



ЗБОРНИК РАДОВА



XXX СИМПОЗИЈУМ ДРУШТВА ЗА ЗАШТИТУ ОД ЗРАЧЕЊА СРБИЈЕ И ЦРНЕ ГОРЕ

**2. - 4. октобар 2019. године
Хотел “Дивчибаре”, Дивчибаре, Србија**

**ДРУШТВО ЗА ЗАШТИТУ ОД ЗРАЧЕЊА
СРБИЈЕ И ЦРНЕ ГОРЕ**



ЗБОРНИК РАДОВА

**XXX СИМПОЗИЈУМ ДЗЗСЦГ
Дивчибаре
2- 4. октобар 2019. године**

**Београд
2019. године**

**RADIATION PROTECTION SOCIETY OF
SERBIA AND MONTENEGRO**



PROCEEDINGS

**XXX SYMPOSIUM RPSSM
Divčibare
2nd - 4th October 2019**

**Belgrade
2019**

ЗБОРНИК РАДОВА

XXX СИМПОЗИЈУМ ДЗЗСЦГ
2-4.10.2019.

Издавачи:

Институт за нуклеарне науке „Винча“
Друштво за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе

За извршног издавача:

Проф. др Снежана Пајовић, научни саветник
в.д. директора Института за нуклеарне науке Винча

Уредници:

Др Михајло Јовић
Др Гордана Пантелић

ISBN 978-86-7306-154-2

©Institut za nuklearne nauke „Vinča“

Техничка обрада:

Михајло Јовић, Гордана Пантелић

Електронско издање:

Институт за нуклеарне науке ”Винча”, Мике Петровића Аласа 12-14, 11351
Винча, Београд, Србија

Тираж:

150 примерака

Година издања:

Септембар 2019.

**RADIOAKTIVNI OTPAD I DEKONTAMINACIJA:
RETROSPEKTIVA RADOVA PREZENTOVANIH NA
SIMPOZIJUMIMA DRUŠTVA ZA ZAŠTITU OD
ZRAČENJA U PERIODU 1963.-2017. GODINE**

**Ivana SMIČIKLAS, Mihajlo JOVIĆ,
Marija ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ i Slavko DIMOVIĆ**

*Univerzitet u Beogradu, Instituit za Nuklearne Nauke Vinča, Beograd, Srbija,
ivanat@vin.bg.ac.rs, mjovic@vin.bg.ac.rs, marijasljivic@vin.bg.ac.rs,
sdimovic@vin.bg.ac.rs*

SADRŽAJ

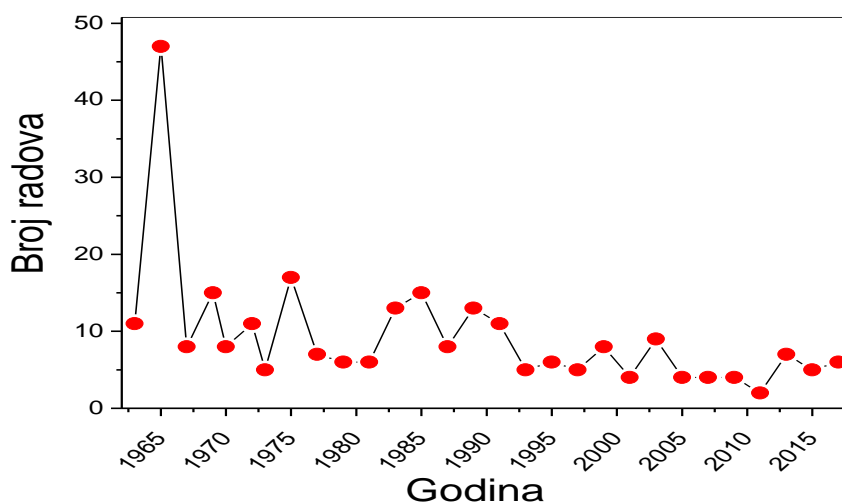
Kao neizbežni pratioci svih vidova proizvodnje i primene nuklearne energije nastaju nusprodukti - otpadni materijali, koji nemaju potencijala za dalje korišćenje, a čija aktivnost premašuje granične vrednosti propisane zakonskom regulativom. Akcidenti pri proizvodnji i primeni nuklearne energije, manipulaciji i transportovanju izvora jonizujućeg zračenja i druge vanredne situacije u miru i ratu, značajno doprinose generisanju radioaktivnog otpada kao i radijacionoj kontaminaciji materijalnih sredstava i objekata, životne sredine i živih bića. Povodom jubilarnog XXX Simpozijuma Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, kroz restrospektivu radova saopštenih na prethodnim skupovima prikazano je kako su se na vremenskoj skali od 54 godine menjale aktualne teme, problemi, metodologija rada i koji su zaključci proistekli iz naučnih istraživanja i praktičnog rada u oblasti radiokativnog otpada i dekontaminacije.

1. Radovi iz oblasti RAO i dekontaminacije na Simpozijumima Društva za zaštitu od zračenja i prvi, tematski skupovi

Radioaktivni otpad (RAO) i dekontaminacija su stalne teme Simpozijuma Društva za zaštitu od zračenja od njegovog osnivanja. Na prethodnih 29 skupova, u okviru ovih oblasti je publikovano oko 270 radova i kratkih izvoda saopštenja.

