

D-306

PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
INSTITUT ZA FIZIKU

DIPLOMSKI RAD

ISPITIVANJE KONCENTRACIJE RADONA  
U STAMBENIM PROSTORIJAMA

Branković Dragana

Novi Sad, 1994.

*Zahvaljujem se članovima laboratorije za nuklearnu fiziku, Instituta za fiziku u Novom Sadu: dr. Ištvanu Bikitu, dr. Jaroslavu Slivki, dr. Miroslavu Veskoviću i dr. Ljiljani Čonkić na pomoći koju su mi pružili u toku izrade ovog diplomskog rada*

## SADRŽAJ

1. Uvod . . . . .	1
TEORIJSKI DEO	
2. Prirodni radionuklidi . . . . .	2
3. Ozračenje stanovništva i primljene doze . . . . .	4
3.1. Negativne posledice uticaja radona na čovečiji organizam . . . . .	5
4. Poreklo radona u stambenim prostorijama . . . . .	6
4.1. Ekshalacija radona iz građevinskih konstrukcija . . . . .	6
4.1.1. Režim ventilacije prostorija . . . . .	13
4.2. Prodor radona iz zemljišta . . . . .	14
4.3. Vertikalana distribucija radona . . . . .	16
4.4. Snižavanje koncentracije radona u prostoriji . . . . .	17
4.5. Procena brzine doze gama zračenja u prostoriji . . . . .	18
EKSPERIMENTALNI DEO	
5. Određivanje koncentracije radona u prostorijama gama-spektroskopijskom metodom . . . . .	20
5.1. Izbor spektralnih linija . . . . .	20
5.2. Odbroj pod vrhom totalne apsorpcije . . . . .	22
6. Metod ugljenih kanistara . . . . .	24
6.1. Kanistar aktivnog uglja . . . . .	24
6.2. Kalibracija kanistara . . . . .	25
6.2.1. Izračunavanje kalibracionog faktora . . . . .	25
6.3. Izračunavanje koncentracije radona iz izlaganja kanistra . . . . .	30
7. Merni instrumenti . . . . .	31
8. Eksperimentalni rezultati . . . . .	32
8.1. Merenje fona . . . . .	32
8.2. Određivanje efikasnosti Ge(Li) detektora . . . . .	33
8.3. Određivanje koncentracije radona u stanu na višem spratu . . . . .	34
8.4. Merenje koncentracije radona u prizemnom stanu . . . . .	35
8.5. Određivanje minimalno merljive zapreminske aktivnosti za Ge(Li) detektor . . . . .	37
9. Zaključak . . . . .	39
Literatura . . . . .	40

## 1. UVOD

Stalno prisustvo prirodne radijacije daje negativne efekte po zdravlje stanovništva. Rezultati mnogih istraživanja pokazuju da doze ozračenja primljenog jonizujućeg zračenja nisu zanemarljive. Izvore ovog zračenja predstavljaju prirodni radionuklidi koji su prisutni u atmosferskom vazduhu, u zemljištu, kao i u građevinskom materijalu.

Pošto čovek provodi dve trećine vremena unutar stambenih i radnih prostorija, posebna pažnja je usmerena na ispitivanje sadržaja prirodnih radionuklida u zemljištu na kojem se podiže zgrada, kao i njihovog sadržaja u korištenom građevinskom materijalu. Danas je u građevinarstvu prisutan velik broj raznovrsnog građevinskog materijala sa različitim vrednostima efektivne specifične aktivnosti radionuklida u njima. Nivo efektivne specifične aktivnosti prirodnih radionuklida u građevinskom materijalu ograničen je zakonskim normativima.

Od svih prisutnih radionuklida, najveći doprinos u dozi ozračenja stanovništva u prostorijama daje radon i produkti njegovog raspada. Negativne posledice radijacije, koja prati raspad radona i njegovih potomaka, moguće je sagledati tek pošto se odrede mehanizmi njegovog nagomilavanja kao i vrednosti njegove koncentracije u prostoriji.

Osnovni cilj ovog rada je određivanje koncentracije radona u stambenim prostorijama. Takođe je izvršena provera postojanja vertikalne distribucije radona između prostorije u prizemlju i prostorije na višem spratu.

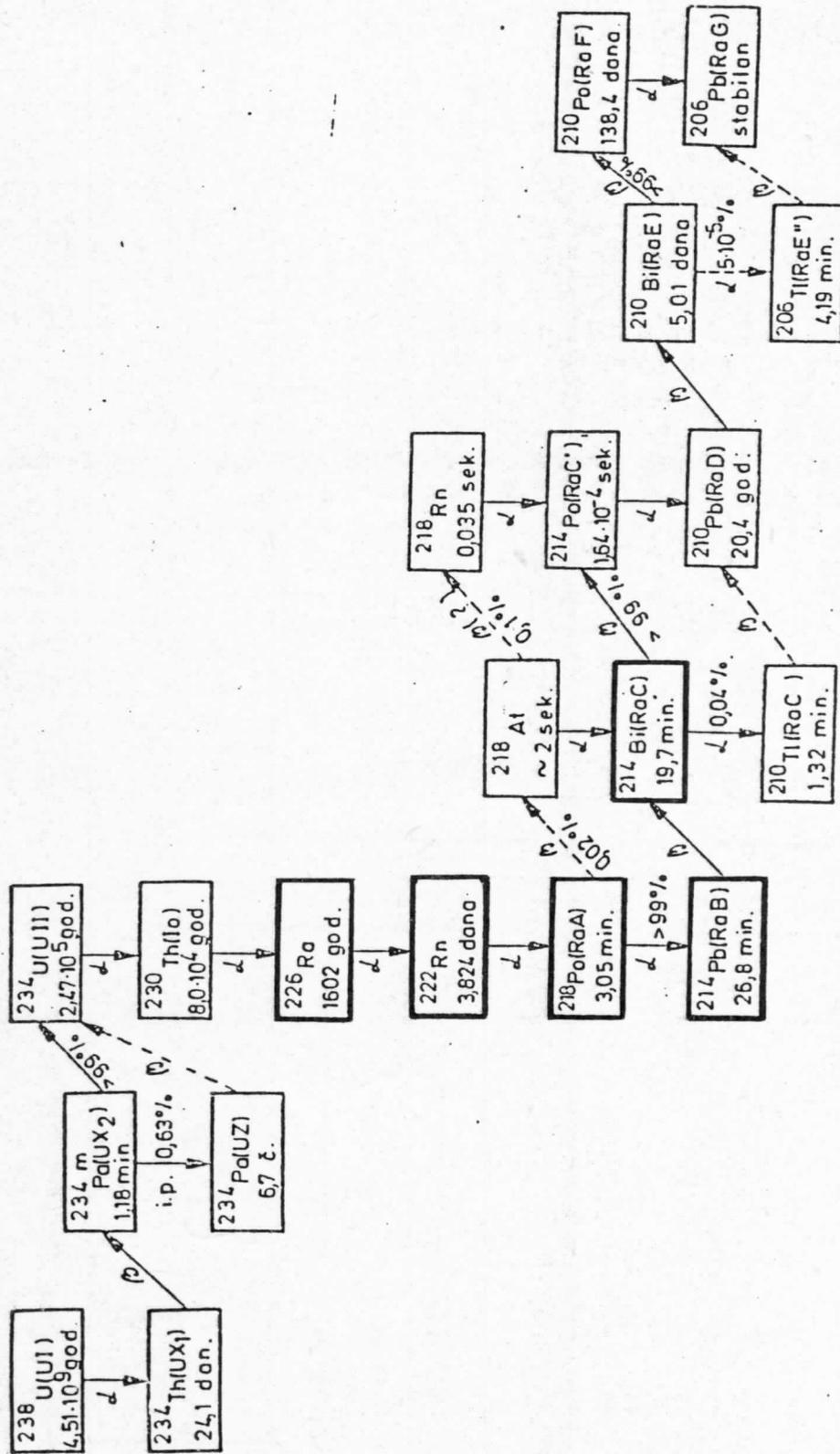


## 2. PRIRODNI RADIONUKLIDI

Prirodni radionuklidi nastali su procesom nukleosinteze koja se odigrala pre nekoliko milijardi godina. Od svih tako nastalih radionuklida na Zemlji preživeli su samo oni sa velikim periodom poluraspada, većim od nekoliko stotina miliona godina ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ). Ovi dugoživi radioizotopi su začetnici tri prirodna radioaktivna niza: uran-aktinijumskog, uran-radijumskog (sl. 1) i torijumskog niza. Jedini prirodni radionuklid koji ne pripada ni jednom od navedenih nizova, a spada u grupu dugoživi radionuklida, je  $^{40}\text{K}$  ( $T_{1/2} = 1.25 \times 10^9$  god.) koji je dosta zastupljen u zemljinoj kori.

Radioaktivni nizovi međusobno imaju dosta sličnih karakteristika. U početku niza, dok je maseni broj izotopa dosta velik, isti se raspadaju najviše preko  $\alpha$ -raspada. Za drugi deo niza karakterističan je  $\beta$ -raspad. Radioaktivni raspad u nizu završava se dobijanjem stabilnog izotopa, stabilnog nuklida olova. Sredinu ovog niza obeležava radioizotop inertnog gasa radona ( $^{222}\text{Rn}$ -radon,  $^{220}\text{Rn}$ -toron,  $^{219}\text{Rn}$ -aktion). U prirodi je najzastupljeniji radon  $^{222}\text{Rn}$  sa prirodnim periodom poluraspada  $T_{1/2} = 3.82$  dana, zatim sledi toron ( $T_{1/2} = 55$  s), pa vrlo malo zastupljeni aktion ( $T_{1/2} = 3.92$  s). Radon, emitujući  $\alpha$ -čestice, raspada se na svoje produkte tj. na grupu kratkoživi elemenata. Nastali radioaktivni produkti raspadaju se zatim dalje preko  $\alpha$  i  $\beta$ -raspada.

U radioaktivnom nizu prisutna je i  $\gamma$ -aktivnost kao prateća komponenta  $\alpha$  i  $\beta$  raspada. Za svaki niz karakteristični su glavni  $\gamma$ -emiteri. U uran-radijumskom nizu glavni doprinos  $\gamma$ -emisiji daju potomci radona (91.5-96.8%) [6], olovo  $^{214}\text{Pb}$  i bizmut  $^{214}\text{Bi}$ , čija će se  $\gamma$ -emisija razmatrati u ovom radu.



Slika 1. URAN-RADIJUMSKI NIZ

### 3. OZRAČENJE STANOVNIŠTVA I PRIMLJENE DOZE

Emitovane  $\alpha$  i  $\beta$ -čestice i  $\gamma$ -fotoni, nastali pri radioaktivnom raspadu, prolazeći kroz neku sredinu vrše jonizaciju iste, odnosno ozračena sredina menja se u fizičkom, hemijskom i biološkom (za živu materiju) smislu. Dejstvo zračenja na čovekovo telo svodi se na oštećenje tkiva. Stepenn oštećenja zavisi od količine energije koja se deponovala u tkivu. Energija od jednog džula apsorbovana u masi od jednog kilograma tkiva, naziva se apsorbovana doza. Jedinica za apsorbovanu dozu je grej [Gy]. Ista doza koja potiče od različite vrste zračenja izaziva različita oštećenja. Poznato je da određena doza  $\alpha$ -zračenja nanosi veća oštećenja nego ista doza koja potiče od  $\beta$  ili  $\gamma$ -zračenja. Zbog toga se uvodi i ekvivalentna doza, doza koja vodi računa o vrsti i energiji zračenja. Vrednost ekvivalentne doze dobija se množenjem apsorbovane doze sa relativnom biološkom efikasnošću, koja za elektrone, pozitrone i  $\gamma$ -fotone ima vrednost 1, dok za protone,  $\alpha$ -čestice i brze neutrone iznosi 10. Jedinica za ekvivalentnu dozu je sivert [Sv].

Doza koja predstavlja ekvivalentnu dozu merenu osetljivošću različitih tkiva na radijaciju naziva se efektivna ekvivalentna doza. Prosečne vrednosti efektivne ekvivalentne doze koje potiču od prirodnog ozračenja date su u tabeli 1. [3].

