

Modelovanie externého ožiarenia pracovníkov pri ukladaní rádioaktívneho odpadu do povrchového úložiska

Barátová Dana · Elektrotechnika, Študentské práce

19.10.2011



Obsahom tejto práce je zhodnotenie dávkovej záťaže pracovníkov pri vykonávaní jednotlivých činností súvisiacich s ukladaním vláknobetónových kontajnerov do Republikového úložiska rádioaktívneho odpadu (RÚ RAO) v Mochovciach. Toto zhodnotenie bolo realizované na základe určitých namodelovaných situácií s využitím výpočtového prostriedku Visiplan 3D Alara. Táto práca taktiež obsahuje všeobecný úvod do problematiky rádioaktívnych odpadov (RAO), typov úložísk, RÚ RAO v Mochovciach a špecifickej obalovej formy - vláknobetónového kontajnera (VBK), ktorý sa využíva v Slovenskej republike (SR).

1. Úvod

Rádioaktívne materiály majú široké využitie v energetike, priemysle, medicíne, či poľnohospodárstve. Tak isto ako pri činnostiach súvisiacich s využívaním rádioaktívnych materiálov, aj pri spracovaní, úprave, preprave, skladovaní a finálnom uložení ich odpadových produktov musí byť zabezpečená dostatočná úroveň radiačnej ochrany pracovníkov, obyvateľstva a životného prostredia. Významným procesom v SR, ktorý súvisí s ukladaním nízko a stredneaktívnych, pevných alebo spevnených RAO je systém činností vykonávaných pri umiestňovaní kontajnerov na miesto ich trvalého uloženia - do RÚ RAO v Mochovciach. Všetky tieto činnosti musia viesť k maximálnej jadrovej bezpečnosti podľa platnej štátnej legislatívy a medzinárodného systému zabezpečenia.

Osoby pracujúce v kontrolovanom pásme (v pásme zasiahnutom radiáciou, ktorá nemá prirodzený pôvod) podliehajú regulácii ožiarenia podľa princípu ALARA (As Low As Reasonably Achievable), ktorého znenie je nasledovné: *Pri vykonávaní činností, ktoré sú spojené s možnosťou ožiarenia musí byť zabezpečená najmenšia možná úroveň a pravdepodobnosť ožiarenia, a taktiež počet osôb zasiahnutých radiáciou má byť minimálny.* Preto je veľmi dôležité správne určiť resp. vypočítať dávkovú záťaž pracovníkov pri všetkých činnostiach v kontrolovaných pásmach.

2. Rádioaktívny odpad

Podľa atómového zákona [1] sú rádioaktívne odpady definované ako akékoľvek nevyužiteľné materiály v plynnej, kvapalnej alebo pevnej forme, ktoré pre obsah rádionuklidov v nich obsiahnutých alebo pre úroveň kontaminácie rádionuklidmi

nemožno uviesť do životného prostredia.

Rádioaktívne odpady vznikajú všade, kde sa pracuje s rádioaktivitou, pričom najväčším zdrojom rádioaktívnych odpadov z hľadiska objemu a úrovne rádioaktivity je jadrová energetika, ktorá je významným producentom RAO od ťažby a spracovania uránovej rudy až po ukladanie vyhoreteho jadrového paliva po ukončení doby jeho využitia v jadrovom reaktore. Ďalším významným zdrojom nízko a stredneaktívnych RAO sú inštitucionálne rádioaktívne odpady, ktoré vznikajú v niektorých oblastiach priemyslu, výskumu, medicíny, archeológie, poľnohospodárstva, geológie, ekológie, potravinárstva, vodohospodárstva a i.

2.1. Rozdelenie RAO

Rádioaktívne odpady možno rozdeliť na základe najrôznejších kritérií (fyzikálne, radiačné, chemické, biologické a i.). Najvýznamnejšie z nich sú napr. rozdelenie RAO s ohľadom na ich aktivitu, skupenstvo, spôsob vzniku, spôsob spracovania a dobu premeny v nich obsiahnutých rádionuklidov. V SR podľa aktivity delíme RAO do 3 skupín [2]:

- prechodné RAO,
- nízkoaktívne a stredneaktívne RAO,
 - krátkodobé RAO
 - dlhodobé RAO
- vysokoaktívne RAO.

