

PRILOG PROCENI IZLOŽENOSTI RADNIKA ZRAČENJU TOKOM DEKOMISIJE REAKTORA RA USLED PRISUSTVA KONTAMINACIJE

Vladan Ljubenov, Rodoljub Simović
Institut za nuklearne nauke Vinča, Centar NTI-150, P.P. 522, 11001 Beograd

Sadržaj – U radu je razmotrena mogućnost uspostavljanja relacije između prisustva površinske kontaminacije na zidovima prostorija reaktora RA u Institutu za nuklearne nauke "Vinča" i izloženosti radnika zračenju tokom obavljanja dekomisionih aktivnosti. Primenom programa RESRAD-BUILD i modela tipičnih za reaktor RA određene su izloženosti zračenju usled prisustva jedinične kontaminacije glavnim očekivanim kontaminantima u funkciji brzine izmene vazduha u prostorijama radom ventilacionog sistema.

1. UVOD

Dokumentovana procena sigurnosti za potrebe dekomisije nuklearnog postrojenja uobičajeno se zahteva od strane regulatornog tela [1,2]. Procena sigurnosti ima za cilj da obezbedi dokumentovanu demonstraciju da predložene dekomisione radnje mogu da budu izvršene na siguran način i u skladu sa regulatornim zahtevima za zaštitu radnika i stanovništva, da obezbedi osnovu za nezavisnu procenu sigurnosti predloženih aktivnosti od strane regulatornog tela i/ili drugih organa nezavisnih od tima za sprovođenje dekomisije, da dokumentuje rezultate procene sigurnosti za potrebe izdavanja formalnih licenci i dozvola od strane regulatornog tela ili drugih ovlašćenih organa i službi za realizaciju projekta ili izvršavanje pojedinih radnji, da omogući sistematsku evaluaciju posledica planiranih operacija i da testira njihovu robusnost tokom normalnih i udesnih scenarija, da podrži razmatranja u okviru izbora optimalne strategije dekomisije i da identifikuje pojedina sigurnosna ograničenja i uslove za dekomisione aktivnosti [3].

Regulatorni zahtevi i kriterijumi koji se primenjuju i u odnosu na koje se određuje prihvatljivost rezultata procene sigurnosti moraju da budu jasno specificirani. Ovi kriterijumi uobičajeno uključuju:

- doze zračenja za radnike
- doze zračenja za stanovništvo
- rizik
- projektantske i inženjerske principe i standarde
- ograničenja u pogledu ispuštanja radioaktivnosti u okolinu
- kriterijume za oslobađanje lokacije od regulatorne kontrole
- ograničenja u pogledu izlaganja hemijskim i drugim neradiološkim hazardima (na lokaciji i van nje)
- kriterijume u vezi industrijske i radne sigurnosti i zdravstvene zaštite

Među ove kriterijume mogu da se uvrste i dodatni poput zahteva za kontinualnim monitoringom i nadzorom ili neka

vremenska ograničenja za izvršavanje pojedinih poslova i operacija.

2. PROCENA IZLOŽENOSTI ZRAČENJU

Za potrebe izrade programa radiološke zaštite tokom dekomisije neophodno je da se proceni inventar radionuklida, a potom da se planiraju aktivnosti dekomisije na način koji obezbeđuje da izlaganja budu u saglasnosti sa ALARA principima.

Ocena količine prisutnih radionuklida i priroda njihovih osnovnih fizičkih i hemijskih osobina predstavljaju najvažnije faktore koji se razmatraju pri donošenju odluke o metodi i granicama dekomisije. Vreme poluraspada radionuklida prisutnih u značajnoj meri uglavnom određuje vremenski interval za koji različite dekomisione aktivnosti treba odložiti.

Pored isluženog nuklearnog goriva koje sadrži glavni deo inventara radionuklida, radioaktivni materijal koji treba ukloniti može se razvrstati u dve kategorije:

- aktiviran građevinski materijal i
- površinska kontaminacija.

Teškovodni istraživački reaktor RA [4-6] u Institutu "Vinča" karakteriše kontaminacija tricijumom čiji ostaci mogu da se nađu u primarnom krugu hladioca i posle njegovog isušivanja, kao i na mestima izlivanja teške vode.

