



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



MERENJE KOEFICIJENTA DIFUZIJE RADONA KROZ GRAĐEVINSKE MATERIJALE

- diplomski rad -

Mentor:
Doc.dr. Dušan Mrđa

Kandidat:
Aleksandar Radukin Kosanović

Novi Sad, novembar 2008

Sadržaj:

1. Uvod.....	1
2. Opšti deo.....	2
2.1. Nastanak i karakteristike radona.....	2
2.2. Radioaktivni nizovi.....	4
2.2.1. Raspad radona.....	6
2.2.2. Raspad torona.....	7
2.3. Faktori koji utiču na koncentraciju radona u zatvorenim prostorijama.....	11
2.3.1. Zemljište kao izvor radona i poroznost zemljišta.....	11
2.3.2. Faktori koji utiču na povećanje koncentracije radona.....	13
2.3.3. Visinska raspodela koncentracije radona.....	16
2.3.4. Vremenska zavisnost koncentracije radona.....	17
2.3.5. Uticaj radona i radonovih potomaka na čoveka.....	18
2.4. Problem radona u niskofonskim laboratorijama.....	20
2.4.1. Podzemna niskofonska laboratorija u Zemunu.....	21
3. Merenje koeficijenta difuzije radona kroz različite građevinske materijale.....	23
3.1. Teorijska osnova računanja.....	23
3.1.1. Proces difuzije.....	23
3.1.2. Proces advekcije.....	24
3.1.3. Koncentracija radona.....	25
3.1.4. Ekshalacija radona iz zemljišta u otvoren prostor.....	26
3.1.5. Ekshalacija iz zemljišta u zatvoren prostor.....	27
3.1.6. Uticaj Darsijevog toka na ekshalaciju radona iz ploče.....	27
3.1.7. Difuzija radona kroz materijal određene debeljine.....	28
3.2. Opis eksperimentalne aparature.....	31
3.2.1. Alfa spektrometrijska metoda - RAD7 detektor.....	31
3.2.2. Eksikatorska posuda.....	35
3.2.3. Radioaktivni uzorak i specifična aktivnost radona.....	36
3.2.4. Ispitivani materijali.....	37
3.3. Realizacija eksperimenta.....	40
3.3.1. Metodologija merenja i objašnjenje eksperimentalne postavke.....	40
3.3.2. Dnevnik rada.....	44
3.4. Podaci dobijeni merenjem.....	46
4. Zaključak.....	68
5. Literatura.....	69
Kratka biografija.....	71
Dokumentacijska informacija.....	72

1. UVOD

Svaki od tri prirodna radioaktivna niza sadrži po jedan radonov izotop, gde pod terminom „radon” podrazumevamo samo izotop $^{222}\text{Rn}_{86}$, koji ima period poluraspada $\tau \approx 3.824$ dana i prisutan je samo u radioaktivnom nizu uranijuma ^{238}U . Sam radon $^{222}\text{Rn}_{86}$, koji je prirodan radioaktivni inertan gas, nastaje α -raspadom radijuma $^{226}\text{Ra}_{88}$ koga ima u zemljištu. Posle radioaktivnog raspada, ispod površine zemlje, radon napušta mesto generisanja i procesom difuzije dospeva u vazduh ili se rastvara u podzemnim vodama i na taj način obrazuje značajne koncentracije. Radon je inertan gas bez ukusa i mirisa koji teži da se veže za druge atome i tako postaje stabilnog molekulskog stanja, ova činjenica čini radon značajnim radioaktivnim zagađivačem.

Pošto procesom difuzije radon prolazi kroz različite slojeve zemljišta sve do vazduha, zato je značajna analiza procesa difuzije radona u eksperimentalnim uslovima. Postoje brojni eksperimenti čija tematika predstavlja difuzija radona, kako kroz modele posebno uzetih uzoraka koji simuliraju različite vrste zemljišta, tako i eksperimenti gde se ispituju koeficijenti difuzije radona za različite materijale. Svrha eksperimenata je određivanje materijala, ili ogdovarajuće kombinacije vrsta i debljina građevinskih materijala koji imaju što manju vrednost koeficijenta difuzije, kako bi se u što većoj meri sprečio ulazak radona iz zemljišta u unutrašnjost prostorija, kako ne bi došlo do kontaminacije unutrašnjosti prostorije radonom i samim tim narušenja zdravlja ljudi koji žive u kontaminiranom prostoru. Pored zdravstvene zaštite ljudi, poseban uticaj koji radon vrši je na merne instrumente koji se koriste za merenje radioaktivnosti, naročito kod „niskofonskih” merenja. Uticaj radona u unutrašnjosti prostorija gde se vrši merenje je značajan, preko značajnog doprinosa linijama fona gama zračenja koji radon ima i proporcionalan je koncentraciji radona u unutrašnjosti prostorija i približno je proporcionalan zapremini vazdušnog prostora u kome se nalazi detektor. Naročita smetnja radona u eksperimentima je za slučaj kada se vrše niskofonska merenja, primer je niskofonska gama spektrometrija, razni eksperimenti u kojima se vrši merenje uticaja fluksa kosmičkih zraka, detektovanje WIMP-ova i drugi eksperimenti.

Zato je neophodno u što većoj meri smanjiti difuziju radona u unutrašnjost prostorija, a za niskofonske eksperimente potrebno je stalno pratiti koncentraciju radona u prostorijama gde se vrši merenje, ovo naročito važi za podzemne prostorije gde se mogu naći visoke koncentracije ovog prirodnog radioaktivnog gasa.

U prvom delu ovog diplomskog rada biće ukazano na način nastanka radona, njegove osobine, uticaj na životnu sredinu, značaj kontrole i načini za smanjenje koncentracije radona u unutrašnjosti prostorija. Drugi deo rada opisuje eksperiment kojim se vrši analiza difuzije radona kroz razne materijale koji se koriste u građevinarstvu, sa svim dobijenim podacima i graficima, gde su uključena objašnjenja merenja, procena mernih nesigurnosti, opisi karakteristika mernih uređaja pri korišćenju optimalnih metoda merenja, koja su bila dostupna. U poslednjem delu izvršena je analiza dobijenih vrednosti eksperimenta za koeficijent difuzije upotrebljenih materijala i izvedeni su određeni zaključci o difuziji radona u zavisnosti od karakteristika upotrebljenih materijala.

2. OPŠTI DEO

2.1. Nastanak i karakteristike radona $^{222}\text{Rn}_{86}$

Friedrich Ernst Dorn je otkrio 1900 godine da radijum $^{226}\text{Ra}_{88}$ emanira gas, koji je isprva nazvao „Niton” (od Latinske reči *nitens* koja znači sijati). Ovaj gas je kasnije nazvan „radon” 1923. godine. Nešto ranije 1908. godine, Vilijam Ramsej i Robert Grej su izolovali radon i odredili njegovu gustinu, a to je tada bila najveća gustina od svih poznatih gasova. Radon je prirodan radioaktivni gas bez ukusa i mirisa, čija je gustina sedam i po puta veća od gustine vazduha. Nastaje α - raspadom radijuma $^{226}\text{Ra}_{88}$, rastvorljiv je u vodi i može lako da difunduje sa gasovitom i vodenom fazom i na taj način obrazuje značajne koncentracije, što i čini radioaktivno zagadenje nekog prostora sa radijumom. Sa stanovišta nuklearne fizike, radon spada u α -emitere: vreme poluraspada radona je $\tau \approx 3.824$ dana i emituje α -česticu energije $E_\alpha = 5.5\text{MeV}$, što je energija dovoljna da se izvrši jonizacija nekoliko hiljada atoma, dok sa stanovišta medicinske fizike bitne osobine su: vreme polueliminacije radona iz pluća je 30 minuta, a iz ostalih tkiva vreme polueliminacije je 15 minuta. Zbog energije emitovane α -čestice $E_\alpha = 5.5\text{MeV}$ radon u tkivu živih bića vrši jonizaciju oko trideset hiljada atoma u celiji živih bića, što ima najveći efekat na tkiva respiratornog sistema kod čoveka.

Ispitivanjima je utvrđeno je da se svi prirodni radioizotopi rednog broja $Z > 82$ mogu grupisati u tri radioaktivna niza (porodice), a između članova jednog niza postoji genetska veza. Od izotopa praroditelja, koji su na čelu niza i imaju veoma dug period poluraspada, sukcesivnim radioaktivnim raspadima nastaju radioaktivni elementi odnosno potomci. Poslednji član niza je jedan od stabilnih izotopa olova $^{206}\text{Pb}_{82}$, koji ima dvostruki magični broj i najveću energiju veze, gde se završavaju radioaktivni nizovi. Ovaj izotop olova je i najstabilniji elemenat u prirodi i svi radioaktivni lanci, ali i sinteza elemenata usled fuzije teže ovom izotopu. Prirodna radioaktivnost potiče prvenstveno od tri prirodna radioaktivna niza čiji su rodonačelnici: ^{232}Th , ^{238}U i ^{235}U , kao i od kalijuma ^{40}K . Slike 1, 2 i 3 pokazuju nizove, kao i odgovarajuće energije emitovanih gama kvanata i čestica, ali i verovatnoću emisije po svakom raspadnutom članu niza.

Radioizotopi ^{232}Th , ^{238}U i ^{235}U imaju ekstremno duge periode poluraspada, koji su za nekoliko redova veličine veći od perioda poruraspada njihovih potomaka, dok se za odgovarajuć izotop olova $^{206}\text{Pb}_{82}$ smatra da je stabilan i da se dalje ne može vršiti radioaktivni raspad, sa ovim elementom se završavaju radioaktivni nizovi. Pošto postoje velike razlike u periodima poluraspada pojedinih elemenata u okviru jednog radioaktivnog niza, posledica je uspostavljanje sekularne radioaktivne ravnoteže, pri kojoj je aktivnost svakog potomka jednaka aktivnosti rodonačelnika niza. Ovaj podatak je u poglavљу 3.2.3. upotrebljen za određivanje aktivnosti radona, preko poznate specifične aktivnosti radijuma. Neki potomak može da nastane kao rezultat dezintegracije pretka koji se raspada i nekim drugim kanalom raspada. Aktivnost nastalog potomka je tada

konstantan deo aktivnosti rodonačelnika niza i zavisi od verovatnoće raspada njegovog pretka po kanalu raspada u kojem posmatrani potomak nastaje.

Sva tri niza ima zajedničku osobinu da postoji dvojaka mogućnost raspadanja (β i α), a druga zajednička osobina je da postoji prisustvo izotopa inertnog gasa radona koji se u manjoj ili većoj meri emanira iz matrice u kojoj se generiše. Radon posle raspada, jedan deo pređe u atmosferu, dok se drugi deo raspadne pre prelaska u atmosferu, tako u atmosferi postoji određena koncentracija radona i njegovih kratkoživećih potomaka.

Za karakterizaciju kontaminacije atmosfere radonom i njegovim kratkoživećim potomcima koristi se nekoliko fizičkih veličina:

- ekvivalentna doza (DE)-veličina koja je uobičajena u zaštiti od zračenja i predstavlja proizvod apsorbovane doze (D), distribucionog faktora (DF) i faktora kvaliteta (QF). Apsorbovana doza je količina energije apsorbovana u jedinici mase tkiva

$$DE = D \cdot DF \cdot QF \quad [Sv] \quad (2.1.1)$$

Definisana apsorbovana doza primenjuje se za proračune radiacionih oštećenja izazvanih svim vrstama zračenja, a jedinica je Grej

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad} = 1 \frac{J}{kg}.$$

Distribucioni faktor (DF) je bezdimenziona konstanta koja u ekvivalentnu dozu uvodi zavisnost biološkog efekta ozračenja od prostornog rasporeda izvora zračenja i ozračenog sistema. Ova vrednost karakteriše uticaj radioaktivnog zagađenja na čoveka.

Faktor kvaliteta (QF) je bezdimenziona konstanta koja pokazuje koliko puta dato zračenja izaziva veći efekat od γ -zračenja, koje se uzima kao referentno. Biološki efekat ozračivanja zavisi i od tipa zračenja, odnosno, od gustine ionizacije koje proizvede radioaktivno zračenje određene vrste. Konkretno za radon broj stvorenih jedinica po jedinici pređenog puta je nekoliko hiljada, ukupno jedna upala čestica radona u plućima stvara oko 30 hiljada jonskih parova. Jedinica za ekvivalentnu dozu je Sivert (Sv), koji je dimenziono jednak Grej-u.

- efektivna ekvivalentna doza je doza koja predstavlja ekvivalentnu dozu merenu osetljivošću različitih tkiva na radijaciju.
- zapreminska aktivnost radona-predstavlja aktivnost radona u jedinici zapremina i izražava se u $\frac{Bq}{m^3}$.
- ukupna energija emitovanih α -čestica za jedan atom u lancu raspada radona. Ova vrednost se može očitati sa tabela radioaktivnih lanaca
- koncentracija potencijalne energije (PAEC) je suma potencijalnih alfa energija svih atoma u metru kubnom vazduha bilo koje smeše kratkoživećih radonovih ili toronovih potomaka. Jedinica za PAEC (Potential Alpha Energy Concentration) je vansistemska jedinica WL-Working level i iznosi $1WL = 0.021 \frac{J}{m^3}$. U jednom WL odgovara oslobođena energija elfa zračenja od $1.3 \cdot 10^{14} \frac{eV}{m^3}$ u vazduhu. Veličina WL

je samo primer kako se može izraziti efekat radona i njegovih kratkoživećih potomaka na živi svet.

- izlaganje radonovim potomcima (P) je proizvod PAEC-a i vremena koje provede čovek u prostoriji u kome je odgovarajuća vrednost PAEC-a. Sistemska jedinica za ovu veličinu je $\frac{Js}{m^3}$, a vansistemska jedinica za ovu veličinu je *Working Level Month*-WLM. U praktičnom izračunavanju osoba koja provede 173 sata u atmosferi sa PAEC=1 WL, izložena je radonovim potomcima od 1 WLM= $12.96 \frac{Js}{m^3}$
- ravnotežna ekvivalentna koncentracija radona (EEC) odnosi se na ravnotežnu smešu smešu kratkoživećih radonovih potomaka u vazduhu i ako je koncentracija radona u radioaktivnoj ravnoteži sa njegovim potomcima koju imaju isti PAEC kao i neravnotežna smeša, na koju se EEC odnosi.
- faktor ravnoteže (F) se definiše kao količnik ravnotežne ekvivalentne koncentracije radona C_e i stvarne koncentracije radona C_0 :

$$F = \frac{C_e}{C_0} \quad (2.1.2)$$

2.2. Radioaktivni nizovi

Prva od tri niza – niz urana počinje izotopom urana ^{238}U a završava se stabilnim $^{206}\text{Pb}_{82}$ - izotop olova, gde značajnu karakteristiku predstavlja dvojaka mogućnost raspadanja (β i α raspad je prisutan). Za masene članove ovog niza je karakteristika da se predstavljaju formulom $(4k+2)$, gde je k neki od koeficijenata koji je ceo broj od 51 do 59. Ukupan broj komponenata u radioaktivnom nizu je 14. Radon je u ovoj seriji jedini radioaktivni gas i to sa najdužim periodom poluraspada od 3.825 dana. Posle raspada radona, njegovi nastali potomci su hemijski aktivni i teže da se vežu za druge čestice, tada su hemijski stabilni i time formiraju krupnije čestice – aerosoli. ^{218}Po i ^{214}Po sa energijama alfa čestica od 6.00 MeV i 7.69 MeV respektivno, su najjači kontaminenti u plućima, jer sadrže najviše energije u emitovanim alfa česticama, pa vrše intenzivnu ionizaciju živih ćelija.

Drugi radioaktivni niz naziva se niz torijuma, jer počinje izotopom ^{232}Th , a isto se završava stabilnim olovom ^{207}Pb , gde je karakterizacija izvršena preko formule $4k$, gde je k ceo broj između 52 – 58. ^{220}Rn je u ovom nizu značajni član, a dalje je praćen ^{212}Pb i ^{212}Bi sa svojim doprinosom u zagadjenju vazduha. Ukoliko se inhaliraju u pluća ^{212}Bi i ^{212}Po vrše sa svojim alfa česticama značajnu kontaminaciju, jer te alfa-čestice imaju energije od 6.05 MeV i 8.78 MeV.

Treći niz se naziva niz aknijuma. Ovaj niz počinje izotopom ^{238}U , a završava se isto sa izotopom olova ^{232}Th , dok se karakterizacija vrši pomoću obrasca $4k+3$, gde je k koeficijent od 51-58

Svaki od tri prirodna radioaktivna niza sadrži po jedan radonov izotop:

1. $^{222}\text{Rn}_{86}$ je sa periodom poluraspada od 3.824 dana. Prisutan je u nizu uranijuma ^{238}U (slika 1.) i predstavlja najznačajniji radonov izotop i pod terminom „radon” podrazumevamo upravo ovu vrstu izotopa.
2. ^{220}Rn ovaj izotop radona ima period poluraspada 54.5 s. Prisutan je u nizu torijuma ^{232}Th (slika 2.) i za njega se koristi specijalni naziv „toron”. Uzima se u obzir u situacijama kada on ili njegovi potomci do dostižu veće koncentracije kod merenja emanacije radona iz zemljišta i pronalaženja mesta ulaska radona.
3. ^{219}Rn sa periodom poluraspada od 3.92 s. Prisutan je u nizu uranijuma ^{235}U i naziva se „aktinon”. On je vrlo malo zastupljen u prirodi (zbog malog sadržaja izotopa urana ^{235}U) i njegov doprinos u ozračenju ljudi je neznatan.

Radon je primarni radioaktivni kontaminant u prirodi, za razliku od torona ili aktinona, ali što se tiče eksperimentalnih merenja toron je takođe značajan doprinos prirodnom fonu koji može da poveća grešku merenja kod niskofonskih merenja. U metodama merenja u nuklearnim eksperimentima pomoću razlaganja radioaktivnih linija možemo izvršiti selekciju linija radona u odnosu na linije torona, dok se aktinon zanemaruje. Radon je inertni gas, koji napušta mesto generisanja procesom difuzije i advekcije i dospeva u vazduh, a takođe procesom difuzije prolazi kroz građevinske materijale u unutrašnjost građevinskih objekata vršeći radioaktivnu kontaminaciju unutrašnjosti prostorija. Bitna osobina je težnja atoma radona da se veže za druge atome, gradeći složenije molekule koji su hemijski stabilni. Uticaj radona na živi svet vrši se primarno jonizacijom koju vrše atomi radona na atome u tkivima živog sveta. Uticaj jonizovanih atoma na funkciju ćelije je veliki i ukoliko je veći broj atoma u ćeliji jonizovan, dolazi do disbalansa u pojedinim funkcijama ćelija. Manifestovanje negativnih zdravstvenih efekata kod čoveka, usled jonizacije atoma u ćelijama, je pojava malignih oboljenja, upravo usled promena u načinu funkcionisanja grupa ćelija.

Potrebno je poznavati ponašanje radonovih potomaka u atmosferi, jer je njihov doprinos radijacionom zdravstvenom riziku znatno veći od samog radona. Oko 80% novoformiranih potomaka je pozitivno nanelektrisano i hemijski su veoma aktivni. Oni interaguju sa negativnim jonima prisutnim u atmosferi pripajajući se za prirodne aerosole. Prvi potomak je polonijum-218, koji postoji kao samostalan mobilan jon ili atom, a nakon izgubljene kinetičke energije pripaja se molekulima vodene pare, kiseonika i drugih gasova. Nepripojeni potomci ostaju kao slobodni klasteri i samo nekoliko preostalih molekula lebde u vazduhu i imaju najveći negativan zdravstveni efekat. Stalnim sudaranjima slobodnih klastera dolazi do njihovog ponovnog spajanja i povećavanja, a takođe i do raspadanja i do taloženja. Verovatnoća taloženja potomaka u ljudskim plućima je znatno veća za slobodne nego za pripojene klasterne. Deo radonovih potomaka koji se u prirodi nalazi u slobodnoj formi zavisi od više različitih parametara i kreće se od 0.3% do 33%.

2.2.1. Raspad radona $^{222}\text{Rn}_{86}$

Period poluraspada radona je 3.824 dana i raspadom nastaju kratkoživeći potomci ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po i dugoživeći-stabilan potomak ^{210}Pb , sa periodom poluraspada od 22.3 godine. Gama linije potomaka predstavljaju radonske linije u fonu i one takođe imaju uticaj na dizanje prirodnog fona pri merenju, dok je efekat dugoživećeg potomka ^{210}Pb takav da može da izazove povećanje površinske kontaminacije zemljišta sa olovom nastalog usled nagomilavanja.

Svako jezgro radona se raspada preko polonijuma ^{218}Po , olova ^{214}Pb , bizmuta ^{214}Bi i polonijuma ^{214}Po , sve do konačnog produkta stabilnog olova ^{210}Pb . Pri svakoj transformaciji jezgra dolazi do emisije bilo alfa čestice, beta čestice ili gama zraka ili kombinaciju čestica i zraka, gde svaka čestica ima odgovarajuću energiju koja je poznata, što je prikazano na slici 1.

