

RÁDIOAKTÍVNE ODPADY

Rádioaktívne odpady (RAO) s nižšou aktivitou vznikajú na jadrovochemických, fyzikálnych, medicínskych a i. pracoviskách, kde sa používajú rádioaktívne nuklidy alebo v závodoch jadrového priemyslu. Takýto odpad obsahuje: sklo, filtračný papier, vatu, rukavice, uteráky, telá pokusných zvierat, ionexy, adsorbenty, kontaminované roztoky, atď. RAO sa triedia podľa doby polpremeny kontaminujúcich rádionuklidov a podľa druhu a energie emitovaného žiarenia. Kvapalné odpady sa solidifikujú. Pred uložením sa objemy RAO redukujú tak, aby zabrali čo najmenší priestor, a tým sa znížili skladovacie náklady. Redukcia objemu RAO sa zvyčajne robí odparovaním, spaľovaním a lisovaním.

JADROVÁ ENERGETIKA – NAJVÄČŠÍ ZDROJ RÁDIOAKTÍVNYCH ODPADOV

UČEBNÉ CIELE

Študent by mal poznať zdroje rádioaktívnych odpadov v jadrových elektrárnach a jadrových reaktoroch ako aj možnosti ich zneškodnenia.

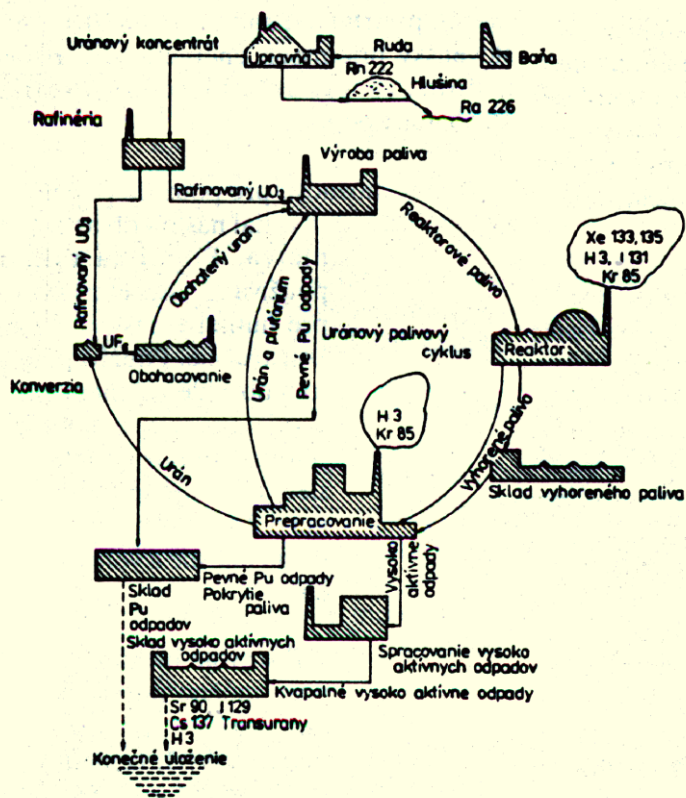
KLÚČOVÉ SLOVÁ

Jadrové palivo, jadrová energetika, vyhorené jadrové palivo, palivové články, vysokoaktívny odpad, prepracovací závod, skladovanie palivových článkov, suché skladovanie, mokré skladovanie, solidifikácia rádioaktívnych odpadov, kalcinácia, cementácia, bitumenácia, vitrifikácia, dezaktivácia, chemická dezaktivácia, fyzikálna a fyzikálno-chemická dezaktivácia, biologická dezaktivácia, ionexy, adsorpcia, absorpcia, elektrodialýza, obrátená osmóza, prevzdušňovanie, rádioaktívne odpadové vody, plynné rádioaktívne odpady, rádioaktívne aerosóly, odlučovače, konzervácia, bezpečné uzavretie, rádioaktívne odpady v Slovenskej republike.

Rádioaktívne odpady z jadrovej energetiky

Najväčším zdrojom odpadov z hľadiska objemu i rádioaktivity sú jadrové reaktory a z nich najmä jadrové palivo. Výroba paliva, od ťažby rudy cez výrobu palivových článkov až po prepracovanie vyhoreného jadrového paliva (VJP), je spojená so vznikom odpadov.

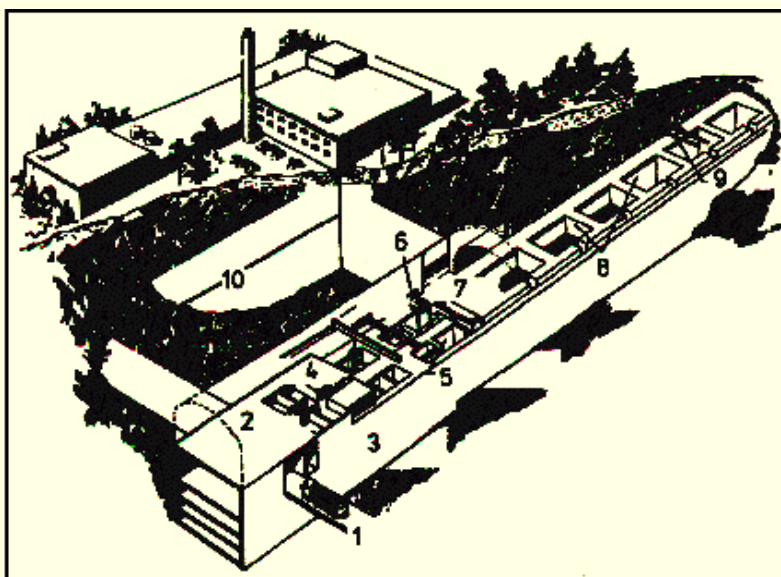
Najväčšie množstvo tuhých vysokoaktívnych rádioaktívnych odpadov (VA RAO) tvoria vyhorené palivové články, ktoré sa v súčasnosti vo väčšine krajín skladujú. Je to však iba dočasné riešenie, pretože vzhľadom na charakter použitých palivových článkov (sú významnou druhotnou surovinou) a tiež vzhľadom na ochranu životného prostredia je výhodnejšie ich najprv prepracovať a až následne RAO zneškodniť a v solidifikovanej forme uložiť do hlbinných úložísk. **Skladovanie** (►Obr.1.) palivových článkov je v súčasnosti najjednoduchší spôsob, ako zabezpečiť ich izoláciu od okolitého prostredia, i keď to nie je lacná cesta. Prechodným skladovaním vyhorených palivových článkov sa má získať čas na vyriešenie problémov ich ekonomického prepracovania a konečného zneškodnenia.



Obr. 1.

Jadrový palivový cyklus.

Na obr. 1 je znázornená jedna z možných schém jadrového palivového cyklu. Vytienené oblasti vyznačujú hlavné oblasti záujmu, v ktorých sa manipuluje s rádioaktívnymi odpadmi.



Obr.2.

Centrálné skladisko palivových článkov

- 1 – dovoz článkov,
- 2 – nádrže na kontajnery,
- 3 – manipulácia s palivom pod vodou,
- 4 – čistenie a chladenie transportných kontajnerov,
- 5 – bazén na prekladanie článkov z kontajnerov do kaziet,
- 6 – žeriav na manipuláciu s článkami,
- 7 – kontrola,
- 8 – skladovacie bazény, každý s obsahom 2000 m³ vody,
- 9 – žeriav na kazety,
- 10 – prírodné potrubia umiestnené v tuneli

Vyhorené palivové články sa najprv chladia v skladovacích bazénoch pri reaktore, potom v nezávislých medziskladoch, alebo v skladoch prepracovacieho závodu použitím mokrej (palivové články sú chladené vodou) alebo suchej (palivové články sú chladené vzduchom) techniky.

Mokrú skladovanie (► Obr. 2.) palivových článkov predstavuje celosvetovo najrozšírenejšiu metódu. Sú to betónové bazény naplnené vodou a vybavené účinným zariadením na kontinuálnu filtráciu a demineralizáciu chladiacej vody. Výhodným sa ukazuje skladovanie palivových článkov v nezávislom sklade, ktorý by bol centrálny pre určitý štát alebo oblasť. Príkladom môže byť výstavba centrálného skladu v **umelej jaskyni** (► Obr. 2.) 30 m pod zemským povrchom.

Potreba prepracovania jadrového paliva vyplýva z toho, že štiepne produkty vznikajúce pri prevádzke jadrového reaktora spomaľujú štiepnu reakciu a majú tak záporný vplyv na ekonomiku prevádzky. Tento "jadrový popol" sa musí odstrániť, aby bolo možné zúžitkovať nespotrebovaný urán v palivových článkoch. Chemické prepracovanie je zložitý proces, pri ktorom sa odstráni asi 2 až 4 % štiepných produktov a asi 1 % plutónia, ktoré vzniklo premenou uránu 238. Celý proces chemickej separácie je ovládaný na diaľku a začína sa odstránením obalov palivových článkov. Potom sa jadrové palivo rozreže na malé kúsky, aby sa ľahšie rozpúšťalo v roztoku horúcej kyseliny dusičnej. Z roztoku sa potom opäť získava urán a plutónium. Hlavný produkt závodu na prepracovanie jadrového paliva sa vracia do palivového cyklu ako surovina na výrobu nových palivových článkov. Zostávajú však **vysokoaktívne odpady** a plutónium. Treba doriešiť problémy spojené s konečným uložením týchto odpadov, prípadne vypracovať technológie na ukladanie vyhorených palivových článkov bez prepracovania.

Z reaktora s výkonom 1 GW vzniká pri prepracovaní vyhoreného paliva 5 až 7 ton spevneného, vysoko rádioaktívneho odpadu ročne, ktorý predstavuje objem 1,8 až 2,5 m³. Aktivita a zvyškové teplo solidifikovaných, vysokoaktívnych odpadov klesá s časom, avšak nerovnomerne. V čase do 100 rokov po vybratí paliva z reaktora sú najvýznamnejšie rádionuklidy ⁹⁰Sr a ¹³⁷Cs, ktoré taktiež vytvárajú zvyškové teplo. Až po 800 rokoch dochádza k takmer úplnému poklesu rádioaktivity a uvoľneniu zvyškového tepla. Na prechodné obdobie 30 – 100 r sa pre RAO budujú nadzemné medzisklady. Až po potrebnom ochladení RAO sa tieto odpady budú triediť a ďalej spracovávať.