Prosečan broj radova je bio 8, izuzimajući II Simpozijum održan 1965. godine u Mostaru, na kome je svih 47 radova bilo posvećeno problemima radiološke dekontaminacije, kao centralnoj temi skupa (slika 1). Tadašnji predsednik Jugoslovenskog društva za radiološku zaštitu Prof. dr Grujica Žarković, navodi u predgovoru Zbornika da je uklanjanje neželjene radioaktivnosti iz čovekove životne sredine jedna od najvažnijih oblasti radiološke zaštite i razlog sazivanja posebnog stručno-naučnog skupa, a prispeli radovi odnosili su se na opšta i organizaciona pitanja, spoljnu i internu dekontaminacija čoveka, dekontaminaciju vode, hrane, objekata i materijala. Već tada je preporučeno da se organizaciji i sprovođenju radiološke zaštite u miru i ratu pristupiti planski, u pogledu donošenja zakonskih propisa i uputstava, osposobljavanja stručnog kadra, nabavke pouzdane instrumentacije i bržeg korišćenja naučnih dostignuća u praksi, što je

rezultiralo usvajanjem Rezolucije sa kojom je trebalo upoznati najodgovornije državne organe.



Slika 1. Broj radova iz oblasti RAO i dekontaminacija prezentovanih na Simpozijumima DZZ u periodu 1963.-2017. god.

Naredni Simpozijum, održan 1967. godine u Banjaluci, takođe je imao centralnu temu - „Merenja i instrumentacija u zaštiti od jonizujućeg zračenja“. Za kontrolu i merenje površinske kontaminacije u to vreme su korišćeni GM, proporcionalni i scintilacioni brojači, a zahvaljujući razvoju elektronike počelo je uvođenje poluprovodničkih elemenata koji su omogućili veću pouzdanost instrumentacije, uz manje dimenzije i potrošnju. Na skupu je predstavljen prenosni, tranzistorizovani instrument za merenje površinske kontaminacije KOMO-T, koji je indikovao kontaminaciju alfa i beta/gama emiterima i imao vizuelnu i akustičku kontrolu broja impulsa (slika 2A). Učesnici skupa su upoznati i sa prvom pokretnom radiološkom laboratorijom, izrađenom u Institutu u Vinči (slika 2B). Ova laboratorija je bila opremljena uređajima za merenje primljenih doza za lica, radijacionih polja gama zračenja, za merenje kontaminacije ljudi, odeće, terena, površina, radioaktivnosti uzoraka vode, hrane i vazduha, a takođe i kompletima za medicinsku intervenciju i humanu dekontaminaciju.



Slika 2. Uređaj za merenje površinske kontaminacije KOMO-T (A) i pokretna radiološka laboratorija Instituta u Vinči (B). Zbornik III Jugoslovenskog Simpozijuma o radiološkoj zaštiti, Banja Luka, 1967.

Naredni Simozijumi DZZ postali su mesto razmene praktičnih iskustava, prezentovanja novih naučnih i tehnoloških dostignuća iz oblasti dekontaminacije, karakterizacije, tretmana i odlaganja RAO, razmatranja strategija upravljanja RAO materijalima i problema dekomisije nuklearnih postrojenja.

2. Dekontaminacija

Efikasnost dekontaminacija metalnih površina i sprega u različitim rastvorima za dekontaminaciju, odeće kontaminirane česticama radioaktivnih padavina postupcima hemijskog čišćenja i mašinskog pranja, kao i kontaminabilnost gumiranih platna i njihova radiološka dekontaminacija, bili su tema Simpozijuma 1969. godine. Ideja o primeni morske vode u dekontaminaciji, predstavljena 1970. god, zasnivala se na visokom sadržaju dvovalentnih katjona i njihovom efektu na oslobađanje radioaktivni katjona koji su za podlogu vezani procesom jonake izmene. Morska voda se pokazala efikasnom u dekontaminaciji obojenih površina i pamučne tkanine, a određene su i optimalne koncentracije aditiva (natrijum-heksametafosfat i površinski aktivne supstance-deterdženti) koji povećavaju efekt dekontaminacije. Predložen je i postupak radiološke dekontaminacija motornih vozila u vanrednim uslovima, koji obuhvata mlaziranje vodom ili vodenim rastvorom deterdženta "Plavi radion". Otkriveno je da laka pena na bazi proteina, koja se koristi pri gašenju požara, može naći primenu u dekontaminaciji površina, s obzirom da ne kvasi uređaje, vezuje nastale gasove i hemijski je neutralna. Primena visoko-ekspanzivne pene u dekontaminaciji sintetičkih podova i vazduha publikovana je 1975. godine. Takođe, diskutovani su problemi i praktična iskustva vezana za određivanje performansi visokoefikasnih aerosolnih filtera, kao važnih činilaca zaštite okoline od rada nuklearnih postrojenja.