Tabela 1. Efektivne ekvivalentne doze prirodnog zračenja

Izvor zračenja	Spoljašnje zračenje	Unutrašnje zračenje	Ukupno [ $\mu$ Sv/god]
Kosmičko zračenje	260	15	275
$^{40}\text{K}$	120	180	300
Lanac raspada $^{238}\text{U}$ $^{238}\text{U}$ , $^{234}\text{U}$ $^{230}\text{Th}$ $^{226}\text{Ra}$ $^{222}\text{Rn}$ $^{210}\text{Pb}$	90	10 7 7 850 130	1094
Lanac raspada $^{232}\text{Th}$ $^{232}\text{Th}$ $^{228}\text{Ra}$ $^{220}\text{Rn}$	140	3 13 170	326
Ukupno [ $\mu$ Sv/god]	610	1385	1995

### 3.1. Negativne posledice uticaja radona na čovečiji organizam

Čovek je izložen stalnom negativnom dejstvu prirodne radijacije. Kao posledica ovog stalno prisutnog ozračenja, javljaju se oštećenja pojedinih tkiva, a samim tim dolazi do narušavanja njihovog normalnog funkcionisanja. Biološki efekti koje izaziva radijacija mogu se svrstati na somatske i genetske. Telesna oštećenja nastaju pri umerenim i visokim vrednostima primljene doze (dozama od 4-6 Gy) [9]. Međutim, genetske promene mogu nastati i pri vrlo malim vrednostima primljenih doza tj. i male doze mogu izvršiti genetsku mutaciju.

Podaci navedeni u tabeli 1 pokazuju da najveći doprinos ozračenju stanovništva daje radon. Radon je radiobiološki gas koji udišemo zajedno sa vazduhom. Kratko živeći produkti radona:  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  i  $^{214}\text{Po}$  su hemijski aktivni elementi. Oni se vezuju za čestice prašine, aerosole i vodene kapi u vazduhu, tako da pri udisanju dospevaju u pluća. Energija koja se oslobodi pri njihovom raspadu, najviše preko  $\alpha$ -raspada, daje sloju bronhijalnog epitela radijacionu dozu, za koju se misli da prouzrokuje značajan broj kancera pluća. Pri koncentraciji radona u prostoriji od  $150 \text{ Bq/m}^3$ , rizik od kancera pluća kreće se od 1-3%, a za dodatnu koncentraciju od  $50 \text{ Bq/m}^3$ , dodatni rizik je reda 0.5% [2]. Tako na primer, ozračenje radonom od  $37 \text{ Bq/m}^3\text{s}$  daje ćeliji bronhijalnog epitela dozu od  $0.45 \mu\text{Gy}$ , a srednja kancerogena doza iznosi  $0.08 \mu\text{Gy}$  [4]. Ako se posmatra cela populacija faktor rizika od radona se kreće od 0.5-1%, što je reda veličine koji ima faktor rizika od pušenja (4%).

#### 4. POREKLO RADONA U STAMBENIM PROSTORIJAMA

Radon, kao najvažniji izvor prirodne radijacije ima i najveći doprinos u ukupnoj dozi ozračenja stanovništva. Sama ova činjenica iziskuje potrebu za otkrivanjem izvora radona u stambenim i radnim prostorijama. Mnogobrojna istraživanja pokazuju da su najvažniji izvori radona u prostorijama: prodor atmosferskog vazduha koji u sebi sadrži radon, proces ekshalacije radona iz građevinskih konstrukcija i prodor radona iz zemljišta. Relativni doprinosi koncentracije radona navedenih procesa su 13, 17 i 70% respektivno.

##### 4.1. Ekshalacija radona iz građevinskih konstrukcija

Građevinski materijal proizvodi se od materijala iz zemljine kore. Veliki broj prirodnih minerala (granit, plovućac, mermer, krečnjak) sadrže dugoživuće prirodne radionuklide ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ). U zavisnosti od količine i vrste mineralnih komponenti koje ulaze u sastav građevinskog materijala, zavisi i njihova specifična aktivnost.

Relativno niske vrednosti specifične aktivnosti radionuklida uočene su kod peska i šljunka,  $A_{s, \text{eff}} = 59 \text{ Bq/kg}$  [15], i ova vrednost bliska je srednjoj vrednosti za zemljište i zemljinu koru. Specifična aktivnost prirodnih radionuklida cigle (crvene,  $A_{s, \text{eff}} = 257 \text{ Bq/kg}$  [16], a posebno silikatne,  $A_{s, \text{eff}} = 48 \text{ Bq/kg}$  [15]) je manja od specifične aktivnosti karakteristične za beton. Beton karakteriše širok interval vrednosti specifične aktivnosti, uslovljene pre svega specifičnom aktivnošću njegovih punilaca.

Sve veći porast industrijskog otpada daje mogućnost njegovog korištenja za proizvodnju građevinskog materijala. Međutim, rezultati mnogih istraživanja pokazuju da je specifična aktivnost radionuklida u tim materijalima (šljaka, pepeo, fosfogips i otpad uranske industrije) velika, i da nije povoljno koristiti iste za proizvodnju građevinskog materijala.

Zračenje koje prati raspad prisutnih radionuklida u građevinskom materijalu biva skoro u potpunosti apsorbovano u samom materijalu. Međutim, jedan od produkata raspada, gasoviti radon, sakuplja se u sisteme pora unutar poroznog građevinskog materijala. Ovako "zarobljeni" radon oslobađa se iz materijala procesom difuzije. Transport radona razmatra se kroz dva procesa: difuzija uslovljena razlikom koncentracije radona u sistemu pora i difuzija usled pritisaka koja vlada između vazduha u porama i spoljašnjeg vazduha.

Jednačina difuzije radona u poroznoj sredini ima oblik:

$$\frac{\partial A_0}{\partial t} = \lambda_0 A_{\text{max}} - \lambda_0 A_0 + \frac{b}{p} \frac{\partial^2 A_0}{\partial x^2} \quad (1)$$

gde je:

$A_{\text{max}} = A_s(\text{Ra})\eta\rho/p$  - maksimalno moguća zapreminska aktivnost u vazduhu koji se nalazi u porama materijala,  $[\text{Bq/m}^3]$

$A_s(\text{Ra})$  - specifična aktivnost radijuma u materijalu, [Bq/kg]

$\rho$  - gustina materijala, [kg/m<sup>3</sup>]

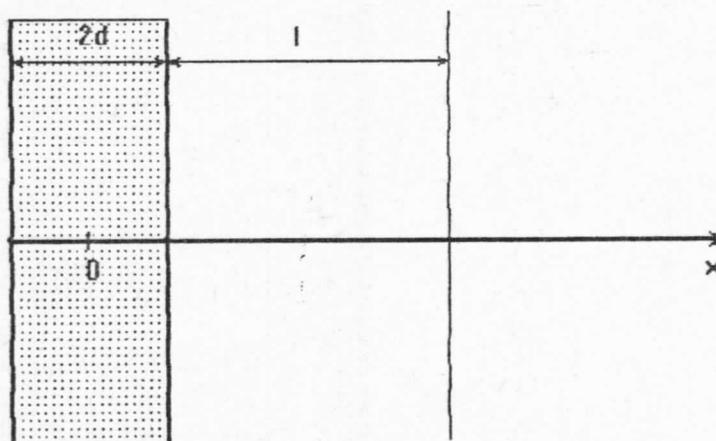
$\eta$  - koeficijent emanacije, [%]

$\lambda_0$  - konstanta raspada radona, [s<sup>-1</sup>]

$p$  - poroznost materijala

$b$  - koeficijent difuzije, [m<sup>2</sup>/s].

Pravac difuzije radona iz zidova prostorije je normalan na površinu zida (u pravcu x-ose), (sl.2)



Slika 2.

Koordinatni početak postavljen je na sredini zida, pa zbog simetrije zadatka protok radona u koordinatnom početku je nula tj.

$$b \frac{\partial A_0}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \quad (2)$$

Drugi granični uslov proizilazi iz ravnoteže radona u vazduhu koji se nalazi u zidu. Pri tome se smatra, da se difuzija radona iz zidova debljine  $2d$  dešava na ograničenom delu spoljne sredine (dubine  $l$ ). Osim toga u spoljašnjem vazduhu dešava se trenutno mešanje radona, pa je u tom slučaju drugi granični uslov oblika:

$$-b \frac{\partial A_0}{\partial x} \Big|_{x=d} - l \lambda_0 A_0 \Big|_{x=d} = l \frac{\partial A_0}{\partial t} \Big|_{x=d} \quad (3)$$

Ako je difuzija počela dovoljno davno, problem se posmatra kao stacionaran proces. Imajući ovo u vidu kao i granične uslove (2) i (3), rešenje stacionarne difuzione jednačine ima oblik:

$$A_0(x) = A_{\max} \left[ 1 - \frac{\operatorname{ch}(x/l_0)}{\frac{\operatorname{sh}(d/l_0)}{\alpha\beta + \operatorname{ch}(d/l_0)}} \right] \quad (4)$$

Zapreminska aktivnost radona u spoljašnjem vazduhu je data izrazom:

$$A_0(x)|_{x=d} = A_0 = A_{\max} \left[ \frac{1}{1 + \alpha\beta/\operatorname{th}\beta} \right] \quad (5)$$

a brzina ekshalacije radona:

$$-b \frac{\partial A_0(x)}{\partial x} \Big|_{x=d} = q = q_{\max} \alpha \left[ \frac{1}{1 + \alpha\beta/\operatorname{th}\beta} \right] \quad (6)$$

gde je:

$q_{\max} = A_s(Ra)\eta\rho\lambda_0 d$  - maksimalno moguća brzina ekshalacije

$\alpha = l/dp$  - odnos razmene spoljne sredine u kojoj se nalazi vazduh i onih na polovini debljine zida

$\beta = d/l_0$  - odnos polovine debljine zida i dužine difuzije radona

$l_0 = \sqrt{b/\rho\lambda_0}$  - dužina difuzije radona u poroznom materijalu.

Analizirajući dobijene izraze (5) i (6), može se uočiti da ako dužina difuzije radona kroz spoljnu sredinu (1) znatno premašuje ukupnu debljinu materijala  $2d$ , onda  $\alpha \rightarrow \infty$  tj.:

$$q|_{\alpha \rightarrow \infty} \rightarrow q|_{\max} \frac{\operatorname{th}\beta}{\beta}; \quad A_0|_{\alpha \rightarrow \infty} \rightarrow 0 \quad (7)$$

a to je slučaj koji odgovara jako ventiliranoj prostoriji. Suprotno od toga, kada  $\alpha \rightarrow 0$  dobija se:

$$q|_{\alpha \rightarrow 0} \rightarrow 0 \quad ; \quad A_0|_{\alpha \rightarrow 0} \rightarrow A_{\max} \quad (8)$$

U fizičkom smislu to znači da zapreminska aktivnost radona u spoljnoj sredini dostiže vrednost zapreminske aktivnosti radona u porama građevinskog materijala, pa nagomilavanje radona u prostoriji prestaje.

Ako radon difunduje u prostorijsku zapreminu  $V$ , čija je ukupna površina poda, tavanice i zidova  $S$ , i ako su isti načinjeni od istog materijala debljine  $2d$ , sledi:

$$\alpha = \frac{V}{Sdp} \quad (9)$$

A ako je prisutna ventilacija prostorije, biće:

$$\alpha = \frac{V}{Sdp} \frac{\lambda_0 + \lambda_v}{\lambda_0} \quad (10)$$

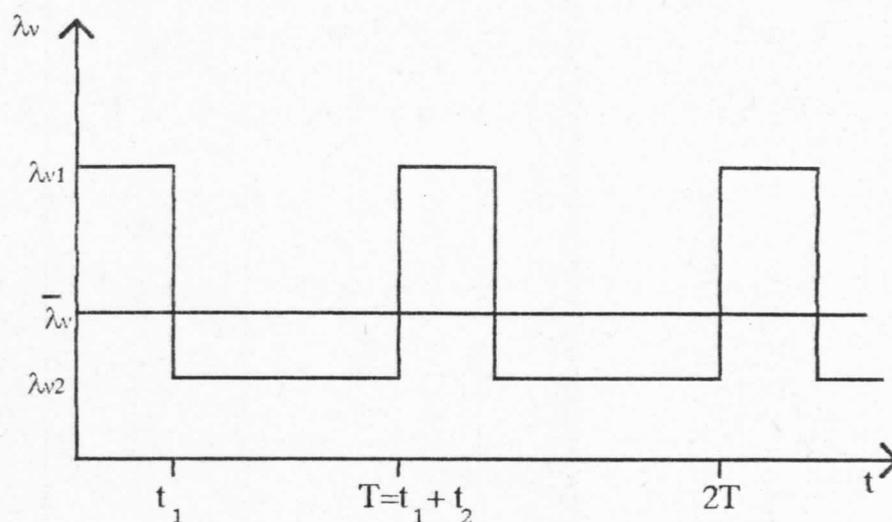
Kad se dobijeni izraz za  $\alpha$  (10) zameni u relacije (5) i (6), i ako se zna da je vrednost  $(\text{th}\beta/\beta)$  za bilo koje  $\beta$  manja od jedinice, dobijaju se modifikovane formule za zapreminsku aktivnost  $^{222}\text{Rn}$  i brzinu ekshalacije:

$$A_0 = A_s(Ra)\eta\rho d \frac{S}{V} \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \lambda_v} \frac{\text{th}\beta}{\beta} + \frac{\lambda_v}{\lambda_0 + \lambda_v} A_0^a \quad (11)$$

$$q = A_s(Ra)\eta\rho d \lambda_0 \frac{\text{th}\beta}{\beta} \quad (12)$$

Dobijena formula za zapreminsku aktivnost radona (11) u vazduhu prostorije je relevantna za slučaj konstantne frekvencije promene vazduha. Međutim režim ventilacije ne mora biti konstantan. Tada se govori o nekoj srednjoj frekvenciji promene vazduha ( $\bar{\lambda}_v$ ). U toku vremena  $t_1$  u prostorijski se održava konstantna promena vazduha frekvencije  $\lambda_{v1}$ . Ona se zatim menja do vrednosti  $\lambda_{v2}$ , koja se održava u toku vremena  $t_2$  (sl.3). Ako se uzme da je  $\bar{\lambda}_v = 1 \text{ h}^{-1}$  za period  $T = t_1 + t_2$ , sledi da je:

$$t_1 = \frac{1 - \lambda_{v2}}{\lambda_{v1} - \lambda_{v2}} T ; \quad t_2 = \frac{\lambda_{v1} - 1}{\lambda_{v1} - \lambda_{v2}} T \quad (13)$$



Slika 3.