Pri použití palivového cyklu bez recyklovania plutónia alebo len s recyklovaním uránu sa **plutónium** neseparuje, ale stane sa **odpadom**. Treba s ním zaobchádzať ako s vysokoaktívnymi alebo transuránovými odpadmi. Ďalej treba brať do úvahy jeho veľkú toxicitu, riziko dosiahnutia kritickosti a dlhodobé tepelné účinky.

Pretože plutónium sa považuje za cenný energetický zdroj, o jeho konečnom zneškodňovaní je málo prác. Plutónium možno ponechať spolu s vysokoaktívnymi odpadmi v roztoku alebo v solidifikovaných odpadoch. Účinky na životné prostredie v tomto prípade sú takmer rovnaké ako pri manipulácii s vysokoaktívnymi odpadmi, s tým rozdielom, že pri úniku transuránových nuklidov pri nehode by boli následky vážnejšie. Ďalšou možnosťou je separácia určitého množstva plutónia bez jeho ďalšieho čistenia. Ak sa plutónium oddelí od uránu i štiepných produktov, dá sa s ním manipulovať rovnako ako s recyklovaným plutóniom.

Z väčšej časti sa plutónium uskladňuje vo forme oxidu v malých trojitých kontajneroch umiestnených po troch v uzavretých oceľových puzdrách s pomerne jednoduchou konštrukciou. Oceľové puzdrá sú trvalo upevnené na oceľových rámoch s vhodnými odstupmi, aby sa zabránilo kritickému stavu, a tieto rámy sú umiestnené v niekoľkých betónových bunkroch, pričom v každom možno uskladniť asi 1 tonu plutónia.

Solidifikácia rádioaktívnych odpadov

Pred dopravou a konečným uložením treba vysokoaktívne odpady solidifikovať. **Solidifikáciou** rozumieme prevedenie rádioaktívnych odpadov z kvapalného do tuhého skupenstva. Solidifikácia je teda aj proces odparenia roztokov v nádržiach, odparenie vody v odparkách, ako aj **kalcinácia**, t.j. proces odparenia vody spojený s chemickou premenou. Existujú rôzne technológie solidifikácie. Dáva sa však prednosť premene odpadov do formy skla alebo keramiky, lebo výhodou tohto spôsobu je zníženie rizika úniku. Ide tu v podstate o tepelné spracovanie odpadov, pri ktorom z odpadov vznikajú zložité polymérne látky, vytvárajúce po ochladení sklá alebo kryštalické látky.

Vysokoaktívne RAO sa solidifikujú predovšetkým **vitrifikáciou** (►Obr. 3.) v podobe borosilikátových skiel alebo keramických materiálov a následne sa budú trvalo ukladať do hlbinných úložísk, ktoré sa budujú v seizmicky a tepelne stálych a nepriepustných geologických formáciách (napr. vo vyťažených solných baniach, tufových, žulových horninách a pod.). Využívajú sa dutiny vyhlbené konvenčnou baníckou technológiou, rozpúšťacou metódou, trhliny vytvorené vodou a pod. Nízkoaktívne a stredneaktívne RAO je možné solidifikovať cementáciou alebo bitumenáciou a potom izolovať.



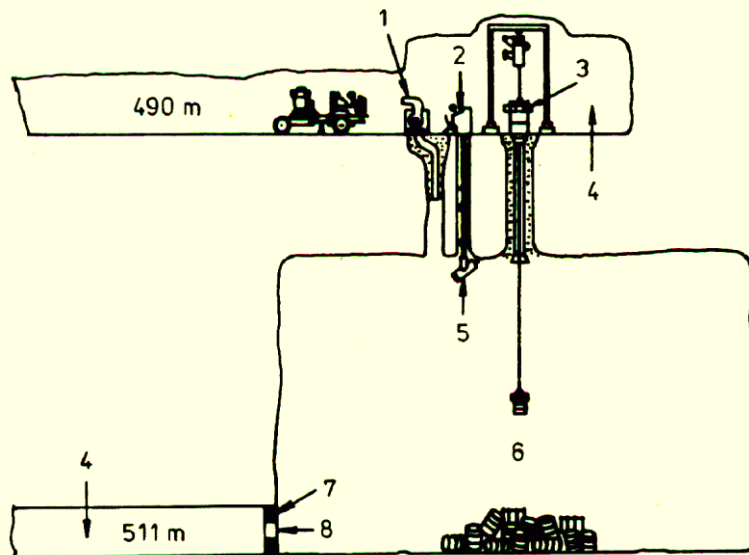
Obr. 3. Vitrifikované rádioaktívne odpady z prepracovania vyhoreného paliva

Cementácia je jednoduchá metóda na solidifikáciu kvapalných odpadov. Tento proces je založený na zmiešaní kvapalných odpadov s cementom, čím sa získa tuhý materiál, ktorého základ tvoria kryštalické zlúčeniny hydrogénkremičitanov a hydrogénuhličitanov vápnika. Na účinnú fixáciu rádioaktívnych odpadov možno použiť aj **bitumenáciu**, pri ktorej sa kvapalné odpady zmiešajú s roztaveným bitúmenom, voda sa odparí a rádioaktívne nuklidy, ktoré sú súčasťou odpadu, sa v ňom rovnomerne rozložia. Pri všetkých solidifikačných technológiách sa výsledný produkt vloží do ocelových nádob a utesní, a tým je pripravený na prepravu, uskladnenie alebo konečné zneškodnenie. V prípade kvapalných odpadov s nízkou aktivitou možno využiť sorpčné vlastnosti pôdy.

Od jednoduchých po exotické návrhy na ukladanie tuhých rádioaktívnych odpadov

Najslubnejšími úložiskami, ktorým sa dnes dáva prednosť na eventuálne skladovanie vysokoaktívneho odpadu, sú solné ložiská, ktoré sú suché a izolované od použiteľných zdrojov podzemnej vody. V **solnom ložisku** (□Obr. 4.) sa najprv vyhlíbi 300 až 500 m hlboká šachta a z nej sa potom razia veľké komory. Do podlahy komôr

sa vyhlbia otvory, do ktorých sa uložia špeciálne kontajnery s rádioaktívnymi odpadmi. Otvory po uložení kontajnerov sa utesnia a po zaplnení celej komory sa utesní i komora. V dôsledku tepla a tlaku, ktoré vyvíjajú rádioaktívne odpady, dochádza k rekryštalizácii solí a za niekoľko rokov sa kontajnery hermeticky zatavia do nej.



Obr. 4.

Úložisko v solných ložiskách. Schéma vybavenia skladovacieho priestoru RAO

- 1 – ventilačný systém,
- 2 – ovládací panel,
- 3 – ochranný plášť,
- 4 – sádzacia miestnosť,
- 5 – TV kamera,
- 6 – skladovací priestor,
- 7 – ochranný tieniaci múr,
- 8 – priezor z olovnatého skla

Dutiny na ukladanie rádioaktívnych odpadov sa môžu vytvárať aj rozpúšťacou technikou. Táto metóda je použiteľná iba v tých geologických formáciách, ktoré sú rozpustné vo vode (napr. kamenná soľ). Pri ukladaní rádioaktívnych odpadov vo vhodných geologických formáciách môže dôjsť v dôsledku uvoľneného tepla k roztaveniu horniny a k vytvoreniu kompaktnej horninovej masy s minimálnou priepustnosťou.

Počíta sa aj s uskladnením vysokoaktívneho odpadu, prevedeného do tuhého stavu, na antarktickom ľade. Tuhý odpad si má teplom, ktoré sám vyvíja, pretaviť cestu až k hlbokým skalným formáciám, aby tam zostal navždy uzavretý pod obrovskými masami ľadu.

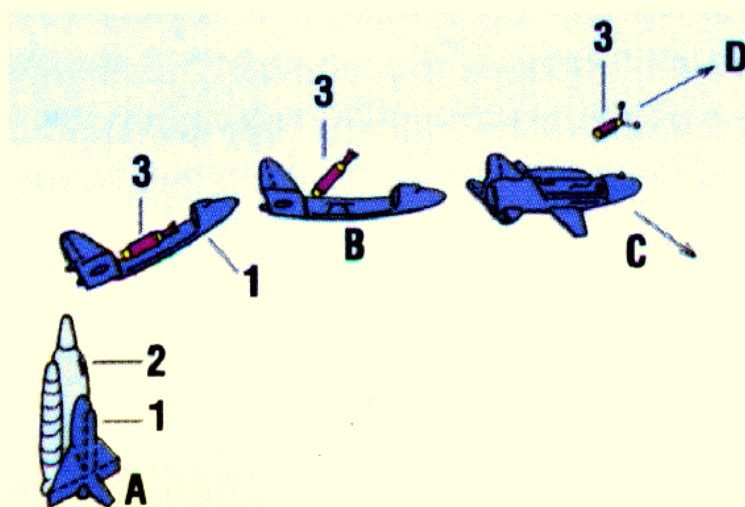
Tuhé rádioaktívne odpady sa ukladajú na morské dno a perspektívne sa ráta aj s ukladaním v horninách pod dnom hlbokých oceánov. Deje sa to napriek rôznym medzinárodným dohodám a zákonom.

Z ekonomického hľadiska je veľmi prítlačivé z nepríjemných rádioaktívnych odpadov vytvárať komerčne využiteľnú surovinu. Vysokoaktívne odpady možno využiť v pôvodnej alebo nepatrne zmenenej forme ako intenzívne zdroje beta a gama žiarenia, alebo po čiastočnej či dokonalej separácii chemických prvkov využiť najdôležitejšie z nich na špecifické účely. Ako zdroje žiarenia sa využívajú cézium-137 a stroncium-90. Niektoré štiepne produkty (plutónium, curium) sa môžu využiť ako zdroje energie. Okrem rádioaktívnych izotopov prvkov odpadu sa ráta s využitím neaktívnych nuklidov, napr. produkcia paládia v jadrových elektrárňach by mohla pokryť jeho celosvetovú potrebu.