Mehanizmi dejstva tenzida i mogućnosti brze filtracija radioaktivnog koloidnog materijala razmatrani su 1983. god, dok je najveći broj radova na narednom skupu 1985. god. bio posvećen radiološkoj dekontaminaciji hrane. Akcenat je bio na postupcima koji će se mogu izvesti u domaćinstvu i koji brzo i efikasno smanjuju sadržaj radiokontaminata bez redukcije konzumne vrijednosti namirnice. Postupci uklanjanja radioaktivnih jona kao što su ^{134}Cs , ^{85}Sr i ^{131}I , zasnivali su se na potapanju kontaminiranog mesa u vodu i slane rastvore, kao i dubokom zamrzavanju mesa, praćenim brzim odmrzavanjem i višestepenim kuvanjem pod pritiskom, uz promenu tečne faze.

Na Simpozijumu održanom 1987. god. nakon nuklearne katastrofe u Černobilu, predstavljen je postupak ultrazvučne dekontaminacije opreme, dok je najveći broj radova iz oblasti humane dekontaminacije bio prezentovan u okviru Sekcije „Medicinsko-biološka zaštita“.

Složeno međudelovanje različitih vrsta tenzida u sistemima za dekontaminaciju bilo je tema radova iz 1991. godine. Prezentovan je i metod elektrohemijske dekontaminacije u nuklearnim postrojenjima, u kome je kontaminirani metalni predmet uronjen u rastvor elektrolita i vezan za pozitivan pol izvora jednosmerne struje. Metod je pokazao dobre rezultate u dekontaminaciji čelika, bakra i aluminijuma, usled anodnog rastvaranja metala. Prikazana je i primena Mossbauer-ove spektroskopije u analizi korozionih produkata čelika.

U okviru dekontaminacije, ispitivani su i postupci tretmana otpadnih materijala koji imaju perspektivu dalje primene. Fosfo-gips se dobija kao nus-proizvod pri proizvodnji fosforne kiseline, a usled povećane aktivnosti radionuklida ne može se koristiti u

građevinskoj industriji i poljoprivredi. Postupci njegovog prečišćavanja predloženi 1997. god, smanjuju koncentraciju prisutnih radionuklida do zakonski predviđenog nivoa. Iste godine je prvi put razmatrana primena laserskog zračenja za dekontaminaciju površina metala, uz analizu principa ablacije površine putem intenzivne i fokusirane laserske svetlosti koja otparava tanak sloj materijala. Kao prednosti nove metode navedeni su: delovanje sa daljine bez kontakta sa objektom, smanjenje sekundarnog otpada i izbegavanje upotrebe agresivnih hemikalija u velikim količinama.

Procena i poređenje efikasnosti dekontaminacije alkidnih i epoksi-poliuretanskih sistema premaza, publikovana je 2007. god, a za merenje površinske aktivnosti kontaminiranih i dekontaminiranih uzoraka korišćen je gamaspektrometrijski sistem visoke rezolucije sa koaksijalnim poluprovodničkim detektorom sa kristalom od germanijuma visoke čistoće (HPGe ORTEC GEM 50).

Prenosni digitalni merač radioaktivnog zračenja DMRZ-M15, za merenje jačine ambijentalne ekvivalentne doze gama zračenja $H^*(10)$, kao i za detekciju radioaktivnih izvora i kontaminacije, predstavljen je 2015. god. Korišćenjem mikrokontrolera omogućena je upotreba više mernih sondi, korekcija na fon, kao i kompenzacija mrtvog vremena. Primenom daljinskih sondi, moguće je i merenje na daljinu (do 100 m), što ga čini korisnim za merenje velikih jačina doza sa bezbedne udaljenosti.

3. Remedijacija kontaminiranih terena

Problemi dekontaminacije i remedijacije terena postali su aktuelni nakon bombardovanja Savezne Republike Jugoslavije od strane NATO saveza, 1999. god. Na području rta Arza, koji se nalazi na ulazu u zaliv Boka Kotorska, ispaljeno je 480 projektila, a procenjeno je da je 300-400 bilo sa uranijumskim penetratorom (90-120 kg osiromašenog uranijuma). Realizaciju projekta dekontaminacije je Vlada Crne Gore poverila Centru za ekotoksikološka ispitivanja i kampanja je trajala do decembra 2002. godine. Dozimetrijski je detaljno pregledano ukupno oko 45.000 m² terena, a kontaminacija osiromašenim uranijumom je detektovana na oko 18.000 m². Na Simpozijumima DZZ održanim 2001. i 2003. god, saopštena su dozimetrijska iskustva, sistematizovani su tipovi lokacija i publikovani rezultati dekontaminacije. Svih 486 kontaminiranih lokacija je dekontaminirano do nivoa koji je niži od dvostruke maksimalne vrednosti lokalnog prirodnog fona i područje je proglašeno podesnim za neograničeni javni pristup.

Na Simpozijumu DZZ 2005. god, sorpcija i distribucija urana na zemljištu lokaliteta Bratoselce koje je za vreme NATO agresije bombardovano municijom sa osiromašenim uranijumom, razmatrana je sa stanovišta povećanja znanja o interakcijama urana i komponenti zemljišta. Takođe, predstavljene su metode hemijske *in situ* stabilizacije radionuklida u zemljištu, a 2013. god. i eksperimentalni rezultati primene apatita u *in situ* remedijaciji zemljišta kontaminiranog radioaktivnim ⁹⁰Sr. Osim metoda stabilizacije, proučavan je i optimizovan sastav rastvora za hemijsku ekstrakciju radionuklida iz kontaminiranog zemljišta (2015. god).