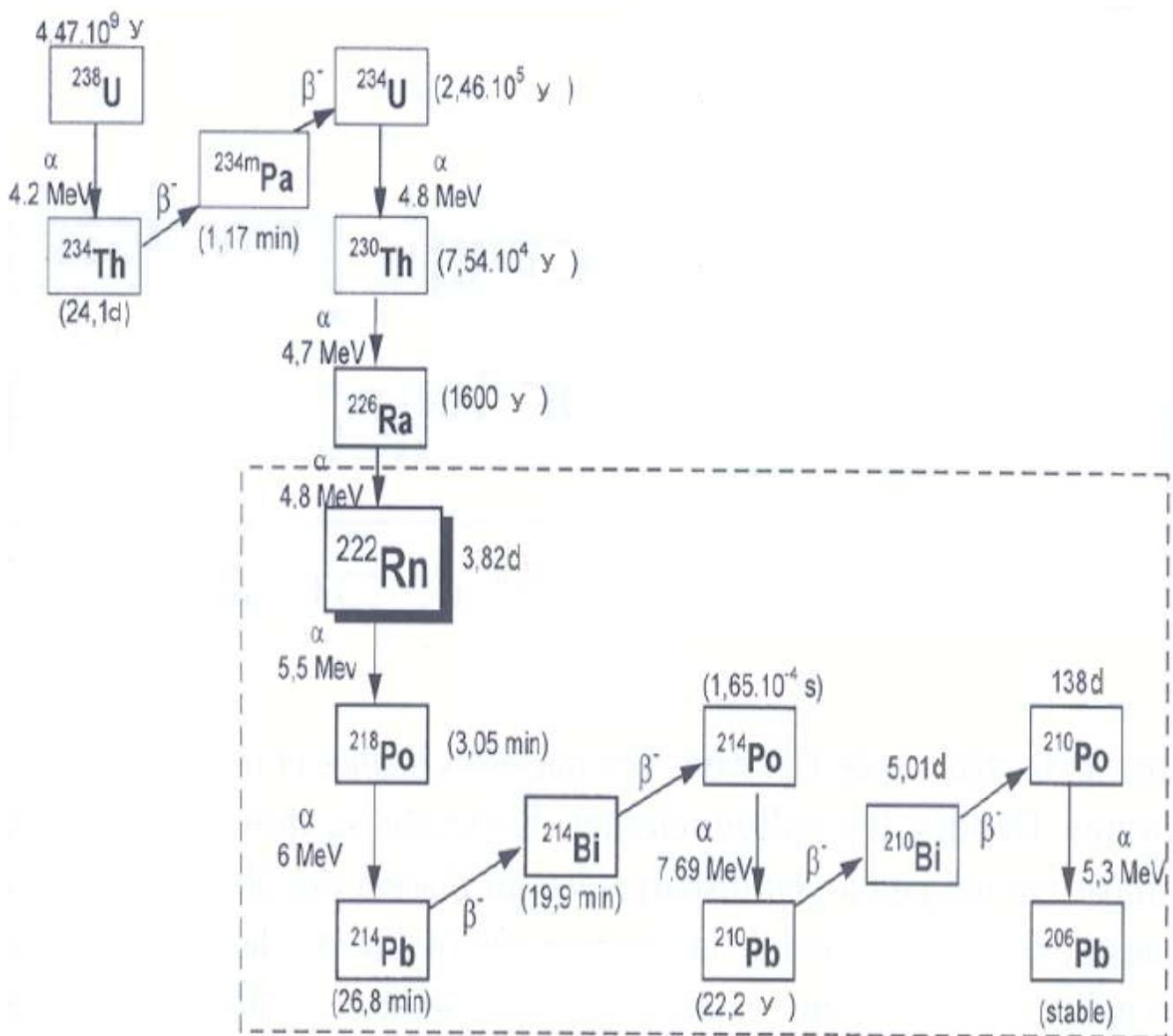
Radon se raspada α -raspadom do polonijuma ^{218}Po , gde je energija emitovane α -čestice 5.49 MeV. Polonijum je metal čiji se atomi lepe za čestice praštine ili se talože na površinama sa kojima dodu u kontakt, a to su zidovi prostorija, nameštaj ali i unutrašnjost pluća. Nastali polonijum ima kratak period poluraspada od 3.05 min, što znači da se najveći deo raspadne za 6 min od vremena do nastanka, a zatim se α -raspadom ^{218}Po raspada na nestabilan izotop olova ^{214}Pb . Emitovana α -čestica pri raspadu polonijuma ima energiju od 6.0 MeV. Oovo ^{214}Pb je čvrstog agregatnog stanja sa periodom poluraspada 26.8 minuta i raspada se emisijom β -čestice i γ -zraka na bizmut ^{214}Bi , koji je isto u čvrstom stanju i takođe β -emiter sa periodom poluraspada od 19.8 minuta i njegovim raspadom nastaje polonijum ^{214}Po . Ovaj izotop polonijuma ima period poluraspada samo 164 milisekunde i predstavlja α -emiter, gde emitujuća α -čestica ima energiju od 7.69 MeV i raspada se na takođe nestabilan izotop olova ^{210}Pb . Ovaj izotop olova, iako nestabilan, je dugoživeći sa periodom poluraspada od 22.3 godine i nije značajan za merenje koncentracije radona, upravo zbog dugog perioda poluraspada.

2.2.2. Raspad torona ^{220}Rn

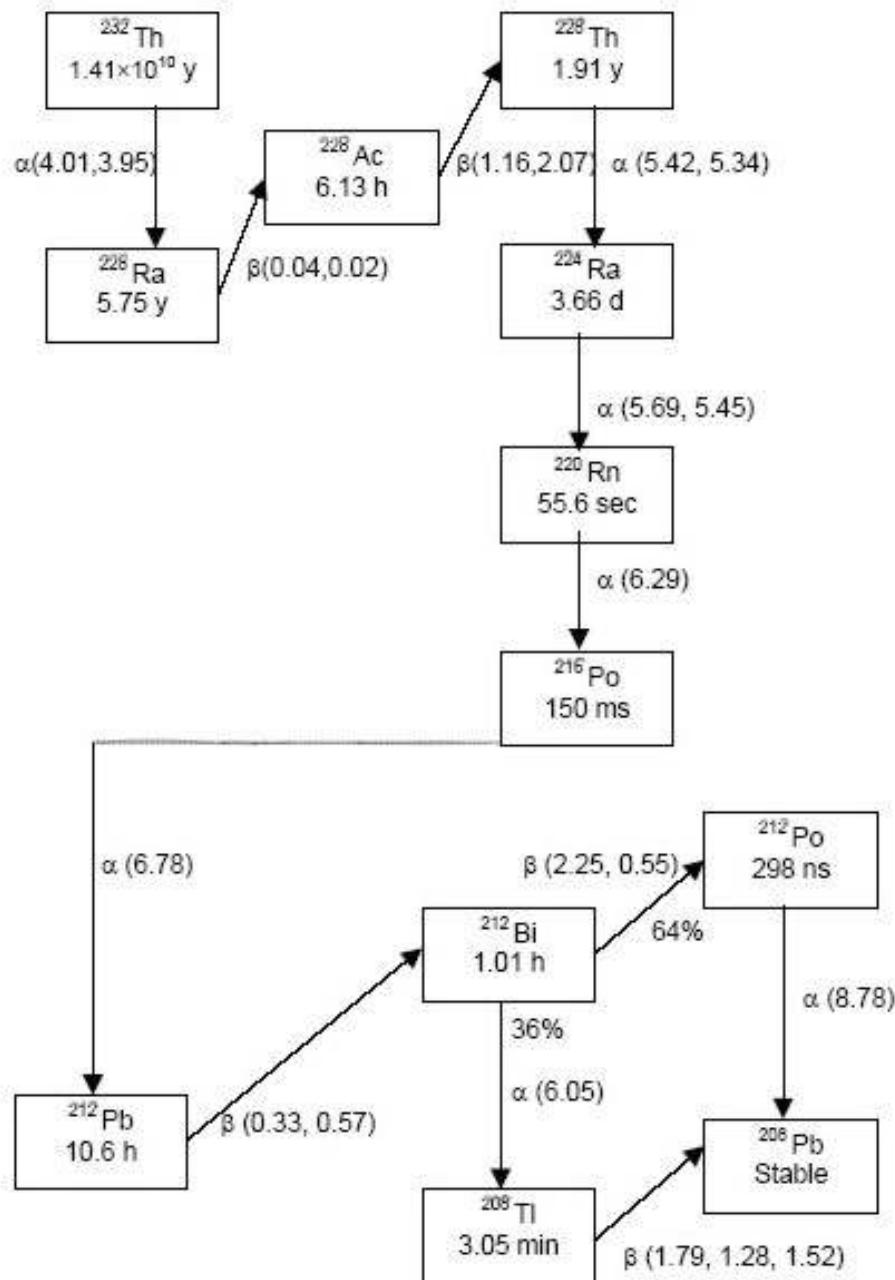
Slično radonu i toron se raspada kroz niz od pet transformacija do stabilnog izotopa olova ^{208}Pb , pri čemu se periodi poluraspada značajno razlikuju (slika 2.). Toron ima period poluraspada od samo 55.6 sekundi i emituje α -čestice energije 6.29 MeV pri transformaciji u polonijum ^{210}Po koji se za vreme od 0.15 sekundi transformiše u olovo ^{210}Pb , emitujući α -česticu energije 6.78 MeV. ^{210}Pb ima period poluraspada od 10.6 sati i transformiše se β -raspadom u bizmut ^{210}Bi sa periodom poluraspada od 60.6 minuta. ^{210}Bi se u razmeri 2:1 transformiše na dva načina:

1. β -raspadom na polonijum ^{210}Po
2. α -raspad, gde se stvara potomak izotopa talijuma ^{208}Tl , a emitovana α -čestica pri raspodu ima energiju od 6.05 MeV.

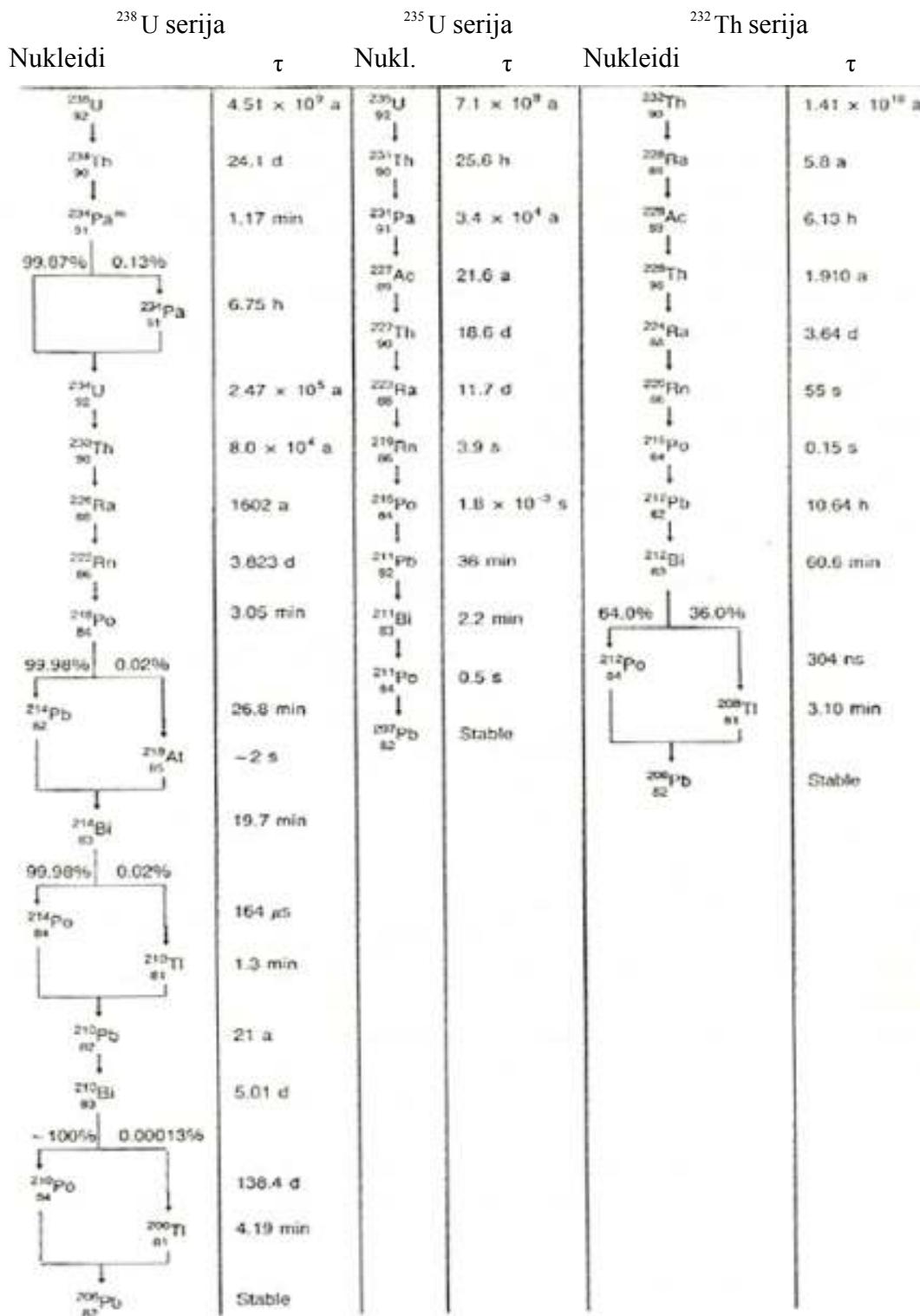
Iz ovih produkata ^{210}Po se raspada u olovo ^{208}Pb , emitujući α -česticu energije 8.78 MeV, dok se ^{208}Tl beta emisijom sa periodom poluraspada od 3 minuta transformiše takođe u ^{208}Pb .



Slika 1. Šematski prikaz ^{238}U radioaktivnog niza, prikazanog zajedno sa radonom i sa njegovim potomcima. Strelice koje upućuju na gore iz pravougaonika su beta raspadi, a koje idu na dole su alfa raspadi. Brojevi koji su u pravougaonicima su periodi poluraspada.



Slika 2. Šematski prikaz ^{232}Th radioaktivnog niza, prikazanog zajedno sa ^{220}Rn i sa njegovim potomcima. Cifre koje su pored raspada, stavljene u zagrade, odnose se na oslobođene energije pri alfa i beta raspada i imaju dimenzije MeV. Strelice koje upućuju na gore iz pravougaonika su beta raspadi, a koje idu na dole su alfa raspadi. Brojevi koji su u pravougaonima su periodi poluraspada.



Slika 3. Prikazano je u tabeli sva tri radioaktivna niza, zajedno sa svojim periodima poluraspada i verovatnoćama da se desi određeni prelaz.

2.3. Faktori koji utiču na koncentraciju radona u zatvorenim prostorijama

U unutrašnjosti prostorija radon dospeva procesom difuzije, a u maloj meri učestvuje proces advekcije. U ovom poglavlju će biti analizirano od kojih faktora zavisi proces difuzije radona, odnosno faktori koji utiču na koncentraciju radona u unutrašnjosti prostorija. Glavni faktor koji omogućava difuziju je poroznost zemljišta, odnosno materijala kroz koji radon difunduje. Treba napomenuti da u eksperimentalnom delu, pri računanju koeficijenta difuzije neće biti uzeto u obzir poroznost ispitivanog materijala. Faktor poroznosti materijala će biti direktno uračunat za „efektivni“ koeficijent difuzije D_{eff} .

2.3.1. Zemljište kao izvor radona i poroznost zemljišta

Dominantan izvor radona predstavlja zemljište duboko ispod stambenog objekta-podzemne stene koje u sebi sadrži uranijum i radijum, to su pored sopstvenih rudnih ležišta ili kao primese u rudama fosfata, olova i cinka i drugih sirovina, a u stenama se koncentrišu u kiselim magmatskim stenama, škriljcima i glinama. Statistički stene sadrže u sebi određenu koncentraciju radioaktivnih atoma, koji vrše radioaktivni raspad i na taj način nastaje između ostalih radioizotopa i radon. Radijum je predak radona i najveća količina radona u zemljištu nastaje upravo od radijuma ^{226}Ra , koji se nalazi u zemljištu vezan za magnezijum, kalcijum ili barijum. Radijum je široko rasprostranjen u zemljištu i može biti u ravnoteži sa uranom ^{238}U . Koncentracija radijuma varira od tipa zemljišta i mogućih kontaminenata iz spoljašnjosti. Radon do površine dospeva procesom difuzije kroz pore i šupljine u zemljištu, pri tome se vezuje za vazduh ili vodu dok je u podzemlju. Usled interakcije podzemnih voda sa stenama i rudama dolazi do prevodenja određenih radionukleida u mobilnu fazu i samim tim i do razdvajanja radionukleida zbog razlike u geohemijskim osobinama. Migraciju urana u površinskim uslovima ograničava prisustvo karbonatnih i fosfatnih jona, obrazovanje nerastvornih soli, vezivanje za organsku fazu i adsorpcija na mineralima glina. Proces difuzije u unutrašnjosti zemljišta je moguć usled razlike koncentracija radona, pri razmatranju vertikalne raspodele. Što je zemljište više porozno ono ima veći koeficijent difuzije, pa određene vrste zemljišta koje imaju višu vrednost koeficijenta difuzije više propuštaju radon, tako da se može reći da u zavisnosti od karakteristika samog zemljišta zavisi količina radona koji emanira iz zemljišta.

Konkretno, se misli na hemijski sastav, fizičke i vodno-mehaničke karakteristike zemljišta, ali najviše zavisi od propustljivosti-poroznosti zemljišta. Stene koje oslobođaju najveću koncentraciju radona su granitne i vulkanske stene, aluminijumske škriljci, a sedimentne stene sadrže niže koncentracije ovog gasa, ali su one i manje porozne pa zato vrše manju emisiju u spoljašnjost. Zanimljivo je napomenuti da kamenje (posmatrano kao celina) ima manji koeficijent emanacije radona od ostalih tipova zemljišta, jer zemljišta imaju daleko manje granulometrijske celine. Detaljnije analize pokazuju da između 10% i 50% ukupno nastalih jezgara radona u površinskom sloju zemljišta uspe da emanira u

atmosferu. Kad se radon nađe na površini dalje prostiranje radona kroz vazduh zavisi od meteoroloških faktora, kao što su temperatura, atmosferski pritisak i vетар, a ovi faktori su povezani i sa dnevnom satnicom.

Poroznost zemljišta se definiše prema odnosu veličine pore-pukotine u zemljištu u odnosu na veličinu samog posmatranog uzorka zemljišta. Postoje dve veoma bitne komponente: „teksturalni” prostor pore i „strukturni” prostor pore.

Teksturalni prostor pore se odnosi na način pakovanja čestica zemljišta, dok je *strukturni* prostor pore zavistan od količine vazduha koji se nalazi u uzorcima zemljišta. Uobičajene vrednosti za poroznost zemljišta se kreću između 0.25-0.5, gde različite varijante zemljišta variraju vrednost poroznosti, koja je bezdimenzionalna veličina. Van der Spoel je precizno definisao vrednost poroznosti tla.

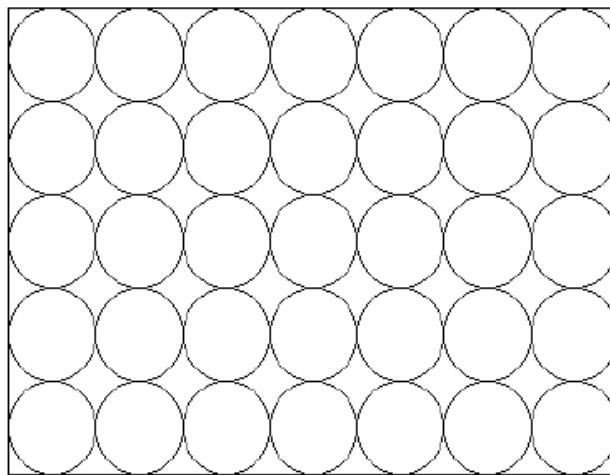
$$\delta V = \delta V_s + \delta V_w + \delta V_a \quad (2.3.1)$$

δV_s , δV_w i δV_a predstavljaju pojedine komponente poroznosti gde navedeni indeksi predstavljaju simbol za agregatno stanje, s-solid odnosno zemljište, w-voda poroznost za vodu i za a-vazduh. Za samu poroznost zemljišta može se izračunati preko relacije. $\delta V_p = \delta V - \delta V_s$ pa je ukupan koeficijent dat relacijom:

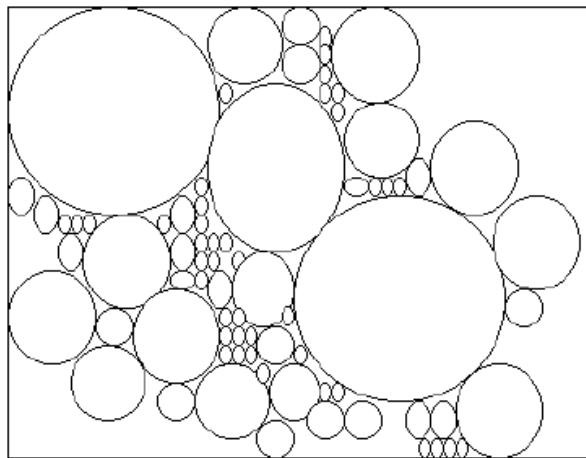
$$\varepsilon = \frac{\delta V_p}{\delta V} \quad (2.3.2)$$

Tako se sukcesivno može izračunati koeficijent poroznosti i za vazduh i za vodu. Zemljišta su klasifikovana u zavisnosti od distribucije veličine najmanjih delića-veličina granulacije. Ova distribucija čini strukturu i teksturu tla, koje direktno rukovodi transportu radona. Permeabilnost-poroznost zemljišta pri izučavanju procesa difuzije radona zavisi od stepena i veličina pora u zemljištu, što su pore veće i ako je učešće pora veće onda je stepen difuzije radona veća. Takođe je bitan faktor vlažnost zemljišta, gde mali stepen vlažnosti zemljišta omogućava veći stepen difuzije radona kroz zemljište. Ukoliko je viši stepen vlažnosti zemljišta, onda su pore popunjene sa vodom i onemogućen je intezivan proces difuzije radona kroz zemljište. U zavisnosti od rasporeda i veličina granulometrijskog sastava zavisi difuzija radona, gde ako su veći komadi prisutni sa ravnomernim rasporedom takav sastav omogućava veći stepen difuzije, prikazano na slici 4. Dok u slučaju kada je velika razlika u veličini granulometrijskog sastava i za nepravilan raspored, gde je prisutno gusto granulometrijsko pakovanje, u tom slučaju je mali stepen difuzije. Ovakav primer je predstavljen na slici 5.