U slučaju nestacionarnosti, rešenje diferencijalne jednačine (1) koja opisuje procese stupanja radona u vazduh prostorije usled njegove ekshalacije iz zidova i podova, radioaktivnog raspada i njegovog prodiranja u prostoriju zajedno sa atmosferskim vazduhom, ima oblik:

$$A_0(t) = \left[ \frac{\sum_i q_i S_i}{V(\lambda_0 + \lambda_v)} + \frac{A_0^* \lambda_v}{\lambda_0 + \lambda_v} \right] (1 - e^{-(\lambda_0 + \lambda_v)t}) + A_0(0) e^{-(\lambda_0 + \lambda_v)t} \quad (14)$$

gde je:

- $A_0^*$  - zapreminska aktivnost radona u atmosferskom vazduhu, [Bq/m<sup>3</sup>]
- $A_0(0)$  - zapreminska aktivnost radona u prostoriji u početnom trenutku ( $t=0$ ).

Srednju vrednost zapreminske aktivnosti radona ( $\bar{A}_0$ ) pri predhodno navedenom režimu ventilacije, određuje se integracijom jednačine (14). Formula (11) za određivanje zapreminske aktivnosti radona koriguje se odnosom zapreminske aktivnosti radona pri nepostojanoj ( $\bar{A}_0$ ) i postojanoj ( $A_{01}$ ) promeni vazduha. Pogledati tabelu 2.

Tabela 2. Koeficijent popravke  $\bar{A}/A_{01}$ , koji uračunava nepostojanost ventilacije pri određivanju srednje zapreminske aktivnosti radona u prostoriji.

$\lambda_{v2} [h^{-1}]$	$\lambda_{v1} = 3h^{-1}$		$\lambda_{v1} = 2h^{-1}$	
	T=12h	T=24h	T=12h	T=24h
0.7	1.18	1.23	1.14	1.18
0.6	1.29	1.36	1.22	1.27
0.5	1.43	1.54	1.31	1.40
0.4	1.61	1.79	1.43	1.57
0.3	1.84	2.16	1.57	1.82

Izraz za zapreminsku aktivnost radona (11) može se predstaviti i u obliku:

$$A_0 = \frac{qS}{V(\lambda_0 + \lambda_v)} + \frac{\lambda_v}{\lambda_0 + \lambda_v} A_0^a \quad (15)$$

gde je:

$$q = A_s(Ra)\eta\rho d\lambda_0 \frac{th\beta}{\beta}$$

Zapreminska aktivnost radona u prostoriji i brzina njegove ekshalacije može se odrediti iz navedenih formula, ako su poznate karakteristike građevinskog materijala, prostorije i frekvencija promene vazduha.

Brzina ekshalacije radona zavisi od dužine difuzije radona ( $l_0$ ) u građevinskom materijalu preko parametra ( $th\beta/\beta$ ). Za  $^{222}\text{Rn}$  dužina difuzije iznosi oko 20 cm. Uobičajene vrednosti za debljinu zidova kreću se od 10-50 cm. Pored ovih parametara građevinskih konstrukcija, za  $q$ , pa stoga i za  $A_0$ , najznačajniji parametar je proizvod specifične aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  i koeficijenta emanacije tj.  $A_s(Ra)\eta$ . Tipične vrednosti za brzinu ekshalacije kreću se u intervalu od  $2.1 \times 10^{-4}$  do  $5.25 \times 10^{-2}$  Bq/m<sup>2</sup>s [8]. Kada se za  $q$  uzmu vrednosti iz ovog intervala, pa ako je prisutna i ventilacija prostorije sa frekvencijom promene vazduha  $\lambda_v$ , za zapreminsku aktivnost radona u prostoriji dobijaju se vrednosti predstavljene u tabeli 3.

Tabela 3. Zapreminska aktivnost  $^{222}\text{Rn}$  u vazduhu prostorije [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ] pri različitim vrednostima frekvencije promene vazduha ( $\lambda_v$ ) i brzine ekshalacije radona ( $q$ )

$S/V=1.57$	$q, 10^{-2} [\text{Bq}/\text{m}^2 \text{ s}]$		
	5.25	1.57	0.17
$\lambda_v [\text{h}^{-1}]$			
0.1	2760	829	91
1	298	92	13
10	33	16	4.66

gde je:  $A_0^a = 3.7 \text{ Bq}/\text{m}^3$

$\lambda_0 = 2.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

Iz priložene tabele vidi se, da se vrednost zapreminske aktivnosti radona smanjuje ako se brzina ekshalacije radona iz građevinskog materijala smanjuje, a frekvencija promene vazduha u prostoriji poveća. Tako u jako ventiliranoj prostoriji ( $\lambda_v = 10 \text{ h}^{-1}$ ), zapreminska aktivnost radona skoro ima istu vrednost kao i zapreminska aktivnost atmosferskog vazduha ( $A_0 = 4.66 \text{ Bq}/\text{m}^3$ ).

#### 4.1.1. Režim ventilacije prostorije

Koncentracija radona u prostoriji u mnogome zavisi od načina ventilacije. Da bi orijentaciono odredili optimalnu ventilaciju za prostoriju izgrađenu od uobičajenog građevinskog materijala, posmatrajmo referentnu prostoriju sa sledećim karakteristikama: standardna dimenzija prostorije (površina poda  $(5 \times 4) \text{ m}^2$  i visina  $h=3\text{m}$ , tj. odnos  $S/V=1.57\text{m}^{-1}$ ) i debljina zida je 20 cm (tada je  $th\beta/\beta=0.76$ ). Za datu prostoriju brzina ekshalacije radona određuje se prema relaciji (12) i za neke građevinske materijale njene vrednosti date su u tabeli 4.

Iz relacije za zapreminsku aktivnost radona (15) izrazimo frekvenciju promene vazduha uvodeći razliku zapreminske aktivnosti radona u prostoriji i zapreminske aktivnosti radona u atmosferskom vazduhu, pri čemu se dobija izraz:

$$\lambda_v = \frac{qS/V - A_0\lambda_0}{A_0 - A_0^a} \quad (16)$$

Dobijeni izraz je interesantan jer pruža mogućnost da sami unapred zahtevamo određenu vrednost za  $A_0$  i da tu vrednost dobijemo uz određenu ventilaciju. U tabeli 4. vrednost  $A_0$  predstavlja umnožak zapreminske aktivnosti radona u atmosferskom vazduhu ( $A_0^a = 6\text{Bq/m}^3$ ). Brzina ekshalacije se u ovom slučaju posmatra kao parametar, koji se određuje iz načina izloženog u prethodnom paragrafu.

U realnosti tipične vrednosti za brzinu ventilacije kreću se u intervalu od  $0.1 - 3 \text{ h}^{-1}$ . Da bi prostorija bila optimalna za boravak, brzina ventilacije ne bi trebala da ima veće vrednosti od  $3 \text{ h}^{-1}$ . Sam proces ventilacije može se izvesti prirodnim protokom vazduha, ili prinudnim putem (erkondišnom). Standardni erkondišni izmeni u toku jednog sata  $89\text{m}^3$  vazduha, što znači da bi za reprezentativnu prostoriju zapremine  $60\text{m}^3$  brzina ventilacije iznosila  $1.5 \text{ h}^{-1}$ .

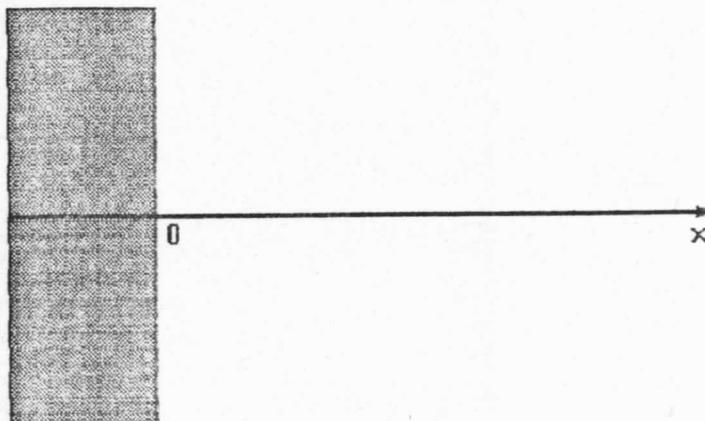
Na osnovu dobijenih rezultata, iz tabele se može zaključiti da prostorija izgrađena od bilo kog priloženog materijala zadovoljava uslov optimalnosti ventilacije, tj. i za male vrednosti  $A_0$  ( $A_0=1.5 A_0^a$ ) brzina ventilacije ne prelazi naznačeni interval. Kao najpogodniji građevinski materijal pokazao se građevinski gips, zatim cementni malter. Međutim za gradnju stambene prostorije najbolje je koristiti crvenu ciglu, a najnepovoljnije beton.

Građevinski materijal	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	As (Ra) [Bq/kg]	$\eta$ [%]	As(Ra) $\eta$ [Bq/kg]	$q$ 10 <sup>-4</sup> [Bq/m <sup>2</sup> s]	$\lambda_v$ [h <sup>-1</sup> ]							
						$A_0/A_0^a$	1.5	2	2.5	3	3.5	4	5
Teški beton	2500	27	11	3.1	24.74		4.64	2.33	1.54	1.15	0.92	0.77	0.57
Laki beton	1700	23	9.5	1.5	8.14		1.51	0.75	0.50	0.37	0.30	0.25	0.18
Silikatna cigla	1800	14	10	1.3	7.47		1.38	0.69	0.46	0.34	0.27	0.22	0.17
Šljaka	1750	104	0.9	0.92	5.14		0.95	0.47	0.31	0.23	0.18	0.15	0.11
Crvena cigla	1840	36	1.5	0.55	3.23		0.59	0.30	0.19	0.14	0.11	0.09	0.07
Cement	2100	41	1.3	0.48	3.22		0.58	0.29	0.19	0.14	0.11	0.09	0.07
Grad. gips	2400	8.9	4.4	0.37	2.83		0.51	0.25	0.16	0.12	0.10	0.08	0.06

Tabela 4. Režim ventilacije referentne prostorije

#### 4.2. Prodor radona iz zemljišta

Ekshalacija radona iz zemljišta opisuje se rešenjem jednačine (1) za slučaj beskonačnog poluprostora (sl.4)



Slika 4.

Za ovaj slučaj ekshalacije radona granični uslovi su:

$$A_0|_{x=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial A_0}{\partial x} \right|_{x \rightarrow \infty} = 0 \quad (17)$$

i u skladu sa njma rešenje jednačine ima oblik:

$$A_0(x) = A_{\max} [1 - e^{(-x/l_0)}] ; \quad q = A_0(Ra)\eta\rho l_0\lambda_0 \quad (18)$$

Ovo je primer ekshalacije radona u spoljnu sredinu (dužina difuzije  $l$  je velika) sa brzinom ekshalacije koja dostiže maksimum za karakteristično zemljište. Iako je ekshalacija intenzivna, zapreminska aktivnost u spoljnoj sredini nikada ne dostiže vrednost zapreminske aktivnosti radona u vazduhu koji se nalazi u porama zemljišta.

Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ), predstavlja i za kućni i za spoljni vazduh, radionuklid sa najvažnijim udelom. Radon ima za pretka  $^{226}\text{Ra}$ , koji se nalazi u malim količinama u celoj zemljinoj kori. Kao hemijski inertan gas radon se može premeštati kroz tlo ili strukture materijala i dospevati do atmosfere. Njegova tipična koncentracija u spoljašnjem vazduhu je od 5-10 Bq/m<sup>3</sup>.

Međutim nas mnogo više interesuje vrednost koncentracije radona u unutrašnjosti kuće. Ta koncentracija široko varira od kuće do kuće, pokazujući veliku korelaciju sa brzinom ventilacije. Brzina ulaska radona po jedinici zapremine računa se po formuli:

$$Q/V = C\lambda_v \quad (19)$$

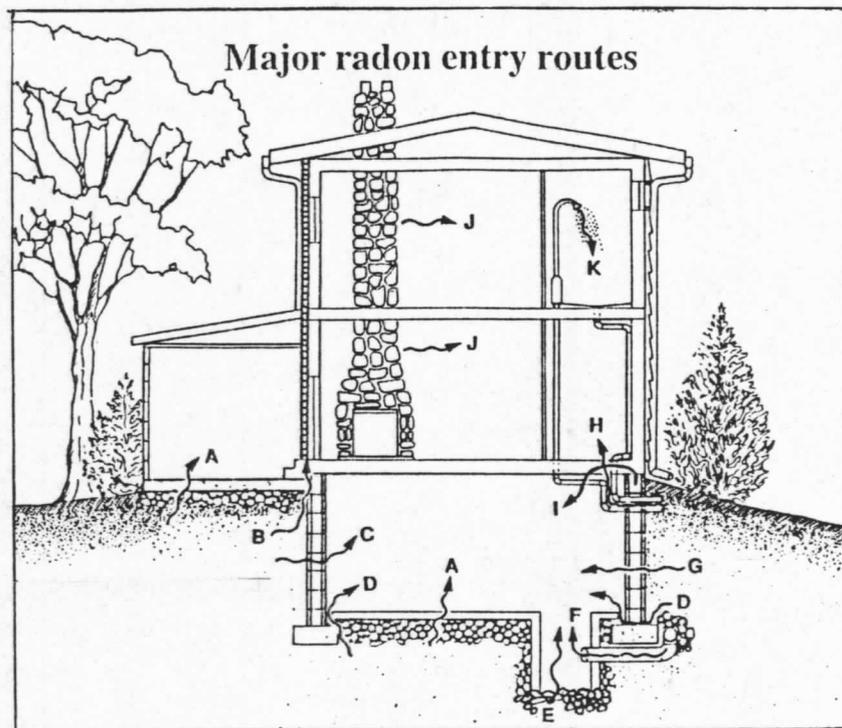
Vršeći set merenja parametara: koncentracije i brzine ventilacije, dobija se široka raznovrsnost brzine ulaska. Varijabilnost brzine ulaska atmosferskog vazduha je jedna od dominantnih odrednica da li će unutrašnja koncentracija biti visoka ili niska. Međutim, ako se u datoj kući smanji brzina ventilacije, koncentracija radona još uvek ima tendenciju da poraste. Iako i građevinski materijal doprinosi povećanju koncentracije radona u kući, ni ovaj izvor ne može opravdati prosečnu vrednost zapreminske aktivnosti od  $50 \text{ Bq/m}^3$ . Jedini izvor koji održava taj nivo je Zemlja. Koncentracija radona u vazduhu koji se nalazi unutar zemljine strukture tipično je oko  $10000 \text{ Bq/m}^3$  [2], tako da bi se dostigla unutrašnja koncentracija od  $50 \text{ Bq/m}^3$ , samo oko 0.1% vazduha koji ulazi u kuću treba da dolazi iz tla.

U početku izučavanja ovog problema smatralo se da su za redukciju difuzionog fluksa radona iz tla odgovorne samo donje strukture zgrade. Međutim, eksperimentalnim istraživanjima je utvrđeno da to nije u potpunosti tačno. Redukcija fluksa prvenstveno zavisi od permeabilnosti tla, kao i od razlike pritisaka i temperature u tlu blizu zgrade. U zavisnosti od vrste zemljišta prisutan je značajan raspon permeabilnosti. Razlika permeabilnosti za glinu i pesak je za faktor milion [2]. Permeabilno zemljište dozvoljava veoma visoke brzine izlaska (emisije) gasa iz zemljišta. U zgradama koje su napravljene na takvom zemljištu, javlja se visoka koncentracija radona u unutrašnjosti čak i ako je količina radona u tom zemljištu mala.

Sav taj eksperimentalni rad podržao je hipotezu da je koncentracija radona unutra visoka zato što zgrada "usisava" radon iz zemlje. Balans između brzine prodiranja radona iz zemljišta, brzine njegovog stvaranja i brzine ventilacije prostorije, određuje koncentraciju radona u unutrašnjosti. Kako rezultati mnogih istraživanja ukazuju da brzina ventilacije nije dominantni činilac koji određuje koncentraciju radona u unutrašnjosti, iz toga sledi, da su koncentracija radona u zemljištu i permeabilnost zemljišta glavni uzročnici povećane koncentracije radona u prostorijama.

Pri samoj izgradnji zgrade ostaje dovoljno pukotina i otvora da vazduh iz zemljišta može relativno lako da prodre u unutrašnjost zgrade (sl. 5).





Slika 5. Glavni pravci ulaska radona

- A. Pukotine u betonskoj ploči
- B. Uzani prostor između cigle i spoljnog sloja zida
- C. Pore i pukotine u betonskim blokovima
- D. Spoj temelj-zid
- E. Izloženost tlu, kao na primer prokop za odvođenje vode
- F. Curenje kroz oštećenu odvodnu cev
- G. Malter spojevi
- H. Prodiranje kroz slobodan kraj cevovoda
- I. Otvori gornjih blokova zida
- J. Građevinski materijal sličan steni
- K. Voda (puštena iz tuša)

#### 4.3 Vertikalna distribucija radona

Prethodno izneseni podaci ukazuju da koncentracija radona u prostoriji zavisi kako od vrste zemljišta na kojem je zgrada izgrađena, tako i od visinske udaljenosti stana od površine tla. Merenjem koncentracije radona u prizemlju može se očekivati da dobijene vrednosti budu veće od izmerenih vrednosti u stanovima na višim spratovima, zbog smanjenja uticaja ekshalacije radona iz zemljišta. Međutim, u nekim situacijama to nije slučaj. Efekat dimnjaka, koji je najintenzivniji zimi, uzrokuje da je koncentracija radona na višim spratovima veća nego u podrumu ili prizemlju. Ovaj efekat uvek je prisutan kada postoji razlika pritiska i temperatura između podruma i stanova na višim spratovima zgrada.

Međunarodna komisija za radiološku zaštitu je za procenu efektivnih ekvivalentnih doza uslovljenih potomcima izotopa  $^{222}\text{Rn}$  i  $^{220}\text{Rn}$  koristila tri situacije (tabela 5).

Tabela 5. Efektivna ekvivalentna doza koja potiče od potomaka izotopa radona pri različitim uslovima

Broj situacija	Zapreminska aktivnost potomaka radona $A_0 [\text{Bq}/\text{m}^3]$				Efektivna ekvivalentna doza $[\mu\text{Sv}/\text{god}]$		
	$^{222}\text{Rn}$		$^{220}\text{Rn}$		$^{222}\text{Rn}$	$^{220}\text{Rn}$	Ukupno
	prost.	atmo	prost.	atmo			
1.	2.7	4.2	0.0	0.2	267	8	275
2.	6.0	4.2	0.8	0.2	521	239	760
3.	20.2	4.2	0.8	0.2	1614	239	1853

U prvoj situaciji  $^{222}\text{Rn}$  i  $^{220}\text{Rn}$  ne ulaze u vazduhu prostorije iz građevinskih konstrukcija i zemljišta; druga- podrazumeva da izotopi radona ulaze u vazduh prostorije samo ekshalacijom iz građevinskih konstrukcija (gornji spratovi zgrade); treća- izotopi radona ekshaliraju kako iz građevinskih konstrukcija, tako i iz zemljišta (prizemlje zgrade).

Iz tabele 5. se uočava da doza koja se dobija iz građevinskih konstrukcija iznosi  $485 \mu\text{Sv}/\text{god}$ , dok doza dobijena ekshalacijom radona iz zemljišta ima vrednost  $1093 \mu\text{Sv}/\text{god}$ , što čini 59% od ukupno primljene doze.

#### 4.4 Snižavanje koncentracije radona u prostoriji

Za snižavanje koncentracije radona primenjuju se sledeći opšti postupci:

1. Uklanjanje izvora radona
2. Skretanje toka radona pre nego što dođe do građevinske konstrukcije
3. Postavljanje prepreke između izvora i životnog prostora
4. Instaliranje opreme za prečišćavanje vazduha
5. Intenziviranje ventilacije prostorije

Pomenuti postupci sastoje se u sledećem:

1. Uklanjanje materijala koji sadrži visoke koncentracije radijuma
2. Tok radona se može skrenuti postavljanjem sistema perforiranih cevi ispod podne ploče. Sakupljeni radon se iz cevi putem sistema ventilacije izbacuje u atmosferski vazduh
3. Postavljanje barijere između izvora radona i životnog prostora sastoji se pre svega od zatvaranja pukotina u podu i zidovima

- podruma, kao i zatvaranja pukotina oko svih prodora instalacija i šupljina u blokovima zidova.
4. Kao najbolji pročišćavači pokazali su se elektrostatički i elektronski pročišćivači vazduha.
  5. Ventilacija prostorija može se izvršiti pasivnim i aktivnim sistemima.

Najbolji rezultati snižavanja koncentracije radona dobijaju se kombinacijom svih navedenih metoda.

#### 4.5. Procena brzine doze $\gamma$ -zračenja u prostoriji

Prirodni radionuklidi sadržani u građevinskom materijalu stvaraju pozadinsko  $\gamma$ -zračenje u prostoriji. Veza između brzine doze u prostoriji i specifične aktivnosti radionuklida u građevinskom materijalu zavisi od spektra  $\gamma$ -zračenja tih radionuklida, dimenzije i forme prostorije.

Brzina doze  $\gamma$ -zračenja [nGy/h] u vazduhu od beskonačne ravni po kojoj su raspoređeni radionuklidi sa datom specifičnom aktivnošću, može se predstaviti formulom:

$$\dot{D}_{\max} = 1.04 A_{s \text{ eff}} \quad (20)$$

gde je  $A_{s \text{ eff}}$  efektivna specifična aktivnost [Bq/kg] prirodnih radionuklida sa ravni data izrazom:

$$A_{s \text{ eff}} = A_s(\text{Ra}) + 1.31A_s(\text{Th}) + 0.085A_s(\text{K}) \quad (21)$$

Specifična aktivnost pojedinih izotopa određuje se iz formule:

$$A_s = 1.323 \times 10^7 \frac{R}{M T_{1/2}} \quad (22)$$

gde je:

R- zastupljenost radionuklida u prirodnoj smeši izotopa, [%]

$T_{1/2}$  -period poluraspada, [god]

M- atomska masa izotopa, [a.j.m.]

Formule (20) i (21) su primenljive tek posle nastupanja radioaktivne ravnoteže u uranovom i torijumovom nizu. Osnovni doprinos u brzini doze u uranovom nizu pripada radijumu ( $^{226}\text{Ra}$ ).

Za savremeni tip zgrade, teorijska istraživanja [10] brzine doze  $\gamma$ -zračenja daju srednje vrednosti za prostorije izgrađene od cigala:

$\dot{D}_p = 0.62 \dot{D}_{\max}$ ; dok za betonske prostorije:  $\dot{D}_p = 0.68 \dot{D}_{\max}$ . Ako se zna da je brzina doze sa ravni u slobodnom prostoru data izrazom:  $\dot{D}_s = 0.5 \dot{D}_{\max}$  ( $2\pi$ -geometrije), može se napraviti odnos brzine doze karakteristične prostorije

( $\dot{D}_p$ ) i vrednosti spoljne brzine doze ( $\dot{D}_s$ ). Vrednosti ovog odnosa dobijenih iz istraživanja, predstavljeni su u tabeli 6.

Tabela 6. Odnos brzine doze  $\gamma$ -zračenja u zgradi i u slobodnom prostoru

$$\dot{D}_p / \dot{D}_s.$$

Građevinski materijal	$\dot{D}_p / \dot{D}_s$
Šljaka	1.47
Cigla i kamen	1.35
Glina	1.35
Kreč	1.24
Beton	1.24
Drvo	0.95

Najniža količina doze opaža se kod drvenih i montažnih kuća a najviša kod zidanih (od cigle i betona). Srednja vrednost brzine doze u većini država je oko 70 nGy/h (tj. efektivna ekvivalentna doza  $\gamma$ -zračenja iznosi 613  $\mu$  Sv/god).