4. Karakterizacija i tretman tečnog RAO

Postupci tretmana tečnog RAO su kontinuirano izučavani do današnjih dana. Na Simpozijumu 1969. godine analiziran je proces prečišćavanja vode flokulacijom i taloženjem ferifosfatnih flokula u LAMELLA aparatima. Sistem kontrole otpadnih radio-

aktivnih voda i postupanje sa tečnim materijalima u institutu u Vinči, opisani su 1970. godine. Prva šarža koja je u toku probnog pogona tretirana u eksperimentalnom postrojenju bila je smeša fisionih produkata. Tretman je obuhvatao koprecipitaciju Sr kalcijum-fosfatom uz dodatak Fe^{3+} jona, separaciju zaostalog Sr i većeg dela Cs jona katjonskom izmenom na smoli Amberlit IR-120 i završno uklanjanje preostalog Cs pomoću selektivnog jonskog izmenjivača $\text{K}_2/\text{CoFe}(\text{CN})_6$. Šema model postrojenja za uklanjanje ^{60}Co i ^{137}Cs , koje je bila planirano za obradu efluenta tipa VR-1, publikovana je 1972. god. S obzirom na složeni hemijski sastav ovog efluenta, tretman je obuhvatao više faza.

Postupak predkoncentrisanja lantanida primenom aluminijum-hidroksida, saopšten 1985. god, pokazao se efikasnim u prisustvu visokih koncentracija soli, ali ne i u prisustvu kompleksanata koji grade stabilne komplekse sa Ln^{3+} jonima.

Mogućnosti tretmana nisko i srednje radioaktivnih efluenta iz nuklearne elektrane (NE) "Krško" kombinovanim metodama, saopštene su 1987. god, a 1989. su definisani najpovoljniji uslovi denitriranja suspenzije visoko radioaktivnog otpada primenom mravlje kiseline. Interesantan je podatak da u ovom periodu, iz praktičnih, ekonomskih i sigurnosnih razloga, započinje praksa izvođenja eksparimenata primenom stabilnih izotopa kao analoga radioaktivnim.

Proces dvostepene pertracije je 1997. godine predstavljen kao perspektivna alternativa postojećim separacionim metodama za uklanjanje radioaktivnih jona iz tečne faze. Ramski membranski moduli sa transverzalno postavljenim šupljim vlaknima omogućavaju da se istovremeno izvrši i dekontaminacija polaznog rastvora i međusobna separacija jona, uz koncentrisanje svakog jona ponaosob i omogućavanje komercijalne primene radioizotopa. Na sledećem Simpozijumu 1999. god, diskutovana je primena membranskih procesa za efikasno koncentrisanje i/ili separaciju radionuklida iz tečne faze, kao što su elektrodijaliza, Donnanova dijaliza, pertracija i reversna osmoza.

Veliki broj radova na Simpozijumima DZZ bio je posvećen separaciji radionuklida iz vodene sredine primenom selektivnih čvrstih matrica – sorbenata. 1969. godine publikovani su rezultati primene sintetičkog zeolita tipa Linde 4A, aktivnog uglja biljnog porekla i mikrokristalnih sorbenata. Godine 1972, izložen je niz radova na temu sorpcije radionuklida, posebno ^{137}Cs , ^{89}Sr i ^{60}Co , na sintetičkom zeolitu AV/-500 koji je visokoselektivan prema Cs, ilitnim glinama, ifuzorijskoj zemlji, bentonitu i tufu. Kristalni BaSO_4 je ispitivan kao sorbent, a izučavan je i zahvat primesa pri njegovoj kristalizaciji. Rezultati izučavanja defektne strukture mikrokristala BaCO_3 i migracija trasera ^{133}Ra u čvrstu fazu BaCO_3 bili su prezentovani 1981. i 1983. godine.

Ispitivanje sorpcije ^{137}Cs na zeolitu 4A, 1973. god, pokazalo je da prisustvo deterdženta nema uticaja na efikasnost separacije. Komparativna sorpcija jona Co na neorganskim i organskim sorbentima publikovana 1973. god, pokazala je da je proces uspostavljanje ravnoteže dugotrajan (24 h i više), osim na organskim jonoizmenjivačkim smolama. Sorpcija radionuklida na kolubarskom lignitu (1975. god) pokazala je selektivnost površine prema jonima Co. U interakciji sa rastvorom iz uglja su ekstrahovane mineralne i organske materije, među kojima i fenol, pa je ovaj sorbent ocenjen kao nepogodan za dekontaminaciju vode za piće.

Istraživanje sistema za fiksaciju radioizotopa iz 1975. god. obuhvatilo je i razmatranje mehanizma rekristalizacije, adsorpciono/desorpcione ravnoteže i samodifuzije, kao procesa koji određuju fiksaciju radioaktivnih izotopa u sistemima čvrsto/tečno.