Ovakav način tumačenja poroznosti kod zemljišta može se koristiti pri tumačenju poroznosti kod ispitivanih materijala, gde poroznost materijala zavisi od veličine unutrašnjosti pukotina i stepena homogenosti ispitivanog materijala, ali i uslova u kojima se vrši merenje koeficijenta difuzije radona.



Slika 4. Primer ravnomernog granulometrijskog pakovanja zemljišta, u kome je viši stepen difuzije radona-viši nivo poroznosti



Slika 5. Primer gustog granulometrijskog pakovanja zemljišta u kome je nizak stepen poroznosti-niži stepen difuzije radona

2.3.2. Faktori koji utiču na povećanje koncentracije radona

Putevi ulaza gasa radona u unutrašnjost zgrada su otvor i pukotine u betonskim pločama i blokovima, loše veze između zidova i ploča, loša izolacija između pojedinih građevinskih materijala, odvodne cevi, slivnici i drugo. Međutim, i pored povoljnih konstrukcionih zahvata na građevinskom objektu, ukoliko se ne upotrebe odgovarajući materijali koji imaju malu vrednost koeficijenta difuzije radona, taj gas lako prodire u unutrašnjost prostorija. Veoma bitan faktor koji utiče na koncentraciju radona u

unutrašnjosti prostorija su pored kvaliteta gradnje, tipa konstrukcije je i ventilacija celokupnog objekta, ili pojedinih prostorija. Radon može direktno iz zemlje da difunduje kroz temelje i podove u unutrašnjost prostorija, ili preko vazduha ulazi preko zidova i prozora u unutrašnjost objekata. Gradijent pritska pokreće vazduh, gde je prisutan stalno niži pritisak u zatvorenim prostorijama, a sa njim i radon kroz građevinske materijale, pa se može reći da radon iz zemlje i procesom advekcije ulazi u zatvorene prostorije. Koncentracija radona na otvorenom u odnosu na unutrašnjost objekata je daleko manja, gde je srednja vrednost koncentracija radona na otvorenom uz površinu zemlje $5-15 \frac{Bq}{m^3}$.

Koncentracije radona u zatvorenim prostorijama su daleko veće zbog „nagomilavanja“ radona usled stalnog dotoka iz zemljišta i građevinskih materijala, ili usled smanjenog stepena ventilacije.

Izvor radona u vazduhu zatvorenih prostorija su i sami **građevinski materijali** koji u sebi imaju povećanu koncentraciju radioaktivnih atoma, naročito radijuma, a takođe je izvor radona i voda koja se koristi u objektu. Veličina koja određuje jačinu ekshalacije radona iz građevinskih materijala je efektivna specifična aktivnost radijuma ^{226}Ra u unutrašnjosti građevinskih materijala $A_{seff}(R_a)$ i definiše se kao proizvod specifične aktivnosti radijuma $A_s(R_a)$ i koeficijenta emanancije radona η , što se izražava u obliku:

$$A_{seff}(R_a) = \eta \cdot A_s(R_a) \quad \frac{Bq}{kg} \quad (2.3.3)$$

Radioaktivnost građevinskog kamena zavisi od minerala koji su upotrebljeni za njegovu proizvodnju, kao što su granit, aluminijumski škriljac i vulkanski tuf imaju povišen sadržaj prirodnih radionukleida. Pesak i šljunak imaju specifičnu vrednost aktivnosti radijuma blisku srednjoj vrednosti za zemljišta. Koncentracija radijuma u građevinskim materijalima zavisi i od mesta proizvodnje sirovine. Primer je za skandinavske zemlje da imaju povećan sadržaj radijuma u odnosu na druge zemlje, zbog vrste zemljišta koje preovladavaju i to najviše vulkanski tuf i granit. Skoro je pravilo da novoformirane kopnene mase, nastale usled vulkanskih erupcija ili skorih složenih tektonskih poremećaja, imaju veću količinu radioaktivnosti u zemljištu, dok stare kopnene mase imaju manju radioaktivnost u zemljištu. Povećan sadržaj prirodnih radionukleida može nastati kao posledica korišćenja sekundarnih sirovina iz industrijskih postupaka, a to su materijali kao što su elektrofilterski pepeo-dobijen sagorevanjem uglja u termoelektranama ili sagorevanjem boksitne rude-šljaka i druge sekundarne sirovine koje se nalaze u prirodi ili se koriste kao konstituent građevinskog materijala. Upotreba, na primer, fosfatnog gipsa može da poveća sadržaj radona u zatvorenim prostorijama i to za faktor od 100. Koeficijent emanancije predstavlja koji deo radonovih potomaka, koji napuste komad materijala u kome su formirani, dospeju u atmosferu, a to zavisi od poroznosti materijala čija se vrednost kreće 1-30%. Samo oni atomi radona koji su nakon formiranja dospeli u šupljine koje postoje u materijalu mogu se difuzijom osloboditi u atmosferu. Materijali se dele prema načinu na koji su obrađeni kako bi dali odgovarajući građevinski materijal, gde visokotemperaturska obrada materijala smanjuje jačinu ekshalacije radona iz građevinskog materijala, jer pri termičkoj obradi dolazi do zbijanja mikročestica i do zatvaranja pukotina. Zato crvena cigla, pepeo, cement, šljaka imaju mali koeficijent emanancije η oko 1%, dok materijali koji tek treba da se termički obrade (silikatna cigla, šljunak, pesak) imaju daleko veći koeficijent emanancije oko 10%.

Površinske vode, prirodni gas i ugalj su **sekundarni izvori radona** u zatvorenim prostorijama, ali ti izvori nisu značajni. Njihov doprinos zavisi od koncentracije radona u njima, ali i od načina i obima njihovog korišćenja. Uzima se da oko 50% radona prisutnog u vodi se oslobodi pri njenom korišćenju u kupatilima i pri kuhanju. Koncentracija radona je različita od mesta do mesta. Najveće koncentracije su u oblastima, gde su bunari sa granitnom podlogom (do $630 \frac{Bq}{m^3}$), a najniža je u oblastima sa tekućim površinskim vodama (do $2 \frac{Bq}{m^3}$).

Jačina ventilacije (L) je faktor koji utiče na smanjenje koncentracije radona u zatvorenim prostorijama, a izražava se u broju izmena celokupnog vazduha u prostoriji u toku od 1h. Pri tome se vrši klasifikovanje faktora:

- infiltracije-nekontrolisani protok vazduha iz zatvorenih prostorija kroz otvore i šupljine u uslovima kada su prozori i vrata zatvoreni.
- prirodne ventilacije-provetravanje prostorija
- veštačke ventilacije-primena uređaja na povećanje ventilisanosti prostorija, koja nije preporučljiva ukoliko je propustljivost okolnog zemljišta veća od $10^{-10} m^2$ jer se snižava pritisak unutar prostorija.

Zgrade koje imaju jačinu ventilacije ispod 0.5 u toku 1h se smatraju loše ventilisanim, a vrednost iznad 1 je dobro ventilisana prostorija. Ako je vrednost iznad 1 onda je ventilacioni sistem takav da za 1h izazove izvlačenje (ubacivanje) celokupne zapremine vazduha iz unutrašnjosti prostorija, a taj vazduh zamenjuje vazduh iz spoljašnjosti. Merenja koncentracija radona u unutrašnjosti prostorija je u sprezi sa procenom stepena ventilacionog sistema. Veza koncentracije radona unutar i van zatvorenih prostorija, ventilacije i jačine ekshalacije (fluksa radona) može se predstaviti u analitičkoj formi u obliku:

$$C_{Rn} = \frac{(L \cdot C_{Rno} + J)}{\lambda + L} \quad \frac{Bq}{m^3} \quad (2.3.4)$$

- C_{Rn} -koncentracija radona u zatvorenoj prostoriji u ($\frac{Bq}{m^3}$)
- C_{Rno} -koncentracija radona na otvorenom prostoru u ($\frac{Bq}{m^3}$)
- L -jačina ventilacije u (1/s)
- J -jačina ekshalacije u ($\frac{Bq}{s \cdot m^2}$)
- λ -konstanta radioaktivnog raspada radona u (1/s)

Sumirajući analize vezane za procene koncentracije radona u zatvorenim prostorijama došlo se do srednje vrednosti, da je za nove građevinske objekte uobičajena koncentracija je od $200 \frac{Bq}{m^3}$ do $400 \frac{Bq}{m^3}$. Koncentracija radona u unutrašnjosti

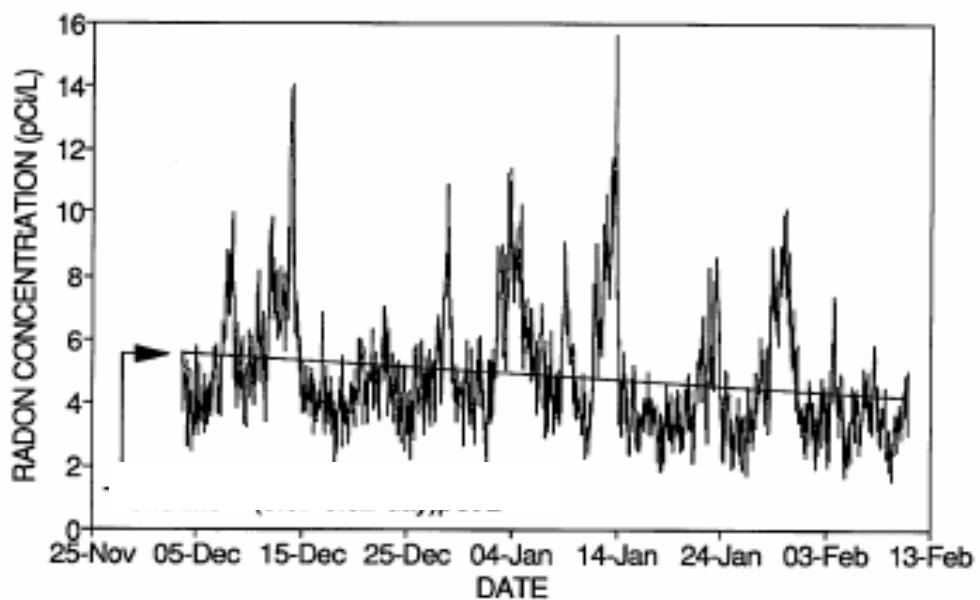
građevinskih objekata zavisi prvenstveno od zemljišta na kojem je izgrađen objekat, zato se koncentracije radona u zemljištu sistematski ispituju u celom svetu. Građevinski standard za izgradnju novih stanova i kuća je oko $100 \frac{Bq}{m^3}$ radona kao prosečni godišnji nivo. Za koncentraciju radona u unutrašnjosti prostorija od $200 \frac{Bq}{m^3}$ mogu se primenjivati jeftine sanacione mere pri izgradnji objekta, dok za koncentraciju od $600 \frac{Bq}{m^3}$ obavezna je primena skupih sanacionih mera, što podrazumeva primenu određenih materijala pri oblaganju unutrašnjosti prostorija i primenu ventilacionih sistema. U primeni mera zaštite unutrašnjosti građevinskih objekata koristi se princip da se postigne što manja koncentracija radona u unutrašnjosti objekta. Naravno, treba uklopiti i cenu i način izrade građevinskog objekta kako bi što manje propuštao radon u unutrašnjost prostorija, zato su potrebna opsežna istraživanja vezana za procenu koeficijenta difuzije koje se odnose na građevinske materijale. Poznavajući vrednosti koeficijenata difuzije za građevinske materijale može se odrediti debljina određenog materijala ili kombinacija različitih materijala različitih debljin koji efikasno sprečavaju difuziju radona u unutrašnjost objekta. Mere zaštite zavise od emanacije zemljišta na kojem se gradi objekat.

2.3.3. Visinska raspodela koncentracije radona

Analizirajući koncentraciju radona po vertikalnoj raspodeli, za građevinske objekte, najveća koncentracija radona se nalazi u podzemnim etažama zgrada, bilo da su u pitanju podrumi ili garaže. U prizemlju je manja koncentracija radona nego u podrumu, a takođe se može izmeriti izvesna manja količina radona i na prvom spratu. Kako se povećava visina koncentracija radona drastično opada, tako da na trećem i višim spratovima koncentracija je u granici greške mernih uređaja. Postoji nekoliko eksperimenata u svetu, sa detektorima radona velike preciznosti, koji su merili koncentracije radona na različitim spratovima i utvrđeno je da se na višim spratovima značajno menja koncentracija radona na svakih 18 spratova. Ovakva merenja koncentracije radona visoke preciznosti nisu uobičajena, ali sa naučnog aspekta su zanimljiva. Analiza vertikalne raspodele radona na višim spratovima, gde je utvrđena relevantna razlika vertikalne koncentracije radona za svakih 18 spratova, rađena je za oblakoder u Singapuru. Za ovu zgradu se smatra da je izvršena veoma dobra analiza i horizontalne i vertikalne raspodele radona u objektu i da su primenjene opsežne mere zaštite donjih etaža od difuzije radona. Za standardne metode merenja se uzima da na spratovima koji su iznad drugog sprata nema značajne koncentracije radona. Radon na više spratove takođe dospeva procesom difuzije kroz građevinski materijal između spratova, ali usled zadržavanja na nižim etažama dolazi do drastičnog smanjenja koncentracije na višim etažama. Zato je preporučljivo organizovati stambeni prostor na višim etažama, odnosno na drugom spratu ili na višim spratovima. Takođe treba napomenuti i značaj adekvatne međuspratne izolacije.

2.3.4. Vremenska zavisnost koncentracije radona

Vremenska zavisnost koncentracije radona u unutrašnjosti prostorija su vezane kako za promene godišnjeg doba, tako i za dnevne promene meteoroloških faktora: temperatura, pritisak i vlažnost. Direktno sezonske promene utiču na parametre temperature, pritiska i vlažnosti, a od ovih parametara zavisi koncentracija radona koji se zadržava nisko iznad zemljišta. Maksimum koncentracije radona treba očekivati u jesen ili na početku zime, jer je tada najviši vazdušni pritisak i nema puno pomeranja vazdušnih masa, dok se minimum koncentracije može očekivati u proleće. Dnevne varijacije koncentracije radona su takođe vezane za atmosferske promene, gde je oko ponoći i u ranim jutarnjim satima prisutan maksimum koncentracije radona zbog temperaturne inverzije koja sprečava vertikalno strujanje vazduha. Nakon svitanja dolazi do postepenog zagrevanja tla i do izdizanja vezduha sa površine tla, i tada dolazi do smanjenja koncentracije radona. Kasno popodne raste stabilnost atmosfere i to dovodi do porasta koncentracije radona.



Slika 6. Grafik vremenske zavisnosti koncentracije radona, sa jasno izraženim pikovima za odođena doba dana. Jasno se mogu videti kada dolazi do naglog povećanja koncentracije radona u zavisnosti od satnice i kako dolazi do opadanja koncentracije kako se bliži proleće

2.3.5. Uticaj radona i radonovih potomaka na čoveka

Uticaj radona i radonovih kratkoživećih potomaka na živ svet i načini merenja uticaja radona su napomenuti u poglavljima 2.1. i poglavlu 2.2., dok u ovom poglavlu biće napomenuti štetni efekti radioaktivnih aerosola i uopšte radona.

Radioaktivne aerosoli su fizičke komponente koje vrše radioaktivnu kontaminaciju disajnog sistema čoveka. Od bitnih karakteristika radioaktivnih aerosoli je njihova raspodela po dijametrima. Uveden je pojma relativna raspodela radioaktivnih aerosola, koja daje deo radioaktivnih aerosola sa određanim dijometrom i označava se:

$$\frac{\Delta C_j(d)}{C_j} = \frac{\Delta Z(d) \cdot \beta(d)}{Z} \quad (2.3.5)$$

$$C_j = \sum_{d=0}^{\infty} \Delta C(d) \quad (2.3.6)$$

U gornjim jednačima su korišćene oznake:

- d-dijametar aerosola jedinice su u m
- $\Delta C_j(d)$ - koncentracija radioaktivnih aerosola dijametra d koji nose j-ti radonov potomak, izražen je u m^{-3}
- Z-ukupna koncentracija aerosola, izražena je u m^{-3}
- C_j -ukupna koncentracija radioaktivnih aerosola koji nose j-ti radonov kratkoživeći potomak ($j=1,2,3$)
- $\beta(d)$ - koeficijent pripajanja i ovo je funkcija veličine aerosola. Vrednosti

koeficijenta su reda veličine $10^{-12} \frac{m^3}{s}$

Ukoliko uporedimo dijametre radioaktivnih aerosoli, može se zaključiti da su veći dijametri na otvorenim prostorijama nego u zatvorenim prostorijama. Veličine dijametara aerosoli koje su od 0.1nm do 10nm se najbolje talože u ljudskim plućima, a ukoliko su aerosoli većih dimenzija ove aerosoli ostaju u nosnoj duplji. Pored pripajanja potomaka u okviru aerosoli, postoji i obrnut proces, a to je odvajanje. Čestice ^{218}Po emituje alfa česticu pri čemu novonastalo jezgro doživljava uzmak. Ovaj uzmak je dovoljan da dođe do odvajanja atoma od aerosola. Verovatnoća da dođe do odvajanja je faktor uzmaka i on iznosi oko 0.81. Visoka vrednost faktora uzmaka nastaje, zato što je energija uzmaknutog jezgra za ^{214}Pb je 117 keV, a energija veze atoma u aerosoli je reda veličine eV.

Prijenjeni i neprijenjeni radonovi potomci se talože na površinama unutar zatvorenih prostorija, a takav proces taloženja je značajan mehanizam smanjivanja koncentracije radonovih potomaka u atmosferi zatvorenih prostorija. Jačina taloženja se dobija u $\frac{Bq}{s}$ i to je nataložena aktivnost u jedinici vremena u zatvorenoj prostoriji.

Zavisnost taloženja se može razmatrati u zavisnosti od različitih parametara, kao što su koncentracija aerosola, raspodela aerosola po veličinama, jačina ventilacije i drugi faktori. Zato je potrebno za merenje raznih uslova eksperimenata da se obezbede kontrolisani uslovi.

Kada se radon i njegovi kratkoživeći potomci, koji mogu biti slobodni ili pripojeni, udahnu zadržavaju se delimično u nosu, usnoj šupljini ili u gornjim delovima traheje. Doza u gornjem delu disajnog trakta je relativno mala, jer se alfa čestice slabije apsorbuju u gornjim delovima disajnih puteva, a doza u traheo-bronhijalnom delu je znatno veća. Odgovarajući odnosi apsorbovane doze zračenja je 95% u traheo-bronhijalnom delu, a samo 5% za gornje delove disajnih puteva, od važnih napomena je da se u roku od 15min aktivnost prenese na krv.

Bez obzira na mali domet α -čestica radonovih potomaka deponovanih u plućima su izuzetno opasne zbog velike moći jonizacije, gde α -čestice u vrlo kratkom roku ($10^{-9} s$) prolaze slojeve tkiva u plućima i izazivaju jonizaciju atoma ćelija tkiva. Svaka ćelija sadrži u sebi nekoliko milijardi atoma, dok je procenjeno da se sa svakom α -česticom jonizuje nekoliko desetina hiljada atoma. Takođe, jonizovan atom tokom $10^{-9} s$ formira slobodne radikale koji reaguju sa biološki značajnim molekulima i izazivaju posledice u obliku mutacija, hromozomskih aberacija, ćelijske smrti ili onkogenih transformacija. Alarmantno je da ove genetske promene mogu nastati i pri vrlo malim vrednostima primljenih doza, kao što je vrednost ozračivanja radonom od $37 \frac{Bq}{m^3 s}$ daje ćeliji bronhijalnog epitela dozu od $0.45 \mu Gy$, a srednja kancerogena doza iznosi samo $0.08 \mu Gy$. Promene na ćelijskom i molekularnom nivou su izazvane jonizujućim zračenjem znatno su izražene u ranim životnim fazama, zbog formiranja i rasta tkiva, zato je potrebno obratiti posebnu pažnju na sprečavanje kontaminacije radonom unutrašnjosti prostorija predškolskih i školskih ustanova, ali i bolnica.