## EKSPERIMENTALNI DEO

### 5. ODREĐIVANJE KONCENTRACIJE RADONA U PROSTORIJAMA GAMA-SPEKTROMETRIJSKOM METODOM

Diskretni spektar gama emisije, koji prati  $\alpha$  i  $\beta$  raspad, može se iskoristiti za identifikaciju radionuklida od kojeg potiče. Emitovani  $\gamma$ -fotoni prolazeći kroz detektabilnu sredinu, sa njom interaguju preko tri efekta: fotoefekta, Komptonovog efekta i efekta stvaranja para. Broj slobodnih elektrona nastao pri ovim efektima određuje visinu izlaznog signala dobijenog sa detektorskog sistema, a isti je srazmeran energiji  $\gamma$ -kvanta. Za identifikaciju emitera u snimljenom spektru najvažniji je foto vrh ili pik totalne apsorpcije (VTA). Njegov energetski položaj u spektru upravo određuje energiju  $\gamma$ -zračenja radionuklida.

Da bi se ostvarila kvalitetna gama-spektroskopija, detektor koji se koristi treba da ima veliku efikasnost i dobru energetsku rezoluciju pošto gama kvant karakteriše visoka energija i relativno mala jonizaciona sposobnost. Kao najpogodniji detektori u gama spektroskopiji pokazali su se scintilacioni NaJ(Tl) i poluprovodnički Ge(Li) i HPGe detektori. Scintilacione detektore karakteriše visoka efikasnost usled dobre apsorpcije gama zračenja, dok poluprovodnički detektori imaju visoku rezoluciju usled male energije, koja je potrebna za stvaranje para elektron-šupljina. Međutim, da bi se izbegli efekti termalne jonizacije i redriftovanja primese, poluprovodničke detektore treba stalno držati na niskoj temperaturi, tj. na temperaturi tečnog azota,  $T=77K$ .

#### 5.1. Izbor spektralnih linija

Koncentracija radona u prostoriji određuje se identifikacijom gama zračenja njegovih produkata. Glavni gama emiteri u uran-radijumskom nizu su upravo produkti radona: olovo ( $^{214}\text{Pb}$ ) i bizmut ( $^{214}\text{Bi}$ ). Ovi produkti raspadaju se  $\beta$ -raspadom. Šeme raspada  $^{214}\text{Bi}$  i  $^{214}\text{Pb}$  date su na slikama 5a. i 5b. Posle raspada pobuđena jezgra prelaze na energetski niža stanja ili osnovno stanje, što je praćeno  $\gamma$ -emisijom. U svom  $\gamma$ -spektru oba produkta imaju mnoštvo linija, ali u  $\gamma$ -spektrometrijskoj analizi koriste se one najintenzivnije.

Posmatrajući šemu raspada  $^{214}\text{Bi}$ , prelaz pobuđenog jezgra bizmuta u osnovno stanje najverovatnije se vrši preko nivoa od 609 keV ( $p_\gamma = 46.1\%$ ). Za ovo jezgro karakteristični su i kaskadni prelazi koji daju suming efekat. Najintenzivnija linija nastala pri ovom efektu je linija od 1764 keV:

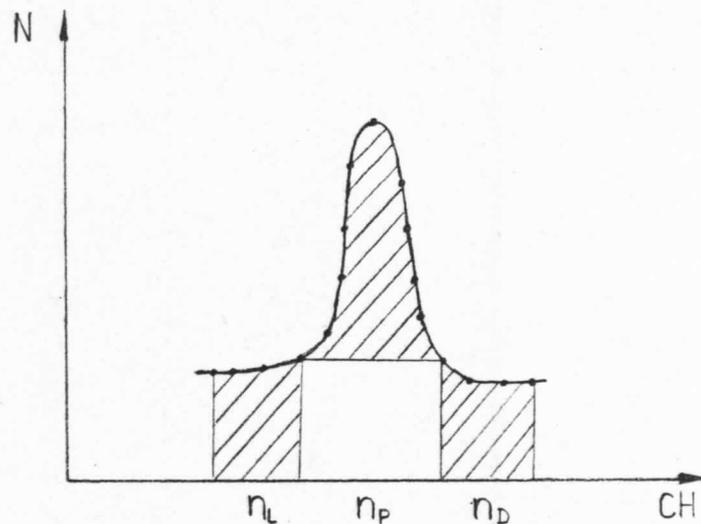
$$609 \text{ keV } (p_\gamma=46.1\%) + 1155 \text{ keV } (p_\gamma=1.7\%) = 1764 \text{ keV } (p_\gamma=15\%).$$

Najintenzivnija linija u  $\gamma$ -spektru radioizotopa  $^{214}\text{Pb}$  je od 352 keV ( $p_\gamma=37.1\%$ ) i nastaje pri direktnom prelazu. Linija nastala kao posledica suming efekta je sa energijom od 295 keV:



## 5.2. Odbroj pod vrhom totalne apsorpcije

Određivanje odbroja pod vrhom totalne apsorpcije, svodi se prvo na određivanje u kom kanalu se nalazi centroida posmatrane linije. Iz prethodno izvedene energetske kalibracije, koja podrazumeva snimanje spektra standardnih izvora sa tačno poznatim energijama, očitava se na osnovu rednog broja kanala energija foto vrha. Vrh totalne apsorpcije je superponiran na kontinuumu koji potiče od Komptonovog rasejanja, te da bi se odredio čist odbroj pod VTA, potrebno je od ukupnog odbroja pod VTA oduzeti odbroj kontinuumu za isti broj kanala. Odbroj kontinuumu pod VTA se približno izračunava nalaženjem srednje vrednosti fona nad  $n_L$  kanala levo i  $n_D$  kanala desno od VTA (sl.6).



Slika 6.

Odbroj pod vrhom totalne apsorpcije (čist odbroj) se računa po formuli:

$$N = P - \left( \frac{L+D}{n_L+n_D} \right) n_P \quad (23)$$

gde je:

P- ukupan odbroj pod VTA

L- odbroj nad  $n_L$  kanala levo od VTA

D- odbroj nad  $n_D$  kanala desno od VTA

$\left( \frac{L+D}{n_L+n_D} \right)$  - srednja vrednost fona po jednom kanalu

$n_P$  - broj kanala nad kojima se nalazi VTA

Kada se izraz (23) podeli sa vremenom merenja spektra ( $t$ ), dobija se formula za izračunavanje spektralnog intenziteta, koja ima oblik:

$$I = \frac{1}{t} \left[ P - \left( \frac{L+D}{n_L + n_D} \right) n_F \right] \quad (24)$$

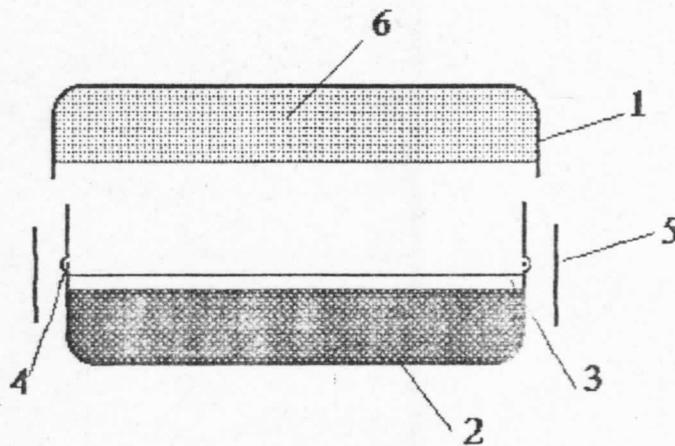
Greška spektralnog intenziteta izračunava se po formuli:

$$\Delta I = \frac{1}{t} \sqrt{P + (L+D) \left( \frac{n_F}{n_L + n_D} \right)} \quad (25)$$

## 6. METOD UGLJENIH KANISTARA

### 6.1. Kanistar aktivnog uglja

Aktivni drveni ugalj ima veliki afinitet prema nekolicini gasova i para, uključujući i gasoviti radon ( $^{222}\text{Rn}$ ). Radon apsorbovan u zrnima aktivnog uglja, raspada se na produkte: radijum A ( $^{218}\text{Po}$ ), radijum B ( $^{214}\text{Pb}$ ), radijum C ( $^{214}\text{Bi}$ ), radijum C' ( $^{214}\text{Po}$ ) i radijum D ( $^{210}\text{Pb}$ ). Za određivanje koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  važni su njegovi potomci  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$  tj. njihovo karakteristično  $\gamma$ -zračenje.



Slika 7. Kanistar aktivnog uglja

1. metalna kutija s poklopcem
2. zrna aktivnog uglja
3. metalna rešetka
4. unutrašnji šireći prsten
5. vinil traka
6. mekani umetak pričvršćen za unutrašnju površinu poklopca

Prirodni radioaktivni sadržaj u aktivnom uglju kanistra mora biti mali i za  $^{40}\text{K}$  on je manji od 0.0037 Bq.

Međutim kod standardnog kanistra ta radioaktivnost je mnogo veća. Za radioizotop  $^{226}\text{Ra}$  ona iznosi oko 758.5 Bq. Poznavanje vrednosti aktivnosti standardnog kanistra važno je radi određivanja efikasnosti detektora koji se koristi u eksperimentu. Naime, efikasnost detektora (E) predstavlja odnos između razlike odbroja standardnog i fonskog kanistra u vremenu i poznate aktivnosti standardnog kanistra tj.:

$$E = \frac{I_s - I_f}{A} \quad (26)$$

## 6.2. Kalibracija kanistara

Kalibracija se vrši na grupi kanistara koji se u komori podvrgavaju kalibracijskim operacijama. Odziv ugljenih kanistara zavisi od dužine vremena izlaganja u komori, kao i od porasta količine vode za vreme izlaganja.

Ugljeni kanistri kalibrišu se za tri stepena vlažnosti: nizak, srednji i visok, odnosno 20, 50 i 80% respektivno. U toku sve tri serije koncentracija radona u komori mora se održavati konstantnom. Kanistri se u grupi od pet izlažu u vremenu od 1, 2, 3, 4, 5 i 6 dana. Na kraju perioda od jednog dana, grupa kanistara odnosi se na merenje odbroja i na vaganje.

### 6.2.1. Izračunavanje kalibracionog faktora

Kalibracioni faktor izračunava se za svaki kanistar sledećom jednačinom:

$$CF = \frac{I - I_F}{T_s E RN DF} \quad (27)$$

gde je:

CF- kalibracioni faktor, brzina adsorpcije radona, [ m<sup>3</sup>/ks];

I- ukupan spektralni intenzitet, [1/ks];

I<sub>F</sub>- spektralni intenzitet fona, [1/ks];

T<sub>s</sub>- vreme izlaganja kanistra, [ ks];

E- efikasnost detektora, [1/ks Bq];

RN- koncentracija radona u komori za period izlaganja, [ Bq/m<sup>3</sup>];