Sorpcija ^{137}Cs je izučavana primenom prirodnog i modifikovanog bentonita (1977. i 1979. god). Utvrđeno je da se efikasnost sorpcije na domaćim bentonitskim glinama

može znatno poboljšati termičkim i hemijskim tretmanima. Najveća efikasnost uklanjanja postignuta je primenom gline obradjene natrijum-hidroksidom, a zatim feri-hloridom, te je ovaj sorbent preporučen i za dekontaminaciju vode za piće.

Na skupovima 1977. i 1981. god, tema je bila mogućnost uklanjanja radionuklida u anjonskom obliku (jod i njegove valentine forme) primenom aktivnog uglja, dok je 1983. analiziran problem dekontaminacije voda sa visokim koncentracijama neaktivnih jona, kod kojih je moguća pojava ekskluzije radioaktivnog materijala. Najveći stepen ekskluzije pronađen je na kaolinu, a najmanji na zeolitu A što mu daje prednost kao matiksnu za dekontaminaciju. Zeoliti su bili aktuelni i 1985. god, kada su predstavljeni rezultati uklanjanje radioizotopa gadolinijuma i mogućnosti korištenja zeolita za obradu nisko i srednje radioaktivnog otpada iz nuklearnih elektrana. Na istom Simpozijumu predstavljeni su prvi u nizu rezultata primene sorbenata na bazi kalcijum-fosfata, čije su različite hemijske i strukturne forme izučavaju do današnjih dana. Pored eksperimenalnih rezultata sinteze i karakterizacije različitih apatita, 1999. god. je na Simpozijumu predstavljen softver VINMATRIX 1.0 razvijen u Institutu „Vinča“ za izučavanje stabilnosti sistema apatit - primesa. U osnovi softvera je izračunavanje vrednosti potencijala jon-jon interakcije, jednog od osnovnih fizičkih parametara koji definišu kapacitet čvrste matrice za inkorporaciju primesa i stabilnost sistema čvrsta matrica/primesa.

O primenljivosti granuliranih formi sorbenata (modernita i zeolita) za uklanjanje radionuklida iz pojedinačnih rastvora ili smeše, bilo je reči na Simozijumima održanim 1987. i 1989. god. U ovom periodu, sorpcija radionuklida na različitim mineralima je izučavana i u svetlu selekcije pogodnih odlagališta RAO, a predstavljeni su i rezultati ispitivanja uticaja temperature i vremena kalcinisanja zeolita na brzine otpuštanja radioaktivnih kajona. Korišćenje sepiolita u oblasti zaštite životne sredine, u svim situacijama kada postoji kontaminacija zemljišta i voda uranijumom, prezentovano je 2011. god.

Od 2007. god, u skladu sa trendovima u svetu, značajno je poraslo interesovanje za valorizaciju otpadnih materijala i njihovu praktičnu primenu u imobilizaciji radionuklida. Životinjske kosti su izučavane kao sekundarni izvor hidroksiapatita i u više studija su se pokazale kao pogodna matrica za imobilizaciju radionuklida. U svrhu uklanjanja radioaktivnih katjona, na Simpozijumima održanim 2013. i 2015. god, predstavljen je niz radova u kojima je kao sorbent korišćen otpadni material (boksitni ostatak, leteći pepeo, pepeo pirinčane pleve, komponente građevinskog otpada, kompost rečne korovske biljke, ljuštore školjki). Dobijeni rezultati su pokazali da se među otpadnim materijalima mogu pronaći alternativne, jeftine, lako dostupne i ekološki prihvatljive matrice za primenu u procesima prečišćavanja tečnog radioaktivog otpada.

5. Karakterizacija i tretman čvrstog RAO

U oblasti tretmana čvrstog RAO, na Simpozijumu 1981. god. se prvi put pored cementa pominje bitumen kao medijum za solidifikaciju RAO. U poređenju sa cementnom matricom, bitumen pokazuje prednosti kao što su fizička, hemijska i radiolitička stabilnost uz niže operativne cene bitumenizacije (10 puta niže u odnosu na cemenctiranje) i niže troškove transporta do mesta odlaganja. Godine 1983, učesnicima Simpozijuma DZZ je predstavljen novi metod solidifikacije jonoizmenjivača plastičnim materijalima koji polimerizuju na sobnoj temperaturi, kao i rezultati prve kampanje vitrifikacije radioaktivnog otpada u Francuskoj.

Na skupovima održanim 1983. i 1985. god, aktuelna tema bio je sastav matriksa za imobilizaciju RAO, a praćena je izlučljivost ^{137}Cs iz perlit-cementa i vermikulit-cementa. Poređenje efiksnosti vermikulit-maltera i maltera dobijenog na bazi Portland cementa sa aditivima, u imobilizaciji istrošenih jonoizmenjivačkih smola, ukazalo je na neminovnost promena u tehnologiji kondicioniranja RAO u NE „Krško”. Modelovanje fizičko-hemijskih parametara maltera za imobilizaciju RAO i betona za izradu kontejnera u tehnologiji odlaganja RAO, prikazano je na Simpozijumu 1989. god.

Lizimetrijska ispitivanja solidifikovanih RAO formi prvi put su primenjena 1991. god, kao nov pristup u definisanju ponašanja RAO materijala niskog i srednjeg nivoa aktivnosti, imobilisanih u izabranim cementnim matriksima. Ovim ispitivanjima se imitiraju realni uslovi, a akcenat je stavljen na pojavu mogućih akcidentalnih uslova na području odlagališta.

Kao rezultat potrebe za nedestruktivnom karakterizacijom otpada u nestandardnim pakovanjima, bez prethodnog iznošenja iz skladišta, 2005. god. su na Simpozijumu DZZ opisana spektrometrijska merenja gama zračenja iz istorijskog otpada nastalog solidifikovanjem reaktorskog tečnog otpada, u cilju ovladavanja *in situ* karakterizacijom. Merenja su izvedena pomoću NaI(Tl) detektora, sa višekanalnim analizatorom InSpector 2000 i programskim paketom Genie 2000.

Na Simpozijumu 2007. godine, predstavljeni su matematički modeli za određivanje i poređenje efektivnih koeficijenata difuzivnosti radionuklida, od značaja u analizi migracije radionuklida iz cementog matriksa pripremljenog bez i sa dodatkom adiva (bentonita i zeolita) za dodatnu stabilizaciju.

Rezultati uklanjanja, kondicioniranja i skladištenja iskorišćenih radioaktivnih izvora u Crnoj Gori, sprovedenih kroz projekte IAEA i EU, predstavljeni su 2017. godine.

6. Dekomisija reaktora

Problem dekomisije nuklearnih elektrana prvi put je akcentovan na Simpozijumu DZZ 1985. god. Povlačenje nuklearnih objekata iz upotrebe nije bilo dovoljno regulisano, a nedostatak kriterijuma povezivan je sa nedostatkom istustva. Do tog trenutka je u celom svetu izvršena dekomisija oko 60 nuklearnih objekata, ali ni jedne komercijalne NE. Procenjivalo se da će do kraja 20 veka preko 100 NE prestati sa radom, što govori o aktuelnosti i razmerama problema.

Godine 1997., na Simpozijumu su izneti problemi zbrinjavanja isluženog goriva reaktora RA u Vinči. Istraživački RA snage 6,5 MW, projektovan i izgrađen od strane bivšeg SSSR, pušten je u pogon 1959. god, a zaustavljen 1984. god. U elaboratu "Podloge i kriterijumi za utvrđivanje daljeg statusa istraživačkog reaktora RA", procenjena je realna vrednost reaktora RA, zajedno sa teškom vodom i gorivom i ocenjeno da izbor rešenja za njegov trajni status mora biti izvršen što pre. Isluženo nuklearno gorivo bilo je smešteno u bazenu za privremeno odlaganje, u suterenu zgrade reaktora. Tadašnja ispitivanja su pokazala da je stanje u ovom bazenu može imati ozbiljne sigurnosne i radiološke implikacije. Dat je opis odlagališta isluženog goriva i aktivnosti koje su sprovedene na poboljšanju njegovih sigurnosnih i radioloških karakteristika. Prikazani su rezultati do tada postignuti na identifikaciji i minimizaciji korozivnih procesa, kao i rezultati analize sigurnosti na nuklearnu kritičnost. Povećana radioaktivnost vode u bazenu pripisana je curenju "izgubljenog" gorivnog elementa, koji je u toku 1996. god. lociran i izvađen sa dna bazena. Cilj Misije IAEA koja je boravila u Institutu "Vinča" u februaru 1997. bio je da eksperti iz Rusije razrade plan i

procene troškove sprovođenja navedenih aktivnosti. Procenjeno je da je za sanaciju bazena sa isluženim gorivom reaktora RA potrebno oko 300 do 500 hiljada US \$.

Odlukom Vlade Republike Srbije iz jula 2002. god, trajno je zaustavljen reaktor RA, te je najviše radova o ovoj problematici prezentovano na Simpozijumu 2003. god. Prikazani su detalji plana radiološke karakterizacije za potrebe dekomisije RA, a koji se odnose na metode uzorkovanja, merenja i analizu eksperimentalnih rezultata određivanja aktivnosti sistema i komponenti. Dat je pregled metoda proračuna koji će biti korišćeni za određivanje neutronske indukovane aktivnosti u komponentama i sistemima reaktora RA i razmatrana je mogućnost korišćenja automatizovane nedestruktivne analize nuklearnog otpada srednje i niske aktivnosti i transuranijskog otpada, smeštenog u kontejnerima (buradima), pomoću emisije kompjuterizovane tomografije (ECT). Analizirane su opcije dekomisije RA, a na osnovu analiziranih parametara predloženo je odlaganje dekomisije za period od 30 godina i usvajanje programa pripremnih radova.