Statističkom obradom uzroka smrtnosti u razvijenim industrijskim zemljama, došlo se do rezultata da od ukupne smrtnosti 2% do 6% učestvuje oboljenje plućnog kancera. Učestanost je drastično veća za pušače u odnosu na nepušače, za pušače plućni kancer je uzročnik smrtnosti u 10% slučajeva, dok je za nepušače oko 1%. Jedan deo plućnih kancera je izazvan radonom i njegovim kratkoživećim potomcima: za srednju vrednost koncentracije radonovih potomaka u atmosferi zatvorenih prostorija je $15 \frac{Bq}{m^3}$

(EEC) a procena je da oko 5% plućnih kancera izazvan radonovim potomcima, gde je procena da na populaciju Sjedinjenih Američkih Država od (240 miliona) da je radon uzročnik između 10000 i 20000 smrtnih slučajeva za jednu godinu. Kampanje koje se odnose na odvikavanje od pušenja i na bolju zaštitu unutrašnjosti objekata od radona, smanjuju ideo smrtnih slučaja prouzrokovani i uticajem radona, jer pušači udišući dim pored katrana, ugljendioksida i čadi udišu u pluća i radioaktivne čestice, uključujući i radon. Radioaktivne čestice su prisutne u listu duvana, jer biljka crpi minerale iz zemlje, pa i radioaktivne čestice prisutne u tim mineralima ili vodi, a preradom radioaktivni kontaminenti se ne oslobođaju iz duvana. Tako da se može izvesti zaključak da pušenje drastično povećava verovatnoću kontaminacije respiratornog sistema čoveka radioaktivnim česticama, gde radon ima veliki ideo i povećava mogućnost onkogenih transformacija u ćelijama ukoliko se razmatra samo uticaj radona kod pušača. Takođe i „pasivni pušači”-osobe koje dugo vremena provode u prostorijama gde se puši su izloženi riziku kontaminacije radona, jer pušači i to za značajan faktor povećavaju koncentraciju radona u unutrašnjosti prostorija. Nivo cirkulacije atmosfere u prostorijama gde se pušu je krucijalan za smanjenje nivoa radona.

2.4. Problem radona u niskofonskim laboratorijama

Radon predstavlja izuzetno veliku smetnju za niskofonska merenja, jer integralni doprinos radonovih linija fonu gama zračenja dostiže čak 50%. Za prisutne veće koncentracije radona jasno se uočavaju brojne linije iz postrandonskog niza (^{214}Bi , ^{214}Pb), a uticaj torona ^{220}Rn , člana niza torijuma ^{232}Th uglavnom se zanemaruje, zbog mnogo kraćeg vremena poluraspada (56s). Pri razmatranju ovog problema treba imati u vidu da je torijum izotopski obilniji od uranijuma u sastavu zemljišta. Zbog težnji da se što više smanji uticaj kosmičkog zračenja, lokacije za niskofonske laboratorije su obično pod zemljom, što povlači posledicu povećanja koncentracije radona u prostorijama laboratorije za niskofonska merenja. Pritisak vazduha u okolnom zemljištu podzemne laboratorije je nešto viši u odnosu na pritisak vazduha u samoj laboratoriji. Zato je potrebno vršiti stalno provetrvanje prostorija laboratorija za niskofonska merenja, ali je neophodno i izvršiti i neophodnu izolaciju tih laboratorija. Merenja koja određuju koeficijent difuzije radona kroz materijale omogućuje da se odaberu odgovarajući materijali određene debljine, kako bi što bolje sprečili ulazak radona u unutrašnjost prostorija laboratorija za niskofonska merenja.

Laboratorije za niskofonska merenja se moraju izolovati sa svih strana, podovi, plafon i zidovi moraju biti pravilno izolovani, a da ne bi došlo do akumulacije radona u unutrašnjosti neophodno je konstruisati poboljšan sistem ventilacije. Takođe je prisutan uticaj radona u laboratorijama gde se vrše eksperimenti za detekciju WIMP-ova i ostalih kandidata tamne materije. U ovim eksperimentima je glavni problem eliminacija fona raona koji kontaminiraju materijal detektora, a eksperimenti ove vrste zahtevaju dugo vreme i veliku preciznost zbog male verovatnoće dejstva WIMP-ova sa atomima detektora. Stari aparati za merenje koncentracije radona su: tečni scintilatori, CR39-trag detektori i ograničene strujne cevi-upotrebljeni u Gran Sasso podzemnim laboratorijama. Pri analizi koncentracije radona u izveštajima projekta ILIAS utvrđeno je da u podzemnim laboratorijama u ventiliranim prostorijama koncentracije variraju od 50 Bq/m^3 do 150 Bq/m^3 , dok u neventiliranim prostorijama i neventiliranim uglovima prostorija laboratorije koncentracija radona dostiže od 800 Bq/m^3 do 1000 Bq/m^3 .

Primer kontinualnog praćenja koncentracije radona u vazduhu na nivou od 1 mBq/m^3 gde je, konstruisan detektor tipa alfa-spektrometar, u eksperimentu BOREXINO, koji radi po principu elektrostatičkog prikupljanja radonovih potomaka. Osetljivost ovog detektora zavisi od efikasnosti prikupljanja radona, što zavisi od zagađenosti vazduha česticama aerosoli. Takođe se mogu koristiti i kriogeni detektori koji imaju dostignutu osetljivost od 12 mBq/m^3 . Željena osetljivost detekcije radona u vazduhu postignuta je u Super-Kamiokande eksperimentu u Japanu konstrukcijom alfa spektrometra koji radi po principu elektrostatičkog prikupljanja radonovih potomaka i merenja energije alfa raspada na PIN fotodiodi. Velika osetljivost se postiže upotrebom velike zapremine (70 dm^3) merne posude visoke radiočistoće. U drugim eksperimentima se često koriste detektori koji radi po principu detekcije energije alfa čestica radonovih potomaka-preko alfa spektrometara. Od merenih vrednosti srednjih koncentracija radona u unutrašnjim prostorijama podzemnih laboratorija, gde se vrše niskofonska merenja,

smatraju se da su prihvatljivi nivoi od 65 Bq/m^3 do 70 Bq/m^3 uzimajući u obzir procenu doprinosa rezidualnog radona za različite niskoenergetske spekture posmatranog radioaktivnog zračenja.

Kod brojnih eksperimenata niskofonskog merenja signale proizvode α -čestice niske energije u površinskom sloju detektora nastale emisijom nataloženih radonovih potomaka. Ako se ne preduzmu posebne mere predostrožnosti, radon iz vazduha difunduje u unutrašnjost zaštite niskofonskih sistema, gde će koncentracija radona biti slična onoj u laboratoriji, pošto je period poluraspada dug u poređenju sa vremenom razmene vazduha u zaštiti sa vazduhom prostorije.

Niskofonska merenja malih radioaktivnosti zahtevaju dugo vreme merenja, što zahteva vremensko praćenje koncentracije radona u unutrašnjosti prostorija laboratorija za niskofonska merenja tokom eksperimenta. Konstantnost fona gama zračenja se proverava praćenjem intenziteta postradonskih linija, ali i direktnim merenjem koncentracije radona. Takođe je potrebno izvršiti automatizaciju sistema provetrvanja unutrašnjosti laboratorija, prema koncentracijama radona u laboratoriji, gde se sistem ventilacije i nivo rada ventilatora vrši prema koncentraciji radona. Na taj način se rešava problem radona u unutrašnjosti laboratorija za niskofonska merenja, a samim tim što je laboratorija postavljena pod zemljom u velikoj meri se eliminiše uticaj kosmičkog zračenja.

Drugi metodi za smanjenje koncentracije radona su na primer kod spektrometarskih sistema malih zapremina sa zaštitom, koji eliminišu radon tako što se gasoviti N_2 koji nastaje ključanjem tečnog azota, koji inače služi za hlađenje detektora, sprovede u unutrašnjost zaštite. To daje dovoljno gasovitog azota da se obezbedi vazduh u okolini detektora tako da je bez radona.

2.4.1. Podzemna niskofonska laboratorija u Zemunu

U Srbiji se niskofonska laboratorija nalazi u okviru Instituta za fiziku u Zemunu, na 12m dubine, a ukupna površina unutrašnjosti laboratorije je 64 m^2 , dok je površina radnog dela 45 m^2 sa tri odvojene prostorije. Vrsta zemljišta, na izabranoj lokaciji koje je na desnoj obali Dunava, je lesno zemljište koji ima mali koeficijent difuzije radona, pa shodno tome se očekuje niži priliv radona u unutrašnjost prostorija u odnosu na drugačiji tip zemljišta. Pre izgradnje je precizno izmerena specifična aktivnost okolnog zemljišta i odabranog građevinskog materijala upotrebljenog u izgradnji laboratorije. Takođe je pre izgradnje laboratorije je izmerena varijacija koncentracija radona na lokaciji laboratorije simultano sa meteorološkim parametrima: pritiskom, relativnom vlažnošću i temperaturom vazduha. Merenja su vršena pomoću detektora tragova, a detaljna merenja pokazuju da ne postoji značajna razlika koncentracije radona u odnosu na razne vremenske periode. Zidovi laboratorije su od armiranog niskoaktivnog betona debljine 30 cm i u celini su hermetički prekriveni limom od aluminijuma koji su debljine oko 1 mm, kako bi se sprečila difuzija u unutrašnjost. Aluminijum je i u samom eksperimentu rađenim za ovaj diplomski rad je pokazao da ima malu vrednost difuzije radona, zato se

aluminijum smatra najboljim za oblaganje unutrašnjosti prostorija laboratorija za niskofonska merenja, sa relativnom niskom cenom i sa velikom mogućnošću obrade. Ipak, aluminijum ne može u potpunosti da spreči difuziju radona u unutrašnjost, a dalji metod eliminacije radona iz prostorija je poboljšani ventilacioni sistem. Laboratorija koristi višestepeni ventilacioni sistem koji u sebi sadrži filter za čestice prašine, zatim instalirani filter od aktivnog uglja koji se koristi za efikasnu adsorpciju radona iz vazduha. Empirijski je ova osobina aktivnog uglja takođe utvrđena. Dodatni stepen u ventilacionom sistemu razlikom u protoku upumpnog i ispumpnog vazduha unutar laboratorije postiže nadpritisak u odnosu na atmosferski od preko 2 mbar-a. Ovakva raspodela razlike pritisaka, gde je pritisak unutrašnjosti prostorije veći od atmosferskog pritiska u pukotinama zemljišta, a time se omogućava da se smanji proces difuzije radona usled razlike pritisaka kroz eventualne pukotine u aluminijumu.

Osnova održanja niskog stepena radona u unutrašnjosti laboratorije je dobar ventilacioni sistem, koji radi automatizovano u zavisnosti od koncentracije radona koja se stalno prati. Pri tome relativna koncentracija radona se smanjuje skoro desetostruko. Od velikog značaja je procena difuzije radona u unutrašnjost laboratorija za niskofonska merenja, kako bi se smanjio uticaj radona na detektore. Zato je potrebno što preciznije vršiti analizu koeficijenta difuzije za pojedine materijale u kontrolisanim uslovima, kako bi se upotrebili određeni materijali, koji su određene debljine da bi se što više sprečila difuzija radona u unutrašnjost laboratorija.

3. MERENJE KOEFICIJENTA DIFUZIJE KROZ RAZLIČITE GRAĐEVINSKE MATERIJALE

3.1. Teorijska osnova računanja

U ovom delu biće objašnjene osnovne matematičke relacije koje će biti upotrebljene za izračunavanje koeficijenta difuzije za slučaj postavljenog eksperimenta, ali će biti navedene formule i za druge slučajeve, kao što su emanacija radona iz zidova ili slučaj emanacije radona iz zemljišta i vode. Za proces transporta radona kroz materijale odgovorna su dva procesa: difuzija i advekcija.

3.1.1. Proces difuzije

Prepostavlja se da je građevinski materijal homogena i porozna sredina, da se transport radona kroz materijal odvija kroz sistem pora ispunjenih vazduhom. Matematičko izražavanje zahteva izvestan stepen aproksimacija, što će za svaki slučaj biti napomenuto. Glavni uslov pri izvođenju jednačina je da se problemi rešavaju kao jednodimenzionalni problem, gde je osnovna osa-z koja se odnosi na osu koja je normalna na površinu postavljenog materijala. Jednačine uzimaju u obzir činjenicu da se radon raspada i tokom merenja i tokom difuzionog procesa, tako da je uvažen priliv novih atoma radona. Najprostiji opis difuzije radona je da atomi radona kreću niz gradijent koncentracije. Ovakav način difuzije opisuje Fikov zakon, koji povezuje gradijent koncentracije sa fluksom radona.

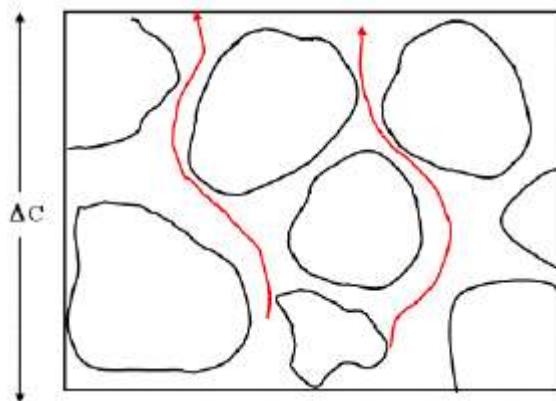
$$J_d = -D_e \frac{\partial C}{\partial z} \quad (3.1.1)$$

J_d -fluks radona izražen u $\frac{Bq}{m^2 s}$

D_e -koeficijent difuzije izražen u $\frac{m^2}{s}$

$\frac{\partial C}{\partial z}$ -gradijent koncentracije duž pravca z izražen u $\frac{Bq}{m^4}$

Negativan predznak ispred difuzionog koeficijenta odnosi se na činjenicu da se difuzija vrši u pravcu smanjenja koncentracije. D_e se može navesti kao efektivan koeficijent difuzije, u koji je uračunat efekat poroznosti materijala. Tipične vrednosti koeficijenta difuzije radona za vazduh je oko $1.2 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$, što se može koristiti kao početna vrednost za iterativni postupak računanja koeficijenta difuzije radona u eksperimentu, a može se uzeti i niža vrednost npr. $1 \cdot 10^{-7} m^2/s$.



Slika 7. Transport radona usled procesa difuzije. Pomeranje radona se vrši uz pravac smanjenja koncentracije.

3.1.2 Proces advekcije

S druge strane, transport radona kroz materijale putem advekcije nastaje usled protoka vazduha kroz porozni materijal, koji u sebi sadrži radon. Ovaj proces je uzrokovani razlikom pritisaka i ova pojava se smatra da je glavni razlog pomeranja radona u zemljištu ispod građevinskih objekata. Radon putuje sve do građevinskih materijala, gde dalje procesom difuzije ulazi u unutrašnjost građevinskih objekata. Studije koje su izveli Van der Spoel utvrđili su da razlika u pritiscima izaziva male promene u emananciji radona iz materijala. Ipak, jedino ukoliko su razlike pritisaka daleko veće nego u većini ispitivanih slučajeva moramo uzeti u obzir i proces advekcije, što se tiče eksperimenta vezanog za ovaj diplomski rad proces advekcije se u potpunosti zanemaruje, pošto je izuzetno niska vrednost gradijenta pritiska iznad i ispod ispitivanog materijala. Tako da je advekcija proces koji treba napomenuti, ali nema velikog značaja na celokupan proces transporta radona kroz materiju, ali uzimanjem u obzir i proces advekcije dodatno bi zakomplikovalo računanje vrednosti koeficijenta difuzije.

Proces advekcije se opisuje pomoću Darsijevog zakona, gde je za jednodimenzionalni slučaj transporta radona kroz zemljište tumačen da je nastao usled razlike pritisaka koji vlada između vazduha u porama zemljišta i spoljašnjeg vazduha.

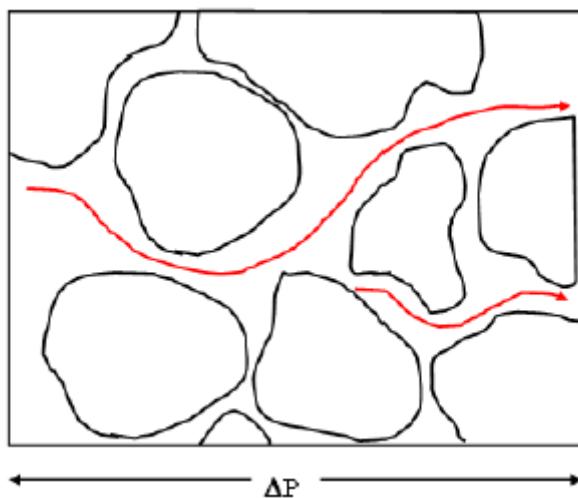
$$v = -\frac{k}{\eta} \frac{dP}{dz} \quad (3.1.2)$$

v - brzina protoka radona izraženih u $\frac{m}{s}$

k - propustljivost medijuma izraženog u m^2

η - dinamička viskoznost vazduha na $10^\circ C$ izraženog u $\frac{Ns}{m^2}$

$\frac{dP}{dz}$ - gradijent pritiska duž sloja debljine z , izražen u $\frac{Pa}{m}$



Slika 8. Šematski prikaz transporta radona kroz materijal procesom advekcije, gde se prokok vrši u pravcu smanjenja pritiska radona.

3.1.3 Koncentracija radona

Jednačina koncentracije radona, izražena preko Fikovog zakona, računat za poroznu sredinu predstavljen u obliku jednodimenzionog slučaja (duž z-ose) i koji zavisi od vremena, dat je opštim oblikom:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D_e}{\varepsilon} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial(vC)}{\partial z} - \lambda C + \phi \quad (3.1.3)$$

C -koncentracija radona ^{222}Rn u sistemu pora (u unutrašnjosti materijala čija se difuzija ispituje) izražen je u $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$

- t – posmatrano vreme merenja izraženog u s
- ε -poroznost (odnos zapremine pore prema celokupnoj zapremini)
- λ -konstanta radioaktivnog raspada ^{222}Rn izraženog u s^{-1}
- ϕ -broj atoma ^{222}Rn nastalih u jedinici vremena, u jediničnoj zapremini pore materijala izraženog u $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \text{s}}$

U većini slučajeva se uzima da se posmatra stacionarno stanje, što predstavlja značajnu aproksimaciju. Pri uvođenju stacionarnosti podrazumeva se da se prvi izvod koncentracije po vremenu ne menja-brzina promene koncentracije je jednaka nuli $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$

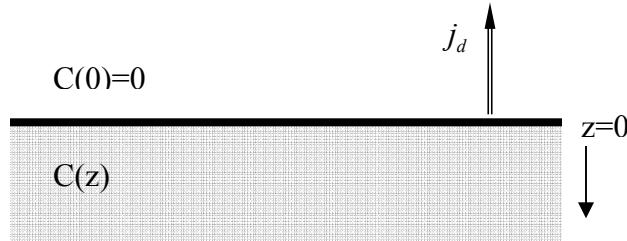
Upotreboom ovog uslova dobija se jednostavnija jednačina u odnosu na relaciju 3.1.3 za koncentraciju.

$$\frac{D_e}{\varepsilon} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial(vC)}{\partial z} - \lambda C + \phi = 0 \quad (3.1.4)$$

U zavisnosti od graničnih slučajeva, koje nameću pojedini modeli, zavise i rešenja ove diferencijalne jednačine drugog reda. U nastavku ovog poglavlja biće predstavljeni elementarni modeli praćenja koncentracije radona sa matematičkim relacijama.

3.1.4 Ekshalacija radona iz zemljišta u otvoren prostor

Razmatranje tla sa ravnomernom raspodelom radijuma, koja je proporcionalna brzini produkcije radona ϕ . Na graničnoj površini je koncentracija radona C jednaka nuli, pri prirodnoj cirkulaciji vazduha. Ovakav slučaj je dat formulom:



Slika 9. Ekshalacija zemljišta u otvoren prostor

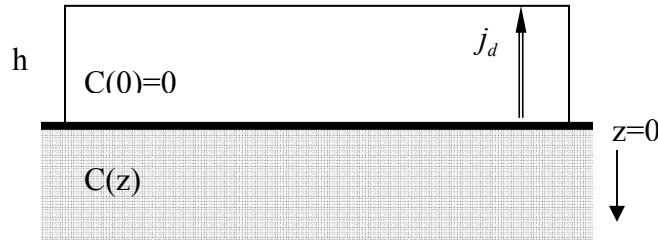
$$C(z) = \phi \cdot \left(1 - e^{-\frac{z}{l}} \right) \cdot \lambda^{-1} \quad (3.1.5)$$

$$\text{a fluks radona iz tla iznosi: } J_d = -D_e \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=0} = \phi \cdot \sqrt{\frac{D_e \cdot \varepsilon}{\lambda}} = \phi \cdot \varepsilon \cdot l \quad (3.1.6)$$

pri tome je izraz $l = \sqrt{\frac{D_e}{\lambda}}$ - difuziona dužina radona, izražena u m

3.1.5 Ekshalacija iz zemljišta u zatvoren prostor:

U ovom slučaju se razmatra koncentracija radona u tlu i fluks radona iz zemljišta u zatvoreni prostor, a predpostavka je da su ostali parametri identični parametrima u slučaju 1.

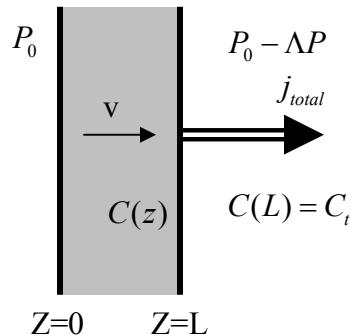


Slika 10. Ekshalacija iz zemljišta u zatvoren prostor

$$C(z) = \frac{\phi}{\lambda} \cdot \left(1 - \frac{e^{\frac{z}{l}}}{1 + \frac{\varepsilon \cdot l}{h}} \right) \quad \text{dok je fluks: } J_d = \varepsilon \cdot \phi \cdot l \cdot (1 + \varepsilon \cdot l \cdot h^{-1})^{-1} \quad (3.1.7)$$

3.1.6 Uticaj Darsijevog toka na ekshalaciju radona iz ploče

Ovaj slučaj razmatra koncentraciju i fluks radona kroz ploču sa uniformnom raspodelom radijuma-226, gde su koncentracije radona levo i desno od ploče konstante i iznose C_s i 0 respektabilno. Razlika pritisaka sa jedne i druge strane ploče je takođe konstantna.