DF-faktor raspada u vremenu (t) od sredine vremena izlaganja do starta brojanja, koji se izračunava po formuli:

$$DF = e^{-\frac{0.693t}{T_{1/2}(Rn)}} \quad (28)$$

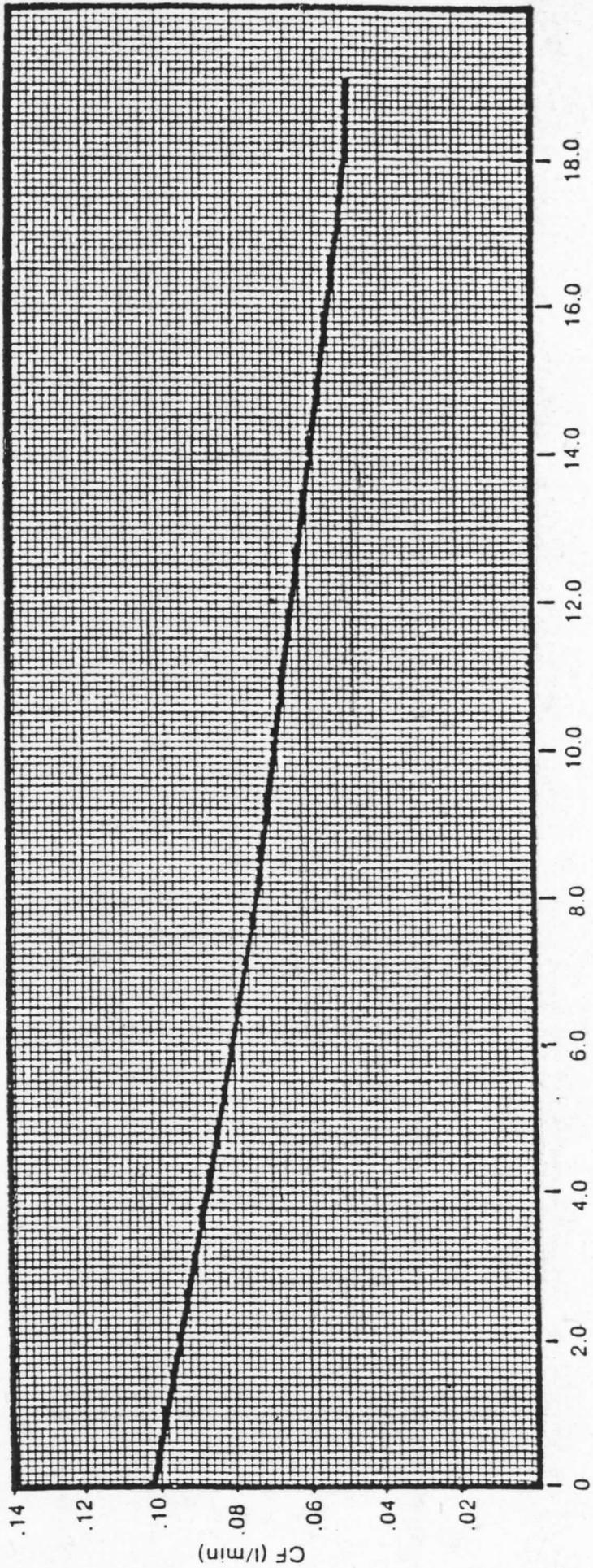
Podaci potrebni za određivanje CF obrađeni su u tabelama 7. i 8. Tabela 7., odnosi se na CF koji zavisi od priraštaja težine (vode) kanistra pri dvodnevnoj ekspoziciji. Tabela 8 povezuje vreme izlaganja sa faktorom popravke za 20, 50 i 80% vlažnosti. Faktor popravke se upotrebljava za modifikaciju CF, za vreme ekspozicije koje je različito od dvodnevnog. Obe tablice su predstavljene i grafički: slike 8. i 9.

Tabela 7. Kalibracioni faktor za dvodnevnu ekspoziciju u zavisnosti od priraštaja težine

Procentna vlažnost	Priraštaj težine [g]	CF [l/min]
20	0.0	0.105
20	0.0	0.101
20	0.0	0.105
20	0.0	0.110
20	0.0	0.107
50	1.7	0.098
50	1.8	0.094
50	1.9	0.097
50	1.8	0.102
50	1.8	0.096
80	7.7	0.077
80	7.5	0.082
80	7.7	0.076
80	7.9	0.076
80	7.9	0.078

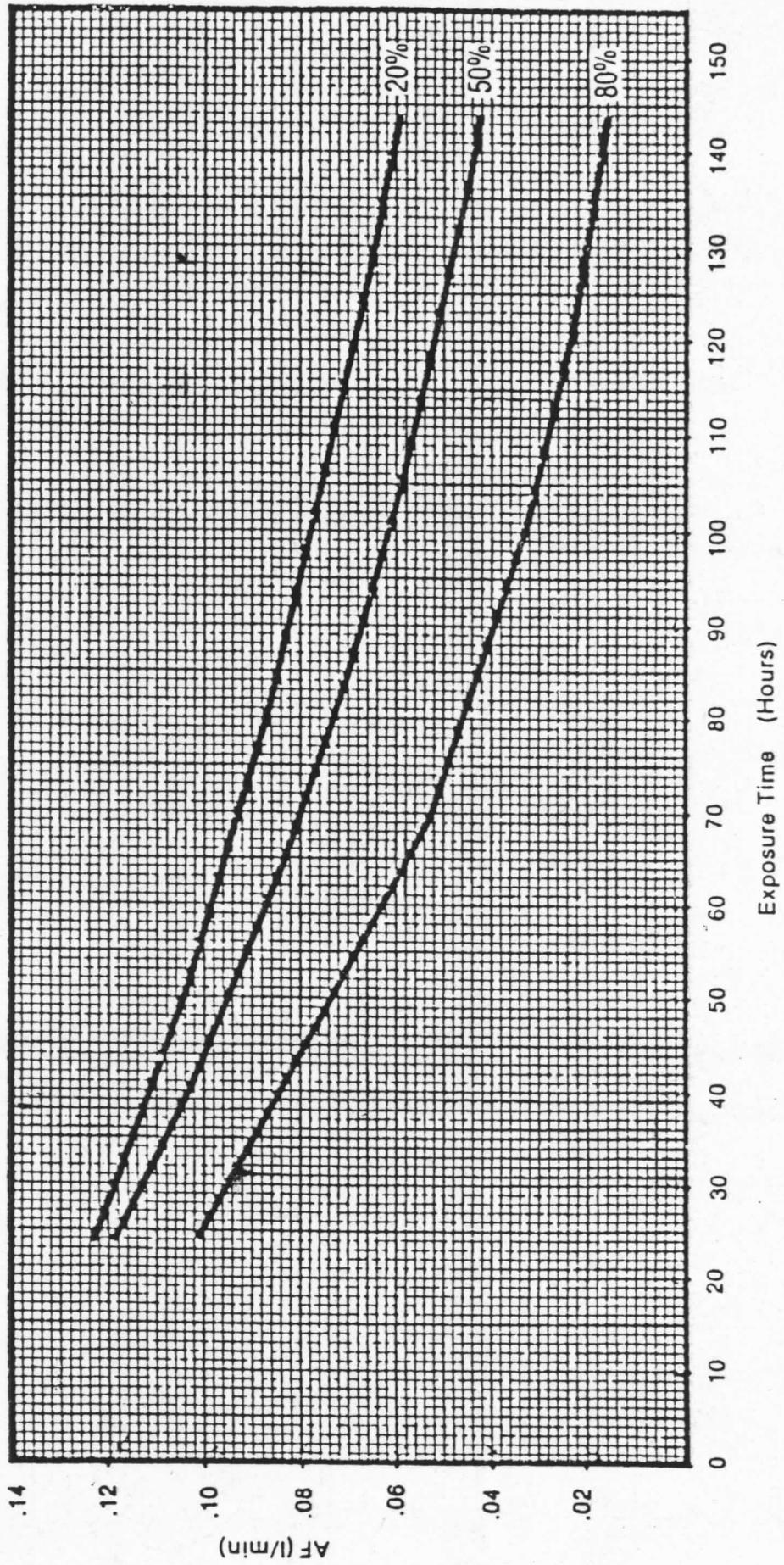
Tabela 8. Faktor popravke u zavisnosti od vremena izlaganja pri niskoj, srednjoj i visokoj vlažnosti

T [h]	AF [ l/min ]		
	20%	50%	80%
24	0.137	0.132	0.116
24	0.143	0.137	0.125
24	0.141	0.132	0.118
24	0.135	0.126	0.117
24	0.138	0.127	0.118
48	0.107	0.096	0.077
48	0.110	0.102	0.082
48	0.105	0.097	0.076
48	0.101	0.094	0.076
48	0.105	0.098	0.078
72	0.087	0.075	0.048
72	0.091	0.079	0.051
72	0.088	0.075	0.051
72	0.083	0.073	0.046
72	0.085	0.075	0.049
96	0.074	0.058	0.035
96	0.080	0.062	0.034
96	0.075	0.059	0.033
96	0.074	0.057	0.033
96	0.075	0.060	0.034
120	0.070	0.051	0.023
120	0.073	0.054	0.025
120	0.071	0.051	0.024
120	0.069	0.050	0.023
120	0.071	0.052	0.023
144	0.064	0.045	0.018
144	0.068	0.047	0.019
144	0.064	0.047	0.016
144	0.062	0.044	0.018



Water Gain (g)

Slika 8.



Slika 9.

### 6.3. Izračunavanje koncentracije radona iz izlaganja kanistara

Jednačina (27) može se rešiti po koncentraciji radona (RN) ako je CF poznato. Nova jednačina je:

$$RN = \frac{I - I_F}{T_s E CF DF} \quad (29)$$

Greška za koncentraciju radona izračunava se po formuli:

$$\Delta(RN) = \frac{\sqrt{(\Delta I)^2 + (\Delta I_F)^2}}{T_s E CF DF} \quad (30)$$

Koja se kalibraciona kriva vlažnosti koristi za određivanje početnog CF, zavisi od priraštaja vode (težine) po sledećem kriterijumu:

Priraštaj vode [g]	Kriva vlažnosti
manje od 1.0g	20%
1.0 - 4.0g	50%
više od 4.0g	80%

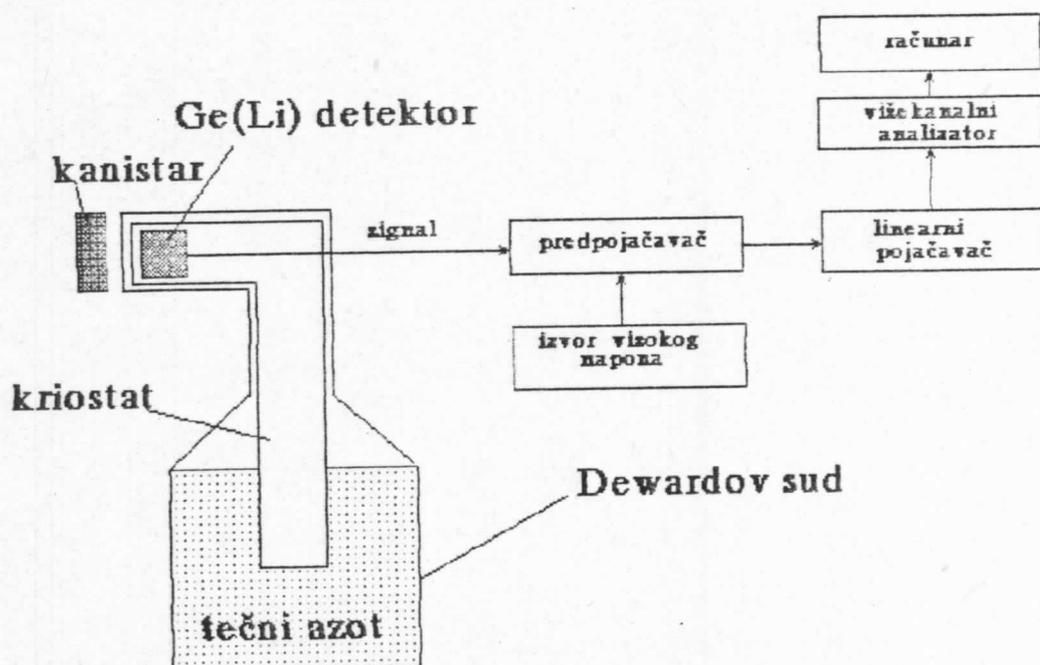
Međutim, početni CF nije i finalni CF ako vreme izlaganja nije dvodnevno. Kalibracioni faktor se tada određuje iz relacije (31).

$$CF_{fin} = CF_{inc} \times \frac{AF \text{ (za aktuelno vreme izlaganja)}}{AF \text{ (za dvodnevno vreme izlaganja)}} \quad (31)$$

gde je AF faktor popravke, čija se vrednost određuje sa kalibracione krive (krive vlažnosti). Kad je aktuelno vreme izlaganja 48 sati, faktor popravke je 1, tj. inicijalno CF je jednako finalnom CF.

## 7. MERNI INSTRUMENTI

U eksperimentalnom radu je korišten poluprovodnički Ge(Li) detektor cilindričnog oblika, koaksijalne izvedbe sa jednim zatvorenim krajem. Ovaj detektor ima osetljivu zapreminu oko  $80 \text{ cm}^3$ , nominalnu efikasnost 15% i moć razlaganja FWHM (Full Weight Half Maksimum):  $2.6 \text{ keV}$  na  $1332 \text{ keV}$ . Detektor se postavlja u vakuumsku komoru kriostata koja je povezana sa rezervoarom tečnog azota. Uzorak (kanistar), čija se aktivnost određuje, postavlja se u slobodni kraj koaksijalne cevi neposredno uz sam detektor. Na slici 10. dat je sklop aparature korištene pri merenju.



Slika 10.

Detektor i Dewardov sud smešteni su u niskofonsku komoru zapremine  $1 \text{ m}^3$ . Zidovi komore, debljine  $25 \text{ cm}$ , izrađeni su od brodskog čeličnog lima, koji je izliven pre II Svetskog rata, pa se pouzdano zna da zidovi nisu kontaminirani dugoživućim fisionim produktima. Integralni fon u komori u energetsom opsegu od  $0.03$  do  $2 \text{ MeV}$  je manji od jednog impulsa u sekundi.