Zaključcima Vlade Republike Srbije iz februara 2004. godine definisani su glavni pravci aktivnosti vezanih za ovo nuklearno postrojenje: vraćanje isluženog nuklearnog goriva u zemlju porekla i dekomisija postrojenja primenom strategije neodložne demontaže. Na Simpozijumu 2007. god, prezentovane su aktuelne aktivnosti vezane za dekomisiju RA. Usvojeni su odgovarajući propisi za rad u objektu reaktora RA, formirani su timovi za realizaciju projekata uklanjanja isluženog goriva i dekomisiju reaktora RA i definisane aktivnosti i rokovi izvršenja za period 2004-2015. Pripreme za prepakivanje i transport isluženog goriva reaktora u Rusiju i za otpočinjanje dekomisije reaktora RA odvijale su se u okviru Programa VIND, finansiranog od strane Ministarstva nauke Republike Srbije, uz ekspertsku i tehničku pomoć IAEA i uz očekivane donacije iz inostranstva.

7. Sakupljanje, transport i odlaganje RAO

Rezultati ocene i provere zaštitnih svojstava kontejnera B-2, za transport radioaktivnih materijala, saopšteni su 1972. god. Odeljenje za reaktorske materijale Instituta u Vinči radilo je na razvoju i izradi konstrukcije kontejnera koji pripada ambalaži tipa B, u skladu sa normativnima IAEA. Ispitivanje gotove konstrukcije, uključujući hermetičnost, zaštitna svojstva, izdržljivost na slobodan pad i temperaturu, pokazalo je da kontejner B-2 ima zadovoljavajuću mehaničku izdržljivost i homogenost zaštite od gama zračenja, te se moglo pristupiti serijskoj proizvodnji.

Podaci o stanju i količinama čvrstog RAO u privremenom skladištu u institutu u Vinči, prvi put su izneti na Simpozijumu 1975. god. Istaknuto je da do 1963. god. nije vođena evidencija o godišnjem prinosu čvrstog RAO, niti o njegovom poreklu. U period od 1948. do 1963. god, sakupljeno je oko 3000 komada buradi od 200 L sa nisko aktivnim RAO. Ovaj materijal nalazio se na izdvojenom mestu u krugu Instituta, van zatvorenog skladišnog prostora, izložen dejstvu atmosferilija. Od 1963. god, vođena je evidencija o količinama i poreklu čvrstog RAO koji je skladišten u novoizgrađenom hangaru. Predlog konstrukcije i tehnički podaci o armirano-betonskim kontejnerima za pakovanje radioaktivnog materijala iznet je 1987. godine.

Na Simpozijumu 1997. god, zaključeno je da problem deponovanja RAO iz NE treba rešavati kroz jedinstveni program na nivou Jugoslavije. Sistematizovana su postojeća rešenja odlaganja RAO: u more, u napuštene rudnike soli i u veštačka odlagališta.

Navedeni su sigurnosni kriterijumi koje skladište treba da zadovolji i koji su od NE "Kriško" upućeni Saveznom komitetu za zdravstvo.

Izbor tehnologija obrade tečnog i čvrstog RAO u institutu u Vinči, prezentovan je 1979. god. Predviđen je faktor smanjenja zapremine 3-4, pakovanje voluminoznog otpada i metalnih predmeta u metalnu burad, a zatim betoniranje. Učesnici Simpozijuma 1981. god, iz Instituta "Ruder Bošković" iz Zagreba i "Jožef Stefan" iz Ljubljane, predstavili su strategiju sakupljanja, privremenog i trajnog odlaganja radioaktivnog otpada iz nuklearnih postrojenja.

Mogućnost primene domaćih materijala za izradu betonskih kontejnera u tehnologiji solidifikacije RAO, kao i za izradu maltera za odlaganje i ispunu betonskih tranšaja razmatrana je na Simpozijumu 1983. god. Oko 3000 m³ tečnog i čvrstog otpada niskog i srednjeg nivoa aktivnosti se u tom trenutku nalazilo na skladištenju u Institutu u Vinči. Kao jedna od prihvatljivih opcija trajnog odlaganja nisko i srednje aktivnog otpada, predloženo je površinsko odlaganje, a istraživački rad je bio usmeren na razvoj postupaka solidifikacije cementnim postupkom, razvoj postupka za dobijanje betonskih kontejnera i recepture za betone za ispunu tranšaja. Cilj rada je bio da pokaže u kojoj meri ovakav koncept, zasnovan na tri barijere, zadovoljava sigurnosne kriterijume i uslove trajnog smeštaja u našoj zemlji sa stanovišta geoloških, klimatskih i drugih specifičnosti. Interesantan je podatak da je u Jugoslaviji bila predviđena izgradnja serije od najmanje šest nuklearnih elektrana do 2000 god, te je problem obrade i odlaganja RAO svih vrsta, uključujući visoko-aktivni, bio značajan.

Program istraživanja i razvoja plitko ukopanih betonskih sistema za odlaganje radioaktivnog otpada u Jugoslaviji predstavljen je na Simpozijumu 1993. god. Zakon o moratorijumu na gradnju nuklearnih elektrana u Jugoslaviji do kraja XX veka već je stupio na snagu, a započeta akcija rešavanja problema trajnog odlaganja RAO dogovorom republika prekinuta je i pre raspada SFRJ. Postojala je velika potreba da se aktuelizuje problem izgradnje skladišta za trajno odlaganje u okviru koga bi se našla odgovarajuća rešenja za sve vrste isluženih izvora.