Slika 11. Uticaj Darsijevog toka na ekshalaciju radona iz ploče

Za ovakvu postavku problema upotrebom izvođenja diferencijalnih jednačina dobija se izraz funkcije za raspodelu koncentracije radona u zavisnosti od debljine ploče:

$$C(z) = \frac{\phi}{\lambda} \cdot \left(1 - \frac{e^{\frac{v \cdot z}{2 \cdot D_e}} \cdot sh\left(\frac{L-z}{\Lambda}\right) + e^{\frac{-v \cdot (L-z)}{2 \cdot D_e}} \cdot sh\left(\frac{z}{\Lambda}\right)}{sh\left(\frac{L}{\Lambda}\right)} \right) + C_s \cdot e^{\frac{v \cdot z}{2 \cdot D_e}} \cdot \left(\frac{sh\left(\frac{L-z}{\Lambda}\right)}{sh\left(\frac{L}{\Lambda}\right)} \right) \quad (3.1.8)$$

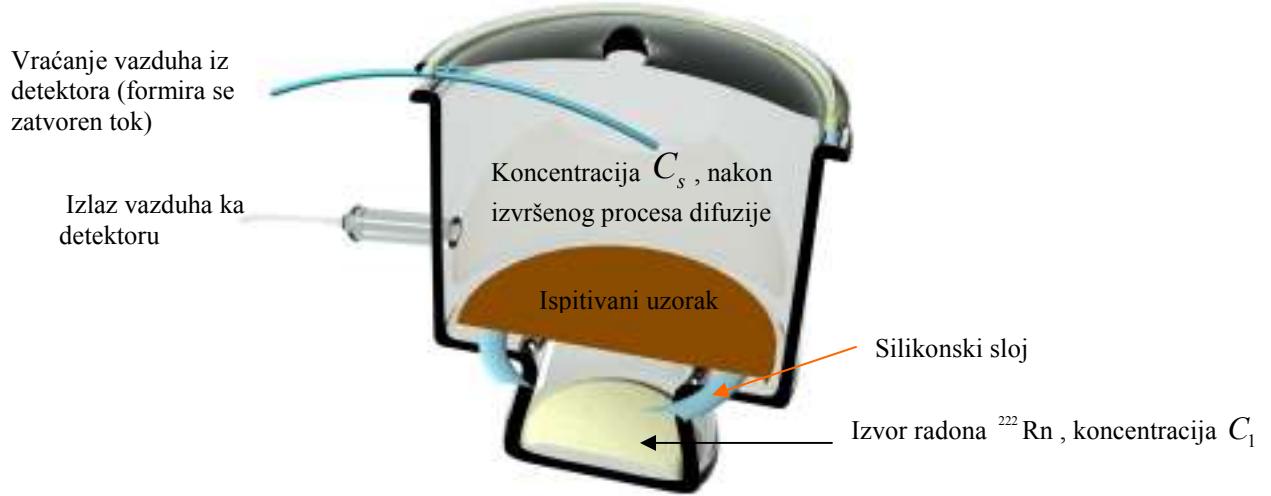
dok se totalni fluks dobija u obliku:

$$J_{total} = \left. \left(-D_e \cdot \frac{dC}{dz} + v \cdot C \right) \right|_{z=L} = \frac{\phi}{\lambda} \cdot \left(\frac{v}{2} + \frac{D_e ch\left(\frac{L}{\Lambda}\right) - e^{\frac{v \cdot L}{2 \cdot D_e}}}{\Lambda \cdot sh\left(\frac{L}{\Lambda}\right)} \right) + C_s \cdot \frac{D_e \cdot e^{\frac{v \cdot L}{2 \cdot D_e}}}{\Lambda \cdot sh\left(\frac{L}{\Lambda}\right)} \quad (3.1.9)$$

- C_s -konstantna koncentracija radona sa leve strane ploče
- L-debljina ploče
- Λ -modifikovana dužina difuzije $\Lambda^{-1} = \sqrt{\frac{v^2}{4 \cdot D_e^2 + L^2}}$

3.1.7 Difuzija radona kroz materijal određene debljine

Ovaj model se javlja u **eksperimentu** koji objašnjava ovaj diplomski rad. Koristeći pređašnje navedene slučajeve razmatranja difuzije radona dolazimo do osnovnog izraza za difuziju radona kroz horizontalno postavljenu prepreku. Smatra se da je materijal homogen, ali će biti napomenuto zašto određeni materijal vrši manju, odnosno veću difuziju radona. Koeficijenti poroznosti biće uračunati u koeficijentu difuzije D_e . Šematski se može postaviti problem.



Slika 12. Šematski princip metode merenja u eksperimentu za merenje koeficijenta difuzije

Postavka eksperimenta je bazirana na merenju koncentracije radona u komori koja je iznad materijala čiji se koeficijent difuzije ispituje. Važi da se radon iz donje komore, sa visokom koncentracijom prenosi u gornju komoru u kojoj je manja količina radona. Što se tiče matematičkog izvođenja, koristi se uprošćena diferencijalna formula u odnosu na formulu za koncentraciju radona (3.1.3). Dakle, u pitanju je jednodimenzionalni slučaj, gde se još uzima aproksimacija da je vremenski nezavisan slučaj i u izvođenju je u potpunosti zanemaren proces advekcije. Izvođenjem jednačine (3.1.3) dobija se oblik:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D_e \cdot \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} - \lambda \cdot C(x,t) \quad (3.1.10)$$

Za slučaj koji je vremenski nezavisan rešenje diferencijalne jednačine (3.1.10) je:

$$C(x) = \frac{[(C_s - C_1 e^{-d/l})e^{x/l} + (C_1 e^{d/l} - C_s)e^{-x/l}]}{2 \cdot \sinh(\frac{d}{l})} \quad (3.1.11)$$

$C(x)$ - koncentracija koji zavisi od parametra (x)

C_1 - koncentracija radona u rezervoaru ispod materijala (saturaciona koncentracija

pre difuzije) $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$

C_s - saturaciona koncentracija radona nakon izvršene difuzije $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$

d - debljina materijala izražena u m

$l = \sqrt{\frac{D_e}{\lambda}}$ - difuziona dužina radona, izražena u m

Ova jednačina se kombinuje sa Fikovim zakonom za difuziju (relacija 3.1.1) gde se izvođenjem dobija oblik pomoću koga se direktno računa koeficijent difuzije:

$$D_e = \frac{J_d \cdot l \cdot \sinh(d/l)}{C_1 - C_s \cdot \cosh(d/l)} \quad \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad (3.1.12)$$

Zamenom difuzione dužine radona - l u jednačinu, dobija se smernica za rešavanje koeficijenta difuzije.

$$D_e = \frac{J_d \cdot \sqrt{\frac{D_e}{\lambda}} \cdot \sinh(d / \sqrt{\frac{D_e}{\lambda}})}{C_1 - C_s \cdot \cosh(d / \sqrt{\frac{D_e}{\lambda}})} \quad \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad (3.1.13)$$

Pošto se D_e nalazi i u \sinh , u \cosh i na levoj i na desnoj strani relacije 3.1.13 očigledno je da je potrebno izvršiti iterativni postupak za rešavanje D_e , gde se može uzeti za početnu vrednost proveren koeficijent difuzije za vazduh ili nižu vrednost, pa određenim ponavljanjem procesa iteracije dobija se tačna vrednost koeficijenta difuzije.

D_e -je računat prema odgovarajućoj debljini materijala d. Međutim, fluks radona J_d - predstavlja problem pri izračunavanju.

Kao aproksimativna formula za računanje fluksa može se uzeti oblik:

$$J_d = \frac{C_s \cdot V}{t_s \cdot S} \quad (3.1.14)$$

Dimenziona analiza ovako formulisanog fluksa je: $\left[\frac{\frac{Bq}{m^3} \cdot m^3}{m^2 \cdot s} = \frac{Bq}{m^2 \cdot s} \right]$

C_s - koncentracija radona pri dostizanju saturacije nakon izvršene difuzije

V - zapremina gornjeg dela eksikatorske posude, u kojoj se nalaze čestice radona koje su prodifundovale kroz materijal

t_s - vreme dostizanja saturacije (od zatvaranja eksikatora, pa sve do dostizanja koncentracije saturacije)

S - površina kroz koju radon vrši difuziju (površina graničnog papira između dela eksikatora u kome je cirkonijum i materijala čiji se koeficijent ispituje)

Posle ubacivanja i oblika za fluks dobijamo konačnu relaciju za difuziju radona:

$$D_{el} = \frac{\frac{C_s \cdot V}{t_s \cdot S} \cdot \sqrt{\frac{D_e}{\lambda}} \cdot \sinh(d / \sqrt{\frac{D_e}{\lambda}})}{C_1 - C_s \cdot \cosh(d / \sqrt{\frac{D_e}{\lambda}})} \quad \frac{m^2}{s} \quad (3.1.15)$$

Ova relacija zahteva izvođenje iterativnog postupka pomoću programa Mathematica 5.0, gde se za svaki slučaj izvodi deset iteracija, a proizvoljno uzeta početna vrednost za iterativni postupak može biti $1 \cdot 10^{-7} m^2 / s$.

Druga relacija pomoću koje izračunavamo koeficijent difuzije radona zasniva se na aproksimaciji za stacionaran slučaj difuzije radona kroz ispitivani materijal, a može se izvesti preko Fikovog zakona za jednodimenzionalni slučaj, po z-osi:

$$J_d = -D_e \cdot \frac{dC}{dz} \quad \frac{Bq}{m^2 s}$$

U slučaju stacionarnog stanja u materijalu ne postoji izvor i ponor radona i uzima se da postoji konstantan gradijent koncentracije radona po z-osi, pa možemo pisati :

$$\frac{dC}{dz} = \frac{C_2 - C_1}{d},$$

gde je d debljina ispitivanog materijala, a C_2 i C_1 koncentracije Rn sa jedne, odnosno druge strane materijala.

Zamenom u Fikov zakon (relacija 3.1.1) dobija se novi izraz za fluks radona kroz ispitivani materijal.

$$J_d = -D_e \cdot \frac{C_2 - C_1}{d} \frac{Bq}{m^2 s}$$

U skladu sa eksperimentalnom postavkom, potrebno je koncentracije radona izraziti na sledeći način : $C_2 = C_s$ - saturaciona koncentracija iznad materijala određene debljine, dok je C_1 koncentracija radona ispod ispitivanog materijala. Zamenom u predhodnu jednačinu dobija se izraz:

$$J_d = -D_e \cdot \frac{C_s - C_1}{d} \frac{Bq}{m^2 s} \quad (3.1.16)$$

U ovoj uprošćenoj formuli nije potrebno da se vrši iterativni postupak. J_d -fluks se računa prema utvrđenoj formuli (3.1.14). U formuli se javlja veličina C_1 -predstavlja saturacionu koncentraciju radona u nekom trenutku, pošto je radon izvršio difundovanje kroz ispitivani materijal. Pri zameni fluksa u ovakav oblik uprošćene relacije, (relacija 3.1.14) i izvođenjem dobija se druga relacija za računanje koeficijenta difuzije radona:

$$D_{e2} = \frac{C_s \cdot V \cdot d}{t_s \cdot S \cdot (C_1 - C_s)} \frac{m^2}{s} \quad (3.1.17)$$

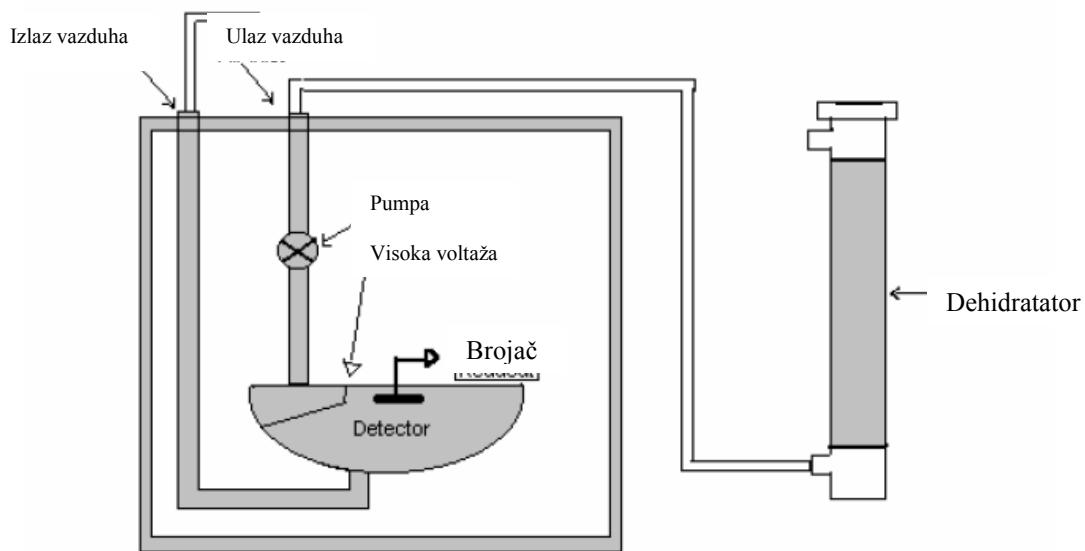
Ova relacija ne zahteva izvođenje iterativnog postupka i daleko je jednostavnija nego relacija 3.1.15, te se preko ove relacije može vršiti procena mernih nesigurnosti kod parametara C_s i C_1 . Potrebno je poznavati vrednosti saturacionih koncentracija radona, pre i nakon procesa difuzije.

3.2 Opis eksperimentalne aparature

3.2.1. Alfa spektrometrijska metoda - RAD7 detektor

RAD 7 detektor je tip alfa-spektrometra. Alfa spektrometrijska metoda je tehnika koja omogućuje stalno praćenje koncentracije radona u vazduhu, a samim tim i praćenje varijacije nivoa radona sa vremenom. U zavisnosti od mernih kompleta-uređaja koji prate detekcionu uređaj moguće je koristiti ovu metodu za određivanje koncentracije radona u vodi i u zemljisu. Prednost ove metode je mogućnost elektronskog razdvajanja energije svake emitovane α -čestice, a tako se može odrediti od kog izotopa (^{218}Po , ^{214}Po i drugih izotopa) potiče detektovana alfa-čestica. Po mogućnosti razdvajanja moguće je pomoći alfa spektrometrijske metode razdvojiti „stari” od „novog” radona, radon od torona, signal od šuma, a još jedna pogodnost ove metode je ekstremnost nizak i stabilan fon. Detektori alfa čestica su najčešće poluprovodnički materijali i to obično silicijum u kojima se energija upadnog alfa zračenja direktno pretvara u električni signal. Ukoliko se posmatra samo pik koji potiče od izuzetno kratkoživećih potomaka (npr. ^{218}Po sa periodom poluraspada od 3 min), a ignoruji se potomci sa relativno dugim periodom poluraspada koji zaostaju od predhodnih merenja (^{214}Po , perioda poluraspada 27 min),

ovi detektori mogu da se koriste i za brzu ocenu koncentracije radona na odgovarajućoj lokaciji. Ukoliko se posmatra samo konstrukcija građevinskog objekta, gde se vrše merenja, moguće je odrediti tačnu lokaciju šupljine u betonu poda ili pukotina u izolaciji gde dolazi do prodiranja radona u unutrašnjost putem procesa difuzije.



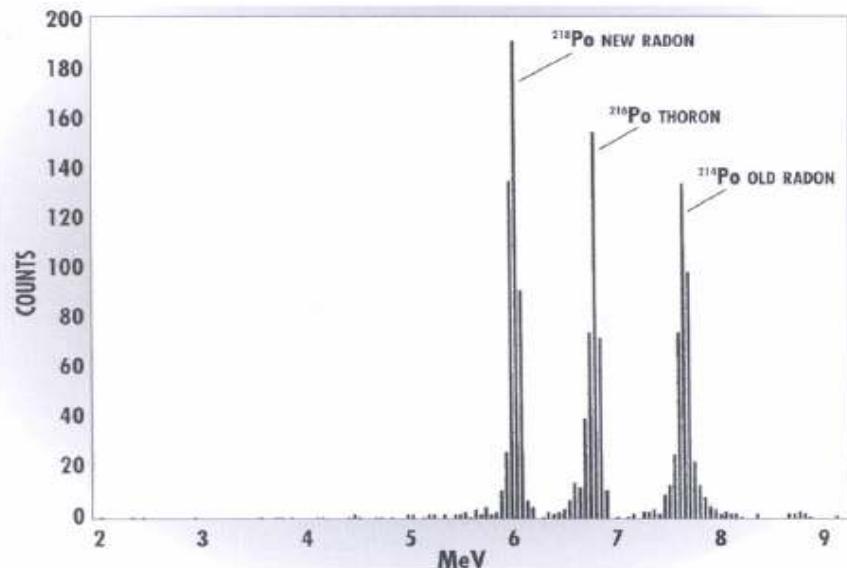
Slika 13. Slika i šematski prikaz principa rada RAD7 Durridge Company detektora radona

Na slici 13. prikazana je unutrašnja zapremina jednog mernog kompleta koji određuje koncentraciju radona alfa-spektrometarskom metodom (RAD7 proizvođača Durridge Company). Unutar uređaja je polusfera zapremine 0.7 dm^3 koja je obložena sa unutrašnje strane materijalom koji je dobar električni provodnik. U centru polusfere nalazi se ravan silicijumski alfa detektor koji je jonski implantiran. Visoki napon održava

razliku potencijala između unutrašnjeg provodnika i detektora od 2000V do 2500V, stvarajući na taj način električno polje unutar zapremeće celije. Električno polje usmerava pozitivno nanelektrisane čestice ka površini detektora. Suv vazduh se provodi kroz unutrašnju mernu komoru, gde se nalazi detektor, sa brzinom protoka od $1 \text{ dm}^3 / \text{min}$. Provođenje suvog vazduha zavisi od kapaciteta rada automatske pumpe koja je ugrađena u uređaj i ona je fiksna za ovaj model RAD7 proizvedenog od strane Durridge Company. Rad pumpe je prilagođena zadatim parametrima merenja koje zadaje korisnik. Na ulasku u mernu komoru postoji filter koji sprečava ulaz radonovih potomaka, što znači da će rezultat merenja predstavljati koncentraciju radona u vazduhu, a ne i koncentraciju njegovih potomaka. Jezgra $^{222}\text{Rn}_{86}$ koja se nalaze u vazduhu unutar merne komore se raspadaju na jezgra ^{218}Po koja su pozitivno nanelektrisani joni. Usled dejstva polja jezgra ^{218}Po se ubrzavaju ka detektoru na čijoj se površini talože. Alfa čestice nastale raspadom kratkoživećeg ^{218}Po sa verovatnoćom od 50% ulaze u aktivnu zapreminu detektora i proizvode električni signal čiji je intenzitet proporcionalan energiji upadne alfa čestice sa drugim iznosom energije. Alfa čestice energije 5.49 MeV-a nastale raspadom ^{222}Rn ne registruju se u vazduhu, već na površini detektora. Atom radona je hemijski inertan i električno neutralan te ne može biti privučen na površinu detektora.

Kod ovakvih uređaja korisnik može, po želji da odabere način rada instrumenta, dužinu trajanja merenja, broj ciklusa, izgled izveštaja, režim rada pumpe. Nakon završenog ciklusa merenja podaci koji se dobijaju u vidu štampanog izvaštaja su sledeći:

- srednja koncentracija aktivnosti radona(torona) za dati period merenja
- standardna devijacija srednje koncentracije
- datum i tačno vreme završetka merenja
- temperatura i vlažnost unutar merne komore
- stanje napunjenoosti baterija
- ukupan odbroj
- odbroj po energetskim prozorima i procentualni deo u ukupnom odbroju
- histogram srednjih koncentracija po zadatim ciklusima
- kumulativan alfa spektar



Slika 14. Prikaz idealnog visokorezolucijskog alfa-spektra

Ukoliko se na merenim lokacijama pored radona detektuje i toron, tada se kao rezultat merenja dobijaju kombinovani spektri i sam spektrometar prilikom izračunavanja radonske koncentracije uzima u obzir u doprinos torona radonskim linijama kako bi se korigovao odbroj koji potiče od ^{212}Bi .

Patološki spektri koji nastaju usled elektronskog šuma, neispravnog rada spektrometra, vibracija, previsokih temperatura ili oštećenja same površine detektor-a se lako mogu uočiti i razlikovati od regularnih alfa spektara jer dolazi do pomeranja linija, preteranog širenja ili razmazivanja linija, povećanog odbroja u repu linija ili izostanka odbroja pri dužem vremenskom periodu merenja. Pojava pika na 5.3 MeV-a usled taloženja ^{210}Pb na površini detektor-a, nakon nekoliko godina regularnog rada spektrometra ili nakon izlaganja veoma visokim radonskim nivoima, ne predstavljaju problem pošto se pik nalazi van energetskog prozora od interesa i ne doprinosi fonu. Za dovoljno precizna ponovna merenja niskih koncentracija neophodno je samo pustiti pumpu da radi na prazno u vremenskom roku od 10-tak min. Time se eliminišu zaostale čestice radona iz predhodnih merenja.

Za merenje koncentracije radona u površinskim slojevima zemljišta postoji poseban dodatak mernom kompletu, a to je zašiljena metalna cev dužine 40cm sa prorezima na vrhu koji su predviđeni za difuziju radona iz zemljišta. Radon se detektuje preko usisavanja vazduha iz zemljišta (u eksperimentu se izvlači vazduh iz eksikatora) koje najpre prolazi kroz komoru za sušenje, koja sadrži C_aS za koji se vezuje vodena para iz vazduha koji se uvlači, a zatim se uvlači u mernu komoru.

Tačna vrednost efikasnosti izdvajanja radona zavisi i od temperature okoline, ali je gotovo uvek veća od 90%. U toku rada sa ovakvim sistemom neophodno je konstantno pratiti i proveravati relativnu vlažnost vazduha unutar merne komore i potrebno je snižavati ispod 10% . Za slučaj kada je vlažnost vazduha koji veća od 10% smatra se da

merenja nisu izvršena pod realnim uslovima, te se merna komora mora ostaviti da radi u prazno, kako bi se relativna vlažnost smanjila do prihvatljivog nivoa.

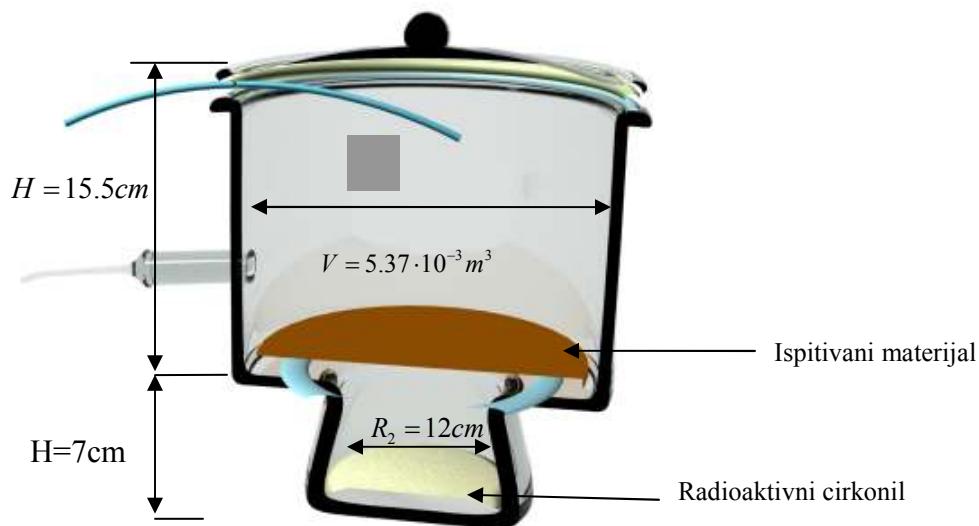
Pri računanju treba obratiti pažnju na korekciju jer treba uskladiti sa merenjem da je period poluraspada radona 3.824 dana, pa treba izvršiti korekciju rezultata merenja na raspad. Faktor raspada je jednostavna eksponencijalna funkcija.



Slika 15. Klasična postavka uređaja RAD7 sa pratećim uređajima

3.2.2. Eksikatorska posuda

Kako bi se što preciznije izmerio koeficijent difuzije potrebno je ostvariti kontrolisane uslove prolaska radona kroz postavljeni materijal. Cilj je spriječiti strujanje vazduha u merenoj oblasti i obezbediti prliv vazduha kako bi detektor mogao da meri u dužem vremenskom intervalu i to u eksperimentu korišćenih 20 ciklusa po 1h. Idealna postavka je standardna eksikatorska posuda, izrađena od vatrostalnog stakla debljine 1cm. Donji deo posude je sužen u odnosu na gornji deo, što daje povoljniju postavku za materijale čiji se koeficijent difuzije meri. Prečnik donjeg dela posude je $R_2 = 12\text{cm}$, visine 8cm i u tom delu se nalazi postavljeni radioaktivni uzorak koji je emiter radona (u eksperimentu je korišćena praškasta supstanca „cirkonil“). Potrebno je iseći ispitivane materijale u kružni oblik, gde je za datu eksikatorsku posudu idealno da to bude 19cm, pošto je prečnik gornjeg dela posude $R_1 = 21\text{cm}$ i visine $H = 15.5\text{cm}$, a izračunavanjem se dobija vrednost zapremine $V = 5.37 \cdot 10^{-3} \text{m}^3$, koja je potrebna za matematičko izračunavanje koeficijenta difuzije. Ispitivani materijal se nalazi na proširenju između donjeg i gornjeg dela posude-na horizontalnim površinama pri proširenju iz donjeg u gornji deo posude. Eksikatorska posuda sadrži jedan ispuštač za ventil, preko tog ventila RAD7 detektor pumpom vuče vazduh koji u sebi ima čestice radona i vrši se detekcija čestice radona.



Slika 16. Šematski prikaz eksikatorske posude sa postavljenim radioaktivnim uzorkom i ispitivanim materijalom.

3.2.3. Radioaktivni uzorak i specifična aktivnost radona

Upotrebljeni radioaktivni uzorak je praškasta supstanca bele boje nazvana „cirkonil”. U pitanju je izvor koji sadrži veću količinu radijuma i emituje veću količinu radona. Upotrebljena masa cirkonila je $m = 873.9\text{ g}$, gde je izražena vrednost za aktivnost od $A = 3760 \pm 230 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$. Nakon 24h difuzije dostignuta koncentracija radona $C_1 = 831 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$.

Specifična aktivnost radijuma procenjena je na $a(^{226}\text{Ra}) \approx 3700 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$, što je vrednost koja je poznata, a ono se može iskoristiti kako bi se izračunala aktivnost radona. Da bi se iskoristila mogućnost da aktivnost radijuma odgovara aktivnosti radona potrebno je uvesti aproksimaciju da celokupna količina nastalog radona ostaje u „idealnoj zatvorenoj posudi“. Takođe je uslov da dolazi do potpune emanacije radona iz izvora i da se akumulira iznad izvora. Može se uzeti da se radon nalazi u takvoj posudi u eksperimentu, ako je eksikatorska posuda idealno zatvorena, što nije slučaj u realnosti, gde uvek postoji određeni procenat curenja gasa radona u spoljašnjost, a time dolazi i do smanjenja količine radona. Upoređujući koncentraciju radijuma sa koncentracijom radona, mora se voditi računa o odnosu perioda poluraspada radijuma i radona za „idealno“ zatvoren slučaj.

Ukupna aktivnost radijuma zavisi od mase ispitivanog uzorka u donjem delu eksikatora:

$$A(^{226}Ra) = a(^{226}Ra) \cdot m_{cirkonijum} = 3233.43 Bq$$

Vrednosti za periode poluraspada su: $T_{1/2}(^{226}Ra) = 1520 \text{ god}$ i $T_{1/2}(^{222}Rn) = 3.8d$

što znači da je $T_{1/2}(^{226}Ra) \gg T_{1/2}(^{222}Rn)$. Na osnovu ove poznate činjenice, tokom vremenskog perioda od približno $10 \cdot T_{1/2}(^{222}Rn) = 38d$ dolazi do uravnovešenja aktivnosti radijuma i radona. Posle pomenutog vremenskog perioda, može se uzeti da je aktivnost radijuma u izvoru jednaka aktivnosti gasovitog radona u hermetički zatvorenoj posudi u kojoj se radonski izvor nalazi, ukoliko bi radon potpuno emanirao iz izvora u kojem nastaja pa možemo pisati $A(^{226}Ra) = A(^{222}Rn) = 3233.42 Bq$

Takođe, možemo izračunati i specifičnu aktivnost po jedinici zapreme u takvom idealizovanom slučaju:

$$V = 5.37 \cdot 10^{-3} m^3 \quad \text{dok je } A(^{222}Rn) = 3233.42 Bq$$

$$a(^{222}Rn) = \frac{A(^{226}Ra)}{V_{eksikatora}} = 6.02126 \cdot 10^5 \frac{Bq}{m^3}$$

Ako ove podatke vezane za aktivnost radona znamo unapred, moguće je izvršiti kalibraciju mernog instrumenta, odnosno detektora RAD7, ali osnovni problem predstavlja relativno mali, nepoznat procenat, radona koji uspeva da emanira iz materijala u kojem nastaje.

3.2.4. Ispitivani materijali

1. **Tarkett linoleum:** debljine $d = 1.9 \cdot 10^{-3} m$, mase $m = 68.7 g$, sa srednjim prečnikom od $R = 18.9 cm$, gde se izračunavanjem dobija srednja gustina $\rho = 1.289 \frac{g}{cm^3}$. Upotrebljen materijal je poboljšana vrsta linoleuma, koji je gušći od običnog linoleuma koji je porozniji. Ova nova vrsta linoleuma je široko zastupljena u bolnicama, školama i predškolskim ustanovama. Ovaj materijal je bio prvi izmeren u eksperimentu i daljem poređenjem sa kasnije dobijenim rezultatima merenja za druge materijale, može se oceniti da je ova vrsta linoleuma pogodna za sprečavanje difuzije radona.

2. **Kondor materijal:** debljine $d = 3.22 \cdot 10^{-3} m$, mase $m = 38.2 g$, sa srednjima prečnikom od $R = 19 cm$, a izračunavanjem se dobija gustina od $\rho = 0.4184 \frac{g}{cm^3}$. Kondor je standardni materijal koji se koristi za izolaciju temelja od vlage. U eksperimentu je izračunata vrednost koeficijenta difuzije za radon. Kondor materijal je višeslojna komponenta, sastoji se iz dva sloja PVC savitljive plastične folije obložene „tep” papirom sa spoljne strane, a između se nalazi sloj ugljovodoničnih jedinjenja. Srednji sloj između dva sloja PVC plastike je „bitulit” koje čine gusto raspoređeni polimerni molekuli ugljovodonika. Ipak, glavni faktor sprečavanja difuzije radona kroz kondor je plastična folija (deblji najlon) koji drastično smanjuje koeficijent difuzije u odnosu na srednji sloj bitulita. Poboljšanje u zaštiti od radona se može izvesti povećanjem debljine PVC slojeva kod ove vrste zaštite. Dobijeni rezultati potvrđuju predpostavku da kondor ima mali koeficijent difuzije, tako da je kondor izuzetno dobar izolator radona.
3. **Šper ploča:** debljine $d = 9.3 \cdot 10^{-3} m$, mase $m = 78.8 g$, sa srednjim poluprečnikom od $R = 18.9 cm$, gde se izračunavanjem dobija srednja vrednost gustine $\rho = 0.302 \frac{g}{cm^3}$. Šper ploča je reprezent drvenih masa koji se koriste kao izolatori u građevinarstvu, kako u unutrašnjosti sagrađenog objekta, tako i kao komponente od koje je napravljen sam građevinski objekat, što je pretežno zastupljeno u konstruisanju montažno-demontažnih stambenih objekata u SAD, i u zapadnoj Evropi. Zato je potrebno izršiti analizu i detaljno merenje koeficijenta difuzije za razne vidove drvenih masa i dati što bolju preporuku za zaštitu unutrašnjosti objekta od difuzije radona. Predpostavka je da će uzorak imati visoku vrednost koeficijenta difuzije radona, što je i potvrđeno eksperimentom. Razlog visoke vrednosti koeficijenta je veliki ideo šupljina u mikrostrukturi drveta, čime se vazduh sa česticama radona lakše probija u gornji deo eksikatorske posude. Fizički pokazatelj velikog učešća šupljina je i mala vrednost gustine.
4. **Tarkett laminat:** debljine $d = 7 \cdot 10^{-3} m$, mase $m = 169 g$, sa srednjim poluprečnikom od $R = 18.9 cm$, gde se izračunavanjem dobija srednja vrednost gustine od $\rho = 0.86 \frac{g}{cm^3}$. Laminat je materijal koji se sastoji od presovanog drveta, kartona, tep papira u unutrašnjosti, a sa spoljne strane je obložen tankim slojem PVC plastike. Pretežno je namenjen za izolaciju podova od vlage i hladnoće. Zbog toga što je u sredini masa sa velikim učešćem šupljina, predpostavka je bila da će laminat imati visoku vrednost koeficijenta difuzije radona, što je eksperimentom i potvrđeno. Nedovoljna vrednost izolacije, što se tiče difuzije radona leži u tankom sloju PVC materijala kojim je obložen središnji sloj. Sa povećanjem debljine sloja PVC materijala dobila bi se niža vrednost koeficijenta radona.

5. **Aluminijumska ploča:** sa debljinom $d = 7 \cdot 10^{-4} m$, mase $m = 39.4 g$, sa srednjom vrednosti poluprečnika $R = 19.1 cm$, gde se izračunavanjem dobija gustina $\rho = 1.964 \frac{g}{cm^3}$. Aluminijumska ploča se koristi u građevinarstvu, radi izolovanja objekata posebne namene. U ovom diplomskom radu je napomenut primer niskofonske laboratorije u Zemunu, koja je sa unutrašnje strane potpuno izolovana aluminijumskim pločama. Predpostavka je da zbog gustog pakovanja molekula aluminijuma, gde je osnovna struktura aluminijuma površinski centrirana kubna celija čija dužina osnovne stranice je $a = 4.04 \cdot 10^{-10} m$, da aluminijum ima veoma malu vrednost koeficijent difuzije radona. Tako da je aluminijum najbolji izolator od radona, što je i potvrđeno eksperimentom. Bez obzira što je pri merenju aluminijuma pređeno na novu vrstu silikonske paste (crne boje), rezultati su dali da aluminijum predstavlja najbolji izolator od izabranih materijala. Uslov za veoma nisku vrednost koefijenta difuzije radona kod aluminijuma je da nema pukotina ili oštećenja uzorka.
6. **Guma:** uzorak ima debljinu od $d = 1.88 \cdot 10^{-3} m$, mase od $m = 61.9 g$, srednja vrednost prečnika je $R = 19 cm$, izračunata vrednost gustine je $\rho = 1.16 \frac{g}{cm^3}$. Guma je takođe materijal koji je često zastupljen u građevinarstvu. Predpostavka je da guma ima malu vrednost koeficijenta difuzije radona i da je veoma dobar izolator od radona, jer je guma gusto pakovan polimerni materijal sastavljen od ugljovodonika. Predpostavka je dokazana eksperimentom, gde je ispitivani uzorak imao veoma malu vrednost koeficijenta difuzije.

Svi rezultati merenja su dati u sledećem odeljku, takođe su opisani svi načini dobijanja podataka. Priložene su slike nekih upotrebljenih uzoraka (slika 17.). Na slikama 20. i 21. vidi se postavljen uzorak Tarkett linoleuma



Slika 17. Izgled ispitivanih uzoraka aluminijumske ploče (s leva) i gume (s desna)

3.3. Realizacija eksperimenta

3.3.1. Metodologija merenja i objašnjenje eksperimentalne postavke

Problem na početku merenja je bio kako obezbediti zatvoreni tok vazduha, jer sa jednim izlazom (preko ventila eksikatora) nije bilo moguće dobiti relevantna merenja. U tom slučaju pumpa vuče iz eksikatora vazduh, ali novi vazduh ne pristiže u posudu, te se stvara nizak pritisak, koji opterećuje pumpu koja ne može više da vuče vazduh i detektor gotovo da nije detektovao čestice radona. Dok, ako bi vazduh ulazio iz spoljašnjosti to bi drastično smanjivalo koncentraciju radonovih čestica u gornjem delu posude i opet ne bi bilo moguće dobiti relevantne rezultate. Zato je bilo potrebno obezbediti zatvoren tok vazduha, gde iz postojećeg ventila na eksikatoru pumpa RAD7 detektora izvlači vazduh i ulazi u detektor, gde se dalje pomoću plastičnom cevi unosi vazduh, koji izlazi iz detektora, u unutrašnjost eksikatora. Ovo je postignuto postavljanjem šire plastične cevi u prostor između poklopca eksikatora i samog suda eksikatora. Ta šira cev je probušena i kroz nju prolazi tanja plastična cev koja vodi vazduh (koji je prošao kroz detektor) iz detektora u nazad u eksikator. Na taj način postavljanjem deblje plastične cevi omogućeno je da kad se stavi poklopac na deblju cev, tako postoji veća dodirna površina i time je viši stepen izolovanja eksikatora od spoljašnjosti. Pošto se vazduh procesom detekcije oslobađa svih radioaktivnih čestica, vazduh koji se vraća smatra se čistim i na taj način se ne stvara manji pritisak u eksikatoru pri radu pumpe. Može se dati zaključak da pri radu detektora u eksperimentu ovakve vrste, da je neophodno očuvati postojeći pritisak vazduha u eksikatoru i vazduh koji ulazi nazad u eksikator ne sme da smanjuje koncentraciju čestica radona koje su izvršile difuziju.

Kako bi se sprečila cirkulacija vazduha kroz postavljene cevi, koristi se silikonska pasta. Potrebno je proveriti kako naleže cev na gornju ivicu eksikatora i da li silikonska pasta efikasno vrši izolovanje unutrašnjosti plastičnih cevi od ulaza spoljašnjeg vazduha. Plastične cevi leže na silikonskoj pasti i naspojevima uske cevi i šire cevi takođe je nanet sloj slikonske paste, kako bi se osigurala izolacija unutrašnjosti eksikatora u odnosu na spoljašnji vazduh. Na taj način se različiti spojevi mogu obezbediti da ne dođe do cirkulisanja vazduha iz spoljašnjosti u unutrašnjost eksikatora, čime bi došlo do smanjenja koncentracije radona koji je izvršio difuziju.



Slika 18. Fotografija eksikatorske posude sa postavljenim zaštitnim filter papirom, bez ispitivanog uzorka i postavljenim plastičnom cevčicom za vraćanje vazduha u eksikatorsku posudu.

Pri svakom merenju treba posebno proveriti da li su spojevi osigurani da ne propuštaju vazduh i da su pravilno raspoređeni. Zatim se postavlja ispitivani materijal, gde se prvo nanosi silikonska pasta na horizontalne strane eksikatora, pa se nanosi silikonska pasta na rub istpitivanog uzorka, na onu stranu uzorka koji će da leži na horizontalnim stranama. Neophodno je osigurati da ne dolazi do slobodnog prolaza vazduha i čestica radona između donjeg i gornjeg dela posude, već samo da procesom difuzije čestice radona prolaze kroz ispitivani materijal, čiji koeficijent difuzije se meri. Pažljivim postavljanjem materijal pravilno naleže na horizontalne ispuste, a kako bi se osiguralo da dolazi do dihtovanja po celom obimu horizontalnog ispusta eksikatorske posude potrebno je da se malo rotira postavljeni uzorak pri postavljanju, pre nego što silikonska pasta očvrsne. Postoje nesavršenosti u zaptivanju, gde je nemoguće u potpunosti spreciti da vazduh prolazi kroz mikropukotine u materijalu ili kroz stvrdnut sloj silikonske paste, ali je upotrebom silikonske paste ovaj proces sveden na izuzetno malu meru, tako da glavni mehanizam prolaska čestica radona je difuzija kroz ispitivani materijal.

Kako bi došlo do akumuliranja čestica radona u gornjem delu eksikatora potrebno je ostaviti neko vreme da radon prodifunduje kroz materijal, pa onda započeti merenje. Na taj način se ostvaruju značajnije koncentracije radona pri merenju. Prema svojstvima silikonske paste, da vrši intenzivno vezivanje nakon nekoliko dana, određeno je vreme difuzije od 24h pre početka merenja. Idealno bi bilo nekoliko dana (oko 10 dana) da se vrši difuzija pre početka merenja, ali je potrebno koristiti posebnu silikonsku pastu, ili supstancu sličnih svojstava za zaptivanje, samo da ne sadrži efekat lepljenja.

Prvi odvodni priključak ide od ventila eksikatora ka donjem priključku dehidratatora. Dehidratator pri prolasku vazduha vrši vezivanje vodene pare za C_aS , a dalje vazduh sa radioaktivnim česticama ide ka detektoru. Pre merenja potrebno je da se zaostali vazduh iz RAD7 detektora izbaci, kako ne bi detektovao čestice radona iz zaostalog vazduha, zato se pusti da pumpa radi „na prazno“ 10-tak min. Zatim se započinje merenje, gde je odabранo da bude 20 ciklusa od po 1h. RAD7 za svaki završeni ciklus daje podatke na čitaču i nakon završenog merenja detektor daje celokupan rezultat merenja sa srednjom vrednosti merenja i iscrtan histogram.

Nakon završenog merenja prvo se uklone priključci za eksikator, pa se otvara poklopac eksikatora kako bi vazduh iz gornjeg dela posude izašao. Treba sačekati oko 20-tak minuta da se vazduh iz gornjeg dela posude pomeša sa spoljašnjim vazduhom. Dalje je potrebno odvojiti postavljeni materijal od silikonske paste i zaostalu silikonsku pastu očistiti sa horizontalnih ispusta pomoću posebnih noževa. Radi sigurnosti je postavljen filter papir koji izoluje donju i gornju komoru, gde se vrši merenje. Na taj način je sprečeno upadanje stvrdnute silikonske paste u radioaktivni cirkonil i sprečena je inhalacija lakih čestica cirkonila pri otvaranju eksikatora. Filter papir je jako tanak i ne utiče na proces difuzije radona. Idealno je da se u potpunosti odstrani stvrdnuta silikonska pasta i dobro očistiti manje komade stvrdnute silikonske paste sa filter papira.

Za svaki materijal se ponovi isti postupak, s tim da je kod drugačijih uzoraka potrebno modifikovati metod postavljanja ispitivanog uzorka u eksikatorsku posudu, ili vršiti merenje u posudi druge vrste koja je prilagođenija merenju ove vrste. Priložene slike daju bolji pregled eksperimentalne postavke jednog od materijala.



Slika 19. Dehidratatorska posuda koja sadrži C_aS .