Pretože aktinidy sa považujú za hlavný zdroj nebezpečenstva pri dlhodobom skladovaní rádioaktívnych odpadov (1000 rokov), vypracovali sa návrhy, aby tieto aktinidy boli oddelené zo štiepnych produktov a z odpadov chemickej úpravy, počas prepracovania vyhoreného paliva. Celkové množstvo aktinidov by bolo také malé, že

sa dá uvažovať o ich úplnom zneškodnení odoslaním do **vesmíru** (□Obr.5.) pomocou rakiet alebo premenou (transmutáciou) dlhožijúcich rádionuklidov na krátkožijúce rádionuklidy alebo stabilné nuklidy. Transport rádioaktívnych odpadov z dosahu gravitačného poľa Zeme závisí od vývoja kozmonautiky a stupňa využívania vesmíru. Či už pôjde o vypúšťanie rakety s nákladom odpadov smerom k Slnku, alebo na vlastnú obežnú dráhu nepretínajúcu dráhu Zeme. Hlavným nedostatkom tohto riešenia je vysoké riziko spojené s možnou haváriou pri štarte alebo počas letu v dosahu zemskej gravitácie.

V súčasnej dobe (koncom 20. storočia) sa v USA začal nový výskum likvidácie vysokoaktívneho RAO pomocou urýchľovačov (pôvodne vyvíjaných pre hviezdne vojny), ktoré by mali slúžiť ako doplnkový zdroj neutrónov pre reťazovú štíepnu reakciu prebiehajúcu v podkritických súboroch paliva. Reakcia by sa mala udržiavať do úplnej transformácie dlhodobých RAO na krátkodobejšie rádionuklidy.



Obr.5.

Likvidácia rádioaktívneho odpadu do vesmíru

- 1 – raketoplán,
- 2 – kontajner s palivom a štartovacie motory,
- 3 – kontajner s odpadom,
- A – štart zo Zeme,
- B – vypúšťanie kontajnera s odpadom,
- C – návrat na Zem,
- D – do kozmického priestoru

Čistenie (dezaktivácia) rádioaktívnych odpadových vôd

Cieľom dezaktivácie rádioaktívnych odpadových vôd je odstránenie rádioaktívnych látok s takou účinnosťou, aby výsledné vody po vyčistení nepresahovali svojou aktivitou hodnoty predpísané hygienickými normami a tak neohrozovali životné prostredie. Veľká pozornosť sa venuje nízkoaktívnym odpadovým vodám z prevádzky jadrových elektrární, z prepracovacích závodov a z výskumu, ako aj vodám obsahujúcim prírodné rádionuklidy, ktoré sa majú používať ako pitná voda.

Na dezaktiváciu rádioaktívnych vôd sa používajú metódy prevzaté buď priamo alebo po úprave z technológie úpravy vody a čistení odpadových vôd. Sú to metódy:

- chemické (zrážanie, koagulácia),
- fyzikálno-chemické (adsorpcia, ionexová separácia, elektrodialýza),
- fyzikálne (odparovanie, destilácia) a
- biologické.

Dezaktivácia rádioaktívnych vôd sa charakterizuje dezaktiváčnou účinnosťou (stupňom dezaktivácie) D a faktorom (koeficientom) dezaktivácie F .

Dezaktiváčna účinnosť je pomer rozdielu začiatkovej (A_0) a výslednej (A_v) aktivity vody k jej východiskovej aktivite

$$D = \frac{A_0 - A_v}{A_0} \cdot 100 \quad \%$$

Faktor dezaktivácie je pomer aktivít vôd pred čistením a po ňom

$$F = \frac{A_0}{A_v}$$

Chemická dezaktivácia

Rádioaktívne látky prítomné vo vode v koloidnom stave alebo v iónovej, príp. molekulovej forme možno po pridaní vhodných nosičov upraviť na makrodisperznú separovateľnú formu chemickým zrážaním. Dezaktivácia nízkoaktívnych odpadových vôd zrážaním je veľmi rozšírenou metódou, ktorá sa používa v rôznych obmenách prakticky vo všetkých známych dezaktiváčnych staniciach na svete.

Prídavkom vhodného chemického činidla do vody vzniknú zlúčeniny s nízkym súčtom rozpustnosti. Odstraňované rádioaktívne látky môžu vstúpiť do kryštalickej mriežky vylučovanej tuhej fázy, alebo sa adsorbujú na časticiach vylučovanej tuhej fázy, príp. sa vzájomne koagulujú. Ide teda v podstate o záchyt mikromnožstiev rádionuklidov vznikajúcimi zrazeninami, z ktorých niektoré majú viac či menej selektívny účinok na niektoré rádionuklidy. Separačný efekt sa zvyšuje i rádo.

Pri čistení rádioaktívnych odpadových vôd majú osobitné postavenie zrážacie reakcie so sekundárnym účinkom, ktoré prebiehajú pri čírení. Mechanizmus záchytu a rozdielne údaje o dezaktiváčnych faktoroch rozličných rádionuklidov sú určené predovšetkým ich stavom vo vode. Obvykle však nepostačuje zrážanie pomocou železitých alebo hlinitých iónov, ale treba použiť i iné zrážacie činidlá, vytvárajúce málo rozpustné, dobre sedimentujúce zrazeniny. Sú to napr. fosforečnan sodný, sulfidy, oxid manganičitý, feroxyanidy, a i.

Optimálnymi dávkami vápna a sódy sa s dostatočnou účinnosťou ($D > 90$) separuje ^{140}Ba , ^{140}La , ^{89}Sr , ^{115}Cd , ^{46}Sc , ^{91}Y , ^{95}Zr , ^{95}Nb a i. Ťažké kovy sa zrážajú vo forme hydroxidov, no stroncium a bárium vo forme uhličitanov (spolu s vápnikom).

Zrážanie fosforečnanom je najúčinnnejšie na čistenie vôd od ^{144}Ce , ^{144}Pr , $^{90,91}\text{Y}$, ^{89}Sr (D až 99,8 – 99,9 %). Toto zrážanie je málo účinné na odstraňovanie ^{137}Cs a tiež ^{131}I a ^{185}W . Na separáciu stroncia je veľmi účinné fosforečnanové zrážanie v prítomnosti iónov Sr^{2+} .

Pri zrážaní feroxyanidov niektorých kovov (napr. železa, medi, kobaltu) sa so značnou účinnosťou zachytávajú aj stopové množstvá cézia (~99,9 %), ruténia (~95 %) a ďalších prvkov. Vhodná je i kombinácia zrážania feroxyanidov a fosforečnanov.

Na realizáciu uvedených procesov sa používajú rovnaké alebo málo upravené zariadenia bežne používané pri úprave a čistení vôd. Z bezpečnostných dôvodov sú usadzovacie nádrže a číriče, na rozdiel od normálnej vodohospodárskej praxe, zakryté. Aj údržba a oprava mechanických častí zariadení pri práci s rádioaktívnymi odpadovými vodami je spojená s určitým rizikom kontaminácie pracovníkov.

Fyzikálne a fyzikálno-chemické metódy dezaktivácie

Tieto metódy nadobúdajú stále väčší význam pre dezaktiváciu rádioaktívnych vôd, ako aj pre dezaktiváciu pitnej vody.

Vo väčšine dezaktivačných staníc sa na separáciu rádioaktívnych zložiek odpadových vôd používa **ionexová metóda**. Dezaktivácia odpadových vôd na ionexoch je výhodná len vtedy, keď je obsah solí menší ako $1 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$. Preto je účelné ionexovú kolónu zaradiť na koniec celého technologického postupu čistenia. Pretože rádionuklidy v roztokoch sú prevažne vo forme katiónov, používajú sa niekedy iba samotné katexové kolóny vo vodíkovom alebo sodíkovom cykle. Dekontamináciou na katexoch možno znížiť rádioaktivitu vstupujúcej vody asi o 98 %, čo však postačuje iba pre odpadové vody s nízkou rádioaktivitou. Podstatne vyššie účinky sa dosahujú použitím zmesí katexov a anexov ($F \sim 10^3$ až 10^4). Nasýtené ionexy sa spravidla neregenerujú, ale sa zneškodňujú ako tuhý rádioaktívny odpad. Rádioaktivita sa týmto spôsobom skoncentruje do malého objemu, ktorý možno ešte podstatne zredukovať spálením na popol.

Na dezaktiváciu rádioaktívnych odpadových vôd sa používa aj **adsorpcia**. Veľmi veľa tuhých látok sa vyznačuje adsorpčnou schopnosťou, ale len pri niektorých možno túto vlastnosť využiť na zachytávanie rádioaktívnych látok. Ako adsorbent má najväčší význam aktívne uhlie. Ďalej sa uplatňujú adsorbenty na báze organických polymérov, ktoré majú selektívne adsorpčné účinky.

Elektrodialýza, používaná na odsolovanie morskej vody, sa uplatňuje aj pri dezaktivácii odpadových vôd. U rádionuclidov prvkov, ktoré sú v roztoku dobre disociované, sa dosahujú dekontaminačné účinnosti $D \sim 99 \%$, nedajú sa však odstrániť koloidné a pseudokoloidné formy rádionuclidov.

Na dezaktiváciu rádioaktívnych odpadových vôd možno použiť aj metódu **obrátenej osmózy**. Požiadavky na akosť a stabilitu membrán sú vysoké. Pri pracovnom tlaku (rádovo MPa) musia umožniť prefiltrovanie asi 500 l vody na 1 m^3 denne pri zadržaní 95 % rádioaktívnych látok.

Najuniverzálnejšou a jednou z najúčinnjších metód dezaktivácie rádioaktívnych odpadových vôd je **odparovanie**. Dosahuje sa pritom dezaktivačný faktor $F \sim 10^4$. Odparovaním odstraňujeme z roztoku časť prchavého rozpúšťadla, čím sa roztok zahusťuje. Odparovanie nie je vhodné, ak odpadová voda obsahuje plynné rádioaktívne látky prchajúce s vodnou parou, ako napr. vzácne plyny, rádiojódu v elementárnom stave, ľahko prchajúce zlúčeniny ruténia, a pod. Špeciálnymi postupmi však možno zabrániť i úniku týchto látok, napr. alkalizáciou roztoku jódu a u prchavých zlúčenín ruténia znížením tlaku pri odparovaní.