Tabela I. Glavni očekivani kontaminanti na reaktoru RA

Nuklid	Period poluraspada [godine]	Emitovano zračenje	Očekivano prisustvo
^3H	12.33	β -	teška voda, grafit, beton, primarni sistem hlađenja
^{14}C	5730	β -	grafit, beton
^{59}Ni	76000	β -	čelik, beton, grafit, barirani pesak
^{60}Co	5.27	β -, γ	čelik, beton, grafit, primarni sistem hlađenja
^{63}Ni	100.1	β -	čelik, beton, grafit, barirani pesak
^{94}Nb	20300	β -, γ	čelik, grafit, beton, barirani pesak
^{137}Cs	30	β -, γ	teška voda, primarni sistem hlađenja
^{152}Eu	13.5	EC, β -, X, γ	grafit, beton, barirani pesak

Sa stanovišta spoljašnjeg ozračivanja radnika tokom više godina po prestanku rada reaktora najznačajniji je ^{60}Co , koji nastaje kao rezultat aktiviranja čeličnih komponenti. Dok su aluminijumski delovi reaktorskog jezgra slabo aktivirani, čelični delovi, kao zavrtnji, ploče, žice i sajle, mogu biti jako aktivirani i stvaraju polja visokog zračenja. Drugi radionuklidi od značaja su ^{55}Fe i ^{63}Ni , dok se ^3H i ^{14}C mogu naći u grafitu, uglavnom zbog prisustva litijuma i azota kao nečistoća. Na unutrašnjim površinama primarnog kola mogu se naći fisioni produkti ^{137}Cs , ^{152}Eu i ^{154}Eu . Izotopi europijuma i tricijum (iz litijuma) takođe su prisutni kao produkti aktivacije u betonu reaktorskog štita. Lista glavnih kontaminanata na reaktoru RA navedena je u Tabeli I [7].

3. PROCENA IZLAGANJA ZRAČENJU PROGRAMOM RESRAD-BUILD

Prisustvo radioloških hazarda u zgradi reaktora RA biće vrlo detaljno identifikovano realizacijom plana radiološke karakterizacije. Program direktnih merenja, uzorkovanja i laboratorijskih analiza, uz program implementacije računskih metodologija na bazi razvijenih modela rezultovaće inventarom radionuklida, njihovim aktivnostima, količinama radioaktivnog otpada i prostornom raspodelom doze zračenja unutar zgrade. Na taj način direktno će se dobiti neki podaci za procenu sigurnosti boravka i rada ljudi unutar zgrade (npr. spoljašnje ozračivanje).

Drugi neophodni podaci (rizici, unutrašnje ozračivanje) moraju da se odrede posredno na bazi rezultata radiološke karakterizacije kao ulaznih podataka i analize normalnih i udesnih scenarija nekim od raspoloživih sredstava. Jedan referentni alat za tu namenu jeste familija kodova RESRAD razvijena u Argonne National Laboratory (SAD).

Računarski program RESRAD-BUILD [8,9] služi za proračun izloženosti zračenju osoba koje rade ili žive u zgradi kontaminiranoj radioaktivnim materijalom. Transport radioaktivnog materijala iz jedne prostorije u drugu unutar zgrade uzima se u obzir modelom kvaliteta vazduha u zatvorenom prostoru. Ovim modelom razmatra se transport čestica radioaktivne prašine i radonovih potomaka izmenom vazduha, njihovo taloženje i ponovno rasprostiranje (resuspenzija). Radioaktivni materijal iz konstrukcije objekta može biti oslobođen u vazduh zatvorenih prostorija difuzijom, mehaničkim odstranjivanjem ili erozijom pri dekontaminaciji. U jednom postupku proračuna programom se može modelovati zgrada sa tri odeljka, četiri geometrije izvora (tačkasta, linijska, površinska i zapreminska), deset zasebnih položaja izvora i deset položaja prijemnika. Zapreminski izvor može biti sačinjen od najviše pet slojeva različitog materijala, pri čemu je svaki sloj homogen i izotropan. Između svakog para izvora i prijemnika može se definisati zaštitni materijal radi proračuna eksterne gama doze. Korisniku je na raspolaganju osam različitih vrsta materijala za štiti. U programu je zastupljeno sedam načina izlaganja: (1) spoljašnje izlaganje neposredno iz izvora, (2) spoljašnje izlaganje materijalima deponovanim na podu, (3) spoljašnje izlaganje vazduhu, (4) udisanje radioaktivnih čestica iz vazduha, (5) udisanje radonovih potomaka iz aerosola u zatvorenim prostorijama i vodene pare zagađene tricijumom, (6) nehotočno gutanje radioaktivnog materijala neposredno iz izvora, i (7) unošenje materijala deponovanog na površinama prostorija zgrade. Programom se mogu