## 8. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Tokom svih izvršenih merenja, meren je odbroj u fotopikovima (P), a levo (L) i desno (D) od njih određivan je odbroj koji potiče od kontinuuma. Energije na kojima je meren odbroj su:

295 keV -  $^{214}\text{Pb}$

352 keV -  $^{214}\text{Pb}$

609 keV -  $^{214}\text{Bi}$

Markacija fotopika vršena je nad četrnaest kanala ( $n_p=14$  CH), dok za kontinuum, nad sedam kanala ( $n_D=n_L=7$  CH). Dobijeni rezultati za pojedinačno izvršena merenja predstavljeni su u daljem toku rada.

### 8.1. Merenje fona

Za merenje fonskog odbroja koristi se nulti kanistar (fonski kanistar). Aktivni ugalj kanistra, iako nije bio izložen ekspoziciji, pokazuje malu radioaktivnost. Ova radioaktivnost potiče od prirodnih radionuklida koji se nalaze u aktivnom drvenom uglju.

Gamaspektrometrijskim metodama određen je odbroj koji potiče od radionuklida olova  $^{214}\text{Pb}$  i bizmuta  $^{214}\text{Bi}$  na izabranim analitičkim linijama. Rezultati merenja obrađeni su u tabelama 9 i 10.

Tabela 9. Rezultati merenja odbroja nultog kanistra

vreme merenja [ks]	295 keV - $^{214}\text{Pb}$			352 keV - $^{214}\text{Pb}$			609 keV - $^{214}\text{Bi}$		
	P	L	D	P	L	D	P	L	D
71	1137	466	402	991	353	264	507	117	112

Tabela 10. Spektralni intenzitet nultog kanistra

	295 keV - $^{214}\text{Pb}$	352 keV - $^{214}\text{Pb}$	609 keV - $^{214}\text{Bi}$
$N_F$	269	374	278
$I_F [\text{ks}]^{-1}$	$3.79 \pm 0.63$	$5.27 \pm 0.56$	$3.91 \pm 0.38$

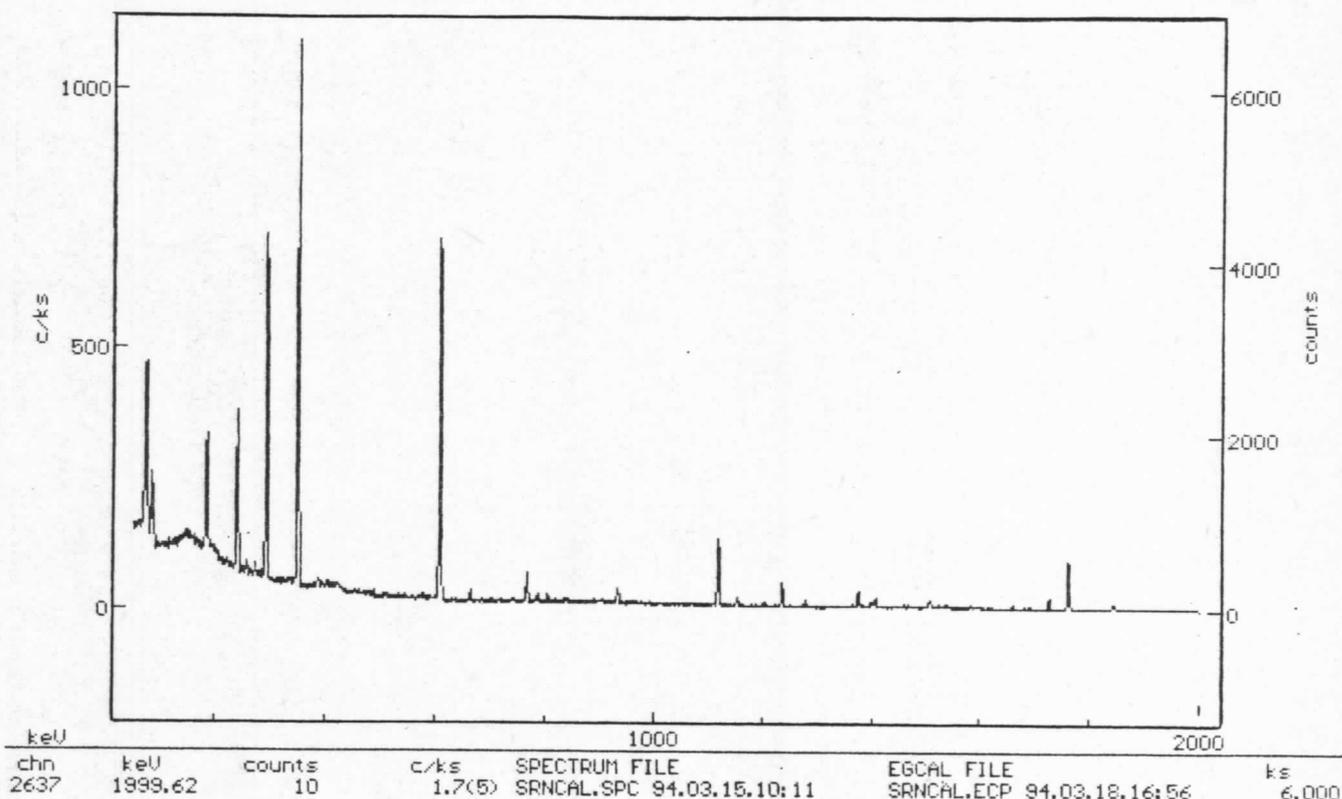
$$\sum_i^3 I_F = (12.97 \pm 0.92) [\text{ks}]^{-1}$$

Greška ukupnog spektralnog intenziteta računa se po formuli:

$$\Delta I = \sqrt{(\Delta I_{F1})^2 + (\Delta I_{F2})^2 + (\Delta I_{F3})^2} \quad (32)$$

## 8.2. Određivanje efikasnosti Ge(Li) detektora

Efikasnost Ge(Li) detektora određuje se iz odbroja koji daje standardni kanistar na izabranim analitičkim linijama. Snimljeni spektar standardnog kanistra dat je na slici 10, dok su rezultati merenja predstavljeni u tabelama 11 i 12.



Slika 10.

Tabela 11. Rezultati merenja odbroja koji daje standardni kanistar

vreme merenja [ks]	295 keV - <sup>214</sup> Pb			352 keV - <sup>214</sup> Pb			609 keV - <sup>214</sup> Bi		
	P	L	D	P	L	D	P	L	D
6	24427	2647	2269	35590	2191	1748	22866	874	613

Tabela 12. Spektralni intenzitet standardnog kanistra

E [keV]	N <sub>s</sub>	I <sub>s</sub> (ks) <sup>-1</sup>
295	19511	3252 ± 29
352	31451	5242 ± 33
609	21379	3563 ± 26

$$\sum_{i=1}^3 I_s = (12057 \pm 51) \text{ [ks]}^{-1}$$

Aktivnost standardnog kanistra je 1.12.1990. iznosila  $A_0 = 722.61 \text{ Bq}$ .  
Aktuelna aktivnost određuje se iz formule:

$$A = A_0 e^{-\lambda_{Ra} t} \quad (33)$$

i ona iznosi:  $A = 721.58 \text{ Bq}$

Efikasnost detektora određuje se iz izraza (26) i ona za korišteni Ge(Li) detektor iznosi:

$$E = 16.7 (\text{Bq} \cdot \text{ks})^{-1}$$

### 8.3. Određivanje koncentracije radona u stanu na višem spratu

KRATAK OPIS STANA: Stan se nalazi na 14. spratu: spoljna konstrukcija zgrade izgrađena je od betona, dok su pregradni zidovi napravljeni od građevinskog gipsa (zidovi su samo okrečeni); pod je obložen parketom; u stanu ima jedan pušač.

1. Period ekspozicije kanistra D1 u stanu: od 14.03.1994., 7 h 20 min  
do 16.03.1994., 7 h 20 min

$$T_s = 172.8 \text{ ks}$$

2. Posle završene ekspozicije, kanistar se zatvara i nosi na obradu. Vaganjem kanistra izmereni priraštaj težine ima vrednost:

$$m_0 = 158.8 \text{ g}$$

$$m_1 = 159.4 \text{ g}$$

---


$$\Delta m_{D1} = 0.6 \text{ g} \quad (20\% \text{ vlažnost vazduha u stanu})$$

Za priraštaj težine od 0.6g, kalibracioni faktor (sl. 8) ima vrednost:

$$CF = 0.1 \text{ l/min} = 1.67 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{ks}$$

3. Gamaspektrometrijskom metodom utvrđeno je prisustvo produkata radonovog raspada. Izmereni odbroji koji potiču od ovih produkata dati su u tabelama 13 i 14.

Tabela 13. Rezultati merenja odbroja kanistra D1

vreme merenja [ks]	295 keV - $^{214}\text{Pb}$			352 keV - $^{214}\text{Pb}$			609 keV - $^{214}\text{Bi}$		
	P	L	D	P	L	D	P	L	D
6	124	41	35	131	33	34	75	11	15

Tabela 14. Spektralni intenzitet izabranih analitičkih linija

E [keV]	$N_s$	$I_s \text{ (ks)}^{-1}$
295	48	$8.00 \pm 2.36$
352	64	$10.67 \pm 2.35$
609	49	$8.17 \pm 1.67$

$$\sum_{i=1}^3 I_{D1} = (26.84 \pm 3.73) \text{ [ks]}^{-1}$$

4. Za izračunavanje koncentracije radona potrebno je odrediti vrednost još jednog parametra, faktora raspada. Kako se sa merenjem odbroja kanistra D1 započelo 16.03. 1994. u 9 h 7 min faktor raspada na osnovu relacije (28) ima vrednost:

$$DF=0.822$$

Na osnovu dobijenih vrednosti parametara koji figurišu u formuli (29), koncentracija radona u posmatranom stanu iznosi:

$$RN = (3.50 \pm 0.97) \text{ Bq/m}^3$$

#### 8.4. Merenje koncentracije radona u prizemnom stanu

**KRATAK OPIS STANA:** Stan se nalazi u prizemlju zgrade. Građevinska konstrukcija napravljena je kombinacijom cigle i betona. Zidovi prostorije su samo okrečeni, a pod je obložen parketom. U stanu ima samo jedan pušač.

1. Kanistar D2 eksponiran je u vremenskom periodu: od 13.03.1994., 10 h  
do 15.03.1994., 9 h

$$T_s = 169 \text{ ks}$$

2. Priraštaj težine kanistra:  $m_0 = 160.0\text{g}$

$$m_1 = 161.3\text{g}$$

---


$$\Delta m_{D2} = 1.3\text{g}$$

Pošto vreme ekspozicije kanistra nije dvodnevno, potrebno je izvršiti popravku inicijalnog kalibracionog faktora (određenog iz dobijenog priraštaja težine) za aktuelno vreme izlaganja. Na osnovu kriterijuma odabira krive vlažnosti iznetog u paragrafu 6.3., faktor popravke za aktuelno vreme izlaganja očitava se sa krive 50% vlažnosti. Tako se dobija da je:

$$CF_{inc} = 0.098 \text{ l/min} = 1.63 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{ks}$$

$$AF_{dvod} = 0.098 \quad AF_{akt} = 0.099$$

Na osnovu formule (31) za vrednost finalnog kalibracionog faktora dobija se:

$$CF_{fin} = 1.65 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{ks}$$

3. Izmereni odbroji kanistra D2 obrađeni su u tabelama 15 i 16, a snimljeni spektar predstavljen na slici 11.

Tabela 15. Rezultati merenja odbroja kanistra D2

vreme merenja [ks]	295 keV - <sup>214</sup> Pb			352 keV - <sup>214</sup> Pb			609 keV - <sup>214</sup> Bi		
	P	L	D	P	L	D	P	L	D
6	128	40	36	152	36	25	71	11	9

Tabela 16. Spektralni intenzitet izabranih analitičkih linija

E [keV]	N <sub>D2</sub>	I <sub>s</sub> (ks) <sup>-1</sup>
295	52	8.67 ± 2.38
352	91	15.17 ± 2.43
609	51	8.50 ± 1.59