Slika 20. Izgled eksikatorske posude pre zatvaranja. Na slici je postavljen tarkett linoleum-prvi uzorak koji se meri (svetlo plava površina). Takođe se jasno vide površine silikonske paste

Horizontalni ispusti-površina na eksikatorskoj posudi pri prelazu iz donjeg u gornji deo posude. Na ovoj površini se gleda da li silikon svuda po obimu tog ispista ravnomerno naleže pri postavljanju materijala

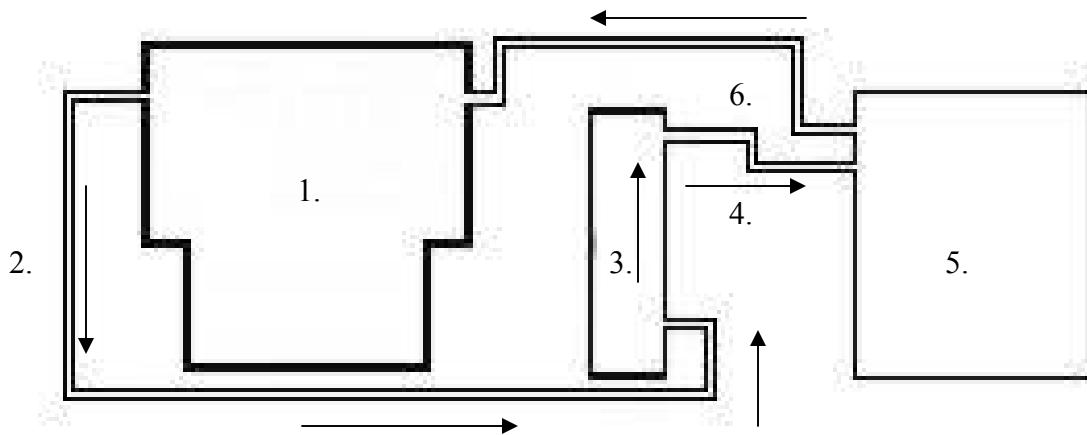


Postavljeni radioaktivni uzorak cirkonila

Slika 21. Prikazuje kako uzorak, na slici je tarkett linoleum, naleže na horizontalne ispuste eksikatorke posude. Prema površini stvrdnutog silikona na tim ispustima može se vizuelno proceniti da li dati materijal dihtuje ili ne. Slika s desna je poprečna slika pošto je postavljen uzorak



Slika 22. Na slici je prikazana postavka za eksperiment za merenje koncentracije radona u slučaju kada nije postavljen uzorak.



Slika 23. Skica povezivanja priključaka upotrebljena u eksperimentu, povezana je direktno sa slikom 22. i dodatno objašnjava način povezivanja uređaja: 1. eksikator, 2. plastično crevo koje odvodi vazduh sa radonom koji je izvršio difuziju u donji priključak dehidratatora, 3. Dehidratator gde vazduh sa radonom prolazi a CaS vezuje vodenu paru i suv vazduh dospeva u prostor detektora, 4. Plastično crevo koje povezuje gornji priključak dehidratatora sa ulazom detektora, gde pumpa omogućava celokupan proces protoka vazduha, 5. Detektor; u sklopu je pumpa i sistem za detektovanje čestica radona, 6. Izlazno plastično crevo, koje povezuje izlaz na detektoru i vraća vazduh u kome nema čestica radona nazad u eksikator, ovim dodatnim priključkom je ostvaren zatvoren tok vazduha. Strelice pokazuju tok vazduha u zatvorenom toku eksperimentalne postavke pri radu pumpe

3.3.2. Dnevnik rada

Dnevnik rada je u eksperimentu potrebno voditi kako bi se procenilo vreme koje je potrebno da dođe do saturacije, kako u slučaju kada nije postavljen uzorak, tako i u slučaju kad je postavljen neki uzorak. Računanje vremena dostizanja saturacione koncentracije vrši se za ukupno vreme difuzije, pa sve do određenog sata (ciklusa) merenja za dati materijal. Za slučaj kada nije postavljen materijal, potrebno je očitati samo saturacionu koncentraciju koja će se javljati kao parametar pri računanju koeficijenta difuzije radona za različite materijale.

- 27.08.2008. Postavljen je radioaktivni uzorak (cirkonil) i zaštitni filter papir, kako bi se merila saturaciona koncentracija kada nema uzorka. Eksikatorska posuda je zatvorena u 14^{15} h i pušta se da se akumulira radon oko 24h.
- 28.08.2008. Otvara se glavni ventil na eksikatorskoj posudi i priključuje se na detektor RAD7, pre startovanja detektora, potrebno je pustiti detektor da radi desetak minuta na prazno kako bi se izbacio zaostali vazduh. Zatim se podešava detektor da radi 20 ciklusa od po 1h svaki. Proveravaju se svi priključci i detektor je pušten u rad u 13^{45}
- 29.08.2008. Detektor je završio merenje koncentracije radona za slučaj kada nema uzorka. Postavlja se prvi uzorak Tarkett linoleum, gde se nanose slojevi

silikonske paste i postavlja uzorak. Procedura postavljanja uzorka objašnjenja je u metodologiji eksperimenta. Zatvaranje eksikatora sa tarketovim linoleumom je u 10^{55} , i prvo se pušta da 24h difunduje.

- 30.08.2008. Pošto je prodifundovao 24h, prema opisanom postupku, priključuje se eksikator na detektor i započinje se sa merenjem. Ukupno ima 20 ciklusa od po 1h za svaki ciklus. Detektor je započeo merenje u 10^{40}
- 01.09.2008. Otvaranje eksikatorske posude, uklanjanje tarket linoleuma i čišćenje od zaostale stvrđnute silikonske paste. Potrebno je što bolje očistiti eksikator, kako bi se stavio sledeći uzorak. Drugi uzorak koji se meri je šper ploča. Gde se postavlja novi sloj silikonske paste i pažljivo postavlja uzorak, prema već utvrđenom postupku. Zatvaranje eksikatora je u 13^{45} i pušten je da difunduje 24h.
- 02.09.2008. Posle difundovanja za uzorak šper ploče, priključen je eksikator na detektor i merenje je započelo u 14^{00} h po istom režimu 20 ciklusa od po 1h svaki ciklus.
- 03.09.2008. Posle merenja šper ploče, otvara se eksikator i sačeka se da vazduh provetri. Očisti se od stvrđnutog silikona i postavi se Tarkett laminat, a oko 13^{35} je zatvorena posuda. Prvo difunduje 24h pa se započinje merenje.
- 04.09.2008. Oko 14^{00} h je započeto merenje takođe 20 ciklusa, gde svaki ciklus traje po jedan sat. Posle ovog merenja napravljena je pauza od nekoliko dana.
- 09.09.2008. Skidanje Tarkett laminata, vrši se otežano jer je uzorak stajao nekoliko dana. Posle čišćenja od laminata postavlja se kondor. Eksikatorska posuda je zatvorena u 13^{15} i zatim je pušteno da difunduje 24 h.
- 10.09.2008. Difuzija je završena i uključuje se na detektor u 14^{55} sa 20 ciklusa od po 1h svaki ciklus.
- 11.09.2008. Merenje se završilo u 10^{55} , pri tome se skida kondor i čisti se eksikatorska posuda. Kako se ne bi ponovila situacija sa tarket laminatom posuda se ostavlja prazna preko vikenda.
- 15.09.2008. Postavljena je guma, pre toga je nanet silikon. Eksikator je zatvoren u 11^{40} i pušteno je da vrši difuziju 24h.
- 16.09.2008. Startovanje merenja za uzorak, priključuje se na detektor i merenje se započinje u 12^{36} sa 20 ciklusa od po 1h svaki ciklus
- 17.09.2008. Skidanje gume, gde se poštije procedura skidanja i čišćenja ispusnih zidova eksikatora. Zatim se postavlja poslednji uzorak aluminijum, koji je postavljen u 13^{20} i zatvorena je eksikatorska posuda da vrši difuziju 24h.
- 18.09.2008. Difundovanje aluminijuma traje do 13^{20} i pušta se uređaj da vrši merenje ukupno 20 ciklusa od po 1h. Napomena za aluminijum je da je upotrebljena druga vrsta silikonske paste koja je istih odlika kao i bezbojna, ali je crne boje.
- 19.09.2008. Kraj merenja aluminijuma 9^{20} , skidanje aluminijuma i čišćenje eksikatora i uzorka.

3.4 Podaci dobijeni merenjem

Od podataka koji su invarijantni od materijala koji se mere su: zapremina gornjeg dela posude V , poprečni presek otvora kroz koje prolaze čestice radona S -površina dela suda između donjeg i gornjeg dela posude gde je postavljen filter papir, λ -konstanta radioaktivnog raspada i C_1 -koja je saturaciona koncentracija dobijena iz merenja za koncentraciju radona kada nema postavljenog materijala za merenje. Dobijeni podaci za nezavisne paremetre:

1. V -zapremina gornjeg dela posude; računa se po formuli $V = \left(\frac{R_1}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot H$ gde

je R_1 -prečnik gornjeg dela posude gde je merenjem dobijeno $R_1 = 21\text{cm}$, a H -visina gornjeg dela posude, koja merenjem iznosi $H = 15.5\text{cm}$. Kad se ubace odgovarajuće vrednosti u formulu za zapreminu gornjeg dela eksikatorske posude dobija se $V = 5.37 \cdot 10^{-3} \text{m}^3$. Treba takođe napomenuti da zbog relativno nepravilnih ivica eksikatorske posude i dodatka koji je postavljen za cirkulaciju vazduha, zapremina je određena sa relativno većim stepenom greške. Ukoliko bi se javio slučaj merenja sa tipom posude koja ima pravilno oblikovane ivice merenje zapremine bilo bi daleko preciznije. Ipak greška pri određivanju zapremine ne utiče značajno na preciznost računanja koeficijenta difuzije.

2. S -površina između gornjeg i donjeg dela posude se računa po osnovnoj formuli površine kruga $S = \left(\frac{R_2}{2}\right)^2 \cdot \pi$, gde je R_2 -prečnik kružnog otvora koji je meren na filter papiru koji deli donji deo posude, gde je radioaktivni cirkonijum, u odnosu na gornji deo posude. Merenjem je dobijeno $R_2 = 12\text{cm}$, a daljim računanjem dobijena vrednost je $S = 1.13 \cdot 10^{-2} \text{m}^2$. Takođe i pri merenju prečnika R_2 prisutna izvesna greška, koja neznatno utiče na vrednost izračunatog koeficijenta difuzije.

3. Konstanta radioaktivnog raspada λ -je konstanta veličina koja se računa po formuli $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$, gde je $T_{1/2}$ -period poluraspada za radon koji iznosi $T_{1/2} = 3.3 \cdot 10^5 \text{s}$, a korišćenjem formule dobija se $\lambda = 2.097 \cdot 10^{-6} \text{s}^{-1}$. Ova vrednost konstante radioaktivnog raspada se ubacuje u formulu za difuzionu dužinu radona

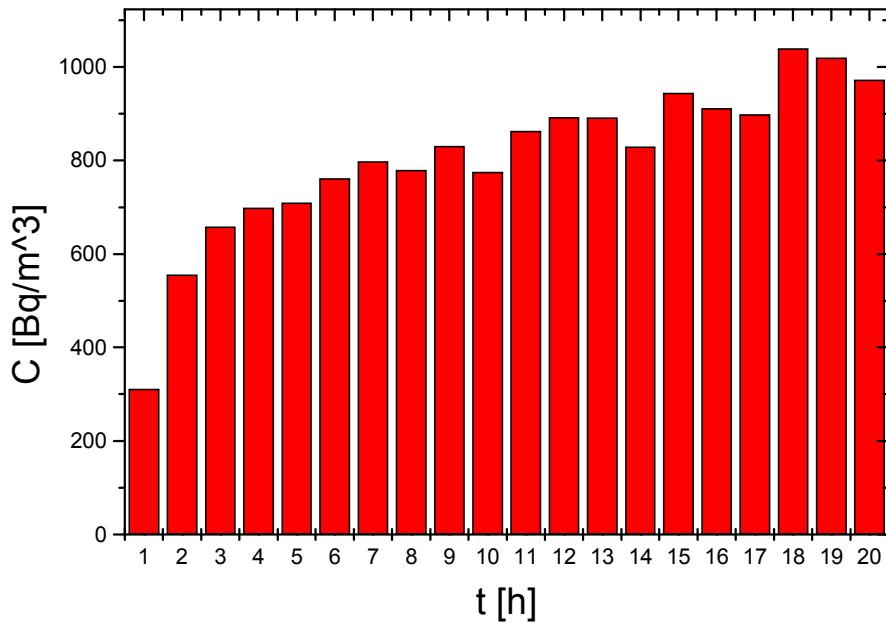
$$l = \sqrt{\frac{D_e}{\lambda}}. \quad (3.4.1)$$

4. C_1 -predstavlja saturacionu koncentraciju radona za slučaj kada nema postavljenog materijala-kada se ne meri proces difuzije. Da bi utvrdili tačnu vrednost C_1 potrebno je prvo izvršiti analizu merenja koncentracije difuzije bez postavljenog materijala i na osnovu postavljenog histograma treba utvrditi saturacionu vrednost C_1 za vazduh. Napomena je da svaki materijal ima svoju odgovarajuću vrednost koncentracije i vreme potrebno za dostizanje saturacije t_s , prema kojem se izračunava vrednost koeficijenta difuzije.

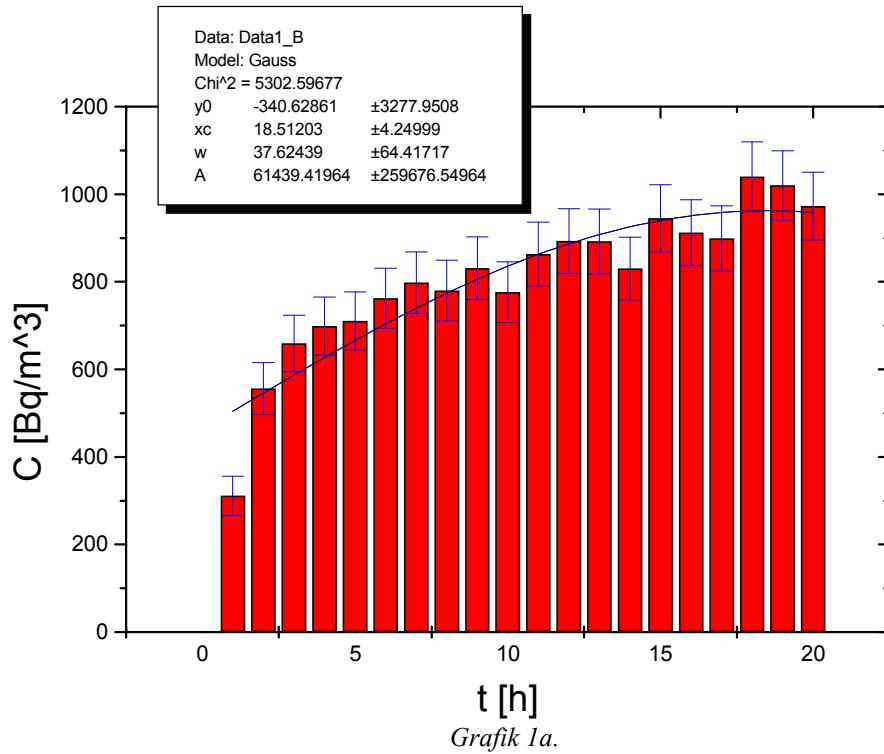
1. Filter papir-bez materijala

t [h]	C [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$]	δ [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$]
1	311	44.7
2	556	59.1
3	659	64.2
4	699	66
5	710	66.5
6	762	68.8
7	798	70.4
8	780	69.5
9	831	71.8
10	776	69.4
11	863	73.1
12	893	74.2
13	892	74.2
14	830	71.8
15	945	76.5
16	912	75.3
17	899	74.6
18	1040	79.9
19	1020	79.1
20	973	77.5

Tabela 1.



Grafik 1.



Gauss fit to Data1_B:

Area	Center	Width	Offset	Height
61439	18.512	37.624	-340.63	1302.9

Analizirajući Grafik 1a. može se odabrat odgovarajuća vrednost koncentracije C_1 koja će se koristiti kao osnovni parametar za računanje koeficijent difuzije i to vrednost $C_1 = 973 \frac{Bq}{m^3}$ a greška dobijena pri merenju ove vrednosti $\delta = 77.5 \frac{Bq}{m^3}$

Sumirajući, sve upotrebljene vrednosti koje se koriste pri:

$$C_1 = 973 \frac{Bq}{m^3}, \delta = 77.5 \frac{Bq}{m^3}, V = 5.37 \cdot 10^{-3} m^3, S = 1.13 \cdot 10^{-2} m^2, \lambda = 2.097 \cdot 10^{-6} s^{-1}.$$

Koeficijent difuzije zavisi dalje od debljine upotrebljenog materijala - d, od vremena t_s -vreme dostizanja saturacije za odgovarajući materijal i od C_s -saturaciona koncentracija radona za odgovarajući materijal.

t_s vreme dostizanje saturacije, a računa se od trenutka zatvaranja eksikatorske posude, pa do trenutka dostizanja saturacije. Radi tačnog određivanja ovog parametra potrebno je pažljivo odrediti vreme dužine difuzije t_d , kada RAD7 nije uključen i vreme dostizanja saturacije od vremena početka merenja t_{sd} .

Gde se vreme saturacije računa prema relaciji

$$t_s = t_d + t_{sd} \quad (3.4.2)$$

Vreme saturacije za slučaj kada je bez postavljenog uzorka nije bitno, jer se ne računa koeficijent difuzije, ali kada su postavljeni materijali onda je od značaja. Međutim pri utvrđivanju vrednosti koeficijenta difuzije radona kod ispitivanih uzoraka, potrebno je utvrditi saturacionu koncentraciju za dati materijal, a zatim ubacivanjem poznatih vrednosti u formule

$$D_{e1} = \frac{\frac{C_s \cdot V}{t_s \cdot S} \cdot \sqrt{\frac{D_e}{\lambda}} \cdot \sinh(d / \sqrt{\frac{D_e}{\lambda}})}{C_1 - C_s \cdot \cosh(d / \sqrt{\frac{D_e}{\lambda}})} \frac{m^2}{s}$$

ili u jednostavniju relaciju:

$$D_{e2} = \frac{C_s \cdot V \cdot d}{t_s \cdot S \cdot (C_1 - C_s)} \frac{m^2}{s}$$

Na osnovu priloženih formula, mogu se izračunati vrednosti koeficijenta difuzije pojedinih materijala, s tim što je potrebno, radi provere formule 3.1.17, da se izračuna relativno odstupanje vrednosti za koeficijenta difuzije radona pomoću relacija 3.1.15 i 3.1.17

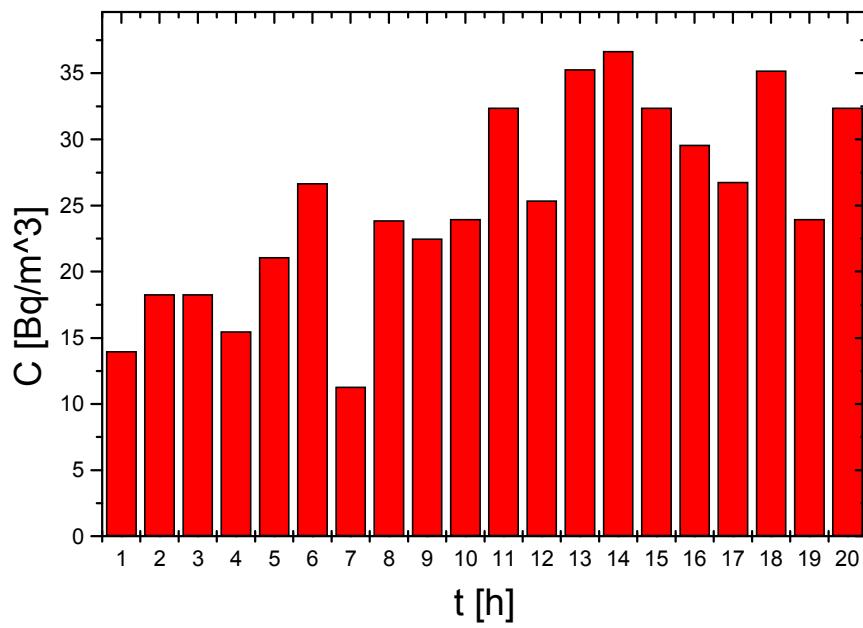
Na osnovu mernih nesigurnosti moguće je izračunati mernu nesigurnost za izračunatu vrednost koeficijenta difuzije radona. Najprikladnija metoda za izračunavanje merne nesigurnosti koeficijenta difuzije je numerički metod. Gde se na svaki parametar sa mernom nesigurnošću dodaje, pa se oduzima od osnovne vrednosti, zatim se izračunate vrednosti kvadriraju i posle se izvlači koren, što upravo predstavlja mernu nesigurnost. Opšti obrazac za jednačinu kojom se računa odstupanje od egzaktne vrednosti za koeficijent difuzije na osnovu formule (3.1.17), a ova vrednost se podrazumeva i za grešku kod formule (3.1.15).

$$\delta(D_{e2}) = \sqrt{\left(\frac{(C_s + \delta(C_s)) \cdot V \cdot d}{t_s \cdot S \cdot (C_1 - (C_s + \delta(C_s)))} - D_{e2} \right)^2 + \left(\frac{C_s \cdot V \cdot d}{t_s \cdot S \cdot ((C_1 + \delta(C_1)) - C_s)} - D_{e2} \right)^2} \frac{m^2}{s} \quad (3.4.3)$$

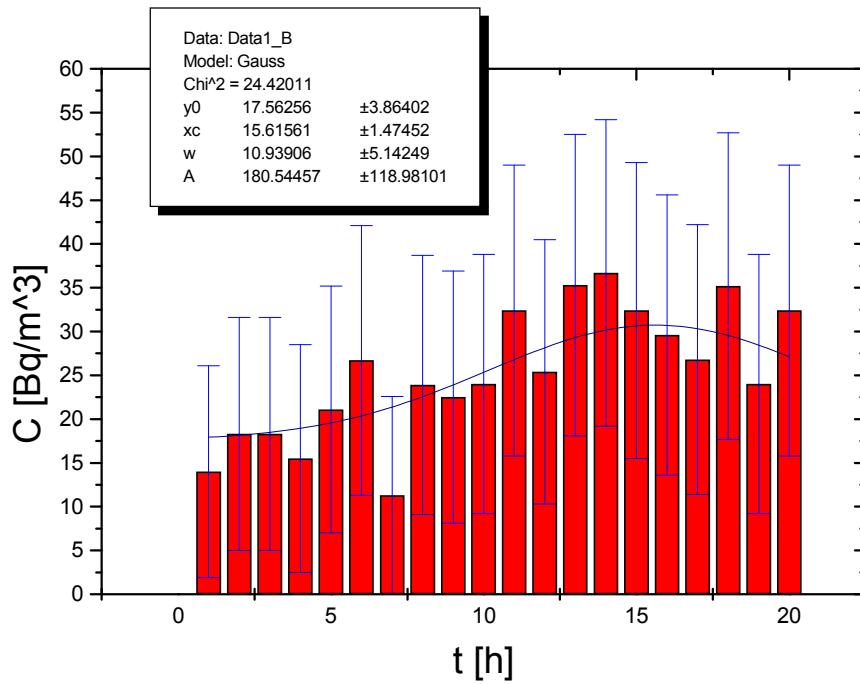
2. Tarkett Linoleum (plave boje) označen brojem 1.

t [h]	C [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$]	δ [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$]
1	14	12.1
2	18.3	13.3
3	18.3	13.3
4	15.5	13
5	21.1	14.1
6	26.7	15.4
7	11.3	11.3
8	23.9	14.8
9	22.5	14.4
10	24	14.8
11	32.4	16.6
12	25.4	15.1
13	35.3	17.2
14	36.7	17.5
15	32.4	16.9
16	29.6	16
17	26.8	15.4
18	35.2	17.5
19	24	14.8
20	32.4	16.6

Tabela 2.