Na Simpozijumu 1995. godine, bilo je reči o progresu u demontaži i skladištenju radioaktivnih gromobrana, nakon donošenja zakonske obaveze na teritoriji SR Jugoslavije. Ponovo je naglašena potreba obrade nekondicioniranog RAO, tečnog i čvrstog, različitih nivoa vezane aktivnosti, kao i potreba da se dovrši izgradnja postrojenja predviđenih za tu namenu. Reaktorski program WIMSD4, primenjen je za proračun parametara kritičnosti odlagališta ozračenog goriva, a rezultati su pokazali da konfiguracija isluženog goriva smeštenog u bazenu za odlaganje goriva Reaktora RA ispunjava zahteve u pogledu sigurnosti na nuklearnu kritičnost.

Kondicioniranje i privremeno stokiranje radijumskih RAO materijala razmatrano je 1999. god, s obzirom da sigurnost ovakvih paketa RAO mora biti obezbeđena u periodu od 40 godina, nakon čega sledi ponovno kondicioniranje izvora. Predložena rešenja obuhvatala su hermetizaciju ²²⁶Ra zatvaranjem izvora u male kontejnere od volframa i pakovanje pet do deset ovakvih kontejnera u hermetički zatvorenu kolonu od nerđajućeg čelika.

2007. god. je predstavljeno i novo uputstvo o sakupljanju, označavanju i čuvanju RAO materijala u Centru NTI, a za evidenciju pojedinačnih paketa sa radioaktivnim otpadom koristi se elektronska baza podataka "*Radioactive Waste Management Registry*" dobijena od IAEA.

Konačno, 2013. god, na Simpozijumu DZZ su predstavljeni novi objekti za skladištenje RAO u Republici Srbiji. U cilju poboljšanja stanja sistema upravljanja radioaktivnim

отпадом, u Vinči su izgrađeni novi objekti za skladištenje čvrstog radioaktivnog otpada, (H3) i za bezbedno skladištenje jakih izvora zračenja (BS). Operator novih objekata za skladištenje je Javno preduzeće „Nuklearni objekti Srbije“, koje je Licencu za probni rad objekata dobilo 2011. god. Nakon probnog rada koji je trajao 20 nedelja i u kome su izvršena sva potrebna ispitivanja infrastrukturnih, sigurnosnih i bezbednosnih sistema, dopunjena dokumentacija i izvršeno dopunsko obučavanje lica koja rade u objektima, dozvola za korišćenje objekata, tj. pun pogon, je dobijena 2012. god. Puštanjem u rad ovih objekata je skladištenje radioaktivnog otpada i izvora zračenja u Republici Srbiji, a ujedno i upravljanje radioaktivnim otpadom u celini, značajno unapređeno i stavljeno na viši sigurnosi i bezbednosni nivo.

8. Umesto zaključka

U proteklih 54 godina, Simozijumi DZZ su bili centralno mesto predavljanja novih dostignuća i razmene iskustava iz oblasti dekontaminacije, karakterizacije, tretmana i odlaganja RAO, remedijacije kontaminiranih terena, dekomisije nuklearnih postrojenja, i donošenja smernica za upravljanje RAO materijalima. Najvažniji problemi, koji su na skupovima kontinuirano isticani, a ostali aktuelni do današnjih dana, odnose se na tretman i kondicioniranje istorijskog tečnog i čvrstog RAO, dekomisiju reaktora RA i trajno odlaganje RAO na teritoriji Republike Srbije.

9. Zahvalnica

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije (Projekat III 43009).

10. Literatura

Kao literatura, korišćeni su zbornici radova I - XXIX Simpozijuma Društva za zaštitu od zračenja, koji su dostupni u elektronskoj formi na web-stranici <http://dzz.org.rs/simpozijumi/arhiva-zbornika/>.

**RADIOACTIVE WASTE AND DECONTAMINATION:
RETROSPECTIVE OF PAPERS PRESENTED ON SYMPOSIUMS
OF THE RADIATION PROTECTION SOCIETY IN THE PERIOD
1963 - 2017**

**Ivana SMIČIKLAS, Mihajlo JOVIĆ,
Marija ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ and Slavko DIMOVIĆ**

*University of Belgrade, Vinča institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia,
ivanat@vin.bg.ac.rs, mjovic@vin.bg.ac.rs, marijasljivic@vin.bg.ac.rs,
sdimovic@vin.bg.ac.rs*

ABSTRACT

As inevitable followers of all forms of production and application of nuclear energy, waste materials are produced which do not have the potential for further use and which activity exceeds the limit values prescribed by the legislation. Accidents in the production and application of nuclear energy, manipulation, and transportation of sources of ionizing radiation, and other emergencies in peace and war, contribute significantly to the generation of radioactive waste as well as to the radiation contamination of material assets and objects, the environment and living beings. On the occasion of the jubilee XXX Symposium of the Society for Radiation Protection of Serbia and Montenegro, through the retrospection of the papers presented at the previous meetings, the current topics have been tracked on the timeline of 54 years, as well as the problems, the methodology of work and significant conclusions derived from scientific research and in practice.