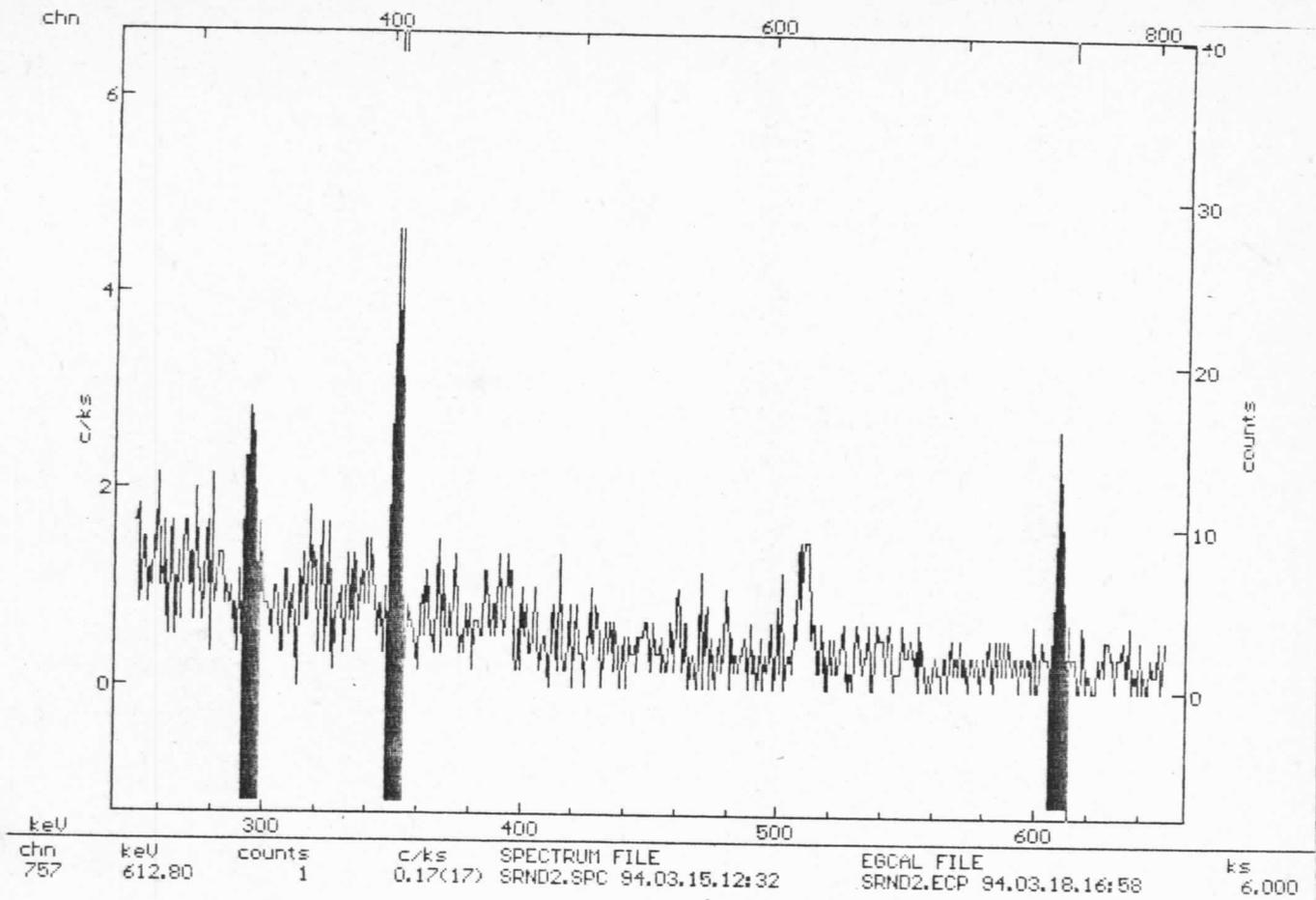
$$\sum_{i=1}^3 I_{D2} = (32.34 \pm 3.75) [\text{ks}]^{-1}$$

4. Kako se sa merenjem započelo 15.03.1994. u 10 h, faktor raspada ima vrednost:

$$DF = 0.824$$

Koncentracija radona u stanu određena iz relacije (29), ima vrednost:

$$RN = (5.05 \pm 1.01) \text{ Bq/m}^3$$



Slika 11.

### 8.5. Određivanje minimalno merljive zapreminske aktivnosti za Ge(Li) detektor

Da bi se procenila minimalno merljiva koncentracija radona koju još može detektovati Ge(Li) detektor, potrebno je odrediti minimalnu vrednost detektovanog odbroja. Koriste se uglavnom dva kriterijuma za određivanja minimalnog odbroja ( $N_{\min}$ ).

Najjednostavniji kriterijum je:

$$N_{\min} = 3\sigma_F \quad (34)$$

tj. ako je čist odbroj pod vrhom totalne apsorpcije ( $N_{\min}$ ) najmanje tri puta veći od standardne devijacije fona na mestu posmatrane analitičke linije, onda se ta izabrana linija još uvijek može detektovati.

Drugi kriterijum je pouzdaniji i on razmatra čist odbroj vrha totalne apsorpcije ( $N$ ) koji potiče isključivo od apsorpcije  $\gamma$ -fotona date energije, a ne od statističkih fluktuacija fona ( $N_F$ ), to jest:

$$N = N_P - N_F \quad (35)$$

gde je  $N_F$ -odbroj pod VTA nakon obračuna Komptonovog kontinuuma. Relativna greška ovog čistog odbroja je:

$$\sigma = \frac{\Delta N}{N} = \frac{[N_F + N_F]^2}{N} \quad (36)$$

što je ekvivalentno jednačini:

$$N^2\sigma^2 - N - 2N_F = 0 \quad (37)$$

Rešenje dobijene jednačine ima oblik:

$$N = \frac{1 + \sqrt{1 + 8\sigma^2 \cdot N_F}}{2\sigma^2} \quad (38)$$

Za minimum merljivog odbroja, ako se odabere  $\sigma=1/3$  (što odgovara 100%-oj relativnoj grešci), dobija se izraz:

$$N_{\min} = 4.5 + \sqrt{20.2 + 18N_F} \quad (39)$$

Kada je to poznato, minimalno merljiva zapreminska aktivnost za upotrebljeni detektor određuje se iz sledeće formule:

$$A_{0 \min} = \frac{N_{\min}/t_m}{T_s E CF DF} \quad (40)$$

Ukupan čist odbroj fona koji detektuje Ge(Li) detektor u toku vremena merenja fona ( $t_m = 71$  ks) iznosi  $N_F = 921$  odbroja. Tada se za minimum merljivog odbroja (39) dobija vrednost:

$$N_F = 133.3 \quad \text{odnosno} \quad N_F/t_m = 1.88 \text{ [ks]}^{-1}$$

Iz relacije (40) određuje se minimalno merljiva zapreminska aktivnost Ge(Li) detektora, pri vrednostima parametara:

$$T_s = 172.8 \text{ ks}; \quad E = 16.7 \text{ [Bq} \cdot \text{ks]}^{-1};$$

$$CF = 0.1 \text{ l/min} = 1.67 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{ks}; \quad DF = 0.822$$

i ona iznosi:

$$A_{0 \min} = 0.47 \text{ Bq/m}^3$$

## 9. ZAKLJUČAK

Sa teorijske strane, u ovom radu je razmatran negativan uticaj radijacije radona i njegovih potomaka na čovečiji organizam. Takođe su ispitivani izvori i mehanizmi nagomilavanja radona u prostoriji.

Praktična strana ovoga rada daje potpunu metodologiju odrađivanja koncentracije radona (zapreminske aktivnosti) u prostoriji. Merenje je izvršeno u sledećim koracima:

1. **Merenje fona.** Fon koji se dobija merenjem ne potiče od radijacije okolne sredine u kojoj se nalazi merna aparatura, već od prirodnog sadržaja radionuklida u aktivnom drvenom uglju (nultom kanistru). Rezultat ovog merenja potreban je radi korekcije rezultata ostalih merenja.

2. **Efikasnost Ge(Li) detektora.** Standardni kanistar karakteriše visoka radioaktivnost. Vrednost aktivnosti kanistra unapred je poznata. Izmeren odbroj standardnog kanistra korigovan odbrojem fona i podeljen aktivnošću istog, određuje efikasnost korišćenog Ge(Li) detektora.

3. **Određivanje koncentracije radona u odabranim stanovima.** Korišteni metod ugljenih kanistara kao rezultat daje relativno niske vrednosti koncentracije radona u stanovima. To znači da je specifična aktivnost radioaktivnih predaka radona mala, kako u korištenom građevinskom materijalu, tako i u zemljištu na kojem je podignuta zgrada. Poređenjem dobijenih koncentracija radona može se uočiti postojanje vertikalne distribucije radona.

Izmerena koncentracija radona u stanu koji se nalazi u prizemlju, prouzrokovana je ekshalacijom radona iz građevinskog materijala, a takođe i prodorom radona iz zemljišta. Mehanizam nagomilavanja radona u ovom stanu ekvivalentan je situaciji br. 3 (tabela 5.), koja je razmatrana u paragrafu 4.3. Poređenjem efektivne ekvivalentne doze i koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  u prostoriji, može se okvirno odrediti primljena efektivna ekvivalentna doza za naš slučaj tj. pri koncentraciji od  $5.05 \text{ Bq/m}^3$ . Ova vrednost koncentracije daje efektivnu ekvivalentnu dozu od  $404 \mu\text{Sv/god}$ .

U stanu koji se nalazi na četrnaestom spratu izmerena koncentracija iznosi  $RN=3.51 \text{ Bq/m}^3$ . Način nagomilavanja radona u ovom stanu ekvivalentna je situaciji br.2 (tabela 5.), tj. u ovom slučaju uticaj difuzionog fluksa radona iz zemljišta se može zanemariti. Dobijena koncentracija radona u stanu daje efektivnu ekvivalentnu dozu od  $304 \mu\text{Sv/god}$ .

## LITERATURA

1. Krišuk E. M., Radijacionij fon pomeštenij, Moskva, Energoatomizdat, 1989.
2. Anthony Nero, Earth, air, radon and home, Physics today, 1989.
3. V. Paić i G. Paić, Dozimetrija i zaštita od zračenja, Zagreb, PMF, 1987.
4. M. Šokčić-Kostić, M. D. Antić, Exposure Assessment from the Natural Radioactivity in Some Building Materials, International Symposium-radiation Protection, Dubrovnik, 1989.
5. William R. Hendee and Doege Theodore C., Origin and Health Risks of Indoor Radon, Seminars in Nuclear Medicine, Vol XVIII, No1 (January), 1987: 3-9 pp. Chicago, Science and Technology, American Medical Association, 1988.
6. R. A. Rezvanov, Jadrenaja geofizika radio-metričeskaja razvedka, Moskva, Nedra, 1976
7. N. A. Koroleva, N. I. Šalak, E. M. Krišuk i dr., Vijdelenie radon iz stroitelnih materialov v žilištah, Gigijena i sanitaria, No 7. S. 64-66, 1985.
8. Natural Radiatio Enviroment II: Proc. of the Inter. Sympozium Houston (Avg. 1972.), Houston, 1980.
9. Dr Milan Jovanović, Kako da se zaštitimo od radioaktivnog zračenja, Medicinska knjiga, Beograd-Zagreb, 1986.
10. Karpov V. I., Krišuk E. M., Fotone izlučenje estestvenah radionuklidov: Preprint HKP3 -79-44, Atomizdat, 1979.
11. G. Novak, Gamaspektrometrijsko određivanje urana i torijuma u uzorcima iz prirode, magistarski rad, PMF, Novi Sad, 1989.
12. IERF Standard Operating Procedures for Rn-222. Measurement Using Charcoal Canister, Montgomery, 1989.
13. Radiation - Doses, effects, risks, United Nations Environment Programme Copyright UN, 1985.
14. CANBERRA -Instruction manual Ge(Li) Spectrometr. Systems 7000 series.

15. Exposure to radiation from the natural radioactivity in building materials:  
Report by an NEA Group of experts (Kolb. W. A., Chairman ), Paris  
NEA OECD, 1979.
16. Strande E., Polatin doses from enviromental radiation in Norway, Health  
Phis., Vol. 33 p. 319-329, 1977.



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
KLJUČNA INFORMACIJSKA DOKUMENTACIJA

RBR Redni broj:

IBR Identifikacioni broj:

TD Tip dokumentacije:

TZ Tip zapisa:

VR Vrsta rada:

AU Autor:

MN Mentor:

NR Naslov rada:

JP Jezik publikacije:

JI Jezik izvoda:

ZP Zemlja publikovanja:

UGP Uže geografsko područje:

GO Godina:

IZ Izdavač:

MA Mesto i adresa:

Prirodno-matematički fakultet, INSTITUT ZA FIZIKU  
21000 Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 4

FO Fizički opis rada: (broj poglavlja/strana/lit. citata/tabela  
slika/ grafikona/priloga)

NO Naučna oblast:

FIZIKA

ND Naučna disciplina:

PO Predmetna odrednica/Ključne reči:

UDK

ČU Čuva se:

VN Važna napomena:

IZ Izvod:

DP Datum prihvatanja teme od strane NN Veća

DO Datum odbrane

KO Članovi komisije (naučni stepen/ime i prezime/zvanje/Fakultet)

☰ 1. Predsednik:

2. Član:

3. Član: