktorá je od okolitého priestoru pece oddelená a má samostatnú filtráciu vzduchu, preto sa nepredpokladá vnútorné ožiarenie pracovníka. V prípade ostatných činností, pri ktorých dochádza k priamemu alebo dostatočne blízkeho kontaktu s kontaminovaným materiálom sa uvažuje ako s vonkajším, tak aj s vnútorným ožiarением. Iba s vonkajším ožiarением pracovníkov sa uvažuje vtedy, ak sa kontaminovaný materiál nachádza v uzavretom obalovom súbore (ingot, resp. troska uzavretá v sude).

#### 3.2.2.1 Externé ožiarenie

Externé ožiarenie sa uvažuje vo všetkých vykonávaných činnostiach v procese pretavovania kovových RAO. Pre účely hodnotenia externého ožiarenia bol využitý výpočtový prostriedok VISIPLAN 3D ALARA.

#### 3.2.2.2 Inhalácia

Inhalácia aerosólov, resp. prachu kontaminovaného rádionuklidmi môže nastať v prašnom prostredí, kde je pracovník v priamom kontakte s kontaminovaným kovom. Dávky obdržané inhaláciou je možné vypočítať podľa nasledovného vzorca [21], [23]:

$$E_{inh,C} = e_{inh} t_e f_d f_c C_{dust} V e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda t_2}}{\lambda t_2}, \quad (1)$$

kde	$E_{inh,C}$	-	úväzok efektívnej dávky obdržanej z inhalácie v kalendárnom roku na jednotku mernej aktivity obsiahnutú v materiáli [(Sv/rok)/(Bq/g)],
	$e_{inh}$	-	dávkový konverzný faktor pre inhaláciu [Sv/Bq],
	$t_e$	-	doba ožiarenia počas kalendárneho roka [hod/rok],
	$f_d$	-	faktor riedenia [-],
	$f_c$	-	faktor koncentrácie [-],
	$C_{dust}$	-	koncentrácia prachu vo vzduchu [g/m <sup>3</sup> ],
	$V$	-	množstvo vdýchnutého vzduchu [m <sup>3</sup> /h],
	$\lambda$	-	konštanta rádioaktívnej premeny [s <sup>-1</sup> ],
	$t_1$	-	doba rádioaktívnej premeny pred začiatkom scenára [s],
	$t_2$	-	doba rádioaktívnej premeny počas scenára [s].

#### 3.2.2.3 Ingescia

Ingescia rádionuklidov môže nastať iba v prípade neúmyselného požitia prachu v prašnom prostredí. Dávky obdržané ingesciou je možné vypočítať podľa nasledovného vzorca [21], [23]:

$$E_{ing,C} = e_{ing} q f_d f_c f_t e^{-\lambda t_1} \frac{1 - e^{-\lambda t_2}}{\lambda t_2}, \quad (2)$$

kde	$E_{ing,C}$	-	úväzok efektívnej dávky obdržanej z ingescie v kalendárnom roku na jednotku mernej aktivity obsiahnutú v materiáli [(Sv/rok)/(Bq/g)],
	$e_{ing}$	-	dávkový konverzný faktor pre ingesciu [Sv/Bq],
	$q$	-	množstvo prijatého prachu za rok [q/rok]
	$f_d$	-	faktor riedenia [-],
	$f_c$	-	faktor koncentrácie [-],
	$f_t$	-	translokačný faktor [-],
	$\lambda$	-	konštanta rádioaktívnej premeny [ $s^{-1}$ ],
	$t_1$	-	doba rádioaktívnej premeny pred začiatkom scenára [s],
	$t_2$	-	doba rádioaktívnej premeny počas scenára [s].

### 3.2.3 Popis výpočtových prostriedkov zvolených pre vykonanie jednotlivých analýz

Pre stanovenie a určenie rádiologických vplyvov procesu pretavovania na pracovníkov, ŽP a obyvateľstvo je potrebné zvoliť vhodný výpočtový prostriedok. Externé ožiarenie bolo hodnotené vo výpočtovom prostriedku VISIPLAN 3D ALARA Planning Tool, ktorý ma požadované možnosti variability pre vytvorené scenáre pracovníkov. Na výpočet vnútorného ožiarenia boli použité vzťahy popísané vyššie, pričom samotný výpočet bol vykonaný v MS EXCEL s využitím dostupných faktorov a parametrov. Pre hodnotenie vplyvu pretavovania na ŽP a obyvateľstvo bol taktiež využitý MS EXCEL, ako aj výpočtový prostriedok ESTE AI vo verzii pre lokalitu Jaslovské Bohunice, ktorý počíta vplyvy na obyvateľstvo žijúce v okolí lokality jadrového zariadenia spôsobené výpustami do atmosféry a hydrosféry počas štandardnej prevádzky [24].

### 3.3 Stanovenie množstva kovových materiálov vhodných na pretavenie

Aby bolo možné stanoviť množstvo kovových materiálov vhodných na pretavenie, je potrebné oceniť parametre vyradovania vybraných JE, pričom nevyhnutnou podmienkou predstavuje rozsiahla databáza zariadení spolu s podrobnou rádiologickou charakterizáciou konkrétnej elektrárne. Vzhľadom na skutočnosť, že počas vyradovania JE z prevádzky je možné vytvoriť viacero variantov a scenárov nakladania so vzniknutými materiálmi, sú v dizertačnej práci popísane scenáre, ktoré okrem iného uvažujú aj s pretavením kovov.

Pri vytváraní jednotlivých modelových scenárov sa vychádzalo z existujúcich JE, ktoré sú v súčasnosti v procese vyradovania v Slovenskej republike. Predmetom vykonávaných analýz sú iba vybrané komponenty elektrárne. Pre stanovenie množstva kovových materiálov vhodných na pretavenie bol využitý výpočtový prostriedok OMEGA, ktorý bol vyvinutý za účelom stanovenia rôznych parametrov vyradovania JE (určenie množstva uvoľniteľných materiálov, náklady na jednotlivé činnosti, ožiarenie personálu, doba trvania čiastkových činností a iné).

## 4. VÝSLEDKY DIZERTAČNEJ PRÁCE S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKOV

### 4.1 Hodnotenie radiačných vplyvov procesu pretavovania

V nasledujúcich podkapitolách sú uvedené a analyzované výsledky výpočtov pre hodnotenie rádiologických vplyvov na pracovníkov, ŽP a obyvateľstvo žijúce v okolí JZ.

#### 4.1.1 Hodnotenie radiačných vplyvov na pracovníkov

Prvým krokom v hodnotení radiačných vplyvov na pracovníkov bolo vypočítať ročné individuálne dávky vzťahujúce sa na vstupnú aktivitu kovového šrotu 1 Bq/g. Vzhľadom na skutočnosť, že dekontaminačný faktor pre štiepne produkty a transurány je oveľa vyšší ako pre aktivačné produkty a pretavovanie sa bude vykonávať najmä za účelom uvoľňovania (aj po určitej dobe skladovania ingotov), bude mať v praxi pretavovaný kov s charakterom kontaminácie A1 zvyčajne vyššiu aktivitu ako kov s charakterom kontaminácie V1. Z uvedeného teda vyplýva, že aktivita šrotu z JE A1 bude v praxi vyššia ako je referenčná aktivita uvažovaná vo výpočtoch (1 Bq/g). Preto je v ďalšom kroku potrebné obdržané dávky prepočítať na vyššiu vstupnú aktivitu kovového šrotu.

Pre účely hodnotenia radiačných vplyvov na pracovníkov by bolo vhodné pristupovať spôsobom, kde je vstupná aktivita vyššia ako referenčná. Do analýz môže byť braných viacero prístupov. Okrem iného je možné pretavovanie vykonávať aj za účelom redukcie objemu kovových RA materiálov pred uložením, resp. ich preklasifikovaním z nízkoaktívnych odpadov na veľmi nízkoaktívne odpady (a následnému jednoduchšiemu ukladaniu do úložiska pre veľmi nízkoaktívne odpady), a preto je z hľadiska hodnotenia rádiologických vplyvov vhodné pristupovať konzervatívne. Konzervatívna hodnota vstupnej aktivity šrotu bola stanovená na 1 000 Bq/g, čo by okrem iného mohlo predstavovať limit prijateľnosti kovových materiálov na pretavenie. V nasledujúcej tabuľke (Tab. 4.1) je možné vidieť rádiologické vplyvy pre oba nuklidové vektory uvažujúce so spomínanou vstupnou aktivitou šrotu 1 000 Bq/g.

Z dosiahnutých výsledkov (za konzervatívne stanovených podmienok) vyplýva, že ak by sa počas pretavovania kovových RA materiálov vzniknutých z JE A1 uvažovalo s odstraňovaním trosky ručne, individuálna efektívna dávka obdržaná pracovníkom počas manipulačných prác s troskou by presiahla hodnotu 20 mSv ročne, čo je podľa Nariadenia vlády č. 345/2006 maximálna povolená dávka obdržaná pracovníkom ročne.

Všeobecne možno konštatovať, že z rádiologického hľadiska a z hľadiska radiačnej ochrany je najprijateľnejšie odstraňovanie trosky pomocou špeciálne prispôbeného manipulátora, kde je troska odstraňovaná diaľkovo z riadiacej miestnosti a následné manipulácie prebiehajú so sudom, v ktorom je troska uzavretá. Z dosiahnutých výsledkov teda možno povedať, že ak sa troska bude odstraňovať uvedeným spôsobom, individuálne efektívne dávky obdržané pracovníkmi počas jedného roka budú nanajvýš rádovo na úrovni jednotiek mSv.

**Tab. 4.1:** Rádiologické vplyvy na pracovníkov počas pretavovania kontaminovaných kovov s uvažovanou aktivitou šrotu 1 000 Bq/g

Vykonávaná činnosť		Celková obdržaná IED [mSv]	
		Nuklidový vektor A1	Nuklidový vektor V1
T1 - ručne	Prevádzka pece	1,540	1,600
	Odstraňovanie a manipulácia s troskou	23,400	2,530
	Odlievanie ingotov	0,077	0,651
T2 – manipulátor	Prevádzka pece	1,420	1,500
	Odstraňovanie a manipulácia s troskou	1,600	0,450
	Odlievanie ingotov	0,077	0,651
T3 – odlievanie s kovom	Prevádzka pece	1,700	1,400
	Odstraňovanie a manipulácia s troskou	18,800	1,800
	Odlievanie ingotov	0,930	0,836
T4 – liaca panva	Prevádzka pece	1,150	1,220
	Odstraňovanie a manipulácia s troskou	7,320	0,689
	Odlievanie ingotov	2,590	3,300
	Manipulácia s ingotmi	0,147	1,280
	Preprava a skladovanie ingotov	0,144	1,250
	Oprava pece	0,035	0,017
	Výmena výmurovky pece	0,008	0,003
	Manipulácia s prachom	2,000	0,120

#### 4.1.2 Hodnotenie radiačných vplyvov na ŽP a obyvateľstvo

Počas procesu pretavovania je produkovaných viacero druhov sekundárnych RAO, z ktorých prach, resp. pecné plyny predstavujú zdroj emisií tuhých znečisťujúcich látok. Z toho dôvodu je filtračný a ventilačný systém jeden z najdôležitejších súčastí pretavovacieho zariadenia. Pretavovacie zariadenie bude rozšírením, resp. súčasťou fragmentačného a dekontaminačného pracoviska slúžiaceho na nakladanie s kovovými RA materiálmi. Spomínané fragmentačné a dekontaminačné činnosti na pracovisku vedú k produkcii aerosólov, ktoré sú odsávané do centrálneho odsávacieho systému s účinnosťou filtrácie 99,95 %. Počas pretavovania bude obslužný priestor pracoviska odsávaný autonómnym filtračným zariadením. Takto prefiltrovaný vzduch bude privedený do centrálneho odsávacieho systému. Pretavovacie zariadenie bude využívať kombinovanú filtráciu (filtračné zariadenie na pracovisku pretavovacej pece a centrálny odsávací systém). Predpokladá sa teda, že kombinovaná filtrácia bude mať významne vyššiu účinnosť ako spomínaných 99,95 %. Ako príklad môžu byť uvedené prevádzkové skúsenosti podobných zariadení, konkrétne pretavovacieho zariadenia CARLA v Nemecku, kde celková filtračná účinnosť dosahuje hodnoty 99,997 % [9]. Počas celého procesu pretavovania nesmú výpuste do atmosféry prekročiť limitné hodnoty stanovené v rozhodnutí Úradu verejného zdravotníctva Slovenskej republiky pre existujúci ventilačný komín fragmentačného a dekontaminačného pracoviska.

Pre hodnotenie radiačných vplyvov pretavovania na ŽP je potrebné poznať viacero parametrov. Vstupná aktivita kovového šrotu bola zvolená konzervatívne na 1 000 Bq/g ako



v prípade hodnotenia rádiologických vplyvov na pracovníkov uvedených v predchádzajúcej kapitole. Taktiež sa vo výpočtoch uvažuje s nuklidovými vektormi pre JE A1, ako aj JE V1 reprezentujúce v súčasnosti vyradované JE na území Slovenskej republiky. Ďalším dôležitým parametrom sú distribučné koeficienty, teda podiel aktivity, ktorá prechádza počas pretavovania do pevných plynov, resp. prachu. Účinnosti filtrácie sú popísané vyššie a vo výpočtoch rádiologických vplyvov na ŽP (výpočet predpokladaných výpustí) sa uvažuje s oboma. Dosiahnuté výsledky sú uvedené v tabuľkách nižšie (Tab. 4.2 a Tab. 4.3).

**Tab. 4.2:** Ročné predpokladané výpustne rádiokontaminantov do atmosféry počas pretavovania kovových materiálov pochádzajúcich z JE A1

Rádionuklid	Výpust' do atmosféry po prečistení na filtroch [Bq/rok]		Čerpanie limitu [%]	
	Filtráčna účinnosť		Filtráčna účinnosť	
	99,95 %	99,997 %	99,95 %	99,997 %
<sup>137</sup> Cs, <sup>60</sup> Co, <sup>152</sup> Eu, <sup>151</sup> Sm, <sup>3</sup> H, <sup>129</sup> I, <sup>99</sup> Tc, <sup>126</sup> Sn, <sup>94</sup> Nb, <sup>93</sup> Mo	9,71E+07	5,83E+06	14,76	0,89
<sup>90</sup> Sr	3,25E+06	1,95E+05	16,58	0,99
<sup>238</sup> Pu, <sup>239</sup> Pu, <sup>241</sup> Am	2,08E+05	1,25E+04	3,37	0,20

**Tab. 4.3:** Ročné predpokladané výpustne rádiokontaminantov do atmosféry počas pretavovania kovových materiálov pochádzajúcich z JE V1

Rádionuklid	Výpust' do atmosféry po prečistení na filtroch [Bq/rok]		Čerpanie limitu [%]	
	Filtráčna účinnosť		Filtráčna účinnosť	
	99,95 %	99,997 %	99,95 %	99,997 %
<sup>60</sup> Co, <sup>93</sup> Mo, <sup>151</sup> Sm, <sup>135</sup> Cs, <sup>41</sup> Ca, <sup>94</sup> Nb, <sup>126</sup> Sn, <sup>107</sup> Pd, <sup>137</sup> Cs, <sup>79</sup> Se, <sup>125</sup> Sb, <sup>54</sup> Mn, <sup>110m</sup> Ag, <sup>65</sup> Zn, <sup>57</sup> Co	3,61E+06	2,17E+05	0,55	0,03
<sup>90</sup> Sr	2,21E+04	1,33E+03	0,11	0,01
<sup>241</sup> Pu, <sup>241</sup> Am	7,75E+04	4,65E+03	1,26	0,08

Z uvedených tabuliek vyplýva, že výpuste neprekračujú limity stanovené Úradom verejného zdravotníctva, avšak ak by sa neuvažovalo s vlastnou filtráciou pracovného priestoru pretavovacej pece, tak by čerpanie limitu počas pretavovania šrotu pochádzajúceho z JE A1 predstavovalo relatívne vysoké hodnoty. Vzhľadom na skutočnosť, že do daného ventilačného komína budú okrem samotnej pretavby zaústené aj iné technológie, je potrebné čerpanie limitu zo samotného pretavovania minimalizovať. Za uváženia viacstupňovej filtrácie (s účinnosťou 99,997 %) by čerpanie limitu pre šrot pochádzajúci z JE V1 predstavovalo iba zlomok percenta a pre šrot pochádzajúci z JE A1 menej ako jedno percento. Ako už bolo spomenuté, fragmentačné a dekontaminačné technológie využívané v súčasnosti, ktoré sú zaústené do daného ventilačného komína, sú zdrojom výpustí. Preto je potrebné

k predpokladaným výpustiam z procesu pretavovania pristupovať ako k príspevku k ostatným výpustiam, ktoré sú do ŽP v súčasnosti vypúšťané. Podľa výročných správ o vplyve prevádzky na ŽP sú výpuste zo spomínaného zariadenia za posledné roky na úrovni jednotiek percent a menej [25]. Ak sa k daným hodnotám pripočíta čerpanie limitu z pretavovania (za predpokladu, že súčasný trend čerpania limitov bude podobný aj v budúcnosti), celkové čerpanie limitov bude na úrovni jednotiek percent.

Rádiologické vplyvy na obyvateľstvo žijúce v okolí jadrového zariadenia, kde sa pretavovacie zariadenie bude nachádzať, boli hodnotené pomocou výpočtového prostriedku ESTE AI verzia EBO 3.52. Základom výpočtu spomínaného prostriedku je rozdelenie okolia lokality na sektory (tzv. sektorizácia), v ktorých je následne vypočítaná dávka pre jednotlivé cesty ožiarenia. Dôležitým vstupným parametrom, okrem samotnej aktivity a nuklidového zloženia výpustí, sú aj meteorologické údaje určitého obdobia. Pre účely hodnotenia rádiologických vplyvov pretavovania na obyvateľstvo boli použité meteorologické údaje získané na základe reálnych meraní pre kalendárny rok 2013. Na základe uvedených vstupov bol identifikovaný ako sektor s najvyššou obdržanou IED, sektor nachádzajúci sa juhovýchodne od ventilačného komína neďaleko areálu Jaslovské Bohunice. Kritickou skupinou je veková kategória 17 rokov a viac (dospelí), pričom kritický jedinec obdrží celkovú ročnú IED pre pretavovanie šrotu z JE A1  $18,4 \cdot 10^{-4}$   $\mu\text{Sv}$  a pre pretavovanie šrotu z JE V1  $1,73 \cdot 10^{-4}$   $\mu\text{Sv}$ . Uvedený sektor identifikovaný ako kritický je však neobývaný, teda vypočítaný dopad predstavuje hypotetickú IED pre kritického jedinca, keby v danom sektore žil. Obývaný sektor s najvyššou vypočítanou celkovou IED bol identifikovaný sektor, v ktorom sa nachádzajú obce Ratkovce a Žilkovce. Obyvateľ uvedeného sektora obdrží ročnú celkovú IED  $11,4 \cdot 10^{-4}$   $\mu\text{Sv}$  vplyvom pretavovania kovového šrotu s charakterom kontaminácie JE A1 a  $1,06 \cdot 10^{-4}$   $\mu\text{Sv}$  vplyvom pretavovania kovového šrotu s charakterom kontaminácie JE V1. Dôležité je ešte spomenúť, že uvedené vplyvy boli vypočítané pre aktivitu kovového šrotu 1000 Bq/g a filtračnú účinnosť 99,997%. Podľa rozhodnutia Úradu verejného zdravotníctva je potrebné zabezpečiť aby obdržaná dávka kritického člena obyvateľstva spôsobená rádioaktívnymi výpustami do atmosféry a povrchových vôd neprevýšila hodnotu 12  $\mu\text{Sv}$  ročne.

## ***4.2 Stanovenie množstva kovových rádioaktívnych materiálov pochádzajúcich z vyrad'ovania JE A1 a JE V1 vhodných na pretavenie***

Výpočet stanovenia množstva kovových rádioaktívnych materiálov vhodných na pretavenie, ktoré vzniknú počas demontáže JE A1 a JE V1 bolo vykonané pomocou výpočtového prostriedku OMEGA, v ktorom bolo vykonaných niekoľko modelových výpočtov. Do úvahy boli brané modelové inventárne databázy vybraných kovových komponentov oboch uvažovaných JE a nuklidové vektory spolu s distribučnými koeficientmi počas pretavovania. V nasledujúcich riadkoch sú popísané dosiahnuté výsledky pre stanovenie množstva kovov vhodných na pretavenie, ako aj ocenenie nákladov pre jednotlivé scenáre, ktoré poskytnú náhľad na možnosti ušetrenia finančných prostriedkov využitím technológie pretavovania.

### **4.2.1 Stanovenie množstva kovových rádioaktívnych materiálov pre definované scenáre**

Stanovenie množstva rádioaktívnych kovov vhodných na pretavenie je vykonané vo forme scenárov nakladania s danými materiálmi. V modelových výpočtoch boli použité celkovo dve materiálové databázy vybraných technologických zariadení. Celková hmotnosť položiek databázy charakterizujúcej inventár kovov JE A1 je cca 2 900 ton a JE V1 cca 14 300 ton.

Dôležité je ešte spomenúť, že JE A1 je už čiastočne demontovaná. Uvažované scenáre pre hodnotenie vplyvu pretavovania na nakladanie s kovovými materiálmi sú nasledovné:

- Referenčný scenár a scenár uvažujúci s pretavbou: Referenčný scenár predstavuje súčasnú stratégiu nakladania s kovovými RA materiálmi, teda kovy sú uvoľnené do ŽP (priamo resp. po podemontážnej dekontaminácii) alebo uložené v príslušnom type úložiska ako RAO. Podemontážna dekontaminácia sa uvažuje vo všetkých uvedených scenároch s dekontaminačným faktorom (DF) 100. Scenár uvažujúci s pretavbou predstavuje spomínanú stratégiu, do ktorej je zaradená technológia pretavovania.
- Vplyv skladovania ingotov v procese ich uvoľňovania do ŽP: Po pretavení je možné ingoty určitú dobu skladovať za účelom prirodzeného poklesu aktivity pod uvoľňovaciu úroveň. Vo výpočtovom scenári sa uvažuje s dlhodobým skladovaním ingotov po dobu 5, 10, 20 a 30 rokov.
- Vplyv zaradenia úložiska pre veľmi nízkoaktívne odpady na proces uvoľňovania ingotov do ŽP: V blízkej budúcnosti bude v SR sprevádzkované úložisko pre veľmi nízkoaktívny odpad určený najmä na ukladanie kontaminovaných zemín a kontaminovanej stavebnej sutiny, ktorá vznikne počas vyradovania. Cieľom analýzy je oceniť vplyv zaradenia tohto typu úložiska do manažmentu nakladania s RA kovovými materiálmi a oceniť možný vplyv na technológiu pretavovania. Hodnotené scenáre sú referenčný scenár a scenár uvažujúci s pretavbou kovov (ako je spomenuté vyššie) rozšírené o možnosť ukladania RAO do úložiska pre veľmi nízkoaktívne odpady (VNAO). Taktiež sa vo výpočtových variantoch uvažuje s pretavením ako reklasifikáciou odpadov z kategórie NAO na kategóriu VNAO, čím sa znížia nároky na ukladanie kovových RAO.
- Vplyv podemontážnej dekontaminácie na množstvo materiálov uvoľniteľných po pretavení: Za účelom zníženia množstva kovových RAO je možné vykonať podemontážnu dekontamináciu technologických zariadení pred samotným pretavením. Ako bolo už spomenuté, s podemontážnou dekontamináciou sa uvažuje vo všetkých scenároch, avšak uvedený scenár analyzuje aj dekontamináciu s DF 250 a 500. Okrem samotnej podemontážnej dekontaminácie je možné na niektorých komponentoch a technologických zariadeniach vykonať aj predemontážnu dekontamináciu. Avšak podemontážnu dekontamináciu uvažujúcu v analyzovaných scenároch možno považovať všeobecne za dekontamináciu. Táto je vykonávaná pred samotným uvoľnením, resp. pretavením.
- Vplyv zmeny uvoľňovacích úrovní na pretavovanie kovov: Analýza sa zaoberá vplyvom zmien uvoľňovacích úrovní pre uvádzanie rádioaktívnych materiálov do ŽP na množstvo materiálov vhodných na pretavenie. Očakáva sa, že súčasné uvoľňovacie úrovne stanovené v Nariadení vlády SR č. 345/2006 budú v blízkej budúcnosti zmenené na základe odporúčaní Medzinárodnej agentúry pre atómovú energiu (dokument „RS-G-1.7“). Analyzovaný scenár pre zmenu uvoľňovacích úrovní je scenár uvažujúci s pretavbou kovov, ktorý je popísaný vyššie

V nasledujúcej tabuľke (Tab. 4.4) sú zhrnuté dosiahnuté výsledky pre stanovenie množstva kovového šrotu vhodného na pretavenie. V uvedenej tabuľke je zobrazené pre jednotlivé scenáre a ich varianty iba množstvo ingotov, ktorí je možné uvoľniť do ŽP po pretavení.

**Tab. 4.4:** Dosiahnuté výsledky pre stanovenie množstva kovov vhodných na pretavenie

Scenár	Množstvo uvoľniteľných ingotov [t]	
	JE A1	JE V1
Referenčný	0	0
S pretavením	1242	2869
5-ročné skladovanie ingotov	74	175
10-ročné skladovanie ingotov	225	452
20-ročné skladovanie ingotov	372	632
30-ročné skladovanie ingotov	374	831
Referenčný_VNAO	0	0
S pretavením_VNAO	1242	2869
Rekategorizácia	374 (do úložiska VNAO)	814 (do úložiska VNAO)
DF250	1213	2686
DF500	1260	2776
Limity_IAEA	865	1384

JE A1 je v procese vyradovania už 17 rokov (od roku 1998) a počas tejto doby bola elektráreň a jej technologické zariadenia čiastočne demontované. Časť materiálov bola dekontaminovaná a uvoľnená do ŽP a ďalšia časť je v súčasnosti uskladnená do doby uvedenia pretavovacieho zariadenia do prevádzky. Odhaduje sa, že počet takto uskladnených sudov je cca 5 900 s celkovou hmotnosťou kovov cca 1 475 – 1 770 ton, z ktorých by mala byť väčšina vhodná na pretavenie s následným uvoľnením do ŽP. Okrem iného je potrebné ešte spomenúť, že materiálová databáza JE A1 obsahuje okrem iného aj dva najmenej kontaminované PG, pričom zvyšné štyri nie sú uvážene v uvedenej materiálovej databáze.

#### 4.2.2 Analýza hodnotenia zisku/nákladov

Hodnotenie nákladov pre jednotlivé scenáre nakladania s kovovými materiálmi boli vykonané pomocou výpočtového prostriedku OMEGA, ktorý okrem iného dokáže v závislosti od vstupných údajov aj spočítať náklady na čiastkové činnosti v procese vyradovania a nakladania s materiálmi z demontáže. V Tab. 4.5 sú uvedené relatívne náklady pre jednotlivé scenáre, ktoré sú vzťahované k referenčnému scenáru (náklady pre referenčný scenár sú rovné 1).

V modelových výpočtoch sa uvažuje iba manažment materiálov vzniknutých demontážou vybraných komponentov. Do analýz nie sú teda zahrnuté náklady na demontážne činnosti, ale iba náklady spojené s nakladaním so vzniknutými materiálmi ako napr. fragmentácia, dekontaminácia, pretavba, balenie primárnych/sekundárnych RAO, radiačná kontrola, ukladanie v úložisku a ďalšie. Okrem iného je taktiež potrebné spomenúť, že náklady zahŕňajú aj manažment neželezných kovov, pričom ich náklady sú v porovnaní s nákladmi za manažment železných kovov významne nižšie.

Vypočítané náklady referenčného scenára pre JE A1 sú približne 54,1 miliónov € a pre JE V1 približne 138,8 miliónov €. Z uvedenej analýzy vyplýva, že využívaním technológie pretavovania je možné ušetriť nemalé finančné prostriedky, a to cca 17,2 milióna € pre obe JE. Ak po pretavení ingoty nespĺňajú podmienky pre uvoľňovanie, je taktiež možné ich

v lokalite určitú dobu skladovať, čím sa dá očakávať ďalšia úspora finančných prostriedkov. V takomto prípade je však potrebné brať do úvahy náklady na skladovanie ingotov, čo sa v prípade 20, resp. 30 ročnej doby skladovania môže negatívne premietnuť úspore financií, ktorá nie je až taká vysoká, ako by sa očakávalo. Avšak stále treba brať do úvahy ušetrené úložne kapacity RÚ RAO v Mochovciach.

**Tab. 4.5:** Relatívne náklady pre hodnotené scenáre

Scenár	Relatívne náklady	
	JE A1	JE V1
Referenčný	1,000	1,000
S pretavením	0,962	0,891
5R	0,961	0,886
10R	0,957	0,876
20R	0,955	0,877
30R	0,955	0,878
Referenčný_VNAO	0,942	0,916
S pretavením_VNAO	0,961	0,881
Rekategorizácia	0,945	0,879
DF250	0,948	0,867
DF500	0,931	0,857
Limity_IAEA	0,966	0,946

Za uváženia ukladania RAO do úložiska pre veľmi nízkoaktívne odpady je v prípade kovov z JE A1 dokonca finančne výhodnejšie nevyužívať technológiu pretavovania, ale priamo uložiť kovy v tomto type úložiska. Pretavenie a súčasne využívanie úložiska typu VNAO by malo taktiež ušetriť finančné prostriedky, hoci nie je potrebné žiadne kovy ukladať do tohto úložiska. Financie sa ušetria najmä na ukladaní sekundárnych RAO a neželezných kovov do úložných priestorov typu VNAO miesto NAO, ktoré majú nižšie nároky na ukladanie. Využitím technológie pretavovania ako rekategorizácie z odpadov typu NAO na VNAO by bolo možné taktiež znížiť náklady na manažment kovových materiálov, pretože významné množstvo ingotov bude uložených v úložisku s nižším stupňom inžinierskych bariér, teda kovy budú uložené za nižšie náklady.

Podemontážna dekontaminácia významne vplýva na množstvo uvoľnených kovov, čo sa v konečnom dôsledku prejaví aj na cene za scenár, pretože sa zníži množstvo kovov, ktoré je potrebné uložiť ako RAO.

Znížením uvoľňovacích úrovní sa zníži množstvo ingotov uvoľnených po pretavení, a teda sa zvýši množstvo materiálov potrebných na uloženie, čím sa zvýšia náklady na celý proces nakladania s týmito materiálmi.

### 4.3 *Produkcia sekundárnych RAO*

Pretavovanie kontaminovaných kovov vedie k vzniku rôznych druhov sekundárnych rádioaktívnych odpadov, ako napríklad troska, prach, výmurovka pece, použité filtre, použité kokily, rôzne pomocné nástroje atď. Sekundárne RAO sú charakteristické pre každú

dekontaminačnú technológiu a je potrebné ich bezpečne spracovať, upraviť a uložiť v úložisku RAO.

Štandardne sa množstvo vzniknutej trosky pohybuje v rozmedzí 1 – 4 % (z pôvodnej hmotnosti kovu) v závislosti od vlastností pece, ako aj od podmienok pretavovania (napr. od druhu a množstva pridaného troskotvorného činidla) [5]. Množstvo vyprodukovaného prachu počas pretavovania taktiež závisí od vlastností pece a od pretavovaného kovu. Indukčné pece produkujú niekoľkonásobne menej prachu oproti oblúkovým peciam. V dokumente [26] sa udáva hodnota vyprodukovaného prachu pre indukčnú pec 0,01 % z pôvodnej hmotnosti kovu, ktorá bola určená na základe výpočtov bilancii hmotnosti v procese pretavovania. Počas prevádzky pece dochádza k postupnej degradácii výmurovky pece, ktorú je potrebné v pravidelných časových intervaloch vymeniť. Životnosť výmurovky závisí od jej typu. Ak sa na jej výrobu používa kyslý materiál, vydrží cca 55 taviieb a jej hmotnosť je 1,2 tony. Kelímok vyrobený z mullitického (neutrálneho) materiálu vydrží pracovné zaťaženie cca 110 taviieb, jeho hmotnosť je 1,8 tony.

Na základe hore uvedených predpokladov a na základe predpokladu pretavovacej kapacity 1 000 ton ročne, možno množstvo vybraných sekundárnych RAO odhadnúť nasledovne:

- troska: 10 – 40 ton;
- prach: 0,1 tony;
- výmurovka pece: 8,2 – 10,9 ton (v závislosti od typu výmurovky používanej počas roka).

Sekundárne RAO ako použité filtre, použité kokily a iný odpad (ochranné odevy, vybavenie) nie sú v analýzach uvedené najmä z dôvodu ich nízkeho množstva vzhľadom k množstvu trosky a výmurovky, resp. vzhľadom na zložitosť ich určenia. Počas pretavovania bude kov odlievaný do železných kokíl, ktoré bude časom potrebné vymeniť, pričom staré možno pretaviť.

#### ***4.4 Návrh limitov prijateľnosti na pretavenie***

Dôležitým parametrom pretavovacieho zariadenia sú limity prijateľnosti kovového šrotu na pretavenie. Ako už bolo spomenuté v kapitole zaoberajúcej sa hodnotením radiačných vplyvov na pracovníkov, k návrhu limitov prijateľnosti sa môže pristupovať viacerými spôsobmi. V nasledujúcich riadkoch bude popísaný návrh limitov pre prijatie kovového šrotu na pretavenie na základe troch nasledovných prístupov a to návrh limitov na základe konzervatívneho prístupu, návrh limitov na základe uvoľňovania ingotov a návrh limitov na základe obdržaných dávok.

Návrh limitov na základe konzervatívneho prístupu: Pretavenie kontaminovaných kovov je okrem iného možné vykonávať aj za účelom redukcie objemu, resp. ich preklasifikovaniu z NAO na VNAO (a následnému jednoduchšiemu ukladaniu do úložiska typu VNAO), a preto sa javí z hľadiska hodnotenia rádiologických vplyvov vhodný konzervatívny prístup. Konzervatívna hodnota vstupnej aktivity šrotu bola stanovená na 1 000 Bq/g, čo je okrem iného aj limit prijateľnosti pre pretavovacie zariadenie CARLA v Nemecku [9].

Návrh limitov na základe uvoľňovania ingotov: Uvoľňovací prístup berie do úvahy pretavovanie výlučne za účelom uvoľnenia ingotov do ŽP priamo po pretavení, resp. po ich dlhodobom skladovaní. Na základe nuklidových vektorov, distribučných koeficientoch pretavby, resp. dekontaminačných faktorov, uvažovanej dobe skladovania ingotov 30 rokov a uvoľňovacích úrovní v SR je možné vypočítať aktivitu kovového šrotu určeného na

pretavenie tak, aby po pretavení a 30-ročnom skladovaní bolo možné ingoty uvoľniť do ŽP. Pre kovy pochádzajúce z JE A1 bola vypočítaná vstupná aktivita na pretavenie 260 Bq/g a pre kovy pochádzajúce z JE V1 50 Bq/g.

Návrh limitov na základe obdržaných dávok: Uvedený prístup pre návrh limitov prijateľnosti kovového šrotu na pretavenie vychádza z hodnotenia radiačných vplyvov na pracovníkov a obyvateľstvo žijúce v blízkom okolí pretavovacieho zariadenia. Vypočítaná hodnota limitu prijateľnosti pre celkovú aktivitu pre nuklidový vektor A1 je 520 Bq/g a pre nuklidový vektor V1 1 850 Bq/g. Uvedená hodnota pre nuklidový vektor V1 je však relatívne vysoká, preto sa ako vhodný limit prijatia na pretavenie javí 520 Bq/g pre všetky kontaminované kovy z oboch JE, ktoré sú v súčasnosti v SR v procese vyradovania.

## 5. SÚHRN VÝSLEDKOV A NOVÝCH POZNATKOV, ZÁVERY PRE PRAX A ĎALŠÍ ROZVOJ VEDNEJ DISCIPLÍNY

Predmetom predkladanej dizertačnej práce je problematika pretavovania kontaminovaných kovových materiálov vznikajúcich počas vykonávania činností súvisiacich s vyradovaním JZ z prevádzky. Základným cieľom práce je vypracovanie metodiky hodnotenia procesu pretavovania, ktorá môže byť aplikovaná v praxi. Dôraz bol kladený na hodnotenie rádiologických vplyvov na pracovníkov, životné prostredia a obyvateľstvo, ako aj na odhad množstva kovových materiálov vhodných na pretavenie s následným uvoľnením do ŽP. Nezanedbateľnou časťou hodnotenia je analýza ocenenia nákladov, resp. ušetrovaných finančných prostriedkov.

Na základe stanovených cieľov možno dosiahnuté výsledky dizertačnej práce zhodnotiť do viacerých bodov, v ktorých bolo urobené:

1. Podrobné zhodnotenie súčasného stavu problematiky vyradovania JZ z prevádzky so zameraním najmä na dekontamináciu kovových materiálov využitím technológie pretavovania. Zároveň bol popísaný prístup k nakladaniu s RAO vo vybraných krajinách, ako aj popis jednotlivých pretavovacích zariadení. Z uvedeného vyplýva, že pretavovanie je významnou súčasťou nakladania s kovovými RA materiálmi vo viacerých krajinách, najmä vo Švédsku a Nemecku, ktoré majú s danou technológiou dlhoročné skúsenosti. Dizertačná práca okrem iného popisuje aj prístup vybraných medzinárodných organizácií k problematike nakladania s kovovými RA materiálmi, kde sú stručne popísané vybrané dokumenty.
2. Popis možností využitia technológie pretavovania v SR, kde sú v súčasnosti predmetom vyradovania dve JE v lokalite Jaslovské Bohunice. JE A1 bola odstavená po nehode a JE V1 po štandardnej prevádzke. Počas demontáže technologických zariadení oboch elektrární sa očakáva vznik veľkého množstva kovových RA materiálov, ktoré by mohli byť pretavené a následne uvoľnené do ŽP.
3. Návrh a vypracovanie metodiky pre pretavovanie kontaminovaných kovových materiálov. Vytvorená metodika pozostáva z nasledovných krokov:
  - Stanovenie nuklidového vektora kontaminovaných kovov určených na pretavenie;
  - Na základe nuklidových vektorov a distribučných koeficientov pretavby stanovenie dekontaminačného faktora a podielu pôvodnej aktivity, ktorá zostane v ingote, resp. prejde do trosky a pecných plynov. Stanovenie nuklidových vektorov pre ingot, trosku a pecné plyny;
  - Definovanie jednotlivých činností v procese pretavovania a identifikácia relevantných expozičných ciest pre jednotlivé scenáre pracovníkov. Taktiež bol popísaný aj spôsob výpočtu IED pre jednotlivé cesty ožiarenia;
  - Zhromaždenie dostatočného množstva údajov potrebných pre vykonanie jednotlivých analýz;
  - Vytvorenie modelov obsahujúcich geometrické, materiálové a rádiologické parametre charakterizujúce jednotlivé činnosti v procese pretavovania. Popis použitých výpočtových prostriedkov;
  - Výpočet rádiologických vplyvov na pracovníkov vzťahnutých na hmotnostnú aktivitu kovového šrotu 1 Bq/g s následným prepočítaním pre konzervatívne stanovenú aktivitu 1 000 Bq/g. Výpočet



- rádiologických vplyvov na ŽP a obyvateľstvo pre konzervatívne stanovenú aktivitu kovového šrotu 1 000 Bq/g.
- Pre oba uvažované nuklidové vektory stanovenie poklesu aktivity v čase, na základe ktorého môže byť určená vhodná doba skladovania ingotov.
  - Stanovenie množstva kovov vhodných na pretavenie a popis využitého výpočtového prostriedku.
  - Stanovenie množstva sekundárnych RAO.
  - Návrh limitov prijateľnosti kovového šrotu na pretavenie.
4. Komplexné posúdenie rádiologických vplyvov počas procesu pretavovania kontaminovaných kovov pre modelové nuklidové vektory charakterizujúce radiačnú situáciu JE A1 a JE V1. Hodnotenie rádiologických vplyvov možno rozdeliť do dvoch krokov:
    - Hodnotenie rádiologických vplyvov na pracovníkov vykonávajúcich jednotlivé činnosti v procese pretavovania;
    - Hodnotenie rádiologických vplyvov na životné prostredie a obyvateľstvo žijúce v okolí lokality jadrového zariadenia (výpočet výpustí a IED kritického jedinca žijúceho v okolí lokality JZ).
  5. Určenie množstva kontaminovaných kovov vhodných na pretavenie s následným uvoľnením do ŽP (priamo po pretavbe, resp. po dlhodobom skladovaní) pre definované scenáre. Taktiež boli analyzované alternatívne scenáre nakladania s kovovými materiálmi za účelom zvýšenia spomínaného množstva materiálov vhodných na pretavenie.
  6. Ďalej bola vykonaná analýza zisku, resp. nákladov pre všetky definované scenáre nakladania s kovovými materiálmi, ktorých podstatou je pretavba kovov.
  7. Návrh limitov pre prijatie kontaminovaných kovov na pretavenie.
  8. Na záver bola vytvorená metodika aplikovaná na hodnotenie procesu pretavovania parogenerátorov z JE A1, kde sa ukázalo, že metodiku možno relatívne jednoducho aplikovať na vybraný komponent, ak sú známe jeho parametre (hmotnosť a aktivita). Výsledkom sú rádiologické vplyvy, ako aj materiálová bilancia, teda množstvo materiálov uvoľniteľných do ŽP, resp. množstvo materiálov, ktoré je potrebné uložiť v úložisku ako RAO.

K základným prínosom dizertačnej práce patrí vytvorenie metodiky hodnotenia procesu pretavovania kontaminovaných kovových materiálov. Keďže dosiahnuté výsledky dizertačnej práce sú viazané na nuklidové vektory charakterizujúce radiačnú situáciu JE A1 a JE V1 a modelové pretavovacie zariadenie, ktoré by malo byť sprevádzkované v Jaslovských Bohuniciach v blízkej budúcnosti, možno ako ďalší prínos práce považovať ohodnotenie základných parametrov procesu pretavovania kovov pochádzajúcich z JE, ktoré sú v súčasnosti v procese vyradovania v Slovenskej republike. Všeobecne možno vytvorenú metodiku aplikovať na kovy pochádzajúce z vyradovania rôznych typov jadrových zariadení, pričom je však potrebné poznať dostatočne množstvo informácií a parametrov, ako napr. typ JZ, charakter a úroveň kontaminácie a pod., ktoré sú nevyhnutné pre ocenenie rádiologických vplyvov, stanovenie množstva pretaviteľných kovov a najmä vykonanie finančnej analýzy.

K ďalším dôležitým prínosom dizertačnej práce patrí stanovenie množstva kovových RA materiálov, ktoré sú vhodné na pretavenie a následné uvoľnenie do ŽP. V uvedených analýzach sa okrem iného aj hodnotil scenár uvažujúci s dlhodobým skladovaním ingotov, kde sa ukázalo, že vhodnou dobou skladovania je možné taktiež uvoľniť významné množstvo ingotov. Na základe dosiahnutých výsledkov dizertačnej práce je možné konštatovať, že využitím technológie pretavovania je možné uvoľniť a opätovne využiť nezanedbateľné

množstvo ocele (takmer 6 100 ton, z toho cca 3 200 ton z JE A1 a 2 900 ton z JE V1). Dlhodobé skladovanie ingotov do 30 rokov zabezpečí pokles aktivity pod uvoľňovaciu úroveň množstvu viac ako 2 200 ton ocele (z toho približne 1 400 ton z JE A1 a približne 800 ton z JE V1). Na základe stanovenia množstva pretaviteľných kovov bola vykonaná finančná analýza, ktorá ukázala, že aplikácia technológie pretavovania do manažmentu kovových RA materiálov môže ušetriť nemalé finančné náklady (viac ako 2 milióny € pre kovy z JE A1 a viac ako 15 miliónov € pre kovy z JE V1). Alternatívne scenáre nakladania s RA kovmi ďalej ukázali, že ako výhodná sa javí rekategorizácia kovov z odpadov typu NAO na VNAO, čím sa znížia nároky na ich ukládanie a s tým súvisiace náklady. Všeobecne možno konštatovať, že čím je väčšie množstvo kovov vhodných na pretavenie, tým by mala byť úspora oproti ukládaniu do úložísk vyššia. Zdôrazniť však treba skutočnosť, že vykonanú finančnú analýzu treba brať ako hrubý odhad a nie presné ušetrené náklady z dôvodu, že cena čiastkových činností v celom procese nakladania s kovmi môže byť oproti cene použitej pre potreby analýzy čiastočne rozdielna a taktiež sa môže v praxi časom meniť.

Z uvedených poznatkov vyplýva, že hlavným cieľom pretavovania kontaminovaných RA kovov je uvoľnenie ingotov do ŽP, avšak v určitých prípadoch sa pretavba javí aj ako vhodný prostriedok pre rekategorizáciu RAO, resp. objemovú redukciu komponentov väčších rozmerov, ktoré by bolo problematické uložiť v súčasnosti prevádzkovanom úložisku. Dôležitým parametrom pretavovacieho zariadenia je limit prijateľnosti kovového šrotu na pretavenie. Z dosiahnutých výsledkov dizertačnej práce vyplýva, že vhodným limitom prijateľnosti sa javí hodnota 520 Bq/g pre celkovú aktivitu pre oba uvažované nuklidové vektory.

Na záver možno konštatovať, že zaradenie technológie pretavovania do manažmentu nakladania s kovovými materiálmi pozitívne ovplyvní celý tento proces, pretože sa ušetria nemalé finančné prostriedky. Na základe dosiahnutých výsledkov možno ďalej konštatovať, že pretavovacie zariadenie nespôsobí významnú radiačnú záťaž na pracovníkov, ako aj obyvateľstvo žijúce v okolí lokality Jaslovské Bohunice. Pretavením a následným uvoľnením ingotov do ŽP sa okrem iného očakáva aj ušetrenie úložných kapacít RÚ RAO v Mochovciach a taktiež sa ušetrí významné množstvo kovových materiálov, ktoré by ináč museli byť nahradené novými.

Vzhľadom na skutočnosť, že v súčasnosti nie je známy presný dizajn pretavovacieho zariadenia, je potrebné v budúcnosti oceniť radiačné vplyvy (na základe metodiky a postupov uvedených v práci) pre to konkrétne zariadenie navrhnuté pre Jaslovské Bohunice. V budúcnosti je však aj potrebné vybrané parametre aktualizovať a optimalizovať (distribučné koeficienty, uvoľňovacie úrovne, náklady na čiastkové činnosti v procese nakladania s kovmi, účinnosť filtrácie atď.) v súlade s najnovšími poznatkami z praxe, pričom samotná metodika ostane nezmenená. Taktiež sa javí ako vhodné pre overenie vytvorenej metodiky dosiahnuté výsledky validovať meraním v praxi.

## POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] DANIŠKA, V.: *Príspevok k metodike výpočtového oceňovania parametrov vyradovania jadrových zariadení z prevádzky*, Dizertačná práca, Bratislava: FEI STU, 2000.
- [2] International Atomic Energy Agency, *Application of Thermal Technologies for Processing of Radioactive Waste*, IAEA-TECDOC-1527, Vienna: IAEA, 2006, ISBN: 92-0-113806-7.
- [3] Organisation for Economic Co-operation and Development – Nuclear Energy Agency, *Decontamination Techniques Used in Decommissioning Activities*, Paris: OECD/NEA, 1999.
- [4] NEČAS, V., ĎURČEK, E.: *RAO a likvidácia JE: Učebný text pre postgraduálne rekvalifikačné štúdium: „Bezpečnostné aspekty prevádzky jadrových zariadení“*, Bratislava: FEI STU, 2005.
- [5] International Atomic Energy Agency, *Managing Low Radioactivity Material from the Decommissioning of Nuclear Facilities*, IAEA Technical Report Series No. 462, Vienna: IAEA, 2008, ISBN: 978-92-0-109907-5.
- [6] ANDERSSON, L.: *Recycling of contaminated metals for free release, WM'99 Conference, February 28- March 4, 1999*.
- [7] HUUTONIEMI, T., LARSSON, A., BLANK, E.: *Melting of metallic intermediate level waste*, Studsvik Nuclear AB, August 2012.
- [8] Swedish Radiation Protection Authority, *Validation of Dose Calculation Programmes for Recycling*, SSI Report 2002:23, Stockholm: SSI, 2002, ISSN: 0282-4434.
- [9] QUADE, U., KLUTH, T., *Recycling by Melting, 20 Years Operation of the Melting Plant CARLA by Siempelkamp Nukleartechnik GmbH*, International Journal for Nuclear Power, Volume 54 (2009), No. 10, October.
- [10] QUADE, U., MULLER, W.: *Recycling of radioactively contaminated scrap from the nuclear cycle and spin-off other application*, Revisita de metalurgia, Rev. Metal: Madrid Vol. Extr. (2005), p. 29-28.
- [11] Organisation for Economic Co-operation and Development – Nuclear Energy Agency, *The NEA Co-operative Programme on Decommissioning, A Decade of Progress*, Paris: OECD/NEA, 2006, ISBN: 92-64-02332-1.
- [12] LAFFAILLE, C., et al. *Melting and Recycling of Metallic Waste in France*, In: *Technical seminar on melting and recycling of metallic waste materials from decommissioning of nuclear installations*, Krefeld, Germany, 26-29 October 1993, Brussels: EC, ISBN: 92-826-8302-8.
- [13] MEEUWIS, O., *Experience in Recycling Contaminated Metal by Decontamination and Melting at the Scientific Ecology Group, Inc.*, In: *Technical seminar on melting and recycling of metallic waste materials from decommissioning of nuclear installations*, Krefeld, Germany, 26-29 October 1993, Brussels: EC, ISBN: 92-826-8302-8.

- [14] European Commission, Nuclear Safety and the Environment, *Recycling and Reuse of Radioactive Material in the Controlled Nuclear Sector*, Report EUR 18041, Luxemburg: EC, 1998.
- [15] CLEMENTS, D.W., *Proven experience plus initiative equates to safe, cost-effective decommissioning with added value*, Waste Management Symposia, 1998.
- [16] BOISSONNEAU, J.F., PHILIPPE, M., DELPLANQUE, J.P.: *Safety assessment of the CENTRACO installation*, [online], [cit: 31. Január 2013], Dostupné na internete: <[http://www.eurosafe-forum.org/files/pe\\_329\\_24\\_1\\_a1.pdf](http://www.eurosafe-forum.org/files/pe_329_24_1_a1.pdf)>.
- [17] DEBES, M., BORDIER, M.: *Radioactive waste management at EDF plants: General overview and perspective*, [online], [cit: 31. Január 2013], Dostupné na internete: <[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/csp\\_006c/PDF-Files/paper-76.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/csp_006c/PDF-Files/paper-76.pdf)>.
- [18] Conditioning Company for Industrial Waste and Effluents (SOCODEI): *Metallic waste melting* [online], SOCODEI: France [cit: 31. Január 2013], Dostupné na internete: <[http://www.socodei.fr/fileadmin/contenus/menus/menu\\_haut/espace\\_documentation/Fusion.pdf](http://www.socodei.fr/fileadmin/contenus/menus/menu_haut/espace_documentation/Fusion.pdf)>.
- [19] GELBUTOVSKY, A.B., *CJSC ECOMET-S Facility for reprocessing and utilisation of radioactive metal waste: operating experience*, Int. J. Nuclear Energy Science and Technology, Vol. 2, Nos. 1/2, 2006.
- [20] JAVYS, Jadrová a vyrad'ovacia spoločnosť, [online], [cit: 31. Máj 2013], Dostupné na internete: <[www.javys.sk](http://www.javys.sk)>.
- [21] International Atomic Energy Agency, *Derivation of Activity Concentration Values for Exclusion, Exemption and Clearance*, IAEA Safety Reports Series No. 44, Vienna: IAEA, 2005, ISBN: 92-0-113104-6.
- [22] U.S. Nuclear Regulatory Commission. *Radiological Assessment for Clearance of Materials from Nuclear Facilities, Main Report*, NUREG-1640, Washington D.C.: US NRC, 2003.
- [23] European Commission, *Practical use of the concepts of clearance and exemption – Part I: Guidance on General Clearance Levels for Practices, Recommendations of Group of Experts established under the terms of Article 31 of the Euratom Treaty*, Radiation Protection No. 122, Luxemburg: EC, 2000.
- [24] ČARNÝ, P., et al. ESTE AI verzia 3.51, V-2, Program pre výpočet dopadov výpustí RA látok z prevádzky JE na okolie: Program na výpočet dávok na členov kritickej skupiny obyvateľov v okolí JE z rádioaktívnych výpustí z jadrovej energetickej zariadení v lokalite Bohunice, Trnava, Slovenská republika, 2014.
- [25] JAVYS, Jadrová a vyrad'ovacia spoločnosť, *Správy o vplyve prevádzky na ŽP*, [online], JAVYS: Bratislava, Slovenská republika, [cit: 14. Január 2015], Dostupné na internete: <<http://www.javys.sk/sk/informacny-servis/spravy-o-vplyve-prevadzky-na-zp>>.
- [26] Swedish Radiation Protection Authority, *Validation of Dose Calculation Programmes for Recycling*, SSI Report 2002:23, Stockholm: SSI, 2002, ISSN: 0282-4434.

## PUBLIKOVANÉ PRÁCE

### ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

- [1] SLIMÁK, A., NEČAS, V.: *Melting of contaminated metallic materials in the proces of the decommissioning of nuclear power plants*, Journal of Hazardous Materials (článok prijatý v redakcii a zaslaný na posúdenie oponentom).

### ADE Vedecké práce v ostatných zahraničných časopisoch

- [2] SLIMÁK, A., NEČAS, V.: *Recyklácia kovových rádioaktívnych materiálov vzniknutých počas vyradovania jadrových zariadení pomocou pretavby – súčasný stav, perspektívy a možnosti využitia*, In: Bezpečnosť jaderné energie, ISSN 1210-7085, Roč. 21 (59), č. 7/8 (2013), s. 241-244.
- [3] SLIMÁK, A., NEČAS, V.: *Hodnotenie procesu pretavovania z hľadiska stanovenia množstva kontaminovaných kovov vhodných na pretavenie*, In: Bezpečnosť jaderné energie, ISSN 1210-7085, Roč. 22 (60), č. 11/12 (2014), s. 351-355.
- [4] SLIMÁK, A., NEČAS, V.: *Hodnotenie procesu pretavovania kontaminovaného kovového šrotu z hľadiska ožiarenia pracovníkov*, In: Bezpečnosť jaderné energie, ISSN 1210-7085, Roč. 23 (61), č. 1/2 (2015), s. 42-45.
- [5] SLIMÁK, A., NEČAS, V.: *Decontamination of Contaminated Scrap Metal by Melting Arisen from the Decommissioning of Nuclear Power Plant Shut Down after an Accident*, In: Informatyka, Automatyka, Pomiarzy w Gospodarce i Ochronie Środowiska, Vol. 4, Number 4 (2014), s. 16-30, ISSN: 2083-0157.

### ADF Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch

- [6] SLIMÁK A., HRNČÍŘ T., NEČAS V.: *Manipulácia s vláknobetónovými kontajnermi v areáli jadrového zariadenia*, In: Posterus [online]. Roč. 4, č. 12 (2011). ISSN: 1338-0087.
- [7] SLIMÁK, A., HRNČÍŘ, T., NEČAS, V.: *Porovnanie dvoch vybraných scenárov manipulácie s obalovými súbormi uskladnenými v areáli jadrového zariadenia*. In: EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie, Roč. 18, č. 4 (2012), s.14-15, ISSN 1335-2547.
- [8] SLIMÁK, A., NEČAS, V.: *Radiation impact during the decontamination by melting of radioactive scrap metal arisen from the decommissioning of nuclear power plants*, In: Journal of Electrical Engineering: Digest of papers presented at Power Engineering 2014 Conference, Vol. 65, No. 7s (2014), s 20-24, ISSN: 1335-3632, V databáze: WOS.

### AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- [9] SLIMÁK, A., NEČAS, V.: *Management of metallic radioactive materials from nuclear installations decommissioning*. In: IYCE: 4th International Youth Conference on Energetics, Siófok, Hungary, 6-8 June, 2013, Danvers: IEEE, 2013, s. [7] p. ISBN 978-1-4673-5554-4.
- [10] SLIMÁK, A., NEČAS, V.: *The Impact of Nuclide Vector Composition on Calculated Individual effective Doses of the Workers during the Melting of Contaminated Scrap*

*Metal*, In: ENC2014: European Nuclear Conference, Marseille, France, 11 – 14 May 2014, Brussels: European Nuclear Society, 2014, s. 275-295, ISBN: 978-92-95064-21-8.

- [11] SLIMÁK, A., NEČAS, V.: *The analysis of metal melting application in the management of metallic radioactive materials arising from decommissioning of nuclear installations*, In: ICEM2013: 15<sup>th</sup> International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, Brussels, Belgium, September 8-12, 2013, New York: ASME, 2013, Vol 1, online, [9] p. ISBN: 978-0-7918-5602-4.

### **AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách**

- [12] SLIMÁK A., HRNČÍŘ T., NEČAS V.: *Evaluation of an external exposure of a worker during manipulation with waste packages stored in Bohunice Radioactive Waste Treatment Centre*, In: Power Engineering 2012, Energy – Ecology – Economy 2012, 11th International Scientific Conference EEE 2012, Tatranské Matliare, May 15-17, 2012, Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2012, s.61-62. ISBN 978-80-89402-49-6.
- [13] SLIMÁK, A., NEČAS, V.: *Využitie veľmi nízkoaktívnej ocele z vyradovania jadrových zariadení na výstavbu železničných konštrukcií*. In: XIII. Štiavnické dni: Banská Štiavnica, 2.-4.októbra 2012. Banská Štiavnica: Združenie pre reguláciu rizika z radónu, 2012, s. [8] s, ISBN 978-80-971150-3-6.
- [14] SLIMÁK, A., NEČAS, V.: *Evaluation of an external exposure of the workers during the melting of radioactive scrap metal arisen from the decommissioning of nuclear installations*. In: ECED 2013: Eastern and Central Europe Decommissioning: International Conference on Decommissioning of Nuclear Facilities, Trnava, Slovakia, June 18-20, 2013, Trnava: SNUS, 2013, s. CD-ROM, [8] p, ISBN 978-80-969943-9-7.
- [15] SLIMÁK, A., NEČAS, V.: *The Impact of Melting of Contaminated Metallic Materials Arisen from the Decommissioning of Nuclear Installations on the Radioactive Waste Disposal in the Waste Management Strategy*, In: Regional Seminar on Radioactive Waste Disposal: Seminar Proceedings, Senec, Slovakia, October 8-9, 2013, Trnava: Decom, 2013, s. CD-ROM [10] p, ISBN 978-80-971498-0-2.
- [16] SLIMÁK, A., NEČAS, V.: *Decontamination and conditioning of radioactive scrap metals arisen from the decommissioning of nuclear facilities by melting*, In: ELITECH'13: 15th Conference of Doctoral Students, Bratislava, Slovakia, 5 June 2013, 1. vyd. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2013, s. CD-ROM, [6] s, ISBN 978-80-227-3947-4.
- [17] SLIMÁK, A., NEČAS, V.: *Evaluation of an External Exposure of the Workers during Melting of Metallic Radioactive Waste Arisen from the Decommissioning of Nuclear Power Plants*, In: ELITECH'14: 15th Conference of Doctoral Students, Bratislava, Slovakia, 4 June 2014, Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2014, s. CD-ROM, [6] s, ISBN 978-80-227-4171-2.
- [18] SLIMÁK, A., NEČAS, V.: *The Radiation Impact during the Melting of Radioactive Scrap Metal Arisen from Decommissioning of Nuclear Facilities*, In: Power Engineering 2014, Energy – Ecology – Economy 2014: Proceedings of the 12th International Scientific Conference EEE 2014, Tatranské Matliare, Slovakia, May 20-22, 2014,

Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, s. 87-92. ISBN 978-80-89402-70-0.

- [19] SLIMÁK, A., NEČAS, V.: *Radiation Impact of the Melting of Radioactive Scrap Metal on the Workers and the Public*, In: ELITECH'15: 16th Conference of Doctoral Students, Bratislava, Slovakia, 25 May 2015, Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2015, s. CD-ROM, [4] s, ISBN 978-80-227-4358-7.
- [20] SLIMÁK, A., NEČAS, V.: *Utilisation of metal melting technology within management of metallic materials arisen from decommissioning of nuclear power plants*. In: ECED 2015: Eastern and Central Europe Decommissioning: International Conference on Decommissioning of Nuclear Facilities, Trnava, Slovakia, June 23-25, 2015, Trnava: SNUS, 2015.
- [21] SLIMÁK, A., NEČAS, V.: *Melting of contaminated metals as a source of irradiation to the workers and public*. In: APCOM 2015, Applied Physics of Condensed Matter, Štrbské Pleso, Slovakia, June 24-26, 2015, s. 263-267, ISBN: 978-80-227-4373-0.

### **BDF Odborné práce v ostatných domácich časopisoch**

- [22] SLIMÁK, A., HRNČÍŘ, T., NEČAS, V.: *Hodnotenie a porovnanie troch vybraných scenárov manipulácie s VBK počas doby ich skladovania v areáli jadrového zariadenia*. In: *Posterus* [online]. Roč. 5, č. 10 (2012), s. online [14] s, ISSN 1338-0087.
- [23] SLIMÁK, A., NEČAS, V.: *Pretavovanie kovových rádioaktívnych materiálov vzniknutých počas vyradovania jadrových zariadení z prevádzky ako dekontaminačná metóda*. In: *EE časopis pre elektrotechniku a elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie*, Roč. 19, č. 4 (2013), s.14-15, ISSN 1335-2547.

### **BEE Odborné práce v zahraničných nerecenzovaných zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)**

- [24] SLIMÁK, A., NEČAS, V.: *Recyklácia kovových rádioaktívnych materiálov z vyradovaných jadrových zariadení pomocou pretavby – súčasný stav, perspektívy a možnosti využitia*. In: *Jaderná energetika v prácich mladá generace – 2012: Mikulášské setkání Mladé generace ČNS*, Brno, Czech Republic, 5.-7. 12. 2012, Praha: Česká nukleární společnost, 2013, s. 103-107, ISBN 978-80-02-02439-2.
- [25] SLIMÁK, A., NEČAS, V.: *Analýza dekontaminácie pretavením v procese nakladania s kovovými rádioaktívnymi materiálmi vzniknutými počas vyradovania jadrových zariadení z prevádzky*, In: *Jaderná energetika v prácich mladá generace – 2013: Mikulášské setkání Mladé generace ČNS*, Brno, Czech Republic, 4.-6. 12. 2013, Praha: Česká nukleární společnost, 2014, s. 100-105. ISBN 978-80-02-02513-9.
- [26] SLIMÁK, A., NEČAS, V.: *Hodnotenie radiačných vplyvov na pracovníkov a životné prostredie počas pretavovania kovov s rôznym charakterom kontaminácie*, In: *Jaderná energetika v prácich mladá generace – 2014: Mikulášské setkání Mladé generace ČNS*, Brno, Czech Republic, 3.-5. 12. 2014, Praha: Česká nukleární společnost, 2015. s. 182-187, ISBN 978-80-02-02599-3.
- [27] SLIMÁK, A., NEČAS, V.: *Hodnotenie radiačných vplyvov spôsobených prevádzkou zariadenia na pretavovanie kontaminovaných kovov vzniknutých vyradovaním JE*

*odstavenej po nehode*, In Elektronický sborník prezentací z konference NUSIM 2014 [CD-ROM], s, ISBN: 978-80-02-02575-7.

**BEF Odborné práce v domácich nerecenzovaných zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)**

- [28] SLIMÁK, A., NEČAS, V.: *Hodnotenie vplyvu prevádzky zariadenia pre pretavovanie kontaminovaného kovového šrotu na pracovníkov a životné prostredie*, In: MG SNUS 2014: zborník príspevkov z odbornej konferencie Mladej generácie Slovenskej nukleárnej spoločnosti, Častá-Papiernička, 25.4. 2014, Trnava: Slovenská nukleárna spoločnosť, 2014, [7] s, ISBN 978-80-971498-2-6.



## **SUMMARY**

### **MELTING OF CONTAMINATED METALLIC MATERIALS IN THE PROCESS OF THE DECOMMISSIONING OF NUCLEAR INSTALLATIONS**

Nuclear power plants as well as every nuclear installation are limited by their lifetime and it is necessary to shut down and start decommissioning of such installations after their lifetime expiration. The decommissioning of such facilities results in generation of a large amount of contaminated metals that can be effectively decontaminated using various technologies. Many technologies for decontamination of the contaminated scrap metal have been developed since the first nuclear power plants and nuclear installations began decommissioning. A suitable decontamination technology for contaminated metals is melting. Within the last twenty five years, melting of contaminated metals in special facilities has developed as a new industry. Decontamination of the melted metals is reached by the effective separation of some radionuclides from the metal waste and their redistribution to the slag and dust. The decontamination factor depends on the radionuclides present. It is also possible to reach the clearance levels and release the ingots into the environment for restricted or unrestricted use.

Dissertation thesis deals with development of the methodology for the evaluation of metal melting process within the radioactive waste management. Thesis comprises method for the assessment of radiological impacts related to the melting of contaminated scrap metal on the workers, environment and the public. The obtained results indicate that the melting does not cause significant impact on the workers as well as environment. Occupational exposure, as well as discharges into the environment and exposure to the public is on relative low level, only few percent (and less) of annual limits. Important part of the thesis is also estimation of the amount of metals suitable for melting and cost benefit analysis. Large amounts of metals (approx. 8 300 tones) can be decontaminated and recycled using melting. The last but not least, the acceptance limit for melting facility was proposed. The limit of 520 Bq/g for total activity of scrap metal seems to be most relevant from other proposed acceptance limits. The evaluation of the melting process has been applied to contaminated metals arisen from the decommissioning of A1 and V1 nuclear power plant.