modelovati različiti scenariji izlaganja. Ovo uključuje kancelarijske službenike, radnike serviserne, dekontaminacione radnike, posetioce, stanovnike, ali i druge scenarije. RESRAD-BUILD omogućava obavljanje determinističkih i probablističkih analiza doze, a rezultati se prikazuju tekstualno i grafički.

RESRAD-BUILD je jedan od programa iz familije RESRAD kodova razvijenih u skorije vreme u Argonu (Argon National Laboratory). Otuda mu je struktura slična RESRAD kodu, osnovnom programu ove familije, šta više, korisniku programa omogućeno je da obrazuje scenarije izlaganja podešavanjem ulaznih parametara programa. U Institutu "Vinča" raspoloživa je verzija programa 3.22 sa bibliotekom podataka od 67 osnovnih radionuklida koji imaju period poluraspada od šest meseci naviše i 53 pridružena radionuklida sa periodom poluraspada kraćim od šest meseci.

Kontaminacija neke osobe koja radi ili boravi u zgradi zagađenoj radioaktivnim materijalom može nastupiti (1) sa površina poda, zidova i plafona, (2) iz samog građevinskog materijala i komponenti, kao što su pregradni zidovi, betonske ploče, čelični konstruktivni elementi, metalne cevi, ili sajle, i (3) iz vazdušnih filtera izmenjivača vazduha ili filtera drenaze, u kojima se kontaminant akumulirao. Program dopušta modelovanje zgrade sačinjene najviše do tri odeljka, ali jedan odeljak može biti sastavljen od više soba na istom spratu sa slobodnom izmenom vazduha među njima. U proračunu spoljašnjeg izlaganja, korisnik programa ima mogućnost da definiše vrstu zaštitnog materijala zidova, podova i plafona, kao i njegovu gustinu i debljinu. Pri proračunu unutrašnjeg izlaganja, udisanjem i unošenjem, doze se računaju na osnovu modela kvaliteta vazduha koji uključuje razmenu vazduha između soba i sa spoljašnjom sredinom. Programom se može odrediti potencijalno izlaganje neke osobe i izvan kontaminirane zgrade pretpostavljajući da je okolina objekta jedan prostrani odeljak pridružen zgradi.

Za lociranje radioaktivnih izvora i prijemnika u objektu, koristi se Dekartov koordinatni sistem sa koordinatnim početkom i pravcima osa slobodno izabranim. Pored slobodnog izbora položaja izvora i prijemnika korisnik ima mogućnost da definiše vreme koje svaki prijemnik provede u odeljku, te se na ovaj način doza zračenja može računati za različite vrste objekata: stambene, administrativne, ili industrijske.

Ulazni model prikazuje objekat kontaminiran radioaktivnim materijalom na jednom ili više mesta čiji su položaji jasno definisani. Takvih izvora može biti do deset u svakoj upotrebi programa. Na osnovu izbora korisnika programa ovim izvorima se pripisuje najsirodniji prostorni oblik: zapreminski, površinski, linijski ili tačkasti. Svaki izvor se karakteriše sledećim setom podataka: oblikom, odeljkom u kome se nalazi, koordinatama svoga centra, brojem različitih radionuklida i njihovom početnom koncentracijom. U zavisnosti od vrste izvora zadaju se još dva geometrijska podatka: površina ili dužina izvora i usmerenost izvora. Za zapreminske i površinske izvore, pod površinom se podrazumeva ona veličina slobodne površine izvora koja je okrenuta prema vazduhu, i pretpostavlja se da je kružnog oblika. Smer izvora odgovara vektoru upravnom na ovu površinu i smatra se da koincidira jednoj od koordinatnih osa. Za linijske izvore, pod dužinom se

podrazumeva dužina segmenta linije koja formira izvor, a pravac je određen pravcem same linije koja mora odgovarati jednoj od koordinatnih osa. Za tačkasti izvor, ovi geometrijski podaci se ne zadaju.