Krátkodobé nízko a stredneaktívne RAO sa vyznačujú zostatkovým teplom menším ako 2 kW/m^3 a ich priemerná hmotnostná aktivita alfa nuklidov je nižšia ako 400 Bq/g . Doba polpremeny rádionuklidov obsiahnutých v týchto RAO je menej ako 30 rokov (patrí sem aj ^{137}Cs). Krátkodobé nízko a stredneaktívne RAO je možné po ich spracovaní a úprave ukladať do povrchových úložísk, ktoré spĺňajú bezpečnostné kritéria práve pre takýto typ RAO. Povrchové úložisko v Mochovciach taktiež slúži na ukladanie nízko a stredneaktívnych druhov RAO.

3. Úložiská

RAO musia byť od ŽP izolované po dobu, kým nepredstavujú nebezpečenstvo pre okolité prostredie. Preto sú fixované v matrici, uložené v príslušnom kontajnery a umiestnené vo vhodnom úložisku. Typy jednotlivých úložísk sú nasledovné [4]:

- landfill systémy,
- povrchové úložiská,
- podpovrchové úložiská,
- hlbinné úložiská.

3.1. Povrchové úložisko

Zariadenie na trvalé uloženie nízko a stredneaktívnych RAO s krátkou dobou polpremeny (zvyčajne s dobou polpremeny kratšou ako 30 rokov), ktoré je umiestnené v povrchovej časti krajinného systému, v styku s biosférou. Povrchové úložisko má viacero ochranných bariér (prírodných a inžinierskych) a musí spĺňať bezpečnostné

kritériá platnej legislatívnej štruktúry. Aj po uzavretí úložiska prebiehajú stále monitorovacie a dozorné procesy, ktoré zahŕňajú napr. obmedzenie prístupu, údržbu, či vykonávanie inštitucionálnych kontrol.

3.2. Republikové úložisko Mochovce

Republikové úložisko v Mochovciach je multibariérové úložisko povrchového typu, ktoré slúži na ukladanie pevných alebo spevnených, nízko alebo stredne aktívnych balených foriem RAO, vznikajúcich pri vyradovaní jadrových elektrární. Ochranné bariéry predstavuje v tomto úložisku [3]:

- matrica, v ktorej je tento nízko až stredne rádioaktívny materiál fixovaný,
- VBK,
- železobetónová konštrukcia úložiska,
- výplň medzipriestoru boxu,
- viacvrstvé konečné prekrytie,
- ílová vaňa.

Ílová vaňa je časť zhutneného ílu (hrúbka dna je 1 m, hrúbka stien 3 m) okolo každého dvojradu. Medzi touto vaňou a úložnými boxmi sa nachádza drenážny – monitorovací systém, ktorý kontroluje a zaznamenáva prípadný únik vody z jednotlivých úložných boxov osobitne. Na zabezpečenie všetkých prác spojených s ukladáním RAO slúži portálový žeriav. Pred nepriaznivými meteorologickými vplyvmi je I. dvojrad úložných boxov chránený oceľovou halou, ktorá predstavuje dočasnú ochranu úložiska počas celého procesu ukladania až do doby, kedy bude táto hala odstránená a nahradená trvalým ochranným prekrytím.

Úložisko tvorí sústava radov a dvojradov. V súčasnosti je to sústava úložných boxov zoradených do dvoch dvojradov. V každom dvojrade je 2×20 boxov, pričom jeden úložný box má kapacitu uloženia 90 vláknobetónových kontajnerov. Celková kapacita úložiska je preto momentálne 7200 VBK s celkovým úžitkovým objemom 22320 m³ [4]. Technické parametre republikového úložiska sú zhrnuté v nasledujúcej tabuľke:

Tab. 1 Technické parametre RÚ RAO v Mochovciach [4]

Rozloha úložiska	11,2 ha
Počet úložných boxov celkom / v rade	80 / 20
Rozmery boxu	18x6x5,5 m
Rozmery kontajnera	1,7 * 1,7 * 1,7 m
Úložná kapacita boxu	90 kontajnerov (10x3x3 kontajnerov)
Celková kapacita úložiska	7200 kontajnerov

4. Úložné kontajnery

Úložné kontajnery sú významným aspektom pre bezpečné nakladanie s RAO od ich skladovania, cez transport, až po definitívne uloženie. Tieto kontajnery sú navrhnuté tak, aby zabezpečovali dostatočnú ochranu ŽP pred radiáciou. V povrchových

úložiskách sa ukladá nízko a stredneaktívny RAO. Úložné kontajnery môžu byť teda projektované na dlhšiu životnosť, ale aj na relatívne krátku dobu (niekoľko desaťročí).

4.1. VBK

Vláknobetónový kontajner je špecifický druh úložného kontajnera, ktorý je používaný aj v SR na uloženie nízko a stredneaktívnych spevnených RAO. VBK je tvorený telom, vekom a 2 zátkami, ktoré sa po zaplnení kontajnera spoja a uzavrujú. Výroba VBK je založená na kvalitných vstupných surovinách a predpísanej receptúre. Medzi výrobné suroviny patrí [5]:

- cement - na výrobu VBK sa používa zmesný cement (zmes trosky, popolčeka a portlandského slinku) kvôli jeho schopnosti odolávať chemickým vplyvom solí v podzemných vodách,
- kamenivo a piesok - veľkosť jednotlivých častí je menšia ako 10-14 mm. Kamenivo sa prepiera vodou kvôli odstráneniu prachových nečistôt, a taktiež kvôli obmedzeniu alkalicko-kremičitých reakcií, ktoré vedú k zväčšeniu objemu a k narušeniu integrity kontajnera,
- voda - pretože priepustnosť vláknobetónu musí byť veľmi nízka, pomer vody a cementu je menší ako 0,4,
- do zmesi sa pridáva aj kremičitý úlet, ktorý zlepšuje mechanické vlastnosti, kompaktnosť a nepriepustnosť materiálu,
- vlákna - na výrobu VBK bolo vybrané vlákno FIBRAFLEX, ktoré sa vyznačuje veľmi vysokou ťahovou pevnosťou (1400 - 2300 MPa), amorfnou štruktúrou a koróznou odolnosťou aj v agresívnych prostrediach.

5. Visiplan 3D Alara

Výpočtový program Visiplan 3D Alara je analytický nástroj určený na modelovanie a simuláciu externého ožiarovania pracovníkov alebo obyvateľstva gama žiarením. V tomto programe je možné vytvorenie modelu alebo sady modelov s využitím ochranných prvkov a detailného plánovania. Namodelovaný systém je následne zhodnotený výpočtami, pričom je ďalej možné aplikovať ho v praxi alebo pozmeniť, aby vyhovoval požadovaným parametrom.

5.1. Metodika Visiplanu

Metodika Visiplanu pozostáva zo 4 krokov [6]:

1. Vytvorenie modelu - tu je potrebné charakterizovať pracovné prostredie (jeho geometriu a zloženie materiálu) a zdroj rádioaktívneho žiarenia (jeho umiestenie, zloženie materiálu, úroveň aktivity a z akých rádionuklidov pozostáva),
2. Všeobecná analýza - zahŕňa vytvorenie dozimetrických máp, na ktorých pozorujeme jednotlivé miesta s určitou efektívnou dávkou (najdôležitejšie sú oblasti s najvyššou hodnotou efektívnej dávky),
3. Detailné plánovanie - tu je potrebné charakterizovať trajektórie, po ktorých sa pracovníci pohybujú, čas jednotlivých uskutočňovaných aktivít a zhodnotiť dávkovú záťaž pracovníkov,
4. Aplikácia modelu - model je buď možné aplikovať v praxi alebo vhodne modifikovať.

5.2. Metóda výpočtu

Metóda výpočtu používaná vo Visiplane je založená na “point kernel” integrácií [6] s využitím korekčného “build up” faktoru (charakterizuje účinky rozptylu žiarenia pri jeho prechode určitým médium).

“Point kernel” integrácia je založená na rozdelení objemového zdroja na určité bodové zdroje, ktorých výber polohy v rámci objemového zdroja je realizovaný metódou Monte Carlo. Počet týchto výberových bodov si môže určiť sám používateľ. Hustotu fotónového toku od objemového zdroja v určitom bode stanovíme sčítaním príspevkov od jednotlivých bodových zdrojov.

6. Systém činností ukladania VBK do povrchového úložiska

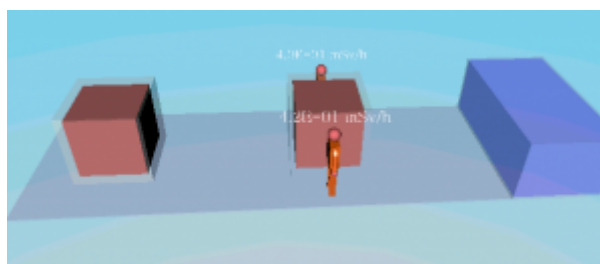
Po spracovaní a úprave v Bohunickom spracovateľskom centre sa RAO ukladajú do VBK kontajnerov, zalievajú cementovou zálievkou a transportujú do RÚ RAO v Mochovciach. Tu sa, po skontrolovaní sprievodnej dokumentácie, 2 VBK kontajnery naložia na transportné vozidlo a prevezú na miesto uloženia, teda do ocelovej haly, kde sa nachádza stavba úložiska. Po vykonaní systému kontrol je jeden z kontajnerov uchopený portálovým žeriavom a preložený na miesto konečného uloženia – do vopred určeného boxu. Z tohto procesu prepravy a ukladania kontajnerov bolo namodelovaných 5 vybraných činností, na základe ktorých boli vykonané výpočty dávkového príkonu v určitých bodoch zvolenej trajektórie. Vybrané činnosti sú nasledovné:

- zloženie z transportného vozidla,
- vizuálna kontrola a odber vzorky,
- meranie dávkového príkonu,
- odkrývanie boxu,
- prekladanie VBK na dlhý dojazd a pohyb na určené miesto.

6.1. Špecifikácia modelovaných činností

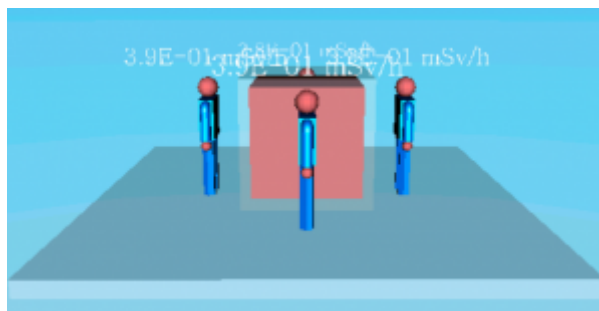
Nasledujúce modelované činnosti vykonávajú traja pracovníci – dozimetrista, žeriavnik a pracovník, ktorý obsluhuje VBK. Proces ukladania sa týka jedného úložného kontajnera z dvojice prepravených na miesto úložiska.

Zloženie z transportného vozidla – pri tejto činnosti pracovník manipuluje s uchopovacím zariadením, ktoré je súčasťou portálového žeriava na 2 stranách kontajnera v časovom intervale 4 minút. Táto manipulácia je nevyhnutná pri upevňovaní a uvoľňovaní VBK v procese premiestňovania kontajnera na dané miesto.



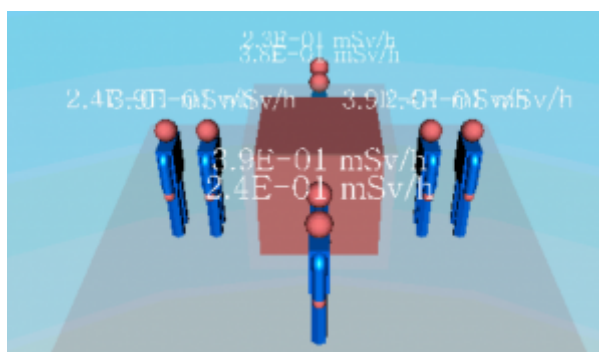
Obr. 1 Manipulácia s uchopovacím zariadením

Vizuálna kontrola a odber vzorky z VBK - v rámci týchto úkonov sa zisťujú vonkajšie poškodenia kontajnera (spôsobené napr. nevhodnou manipuláciou), trhliny vo vláknobetónovom obale cementovej zálievky (môžu vznikáť vplyvom uvoľňovaného zvyškového tepla) a odoberá sa vzorka na vykonanie finálnych bezpečnostných testov.



Obr. 2 Vizuálna kontrola a odber vzorky z VBK

Meranie dávkového príkonu - dávkový príkon meria pracovník vo vzdialenosti 0,5 m a 1 m od povrchu VBK. Doba merania je 1,5 min z každej strany úložného kontajnera v rámci jednej vzdialenosti.



Obr. 3 Meranie dávkového príkonu v dvoch vzdialenostiach

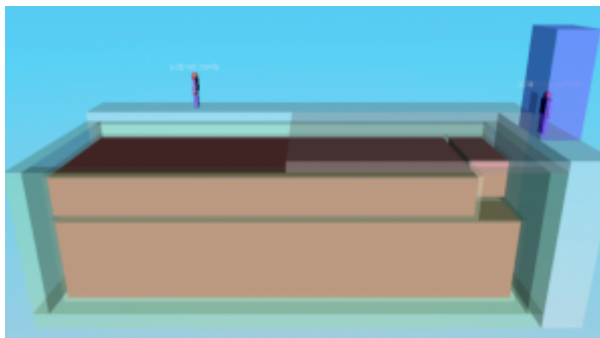
Odkrývanie boxu - jeden úložný box má kapacitu 90 vláknobetónových kontajnerov a osovú rozmery

18×6 m (vnútorné rozmery 17,4×5,4 m), pričom stredná výška boxu je 5,5 m (hrúbka železobetónových stien i dna - 0,6 m) [3]. V modelovanom boxe sa nachádza uložených 89 kontajnerov, ktoré tvoria v rámci vytvorenia modelu tri kompaktné objemy s hrúbkou vláknobetónových stien 0,125 m a nasledovnými parametrami:

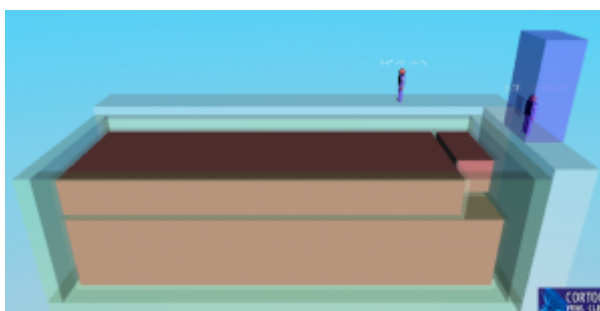
- prvý objem - 60 VBK s celkovou aktivitou $1,59 \cdot 10^{13}$ Bq,
- druhý objem - 27 VBK s celkovou aktivitou $7,16 \cdot 10^{12}$ Bq,
- tretí objem - 2 VBK s celkovou aktivitou $5,3 \cdot 10^{11}$ Bq.

Rozdelenie danej činnosti je z hľadiska modelovania a výpočtu dávkového príkonu nasledovné:

- odkrytie hornej časti boxu do polovice (45 min),
- odkrytie zvyšnej časti boxu (45 min).



Obr. 4 Odkrytie boxu do polovice



Obr. 5 Odkrytie celého boxu

Prekladanie VBK na dlhý dojazd a pohyb na určené miesto – táto činnosť zahŕňa upevňovanie uchopovacej časti portálového žeriava k veke VBK (4 min), zodvihnutie kontajnera do určitej výšky (2 min) a prevoz na vopred určené miesto (10 min). Kontajner je transportovaný do úložného boxu vo vzdialenosti 10 metrov od obsluhovanej kabíny portálového žeriava.



Obr. 6 Manipulácia s uchopovacím zariadením s výpočtom efektívnej dávky pre žeriavnika



Obr. 7 Prekladanie VBK na dlhý dojazd



Obr. 8 Transport na určené miesto

6.2. Zdroj žiarenia

Finálnym reálnym produktom zaobchádzania s

RAO je VBK, pričom zdrojom rádioaktívneho žiarenia sa stáva cementová matrica (tvorená kvapalným RAO a cementovou zmesou), v ktorej sú zaliate pevné RAO (sudý, výlisky). V rámci tejto práce je zdroj žiarenia namodelovaný homogénne, čiže sa zanedbáva vplyv presného uloženia sudov a výliskov v cementovej matrici.

Celková aktivita dvoch rádionuklidov (^{137}Cs , ^{60}Co) bola vypočítaná na základe legislatívne stanovených limit na prepravu RAO. Pri preprave sú dva úložné kontajnery od seba vzdialené 3 m a ich aktivita v bode dva metre vzdialenom od povrchu VBK nemôže prekročiť hranicu 0,1 mSv/h. Celková aktivita homogénne namodelovaného zdroja pri splnení vyššie uvedených predpokladov má hodnotu 265 GBq (zdroj je aktivítne naplnený). Rozmery VBK sú 1,7×1,7×1,7 m a hrúbka jednotlivých stien 0,125 m.

Dôležitým parametrom v rámci sledovania dávkového príkonu je hustota betónu. Hustota vláknobetónových stien VBK dosahuje kvôli vláknam hodnotu 2,703 g/cm³ a hustota cementovej zaličky 3,008 g/cm³ (kvôli obsahu pevných RAO). Technické údaje modelovaného VBK sú zhrnuté v nasledujúcej tabuľke:

Tab. 2 Parametre modelovaného VBK

Rozmery VBK	1,7×1,7×1,7 m
Hrúbka stien	0,125 m
Celková aktivita zdroja	265 GBq
Hustota vláknobetónu	2,703 g/cm ³
Hustota cementovej zaličky	3,008 g/cm ³
Percentuálne zastúpenie rádionuklidov	90 % ^{137}Cs 10 % ^{60}Co

6.3. Sumarizácia obdržaných individuálnych efektívnych dávok

Efektívne dávky žiarenia obdržané jedným dozimetristom, jedným pomocným pracovníkom a jedným žeriavnikom pri vykonávaní vybraných činností sú uvedené v nasledujúcich tabuľkách (Tab. 3 , Tab. 4 a Tab. 5).

Tab. 3 Dávková záťaž dozimetristu pri vybraných činnostiach

Vybraná činnosť	Čas vykonávania činnosti (min)	Efektívna dávka (μSv)
Vizuálna kontrola + odber vzorky	8	52
Meranie dávkového príkonu	12	63

Tab. 4 Dávková záťaž pomocného pracovníka pri vybraných činnostiach

Vybraná činnosť	Čas vykonávania činnosti (min)	Efektívna dávka (μSv)
Zloženie z auta	8	53
Odkrývanie boxu	90	37
Prekladanie VBK na dlhý dojazd	16	49,1

Tab. 5 Dávková záťaž žeriavnika pri vybraných činnostiach

Vybraná činnosť	Čas vykonávania činnosti (min)	Efektívna dávka (μSv)
Odkrývanie boxu	90	26
Prekladanie VBK na dlhý dojazd a pohyb na určené miesto	16	8,9

7. Zhodnotenie

Dozimetrista a pracovník v kontrolovanom pásme, vykonávajúci všetky činnosti spojené s pomocnými úkonmi pri obsluhovaní portálového žeriava (napr. manipulácia s uchopovacím zariadením, vizuálna kontrola pri ukladaní) sa nachádzajú v bezprostrednej blízkosti zdroja rádioaktívneho žiarenia, a preto obdržané dávky rádioaktívneho žiarenia sú v ich prípade vyššie. Naopak žeriavnik v kontrolovanom pásme, ktorý je chránený kabínovou časťou portálového žeriava je vystavený nižšej dávkovej záťaži

Legislatívne stanovený limit pre efektívnu dávku ožiarenia pracovníkov je 100 mSv za päť po sebe nasledujúcich rokoch, pričom za jeden rok nemôže prekročiť hranicu 50 mSv. Je možné teda predpokladať, že za normálnych okolností by efektívna dávka ožiarenia pracovníkov nemala presiahnuť hranicu 20 mSv za jeden kalendárny rok. Ak by dozimetrista, pomocný pracovník a žeriavnik vykonávali všetky dané činnosti pravidelne (približne 100 preprav uskutočnených za kalendárny rok), ich dávková záťaž by bola podstatná. Súčet efektívnych dávok, ktoré by obdržali pracovníci v kontrolovanom pásme pri ukladaní jedného VBK z dvojice prepravených na miesto uloženia, v rámci jedného roka by nadobúdali nasledovné hodnoty:

- Dozimetrista - 11,5 mSv/rok,
- Pomocný pracovník - 13,9 mSv/rok,
- Žeriavnik - 3,5 mSv/rok.

Tieto hodnoty sú však stále vyhovujúce, čo sa týka stanovených limitů ožiarenia pracovníkov v kontrolovaných pásmach aj napriek faktu, že celková aktivita VBK je na hranici limitů pre transport RAO.

8. Literatúra

1. Zákon 541/2004 Z.z. o mierovom využívaní jadrovej energie (atómový zákon), 2004.
2. Národná správa spracovaná v zmysle Spoločného dohovoru o bezpečnosti nakladania s vyhoretým palivom a o bezpečnosti nakladania s rádioaktívnym odpadom, 2008.
3. Nečas, V., Ďurček, E., Remiáš, V.: RAO a likvidácia JE. Bratislava, 2009.

-
4. JAVYS, Jadrová a vyradovacia spoločnosť [online]. Dostupné na internete: www.javys.sk.
 5. SEAS, Slovenské elektrárne, a.s. [online]. Dostupné na internete: http://www.seas.sk/_cms/_files/747/t071001.htm.
 6. Vermeersch F.: VISIPLAN 4.0 3D ALARA Planning tool, Users manual, SCK-CEN, Mol Belgicko, 2005.

Spoluautorom článku je Ing. Tomáš Hrnčíř, Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Práca bola prezentovaná na Študentskej vedeckej a odbornej činnosti (ŠVOČ 2011) v sekcii Jadrová technika a energetika a získala Diplom Dekana, ISBN 978-80-227-3508-7