Na odstránenie ^{222}Rn z podzemných vôd používaných na zásobovanie obyvateľstva pitnou vodou sa ukazuje veľmi účinným **prevzdušňovanie**. Uplatňujú sa pritom prevzdušňovacie zariadenia používané vo vodárenstve. Prevzdušňovanie sa uskutočňuje stlačeným vzduchom privádzaným do prevzdušňovacej nádrže dierovaným dnom, prípadne sa voda rozdelí v ejektorovom zariadení do jednotlivých prúdov a atmosférický vzduch do stykového potrubia sa samovoľne prisáva alebo umelo vháňa ventilátorom. Pri prevzdušňovaní po dobu 6 minút možno dosiahnuť dezaktivačnú účinnosť $\sim 98 \%$ a zabezpečiť tak kvalitu upravenej vody vyhovujúcu hygienickým požiadavkám na pitnú vodu z hľadiska obsahu ^{222}Rn .

Biologické čistenie

Biologické čistenie rádioaktívnych odpadov je v podstate napodobnením procesov prebiehajúcich v prírode. Využíva sa pritom prirodzená činnosť mikroorganizmov v ich životnom prostredí. Uplatňujú sa najmä biologické aeróbne metódy, ktoré sa zakladajú na odstraňovaní organických látok, prítomných v rozpustenej alebo koloidnej forme, pomocou zmesnej kultúry mikroorganizmov za

prítomnosti kyslíka. Mikroorganizmy rozkladajú organické látky v odpadových vodách oxidáciou za súčasného uvoľňovania energie, okrem toho syntetizujú v nich novú biomasu. V prípade rádioaktívnych odpadových vôd dezaktivačný efekt spočíva v tom, že mikroorganizmy, ktoré v sebe akumulovali rádioaktívne látky, postupne hynú a ich telá sa usadzujú na dne. Okrem toho organické nečistoty so sorbovanými rádionuklidmi sa oxidujú a produkty oxidácie vo forme kalu klesajú na dno. Takto to prebieha v tzv. biologických rybníkoch, ktoré však majú mnohé nevýhody. Sú náročné na plochu, predstavujú nebezpečie kontaminácie ovzdušia, pôdy i podzemných vôd a sú účinné predovšetkým na odstraňovanie rádioaktívnych biogénnych prvkov. Výhodnejšie sú biofiltre, ktoré pracujú s dezaktivačnou účinnosťou 75 až 95 %, zadržujú ~ 90 % ^{137}Cs , ^{91}Y , ^{95}Zr , najúčinnnejšie sú na ^{144}Ce .

Biologické metódy dezaktívácie sa nevyznačujú príliš veľkou účinnosťou. Nemožno preto rátať s tým, že by bežné čistiarne mestských splaškových vôd odstránili z nich úplne rádioaktívne zložky.

Ústavy zaoberajúce sa výskumom v oblasti využitia jadrovej energie, prípravou a regeneráciou jadrových palív, jadrovej energetiky a iné inštitúcie produkujúce rádioaktívne odpadové vody musia byť vybavené dezaktivačnými stanicami. Niektoré výskumné strediská na dezaktíváciu rádioaktívnych odpadových vôd majú zriadenú jednoduchú stanicu, vybavenú prakticky iba chemickým zrážaním. V iných staniach sa používa kombinácia chemických, fyzikálnych, fyzikálno-chemických, príp. i biologických metód. Hlavným zariadením väčšiny dezaktivačných staníc jadrových elektrární býva odparka, ktorá pracuje s odpadovou parou elektrárne. Odparky sa používajú pre roztoky s vyššou mineralizáciou a rádioaktivitou. Veľké množstvá chladiacich a oplachovacích vôd po dekontaminácii malým obsahom solí sa prečisťujú na ionexoch.

Zneškodnenie plyných rádioaktívnych odpadov

S postupujúcim rozvojom jadrovej energetiky a používaním rádionuklidov vo vede a technike sa dostáva do popredia problematika zneškodnenia, resp. záchytu rádioaktívnych exhalátov. Hlavným zdrojom plyných rádioaktívnych odpadov je jadrová energetika. Je to palivo v palivových článkoch, ktorých puzdrá sa v priebehu prevádzky stali nehermetickými, ďalej zvyšková kontaminácia na povrchu puzdiel palivových článkov vznikajúca pri továrnskej výrobe a aktivácii primárneho chladiča a jeho prímiesí. Podiel každého z týchto zdrojov sa značne mení v závislosti od typu reaktora, energetického zaťaženia aktívnej zóny, jej prevádzkového režimu a ďalších faktorov.

V závislosti od fyzikálno-chemického zloženia sa plyné rádioaktívne splodiny delia do 4 skupín:

1. Rádioaktívne vzácne plyny štiepneho (Xe, Kr) a aktivačného (Ar) pôvodu, ktoré sú pre človeka nebezpečné ako zdroje vonkajšieho ožiarovania beta a gama. Doteraz zverejnené výsledky však ukázali, že i pri maximálnej hodnote ročných emisií rádioaktívnych vzácných plynov nepresahuje individuálna a kolektívna dávka z ožiarovania obyvateľstva v blízkosti jadrových elektrární 1 % prírodného radiačného pozadia.
2. Rádioaktívne izotopy jódu (^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I , ^{129}I) prchajúce pri pracovných teplotách jadrového paliva. Človeku sú nebezpečné tým, že sa zo vzduchu alebo z mlieka koncentrujú v štítnej žľaze. Ak sa berú do úvahy cesty, ktorými sa môže jód dostať do ľudského organizmu, a tiež súvislosti medzi veľkosťou štítnej žľazy a rýchlosťou látkovej výmeny u ľudí

rôzneho veku, možno použiť nasledovné dávkové normovacie koeficienty: pre elementárny ^{131}I vo vzduchu je $0,13 \text{ Gy}\cdot\text{m}^3\cdot\text{Bq}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, pre jeho organické zlúčeniny $4,3\cdot 10^{-3} \text{ Gy}\cdot\text{m}^3\cdot\text{Bq}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, pre elementárny ^{137}Cs vo vzduchu je $1,46\cdot 10^{-3} \text{ Gy}\cdot\text{m}^3\cdot\text{Bq}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ a jeho organické zlúčeniny $1,13\cdot 10^{-3} \text{ Gy}\cdot\text{m}^3\cdot\text{Bq}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$.

3. Rádionuklidy s dlhou dobou polpremeny (^3H , ^{14}C), ktoré sa v organizme viažu do dôležitých štruktúr, hlavne do genetického aparátu buniek.
4. Rádioaktívne aerosóly (hlavne aerosóly štiepných produktov), ktoré vypadávajú na zem z vlečky rádioaktívnych plyných splodín a dostávajú sa do potravinového reťazca.

Na pracoviskách s rádioaktívnymi látkami musí byť rádioaktivita atmosféry neustále udržiavaná na predpísanej hygienickej úrovni. Väčšie pracoviská musia byť vybavené dezaktivačným vzduchotechnickým zariadením. Rádioaktívne exhaláty na týchto pracoviskách sa musia do atmosféry vypúšťať zvláštnym, dostatočne vysokým komínom, ktorý zabezpečuje účinný rozptyl rádioaktívnych látok v ovzduší. Musí sa účinne filtrovať i vstupný vzduch, pretože prachové častice v nasávanom vzduchu by sa stali kondenzačnými centrami rádioaktívnych látok.

Ideálnym stavom by bolo úplné odstránenie všetkých plyných rádionuklidov a rádioaktívnych aerosólov zo vzduchu vystupujúceho z jadrovej energetiky zariadení a z pracovísk, kde sa pracuje s rádioaktívnymi látkami. V praxi je to však neuskutočniteľné. Unášané častice majú často veľmi nepatrné rozmery, nedosahujú niekedy ani mikrometrové veľkosti. Separácia najmenších častíc je veľmi náročná a nákladná, a to hlavne pri požiadavke vysokého dekontaminačného účinku. Veľmi náročné je tiež odstraňovanie plyných rádioaktívnych látok zo vzduchu. Dostupnými technikami je však možné znížiť množstvo rádioaktívnych aerosólov a plynov v ovzduší na takú hodnotu, aby ich pôsobenie na ľudský organizmus bolo zanedbateľné.

Na separáciu **rádioaktívnych aerosólov** sa používajú rôzne zariadenia – odlučovače, ktoré sa bežne používajú aj na zachytávanie neaktívnych tuhých častíc. Sú to suché mechanické odlučovače (usadzovacie komory, žalúziové odlučovače, cyklóny, multicyklóny, atď.), mokré mechanické odlučovače (vírové, hladinové, prúdové a i.), elektrické odlučovače (suché, mokré) a filtre (vločkové, pásové, látkové a i.). Voľba metódy zachytu aerosólov okrem iného závisí od ich veľkosti. Obvykle sa nevystačí s jednoduchým zariadením, ale je potrebné zaradiť viac stupňov. Na začiatku sa odstránia väčšie častice a na konci sa umiestňujú zariadenia, ktoré zachytia aj najmenšie častice.

Ako príklad na praktické riešenie čistenia plyných exhalátov môžeme uviesť chemický spracovateľský závod v Idaho, kde pri kalcinácii odpadov vznikajú pary, plyny a jemné častice. Prvým odlučovacím stupňom je cyklón, ďalej nasledujú mokré práčky s cyklónom. Kontaminovaný vzduch odtiaľ postupuje cez kolónu na zachyt ruténia na absolútne filtre, kde sa zachytia jemné aerosóly. Okrem trícia a ruténia sú všetky rádionuklidy vo forme aerosólov. Asi 10 % tuhých látok vstupujúcich do kalcinátora v odpadnom roztoku odchádza v podobe exhalátov.

Plyný rádioaktívny odpad vzniká v závodoch na spracovanie rádioaktívnej rudy, v jadrových reaktoroch, v závodoch na prepracovanie jadrového paliva a na spracovanie vysokoaktívnych odpadov a na rádionuklidových pracoviskách. Sú to niektoré izotopy vzácnych plynov, trícium, oxid uhličitý $^{14}\text{CO}_2$, jód v elementárnej forme, atď.

Pri posudzovaní "prípustných" vypúšťaných množstiev rádioaktívnych plynov sa všeobecne uplatňuje zásada, že radiačné zaťaženie obyvateľstva má byť také

nízke, ako je to za súčasného stavu technológii rozumne dosiahnuteľné (tento princíp sa nazýva ALARA, čo pochádza z anglického *as low as reasonably achievable*). Pritom treba starostlivo zvažovať pomer nákladov a prospechu, ktorý sa tým dosiahne ("cost/benefit" analýza). Preto sa rádioaktívne plyny, ktoré by najviac prispeli k záťaži obyvateľstva, z veľkej časti účinne zachytávajú a potom skladujú.

Z plyných rádioaktívnych nuklidov sa trícium po zriedení väčšinou vypúšťa do ovzdušia. Robia sa síce pokusy s jeho záchyтом (napr. sorpcia hygroskopickými soľami, adsorpcia na silikagéli a zeolitoch), no účinnosť týchto metód je malá.

Plynné rádioaktívne látky, ktoré nemožno z rôznych dôvodov priamo vypúšťať, treba z prúdu plynu oddeliť. Používajú sa na to rôzne chemické a fyzikálne postupy ako adsorpcia, absorpcia, vymrazovanie, reakcie za vzniku nerozpustných látok, atď.

Na absorpciu sa niekedy používajú roztoky, príp. suspenzie účinných látok, s ktorými rádioaktívne plyny reagujú za vzniku novej chemickej zlúčeniny alebo niekoľkých chemických zlúčenín. Absorpcia sa používa na odstránenie prchavých rádioaktívnych izotopov a zlúčenín jódu a ruténia. Dobré výsledky sa dosahujú v absorpčnom roztoku NaOH. Účinnosť absorpcie je pre I_2 a HI 99,9 %, zatiaľ čo pre CH_3O je malá. Ak sa nahradí alkalický roztok kyselinou dusičnou s prídavkom $HgNO_3$, zvýši sa účinnosť odstránenia metyljodidu na 99,9 %. Značné množstvá ruténia možno zachytiť prebublávaním znečisteného vzduchu buď cez roztok NaOH alebo formalín.

Adsorpcia sa používa na odstraňovanie rádioaktívnych vzácnych plynov z kontaminovanej atmosféry v dvoch základných obmenách. Adsorbované plyny možno ponechať zachytené na adsorbente až do premeny na stabilné dcérske nuklidy, alebo ich možno z adsorbentu desorbovať a ďalej spracúvať. Napr. pre ^{85}Kr je pre dlhú dobu polpremeny druhý spôsob výhodnejší. Ako adsorbenty sa používajú aktívne uhlie, silikagél, aktivovaný oxid hlinitý a rôzne typy molekulových sít. Najvhodnejším adsorbentom vzácnych plynov pritom je aktívne uhlie. Separáčna účinnosť je vyššia než 99,9 %. Z hľadiska účinnosti deja je výhodnejšia adsorpcia pri nízkych teplotách.

Adsorpcia na aktívne uhlie sa používa aj na separáciu rádiojódu. Účinnosť aktívneho uhlia voči metyljodidu možno zvýšiť impregnáciou jodidom draselným v kombinácii s inými anorganickými i organickými látkami. Najúčinnnejšími adsorbentami rádioruténia sú silikagél a oxid železitý, nanosený na silikagél. Na silikagél sa RuO_4 adsorbuje pri teplotách 70 až 120 °C s účinnosťou 99,9 %. V druhom prípade oxid železitý pôsobí ako katalyzátor tepelného rozkladu: $RuO_4 \rightarrow RuO_2 + O_2$. Teplota záchytu sa pohybuje od 150 do 250 °C a dekontaminačný faktor je až 10^3 .

Rádiojód sa zachytáva aj na základe jeho afinity k striebru za vzniku nerozpustného jodidu strieborného. Plyny sa pritom nechajú prechádzať vrstvou porézneho materiálu impregnovaného $AgNO_3$. Pri teplote okolo 200 °C reaguje jód so striebrom pričom vzniká neprchavý jodid, ktorý zostáva zachytený na poréznom materiáli. Účinnosť zachytenia je 99,5 až 99,9 %.

Rádioaktívne izotopy kryptónu a xenónu sa môžu z kontaminovaného ovzdušia odstrániť aj extrakciou chloridom uhličitým.

Rádioaktívne vzácne plyny možno odstrániť z plyných rádioaktívnych odpadov pomocou syntetických permeabilných membrán (napr. dimetylsilikónová guma, acetylcelulóza) využívaním rozdielov v rýchlostiach transportu plynov membránou. Maximálnu účinnosť separácie 99 % možno dosiahnuť sériovým zapojením membrán.

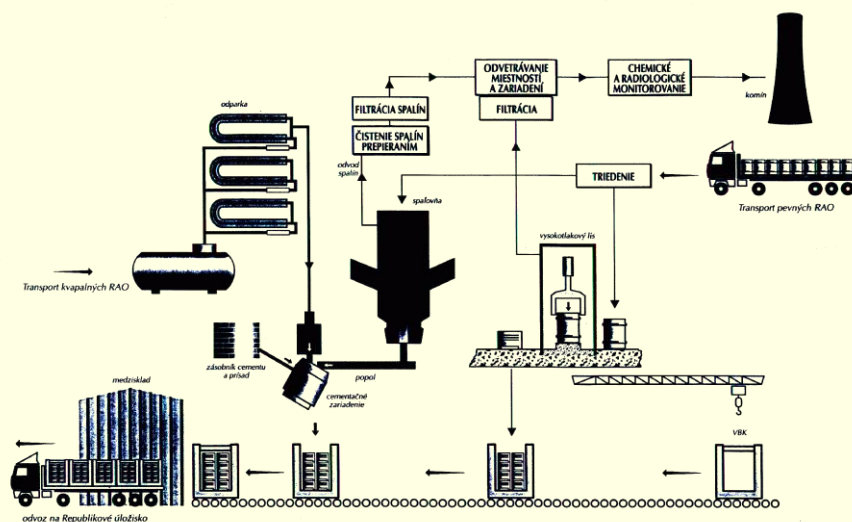
Plynné exhaláty sa nakoniec vždy vypúšťajú do ovzdušia dostatočne vysokým komínom. Vo voľnej atmosfére sa potom rádioaktívny plyn veľmi rýchlo rozptýli a koncentrácia rádioaktívnych látok vo vzduchu klesne pod prípustnú hodnotu. Je dôležité, aby lokálne meteorologické podmienky po väčšinu dní v roku umožnili účinný rozptyl rádioaktívnych plynov a aerosólov.

RÁDIOAKTÍVNE ODPADY V SLOVENSKEJ REPUBLIKE

V našich podmienkach má množstvo vznikajúcich rádioaktívnych odpadov pri normálnej prevádzke JE V-1 a JE V-2 klesajúci trend, pričom čiastočne prechodné zvýšenie kvapalných a tuhých rádioaktívnych odpadov bolo vyvolané rekonštrukciou blokov v jadrovej elektrárni Jaslovské Bohunice.

Pri nakladaní s vyhoreným jadrovým palivom (VJP) rozlišujeme tri fázy:

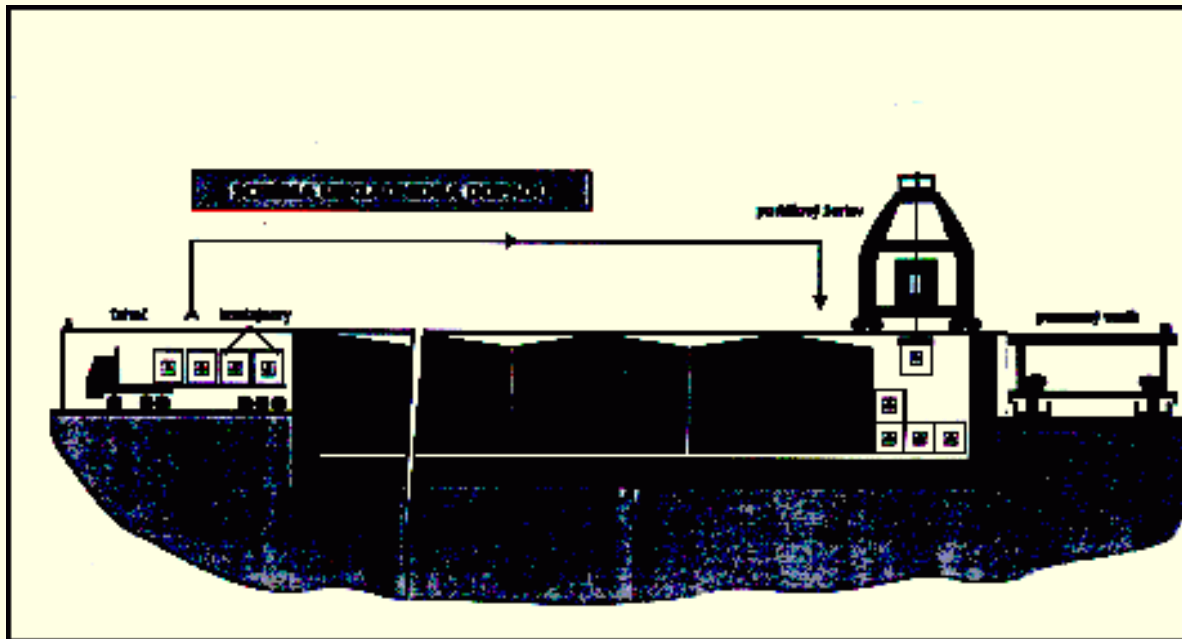
- krátkodobé skladovanie v bazénoch hlavného výrobného bloku (HVB) (min. 3 roky),
- strednodobé skladovanie v areáli alebo mimo areál jadrovej elektrárne (3-50 rokov),
- definitívne uloženie VJP.



Obr.6a.
Bohunické spracovateľské centrum Spôsob úpravy rádioaktívneho odpadu v BSC

Nakladanie s nízko- a stredne aktívnymi odpadmi predpokladá minimalizáciu ich objemu, fixáciu do vhodnej matrice (bitúmen, cement), uloženie do fibrobetónového kontajnera slúžiaceho na prepravu, skladovanie a uloženie na republikovom úložisku rádioaktívnych odpadov v Mochovciach. Z hľadiska súčasnej legislatívy možno ukladať na úložisko v Mochovciach len upravené odpady vo vláknobetónových kontajneroch. Z uvedeného vyplýva, že všetky odpady spevnené cementom alebo bitúmenom do 200-litrových sudov treba „prebaliť“ do uvedených kontajnerov. K 1.1.1998 bolo v skladoch SE-EBO 431 ks 200-litrových sudov s rádioaktívnymi odpadmi zafixovanými do cementu a 796 sudov odpadov zafixovaných do bitúmenu. Na uskutočnenie celej koncepcie sa okrem už prevádzkovej bitumenačnej linky a vitrifikačnej linky, ktorá je v štádiu aktívnych skúšok, zriadilo Bohunické spracovateľské centrum (BSC) (►Obr.6.), predstavujúce komplex spracovateľských technológií všetkých druhov nízko a stredne aktívnych odpadov. Centrum je určené na spracovanie a úpravu kvapalných a tuhých RAO vzniknutých pri vyradovaní jadrovej elektrárne A-1 z prevádzky, spracovanie odpadov z jadrových elektrární V-1, V-2 v Jaslovských Bohuniciach a z prevádzky JE Mochovce, ako aj spracovanie inštitucionálnych rádioaktívnych odpadov, ktoré

vznikli v najrôznejších organizáciách (nemocnice, výskumné ústavy) z celého Slovenska. **Republikové** (►Obr.6.), úložisko RAO (RÚ RAO) sa nachádza v Mochovciach. Je to úložisko povrchového typu, určené pre konečné uloženie tuhých a spevnených nízko a stredne rádioaktívnych odpadov, vznikajúcich pri prevádzke jadrových elektrární a v iných inštitúciách, nachádzajúcich sa na území Slovenskej republiky a zaoberajúcich sa činnosťami, pri ktorých vznikajú RAO. Areál RÚ RAO je umiestnený asi 2 km severozápadne od areálu jadrovej elektrárne Mochovce.



Obr.6b. Republikové úložisko RAO Mochovce pre Slovenskú republiku

Vyhorené jadrové palivo sa v súčasnosti skladuje v medzisklade vyhoreného paliva v Jaslovských Bohuniciach (10 – 50 rokov), kam sa preváža z krátkodobých skladovacích bazénov v hlavnom výrobnom bloku (3 – 10 rokov). Dlhodobým skladovaním vyhoreného paliva sa zníži jeho celková aktivita a získa sa časový priestor na rozhodnutie medzi dvoma spôsobmi konečného uloženia: uloženie po prepracovaní alebo priame uloženie palivových kaziet bez prepracovania.

DEFINITÍVNE ULOŽENIE VYHORENÉHO JADROVÉHO PALIVA

Záverečným stupňom palivového cyklu je definitívne uloženie vyhoreného jadrového paliva alebo rádioaktívneho odpadu z jeho prepracovania. Vo svete je všeobecne akceptovaný názor, že na definitívne uloženie sú vhodné jedine úložné priestory budované v hlbinných geologických formáciách, pri ktorých je vysoká pravdepodobnosť, že nedôjde k zmenám zistených geologických vlastností a hydrogeologických pomerov v časovom období určenom v bezpečnostných rozboroch (najčastejšie 104 -105 rokov). Tento prístup je v mnohých krajinách už rozpracovaný, doložený bezpečnostnými rozborami a výsledkami skúšok v podzemných laboratóriách (napr. firma ASEA vo Švédsku). Aj v SR sa v súčasnom období robí prieskum geologických, hydrogeologických a seizmických podmienok na

výber lokality pre takýto typ hlbinného podzemného úložiska vitrifikovaných VA RAO. Je to spôsob, ktorý vyhovuje kritériám na ochranu človeka a životného prostredia nielen v súčasnosti, ale s ohľadom na dlhodobú existenciu rádionuklidov, aj v ďalekej budúcnosti. V súčasnosti neexistujú technické prekážky definitívneho ukladania rádioaktívneho odpadu, hľadá sa však ekonomicky optimálne riešenie.

Rádioaktivita a hmotnosť zariadení a konštrukcií jadrovej elektrárne po tridsaťročnej prevádzke

Typ zariadení a konštrukcií	Rádioaktivita	Hmotnosť (t)
Oceľové konštrukcie vnútri biologického tienenia: zariadenie vnútri reaktora, plášť reaktora	37 TBq 3,7 až 37 TBq	200 500 až 600
Oceľové konštrukcie 1. okruhu (potrubie, výmeníky tepla, čerpadlá) Aktivovaný betón	stredná nízka až stredná	500 až 100 1000
Systémy vetrania, systém čistenia (dekontaminácia) Materiály a činidlá používané pri zneškodňovacích prácach: kvapalné odpady, filtre	nízka až stredná stredná nízka až stredná	 10 ⁴ m ³ 1

JADROVÝ REAKTOR AKO RÁDIOAKTÍVNY ODPAD (ZNEŠKODNENIE JADROVÝCH REAKTOROV)

Jadrové reaktory treba na konci ich praktickej životnosti (35 až 40 rokov) zneškodniť, aby bola zabezpečená trvalá ochrana verejnosti pre zvyškovou rádioaktivitou a inými potenciálnymi rizikami z vyradeného zariadenia, a aby bol pozemok uvoľnený pre ďalšie použitie.

Celková aktivita zariadení a stavebných konštrukcií jadrovej elektrárne s výkonom $\sim 1000 \text{ MW} \cdot \text{r}^{-1}$ dosahuje po 30 až 40 rokoch nepretržitej prevádzky (bezprostredne po zastavení prevádzky) 40 až 80 PBq, pričom palivo a regulačné tyče, ktoré nemajú vplyv na proces zneškodnenia, nie sú v tomto údaji zahrnuté.

V nasledujúcej tabuľke sú uvedené údaje o rádioaktivite a hmotnosti zariadení a konštrukcií jadrovej elektrárne s tlakovodným reaktorom s výkonom $1200 \text{ MW} \cdot \text{r}^{-1}$ po skončení tridsaťročnej prevádzky.

Prevažná časť rádioaktívnych látok je sústredená vo vnútornom zariadení reaktora; prevažujú rádionuklidy ⁵⁵Fe, ⁵⁹Ni, ⁶⁰Co, ⁶³Ni, ¹⁴C (90 % aktivity je spôsobených relatívne krátkožijúcimi rádionuklidmi ⁶⁰Co a ⁵⁵Fe).

Pod zneškodnením (likvidáciou) jadrového reaktora rozumieme ukončenie prevádzky bez možnosti jeho prípadného ďalšieho obnovenia. Obvykle sa uvažujú tri základné možnosti zneškodnenia:

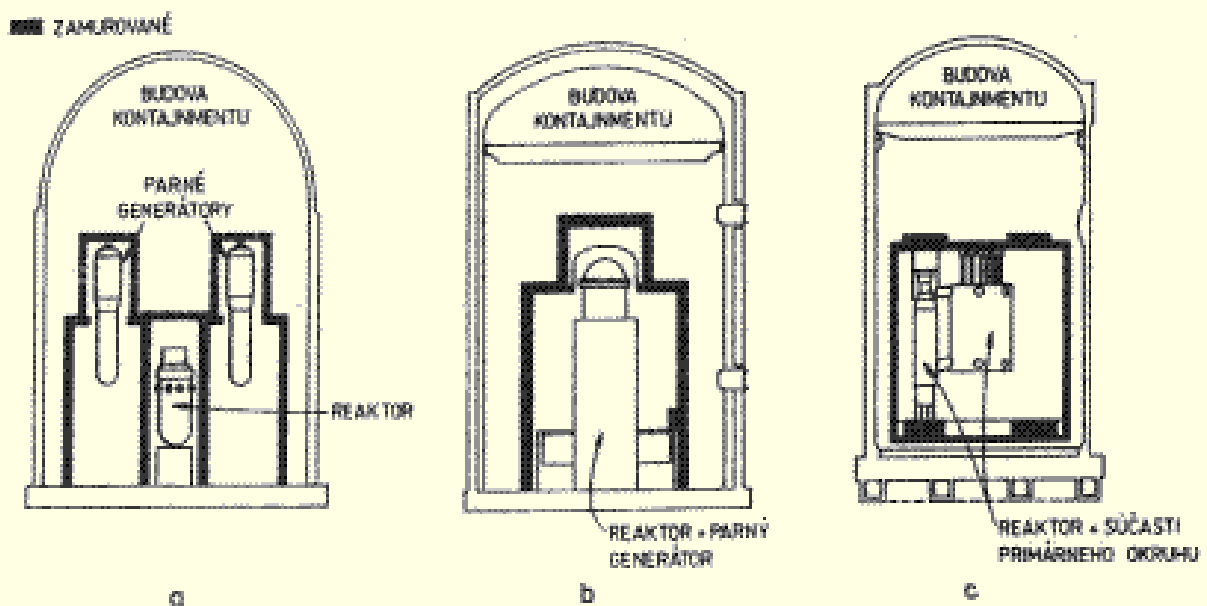
- konzervácia,
- bezpečné uzavretie (zamurovanie, zabetónovanie),

- priama demontáž a odstránenie,
- a dva kombinované spôsoby:
- kombinácia zakonzervovania s neskoršou demontážou a odstránením,
 - kombinácia bezpečného uzavretia s neskoršou demontážou a odstránením.

Konzervácia spočíva v uvedení zariadenia do stavu ochranného uloženia. Reaktor môže zostať nedotknutý okrem odvezenia všetkého paliva a rádioaktívnych kvapalín a odpadov. Treba zaviesť príslušné monitorovanie, kontrolu okolitého prostredia a vhodné bezpečnostné opatrenia, aby nedošlo k ohrozeniu verejného zdravia a bezpečnosti. Konzervácia je postupným procesom, ktorý sa skladá z týchto operácií:

- vyčistenie prístupných priestorov elektrárne od voľnej kontaminácie,
- spracovanie rádioaktívnych odpadov a ich odvoz,
- ponechanie reaktorovej nádoby, jej vnútorného zariadenia a rádioaktívnych častí na mieste,
- uzamknutie vchodov umožňujúcich kontrolovaný prístup do rádioaktívnych priestorov,
- vstup hliadok nepretržitej strážnej služby do areálu,
- uskutočnenie menšej periodickej údržby a kontroly okolitého prostredia.

Trvalé zakonzervovanie sa nezdá byť hospodárnym spôsobom zneškodnenia jadrových zariadení.



Obr. 7. Rezy konštrukciou ochranného obalu reaktora, znázorňujúce hranice zamurovania

- a) tlakovodného reaktora,
- b) varného reaktora,
- c) vysokoteplotného reaktora

Pod **bezpečným uzavretím** sa rozumie hermetizácia všetkých vysokorádioaktívnych či kontaminovaných súčastí (napr. tlakové nádoby, vnútorné zariadenie) reaktora v rámci stavebnej konštrukcie, slúžiaca tiež ako biologická ochrana po odstránení všetkých palivových článkov, rádioaktívnych kvapalín a

odpadov a niektorých vybraných súčastí. Na uzavretie rádioaktívnych materiálov sa používa betón alebo iné dostatočne pevné stavebné materiály s dlhou životnosťou, ktoré by zadržali rádioaktivitu až dovtedy, kým jej úroveň neklesne na hodnotu prijateľnú pre uvoľnenie staveniska na iné účely. Tieto bezpečne uzavreté konštrukcie musia byť projektované tak, aby vydržali akékoľvek riziko možného poškodenia. Bezpečné uzavretie zahŕňa tieto opatrenia:

- prístupové priestory elektrárne sa vyčistia od voľnej kontaminácie,
- rádioaktívne odpady sa spracujú a odvezú mimo areál,
- reaktorová nádoba, jej vnútorné zariadenia a ďalšie rádioaktívne súčasti vnútri budovy reaktorového ochranného tienenia sa ponechajú na mieste a na úplné uzavretie týchto súčastí a systémov sa vybuduje železobetónová stena,
- na kontrolu vstupu a na zabránenie vniknutiu do uzavretého zariadenia sa inštalujú bezpečnostné a poplachové zariadenia vnútri i mimo uzavretej konštrukcie,
- periodicky sa uskutočňujú menšie údržbové práce nestavebnej povahy a kontrola okolitého prostredia.

Konštrukciu **ochranného obalu** (► Obr.7) tlakovodného, varného a vysokoteplotného reaktora s vyznačením približného umiestnenia železobetónových uzáverov si môžete pozrieť v hypertexte. Tento spôsob bezpečného uzavretia vyžaduje ochranné uloženie dlhožijúcich zdrojov vysokej aktivity (napr. ^{59}Ni , ^{63}Ni , ^{14}C) po dobu 100 až 150 rokov od zastavenia prevádzky.

Pri **priamej** (okamžitej) **demontáži** sa odstránia rádioaktívne materiály, zariadenie sa dekontaminuje a demontuje bezprostredne po odstavení z prevádzky. Po skončení týchto prác sa pozemok uvoľní na výstavbu náhradného jadrového zariadenia alebo na iné účely, na ktoré sa však musí vyžiadať zvláštne povolenie. Proces priamej demontáže zahŕňa tieto úkony:

- * odstránenie voľnej dekontaminácie na budovách a súčastiach, aby sa znížili dávky, ktorými sú pracovníci vystavení v priebehu demontáže,
- * spracovanie rádioaktívnych odpadov a ich odvoz,
- * demolácia a odvoz všetkých rádioaktívnych materiálov a súčastí (vrátane betónovej konštrukcie) na povolené úložisko,
- * uskutočnenie úplnej demolácie všetkých nerádioaktívnych súčastí, budov a konštrukcií,
- * úprava pozemku pre iný spôsob využitia.

Kombinácia konzervovania s neskoršou demontážou je reálny postup zneškodnenia jadrových reaktorov. Pri tomto spôsobe sa jadrový reaktor uvedie do stavu ochranného uloženia metódou konzervácie. Po určitom čase, keď sa radiačné riziko dostatočne zmierni, sa zariadenie rozoberie postupom uvedeným pre možnosť demontáže a odstránenia.

Kombinácia bezpečného uzavretia s neskoršou demontážou predstavuje ďalšie spojenie medzi uvedenými možnosťami.

Na svete bolo doteraz zneškodnených vyše 100 reaktorov konzerváciou, bezpečným uzavretím alebo priamou demontážou. Niektoré príklady sú uvedené v tabuľke:

Príklady porovnateľných zahraničných reaktorov uvedených do pokoja

Elektrárň	Prevádzkovateľ	Typ reaktora	Výkon [MW]	Spôsob uvedenia do pokoja
Carolinas Virginia Tube Reactor (CVTR)(USA)	Carolinas Virginia Nuclear Power Associates	Ťažkovodný reaktor s tlakovými rúrami	19	Bezpečné uzavretie
Experimentálna jadrová elektrárň Lucens (Švajčiarsko)	SAL'Energie de l'Quest Suisse (Štátna spoločnosť pre podporu jadrovej techniky)	Ťažkovodný reaktor chladený CO ₂ s tlakovými rúrami	8,55	Čiastočné zneškodnenie s bezpečným uzavretím zvyšku
Experimentálna jadrová tepláreň Agesta (Švédsko)	Švédsko štátna energetická správa	Ťažkovodný tlakovodný reaktor	12 (+68 MW pre diaľkové vykurovanie)	Bezpečné uzavretie

Práce spojené so zneškodnením jadrových reaktorov sú veľmi zložité a v niektorých ohľadoch ešte zložitejšie, než je ich výstavba a uvedenie do prevádzky. Ukážeme to na príklade zneškodnenia malého experimentálneho reaktora v Santa Susane (Kalifornia) vybudovaného v podzemnej dutine výšky 9 m, ktorý mal ochranný obal zo 130 mm hrubej vrstvy ocele, obklopenej vrstvou železobetónu hrúbky 1,5 m. Konštrukcia ochranného obalu bola najprv naplnená vodou, ktorá slúžila ako tienenie proti žiareniu. Potom bola oceľová výstelka rozrezaná na kusy veľkosti 1,2 m x 1,2 m pomocou diaľkovo ovládaného horáka. Rozrezané kusy sa žeriavom premiestnili do vodného bazénu. 350 ton získaného rádioaktívneho odpadu sa uložilo na pohrebisko v Beatty (štát Nevada). Použitý žeriav bol tiež rozrezaný a zlikvidovaný. Tieniaca voda (68 m³) bola zlikvidovaná spôsobom používaným pre kvapalné rádioaktívne odpady.

Zneškodnenie reaktora trvalo dva roky a stálo 6 miliónov dolárov. Táto doba odpovedá približne dobe výstavby reaktora v päťdesiatych rokoch; výstavba vtedy stála 13 miliónov dolárov.

Reaktor v Santa Susane je v porovnaní s dnes budovanými komerčnými reaktormi s výkonom 1 GW i viac iba trpaslíkom. Rôzne aspekty problému zneškodnenia dnešných komerčných reaktorov – technické, ekonomické, ekologické, rádiologické a organizačné majú v mnohých smeroch konfliktný charakter a nebudú doriešené, dokiaľ sa nevypracujú a nestanovia spoľahlivé metódy konečného zneškodnenia rádioaktívnych odpadov.

Na ilustráciu uvedieme, že pri demontáži tlakovodného reaktora s výkonom 1 GW bude treba zneškodňovať tieto objemy rádioaktívnych materiálov:

- 1191 m³ aktivovaného materiálu,
- 16 078 m³ kontaminovaného materiálu,
- 618 m³ rádioaktívnych odpadov,
- 37 m³ vyhoreného paliva.

Vyžaduje to 1363 automobilových a 28 vagónových zásielok. Všetky netransuránové materiály sú uložené v skladovom zariadení blízko pod povrchom a všetky vysokoaktívne materiály sú uložené v hlbokých skladoch v geologických formáciách.

Veľkým problémom, ktorý bude treba riešiť, je určenie časového úseku, počas ktorého sa má uskutočniť úplná demontáž. Odloženie času demontáže o 50 až 100

rokov by minimalizovalo potrebu diaľkového riadenia likvidačných operácií a umožnilo by použiť väčší počet pracovníkov bez zvýšeného rizika radiačného poškodenia. V niektorých prípadoch môže dôjsť k tlaku na rýchle uskutočnenie zneškodnenia reaktora, ale takéto prípady budú v prvom rade vyplývať z ekonomických úvah a zváženia veľmi rôznych faktorov.

BEZPEČNOSŤ PRI PRÁCI S RÁDIOAKTÍVNymi ODPADMI

Bezpečné využívanie jadrovej energie je spojené s bezpečným zaobchádzaním s rádioaktívnymi odpadmi, ktoré vznikajú počas prevádzky a tiež po dožití jadrovoenergetických zariadení.

Medzinárodná agentúra pre atómovú energiu (MAAE) stanovila rozsiahly program s cieľom poskytovať členským štátom pomoc v otázkach bezpečnosti a techniky, vzťahujúcej sa k jadrovým reaktorom pracujúcim na báze tepelných a rýchlych neutrónov a k príslušnému palivovému cyklu, vrátane bezpečnosti práce s rádioaktívnymi odpadmi. V oblasti bezpečnosti práce s rádioaktívnymi odpadmi vypracovala MAAE dokumenty v troch programoch: manipulácia s rádioaktívnymi odpadmi a ich spracovanie, konečné uloženie rádioaktívnych odpadov a hľadiská životného prostredia. Tieto smernice sú zamerané na navrhovanie a prevádzku systému spracovania plyných, kvapalných a tuhých rádioaktívnych odpadov, dopravu, skladovanie a konečné uloženie rádioaktívnych odpadov, odpadov z vyradenia jadrovoenergetických zariadení z prevádzky po dožití jadrovej elektrárne a odpadov z neplánovaných udalostí.

Systém spracovania a ukladania rádioaktívnych odpadov z jadrových elektrární je predmetom rokovania mnohých organizácií zapojených do nášho jadrového programu. Väčšinu systémov našich jadrových elektrární navrhli a vyrobili zahraniční dodávatelia, ale návrhy systémov na spracovanie a ukladanie rádioaktívnych odpadov sú výsledkom domácej konštrukcie a výroby. Likvidácia rádioaktívnych odpadov v rámci SR sa riadi internými predpismi pracoviska, ktoré musia byť v súlade s podmienkami na prevzatie RAO závozom SE-VYZ, Jaslovské Bohunice a platnými zákonmi NR SR.

Zásadou práce pri spracovaní rádioaktívnych odpadov je dôsledná segregácia odpadov rôznych rádionuklidov s rôznou špecifickou aktivitou tak, aby podľa možnosti nedochádzalo k nekontrolovanej tvorbe neznámych zmesných rádioaktívnych odpadov a ich zmesí s odpadmi, ktoré nie sú rádioaktívne. Pracovník už pred začatím práce s rádionuklidom si naprogramuje spôsob priebežného ukladania a odstraňovania kvapalných a tuhých odpadov, ktoré pri jeho práci vznikajú. Vzniknuté odpady sa odovzdávajú kvalifikovanému expertovi pracoviska. Na pracovisku sa z hľadiska likvidácie odpady triedia do týchto kategórií:

Kategória I. Dlhožijúce rádionuklidy s dobou polpremeny väčšou ako 65 dní a neznáme zmesi rádionuklidov

Skladovanie odpadov tejto kategórie je dovolené zásadne iba v tuhej forme, po úprave solidifikáciou (odparení, vsiaknutí pórovitým materiálom, vyzrážaní s nosičom, sorpcii alebo použití inej koncentračnej metódy). Neutrálne roztoky a roztoky s nízkou soľnosťou sa dajú vhodne solidifikovať cementáciou.

So súhlasom kvalifikovaného experta sa dá tento odpad odovzdať ako kvapalnú, zvlášť vodné roztoky a zvlášť organické rozpúšťadlá a scintilátory, v tesne uzavretých bandaskách maximálneho objemu 50 dm³.

Pre ďalšiu identifikáciu odpadu, v zmysle podmienok prevzatia rádioaktívnych odpadov preberajúcim závodom SE-VYZ Jaslovské Bohunice (Slovenské elektrárne a.s. Bratislava, odštepny závod Vyraďovanie jadroenergetických zariadení a zaobchádzanie s rádioaktívnymi odpadmi a vyhoreným palivom, 919 31 Jaslovské Bohunice, tel. (0805) 591 501), treba odpad charakterizovať podľa fyzikálneho zloženia takto:

Tuhý:

- **lisovateľný (L):** sklenené obaly, laboratórne sklo a pomôcky, keramické misky, drôty a drôtený materiál, malé kusy kovov, ihly, teflón, hliník. Filtračná tkanina z digestórií a iné veľkorozmerové materiály z PVC,
- **spáliteľný (S):** papier, buničitá vata, textilie (odevy, handry), obaly (prázdne) a iný materiál z plastov (PE fľaše, injekčné striekačky, šľapky, fólie), tvrdé ochranné pomôcky, gumené materiály (rukavice, hadice), drevo (do dĺžky 60 cm). Spáliteľný biologický materiál sa zbiera a balí zvlášť,
- **kovový (U):** Uložený v sudoch MEVA.

Tuhý odpad sa ukladá v množstve maximálne do 5 kg do plastových vrecúšok alebo nádob označených špeciálnym štítkom, ktorý obsahuje: skratku pracoviska, meno pracovníka, označenie a aktivitu rádionuklidu(ov), charakteristiku odpadu podľa uvedených kritérií a dátum uzatvorenia. Odpad kategórie I. sa odovzdáva poverenému pracovníkovi, ktorý jeho prijatie potvrdí na internej výdajke rádioaktívneho žiariča, prideli mu identifikačné číslo totožné s Odovzdávacím protokolom IRAO, zistí jeho hmotnosť, dávkový príkon na povrchu a určí jeho zaradenie:

- podľa doby polpremeny – do 300 a nad 300 dní,
- podľa radiotoxicity: - I. trieda: ^{226}Ra , ^{241}Am
 - II. trieda: ^{22}Na , ^{45}Ca , ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{125}I , ^{131}I , ^{137}Cs , ^{152}Eu
 - III. trieda: ^{14}C , ^{32}P , ^{35}S , ^{51}Cr , ^{57}Co , ^{65}Zn , ^{59}Fe , ^{85}Sr , ^{90}Y , ^{123}I , ^{207}Tl
 - IV. trieda: ^3H , ^{67}Ga , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{134}Cs
- podľa typu žiarenia – tvrdé γ (^{60}Co , ^{22}Na , ^{134}Cs , ^{152}Eu , ^{65}Zn , ^{192}Ir , ^{137}Cs , ^{57}Co),

a urobí o tom záznam.

Kategória II. Krátkožijúce rádionuklidy s dobou polpremeny menšou ako 65 dní

Tuhý odpad II. kategórie sa môže ukladať do odpadových nádob s označením Rádioaktívne odpady II.

Kvapalný odpad sa ukladá: zvlášť vodné roztoky a zvlášť organické roztoky a scintilátory do plastových alebo sklenených nádob, ktoré sú pred naplnením označené štítkom s uvedením rádionuklidu a mena pracovníka a po naplnení sa údaje doplnia o uloženú aktivitu rádionuklidu(ov), približné zloženie odpadu a dátum naplnenia. Odpad kategórie II. sa odovzdáva poverenému pracovníkovi.

KONTROLNÉ OTÁZKY

1. Ktoré rádioaktívne odpady pochádzajú z jadrovej energetiky?
2. Ktoré sú výhody a nevýhody mokrej a suchej skladovacej techniky?
3. Aké techniky sa používajú pri solidifikácii rádioaktívnych odpadov?

4. Čo je cementácia?
5. Čo je bitumenácia?
6. Čo je vitrifikácia?
7. Ako môžeme využiť vysokoaktívne odpady ako surovinu?
8. Ako sa zneškodňujú aktinidy?
9. Ako možno zneškodňovať vysokoaktívne odpady pomocou urýchľovačov?
10. V čom spočíva dezaktivácia rádioaktívnych odpadových vôd?
11. Čo je dezaktivačná účinnosť a faktor dezaktivácie?
12. Čo je podstata chemickej dezaktivácie rádioaktívnych odpadových vôd?
13. Čo je podstata fyzikálnej a fyzikálno-chemickej dezaktivácie rádioaktívnych odpadových vôd?
14. Čo je podstata biologickej dezaktivácie rádioaktívnych odpadových vôd?
15. Ako sa zneškodňujú plynné rádioaktívne odpady?
16. Do akých skupín sa delia plynné rádioaktívne odpady?
17. Ako sa odstraňujú rádioaktívne plyny?
18. Aké zariadenia sa používajú na separáciu rádioaktívnych aerosólov?
19. Čo je podstata princípu ALARA?
20. Aká je situácia so zneškodňovaním rádioaktívnych odpadov v Slovenskej republike?
21. Ako sa realizuje definitívne uloženie jadrového paliva?
22. Ako sa zneškodňujú jadrové reaktory na konci ich praktickej životnosti?
23. Čo je podstata konzervácie starého jadrového reaktora?
24. Čo rozumieme pod bezpečným uzavretím starého jadrového reaktora?
25. Čo je podstata bezpečnosti pri práci s rádioaktívnymi odpadmi?

S Ú H R N

aerosól - koloidný systém, v ktorom disperzným prostredím je plyn (najčastejšie vzduch) a dispergovanou fázou tuhá alebo kvapalná látka s vysokým stupňom disperzity

bitumenácia – metóda solidifikácie kvapalných rádioaktívnych odpadov; je založená na zmiešaní kvapalných odpadov s roztaveným bitúmenom (nerozložené kvapalné alebo tuhé zmesi uhľovodíkov získané z prírodných látok), voda sa odparí a rádioaktívne látky sa rovnomerne rozložia v bitúmene

cementácia - metóda solidifikácie kvapalných rádioaktívnych odpadov; je založená na zmiešaní kvapalných odpadov s cementom, čím sa získa tuhý materiál. Jeho základ tvoria kryštalické zlúčeniny hydrogénkremičitanov a hydrogénuhličitanov

demineralizácia - odstránenie rozpustných minerálnych látok z vody

dezaktivácia - odstránenie rádioaktívnych látok z rádioaktívnych odpadových vôd. Dezaktivačná účinnosť je pomer rozdielu začiatočnej (A_0) a výslednej (A_v) aktivity vody k jej východiskovej aktivite $D = \frac{A_0 - A_v}{A_0} \cdot 100$ % . Faktor dezaktivácie je

pomer aktivít vôd pred čistením a po ňom $F = \frac{A_0}{A_v}$.

kalcinácia - proces odparenia vody z kvapalných odpadov spojený s chemickou premenou

odlučovač - zariadenie na oddelenie tuhých i kvapalných prímiesí z plynov (vzduchu)

odpad - produkt ľudskej činnosti a jej činnosti v prvovýrobe a druhovýrobe aj terciárnej sfére, ktorý spoločnosť v ďalšej činnosti buď vôbec nevyužíva, alebo využíva len čiastočne a je nútená ho zneškodňovať, aby sa nezhoršovala kvalita životného prostredia

rádioaktívny odpad - odpad v tuhom, kvapalnom alebo plynnom skupenstve, ktorý vzniká pri využívaní zdrojov ionizujúceho žiarenia, pri prepracovaní vyhoreného jadrového paliva alebo pri ťažbe a úprave surovín; obsahuje rádioaktívne látky, prípadne je nimi znečistený

solidifikácia - prevedenie rádioaktívnych odpadov z kvapalného do tuhého skupenstva

vitrifikácia - metóda solidifikácie kvapalných rádioaktívnych odpadov; premena odpadov do formy skla alebo keramiky primiešaním kvapalných odpadov do roztaveného skla

zneškodnenie (likvidácia) jadrového reaktora - ukončenie prevádzky jadrového reaktora bez možnosti prípadného ďalšieho obnovenia; realizuje sa konzerváciou, bezpečným uzavretím a priamou demontážou



Návrat z acrobat readera -  (zatvorením okna)