Mehaničkim uklanjanjem ili erozijom materijala izvora, ukoliko je njegova površina izložena vazduhu, nastaje prenos dela njegove mase neposredno u vazдушnu sredinu zatvorenog prostora, što dovodi do dalje kontaminacije iz vazduha. Usled izmene vazduha između odeljaka zgrade, ove čestice se transportuju u prostore ostalih odeljaka.

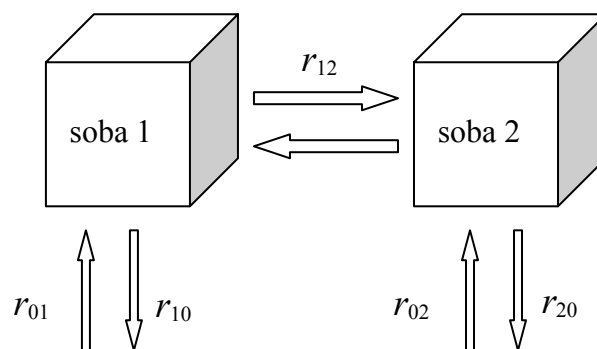
U RESRAD-BUILD modelu pod prijemnikom se podrazumeva službenik, stanar, industrijski radnik, serviser, posetilac zgrade, ili ma koja druga osoba koja boravi neko vreme u kontaminiranoj zgradi. Program je projektovan da omogućuje različite scenarije izlaganja lica koji mogu nastupiti u vezi sa prirodom posla ovih osoba. Za određivanje eksternog izlaganja potrebno je definisati tačan položaj prijemnika. Položaj prijemnika odgovara središtu receptora. Na primer, ako osoba stoji na zagađenom podu, položaj prijemnika je jedan metar iznad poda. Za druge puteve ozračivanja jedino je važno znati sobu u kojoj je prijemnik smešten pošto model kvaliteta vazduha podrazumeva da je vazduh homogeno izmešan u svakom odeljku. Da bi se izračunale eksterne doze potrebno je definisati zaštitne materijale, njihove gustine i debljine, povezano sa pozicijom prijemnika. Orjentacija receptora prema izvoru ima takođe uticaja na eksternu dozu. U mnogim okolnostima prijemnik se kreće u odnosu na izvor, te se tada koristi faktor konverzije eksterne doze za rotacionu orjentaciju prijemnika.

U programu se definiše do deset tačaka prijema. Vremenska frakcija mora biti pripisana svakoj receptorskoj tački. Ukupna vremenska frakcija može prevazići jedinicu, čime se omogućava da se jednom upotrebom programa odrede ukupna kolektivna doza za radnike kao i ukupna individualna doza.

4. MODEL I REZULTATI

Analiziran je kompleks od dve susedne prostorije razdvojene betonskim zidom debljine 0.3 m, dimenzija tipičnih za tehnološke prostorije reaktora RA (površina osnove 20 m³ i visina 4.3 m), između kojih postoji razmena vazduha putem ventilacije. Zidovi protorija su od betona. Pretpostavljeno je prisustvo površinske kontaminacije aktivnosti 100 Bq/cm² na kružnoj površini veličine 4 m² na jednom od zidova prostorije broj 1. Određene su godišnje izloženosti dva receptora smeštena na sredinama prostorija 1 i 2, ukoliko oni tokom 365 dana u godini u prostoriji provode 25% vremena. Za sve parametre čije vrednosti nisu dobro poznate u modelima su korišćene default vrednosti programa RESRAD-BUILD (brzina depozicije i resuspenzije čestica, uklonivi deo kontaminacije, frakcija koja se raspršuje u vazduhu, zapremina udahnutog vazduha u jedinici vremena i ostalo).

Ventilacioni sistem obezbeđuje razmenu vazduha iz svake prostorije sa okolinom, kao i između samih prostorija. Model razmene vazduha prikazan je na slici 1, a vrednosti parametara modela u Tabeli II.



Slika 1. Model razmene vazduha između prostorija i sa okolinom

Nulti režim ventilacije pretpostavlja odsustvo izmene vazduha između prostorija i sa okolinom. Režimi 1 do 4 i 5 do 8 progresivno povećavaju brzinu razmene vazduha, pri čemu je razmena vazduha svake prostorije sa okolinom oko četiri puta intenzivnija od interne razmene između prostorija. U režimima 1 do 4 pretpostavlja se jednosmeran tok vazduha iz kontaminirane prostorije 1 ka prostoriji 2, dok režimi 5 do 8 modeluju dvosmeran tok vazduha. Pritom važe relacije:

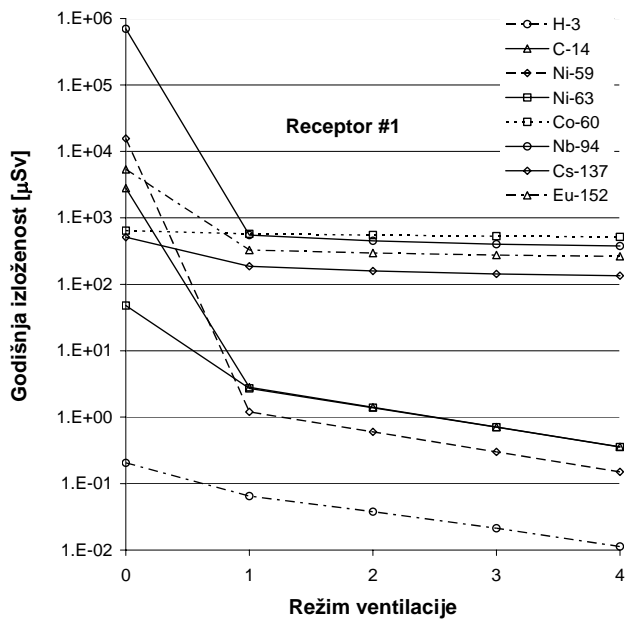
$$\begin{aligned} r_{01} + r_{21} &= r_{10} + r_{12} \\ r_{02} + r_{12} &= r_{20} + r_{21} \end{aligned} \quad (1)$$

Tabela II. Režimi ventilacije korišćeni u modelima

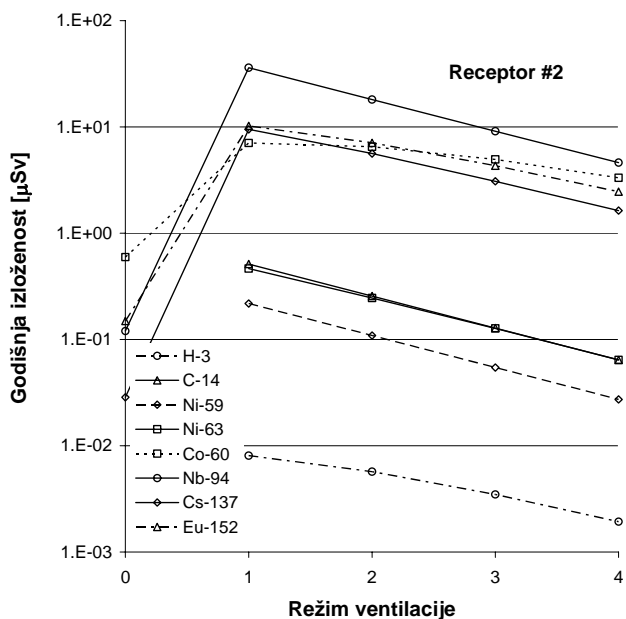
Režim	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Parametar	Brzina izmene vazduha [m ³ /h]								
r_{10}	0	4.5	9	18	36	4.5	9	18	36
r_{01}	0	5.5	11	22	44	4.5	9	18	36
r_{12}	0	1	2	4	8	1	2	4	8
r_{21}	0	0	0	0	0	1	2	4	8
r_{20}	0	5.5	11	22	44	4.5	9	18	36
r_{02}	0	4.5	9	18	36	4.5	9	18	36

Na slikama 1 i 2 prikazane su ukupne godišnje izloženosti radnika zračenju usled boravka i rada u kontaminiranoj prostoriji i u susednoj prostoriji sa kojom postoji razmena vazduha. Čisti beta emiteri ³H, ¹⁴C, ⁵⁹Ni i ⁶³Ni u uslovima odsustva ventilacije ne daju doprinos izloženosti receptora u prostoriji broj 2. Njihov doprinos se pojavljuje u uslovima razmene vazduha između susednih prostorija. Intenzivnija izmena vazduha sa okolinom smanjuje koncentracije kontaminanata u vazduhu i mogućnost inhalacije u obe prostorije.

Za usvojeni model u kome je interna razmena vazduha na nivou 25% od razmene sa okolinom, ne postoje značajne razlike u rezultatima za model jednosmernog toka vazduha iz prostorije 1 u prostoriju 2 ($r_{21} = 0$) i za model ujednačenog dvosmernog toka vazduha ($r_{12} = r_{21}$). Zbog toga rezultati za režime ventilacije 5 do 8 nisu grafički predstavljani.



Slika 1. Zavisnost izloženosti zračenju receptora #1 od režima ventilacije



Slika 2. Zavisnost izloženosti zračenju receptora #2 od režima ventilacije

5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana mogućnost korišćenja programa RESRAD-BUILD za potrebe procene izloženosti zračenju osoblja usled boravka i rada u kontaminiranim prostorijama tokom dekomisije reaktora RA. Analiziran je uticaj glavnih kontaminanata prisutnih na reaktoru RA u zavisnosti od uspostavljenog režima ventilacije. Rezultati pokazuju neophodnost intenzivne ventilacije kontaminirane prostorije sa razmenom vazduha sa okolinom uz filtriranje i sprečavanje

razmene vazduha sa okolnim prostorijama korišćenjem privremenih zastora i tendi.

ZAHVALNICA

Rad prikazuje rezultate dobijene za potrebe realizacije projekta "Dekomisija istraživačkog reaktora RA u Institutu Vinča" u okviru Programa VIND, finansiranog od strane Ministarstva nauke i zaštite životne sredine Republike Srbije i Međunarodne agencije za atomsku energiju.

REFERENCE

- [1] *Decommissioning of Nuclear Power Plants and Research Reactors*, IAEA Safety Standard Series, Safety Guide No. WS-G-2.1, IAEA, Vienna, Austria (1999)
- [2] *Organization and Management for Decommissioning of Large Nuclear Facilities*, IAEA Technical Report Series, No. 399, IAEA, Vienna, Austria (2000)
- [3] *Safety Assessment Methodologies for Decommissioning of Nuclear Facilities*, (in preparation, revised draft from the Technical Meeting in IAEA, November 1-5, 2004), IAEA Safety Report Series (December 15, 2004)
- [4] *Final Project Documentation of the RA Reactor*, The RA internal documentation, IBK, Vinča (1960) (in Russian)
- [5] "Heavy Water Research Reactor RA," in *Directory of Nuclear Reactors*, Vol. V, pp.217-222, IAEA, Vienna, Austria, 1964
- [6] O. Šotić et al., *Final Safety Analysis Report of the Nuclear Reactor RA*, Vol. 1-17, (in Serbian), Institute of Nuclear Sciences "Boris Kidrič", Vinča (November 1986)
- [7] M. Milošević, V. Ljubenov, "Plan radiološke karakterizacije za potrebe dekomisije istraživačkog reaktora RA u Institutu za nuklearne nauke Vinča", Vinča-NTI-118, Vinča (2003)
- [8] RESRAD-BUILD for Windows, version 3.22, Argonne National Laboratory, Environmental Assessment Division
- [9] Probabilistic Modules for the RESRAD and RESRAD-BUILD Computer Codes, User Guide, NUREG/CR-6692, ANL/EAD/TM-91, Argonne NL (2000)

Abstract – In this paper a possibility to establish the relationship between the presence of the surface contamination in the RA reactor rooms and the worker exposure during the decommissioning activities is discussed. RESRAD-BUILD code and the models typical for the RA reactor has been used to determine annual doses from the supposed activities of the main expected RA reactor contaminants. Different room air exchange rates have been modelled and analysed.

AN EVALUATION OF THE WORKER EXPOSURE DURING THE RA REACTOR DECOMMISSIONING DUE TO PRESENCE OF CONTAMINATION

Vladan Ljubenov, Rodoljub Simović