Grafik 2.



Grafik 2a.

Gauss fit to Data1_B:

Area	Center	Width	Offset	Height
388.81	15.708	15.106	11.300	20.536

Prema Grafiku 2a. određena je saturaciona koncentracija za Tarket linoleum $C_s = 32.4 \frac{Bq}{m^3}$, a greška pri proceni vrednosti saturacione koncentracije $\delta(C_s) = 16.9 \frac{Bq}{m^3}$ koja odgovara šestom ciklusu merenja, što određuje vreme nakon početka merenja instrumentom - $t_{sd} = 15h$, dok se prema dnevniku rada može odrediti da je ukupno vreme difuzije, pre uključenja uređaja - $t_d = 1429 \text{ min}$. Pa je prema (relaciji br. 3.4.2) ukupno vreme dostizanja saturacije je $t_s = 139740s$. Debljina materijala je $d = 1.9 \cdot 10^{-3} m$. Prema predhodnim poznatim vrednostima koje su invarijantne u odnosu na ispitivani materijal dobija se vrednost za koeficijent difuzije (prema relaciji 3.1.15.-složena relacija za računanje koeficijent difuzije)

$$D_{el} = \frac{\frac{C_s \cdot V}{t_s \cdot S} \cdot \sqrt{\frac{D_e}{\lambda}} \cdot \sinh(d / \sqrt{\frac{D_e}{\lambda}})}{C_1 - C_s \cdot \cosh(d / \sqrt{\frac{D_e}{\lambda}})} \frac{m^2}{s}$$

Ako se računa prema relaciji koja zahteva iterativni postupak (formula 3.1.15), nakon deset ponovljenih iteracija prema što je obavljeno u programu Mathematica 5.0 dobijena je vrednost:

Za proceduru izrade iterativnog postupka u programu Mathematica 5.0 prvo se definiše funkcija, a zatim se korišćenjem operacije NestList za početnu vrednost od $1 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s}$ vrši računanje desetostrukog iterativnog postupka. Pr. Res=NestList[phi, 0.0000001, 10]

Zadnja dobijena vrednost iteracije je: $D_{e1} = 2.16508 \cdot 10^{-10} \frac{m^2}{s}$

Prema formuli 3.1.17, što predstavlja uprošćenu formulu za računanje koeficijenta difuzije

$$D_{e2} = \frac{C_s \cdot V \cdot d}{t_s \cdot S \cdot (C_1 - C_s)} \frac{m^2}{s} \quad \text{dobijena vrednost je:}$$

$$D_{e2} = 2.2257 \cdot 10^{-10} \frac{m^2}{s}$$

Ukoliko uporedimo dobijene rezultate dobijamo relativno odstupanje od 2.7%

Računanjem greške opisan pomoću (formule 3.4.3) , gde su parametri koji imaju mernu nesigurnost: $C_1 = 973 \frac{Bq}{m^3}$, $\delta(C_1) = 77.5 \frac{Bq}{m^3}$ tarket linoleum $C_s = 32.4 \frac{Bq}{m^3}$ $\delta(C_s) = 16.9 \frac{Bq}{m^3}$

$$\delta(D_{e2}) = 1.2348 \cdot 10^{-10} \frac{m^2}{s}$$

Relativno velika merna nesigurnost potiče od malih izmerenih vrednosti koncentracija radona, a merne nesigurnosti su posledica mernog uređaja-detektora RAD7. Za veće izmerene vrednosti dobija se manja vrednost greške.

Vrednost koeficijenta difuzije za **tarket linoleum** sa mernom nesigurnosti je:

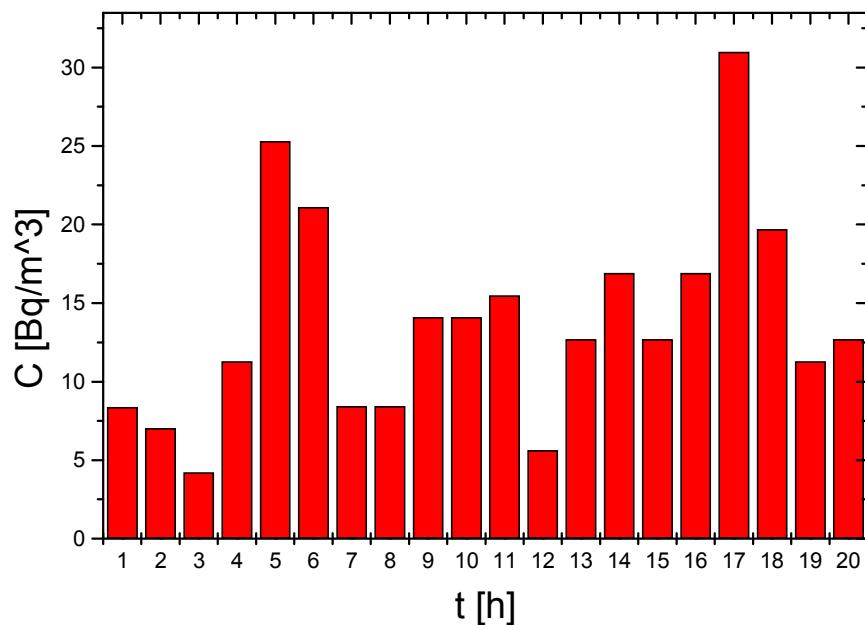
$$D_e = 22(12) \cdot 10^{-11} \frac{m^2}{s}$$

Tarket linoleum je poboljšana vrsta linoleuma, koji ima viši stepen kompresije pri izradi, tome su slojevi PVC materijala od koga je napravljen tarket linoleum homogeniji i veće gustine. Zato ove vrste obloga predstavljaju idealne materijale za zaštitu raznih ustanova od prodora radona kroz podove prostorija.

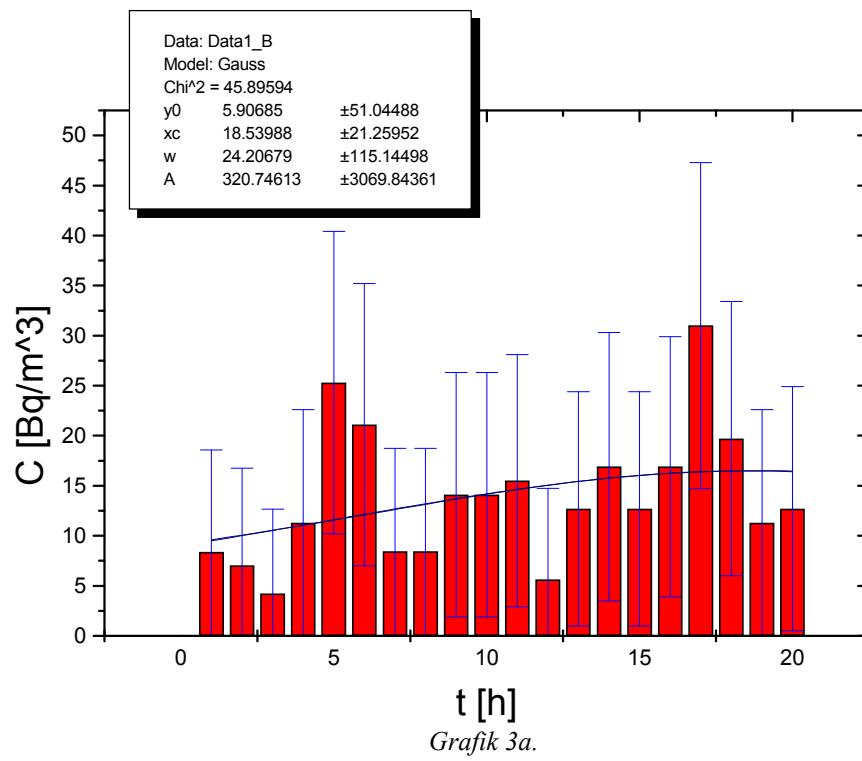
3. Kondor materijal

t [h]	C [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$]	δ [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$]
1	8.38	10.2
2	7.04	9.71
3	4.22	8.44
4	11.3	11.3
5	25.3	15.1
6	21.1	14.1
7	8.44	10.3
8	8.44	10.3
9	14.1	12.2
10	14.1	12.2
11	15.5	12.6
12	5.63	9.11
13	12.7	11.7
14	16.9	13.4
15	12.7	11.7
16	16.9	13
17	31	16.3
18	19.7	13.7
19	11.3	11.3
20	12.7	12.2

Tabela 3.



Grafik 3.



Gauss fit to Data1_B:

Area	Center	Width	Offset	Height
424.34	18.903	27.555	4.2200	12.287

Prema Graffiku 3a. određena je saturaciona koncentracija za Kondor materijal, $C_s = 16.9 \frac{Bq}{m^3}$, dok je relativno merno odstupanje $\delta(C_s) = 13 \frac{Bq}{m^3}$ koja odgovara šesnaestom ciklusu merenja, što određuje vreme nakon početka merenja instrumentom- $t_{sd} = 16h$, dok se prema dnevniku rada može odrediti da je ukupno vreme difuzije, pre uključenja uređaja - $t_d = 1537 \text{ min}$. Pa je ukupno vreme dostizanja saturacije je $t_s = 149820s$. Debljina materijala je $d = 3.22 \cdot 10^{-3} m$. Prema predhodnim poznatim vrednostima koje su invarijantne u odnosu na ispitivani materijal dobija se vrednost za koeficijent difuzije (prema relaciji 3.1.15 -složena relacija za računanje koeficijent difuzije i preko programa Mathematica 5.0 se za 10 iterativnih postupaka dobija vrednost, treba znati vrednost ($C_1 = 973 \frac{Bq}{m^3}, \delta(C_1) = 77.5 \frac{Bq}{m^3}$)

Zadnja vrednost dobijena procesom iteracije je:

$$D_{e1} = 1.80537 \cdot 10^{-10} \frac{m^2}{s}$$

Ako se računa prema formuli 3.1.17, što je uprošćena formula dobina vrednost je :

$$D_{e2} = 1.805366 \cdot 10^{-10} \frac{m^2}{s}$$

Ukoliko uporedimo dobijene rezultate dobijamo relativno odstupanje $2.2156 \cdot 10^{-4}\%$

Dok se računanjem relativnog odstupanja prema formuli 3.4.3 dobija vrednost greške od vrednosti D_{e2} :

$$\delta(D_{e2}) = 1.38873 \cdot 10^{-10} \frac{m^2}{s}$$

Takođe za kondor materijal, kao i za tarket linoleum dobijaju se niske vrednosti koncentracija, pa je greška izražena u odnosu na dobijenu vrednost koeficijenta difuzije. Ukupno izražena vrednost koeficijenta difuzije za kondor je:

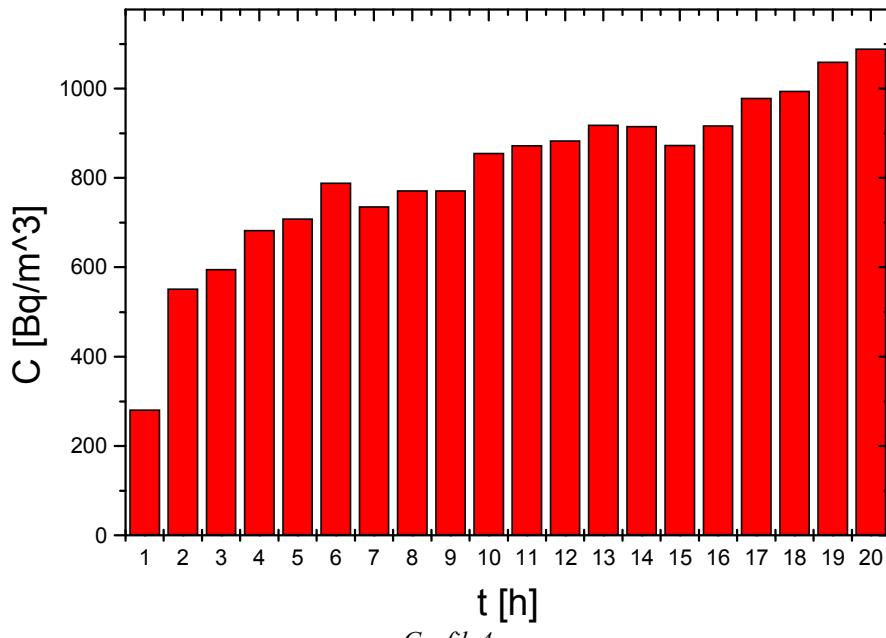
$$D_{e2} = 18(14) \cdot 10^{-11} \frac{m^2}{s}$$

Upoređujući kondor sa tarket linoleumom, kondor materijal je za 23% bolji izolator radona od tarket linoleuma, tako da se može reći da je ova vrsta materijala veoma dobar izolator od radona i s obzirom na nisku cenu, efikasno se koristi za izolaciju i za sprečavanje difuzije radona u prostorije. Sa povećanjem debljine PVC sloja u Kondor materijalu može se dodatno smanjiti koeficijent radona i time poboljšati izolaciju od radona.

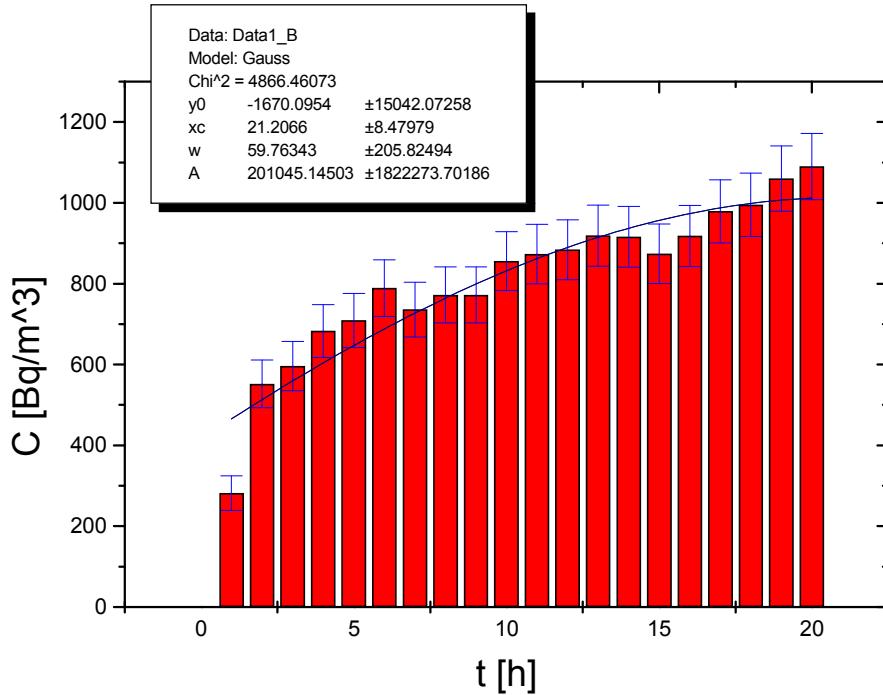
4. Šper ploča

t [h]	C [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$]	δ [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$]
1	282	42.7
2	552	58.9
3	596	61.1
4	683	65.3
5	709	66.6
6	789	69.9
7	736	67.7
8	772	69.3
9	772	69.2
10	856	72.7
11	873	73.7
12	884	74
13	919	75.5
14	916	75.3
15	874	73.4
16	918	75.3
17	979	77.8
18	995	78.5
19	1060	80.8
20	1090	81.8

Tabela 4.



Grafik 4.



Grafik 4a.

Gauss fit to Data1_B:

Area	Center	Width	Offset	Height
2.0105E5	21.207	59.763	-1670.1	2684.1

Prema Grafiku 4a. određena je saturaciona koncentracija za Šper ploču, $C_s = 995 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$, a merna nesigurnost je $\delta(C_s) = 78.5 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$ koja odgovara osamnaestom ciklusu merenja, što određuje vreme nakon početka merenja instrumentom- $t_{sa} = 18\text{h}$, dok se prema dnevniku rada može odrediti da je ukupno vreme difuzije, pre uključenja uređaja - $t_d = 1448\text{ min}$. Pa je ukupno vreme dostizanja saturacije je $t_s = 151680\text{s}$. Debljina materijala je $d = 9.3 \cdot 10^{-3}\text{m}$. Prema predhodnim poznatim vrednostima koje su invarijantne u odnosu na ispitivani materijal dobija se vrednost za koeficijent difuzije (prema relaciji 3.1.15 i preko programa Mathematica 5.0 izvršen iterativni postupak isto kao i za predhodno opisani materijal ($C_1 = 973 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}, \delta(C_1) = 77.5 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$)).

Uzima se apsolutna vrednost od zadnjeg podatka dobijen iterativnim postupkom:

$$D_{el} = 1.3178 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Ako se računa prema uprošćenoj relaciji 3.1.17 dobija se:

$$D_{e2} = 1.31776 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

Ukoliko uporedimo dobijene rezultate dobijamo relativno odstupanje $2.29 \cdot 10^{-3}\%$
Relativno odstupanje dobijene vrednosti usled mernih nesigurnosti pri detekciji,
koristimo relaciju (3.4.3) i pri tome je dobijena vrednost: $\delta(D_{e2}) = 1.709637 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$

Ukupna vrednost za koeficijent difuzije sper ploče je:

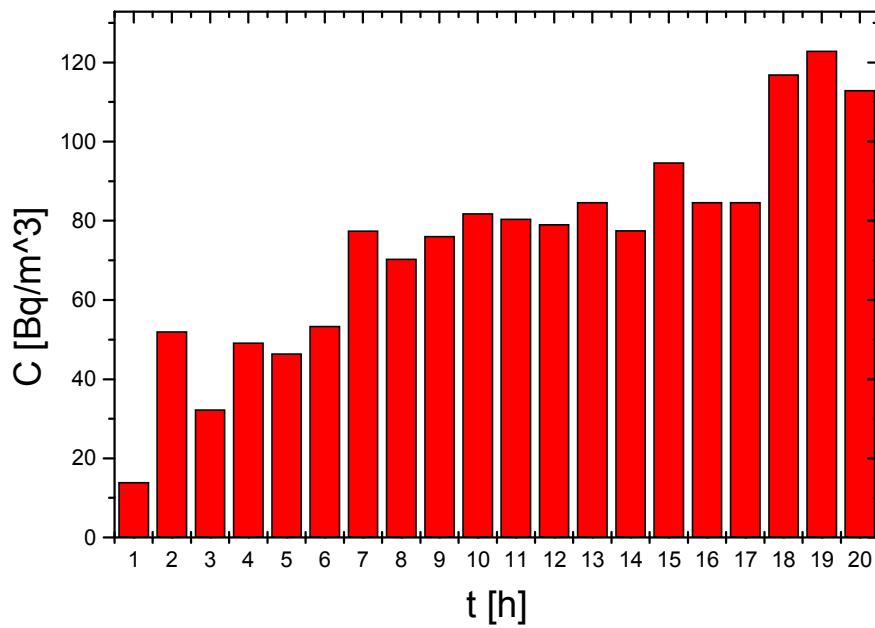
$$D_{e2} = 13(17) \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

Problem pri računanju mernog odstupanja je viša vrednost saturacione koncentracije za postavljen uzorak u odnosu na saturacionu koncentraciju za vazduh. Time se u jednačini 3.4.3 dobija visoka podkvadratna vrednost i time visoka greška. Razlog ovoj pojavi je izuzetno visok koeficijent difuzije za šper ploču, ili se može reći da radon lako prolazi kroz ovaj ispitivani materijal. Ovo se dešava usled velikog udela pukotina u strukturi presovanog drveta i velike nehomogenosti materijala, tako da je svaki materijal koji ima veliki udeo šupljina u strukturi je loš izolator od radona. Poredeći sa aluminijumom dobija se da šper ploča 14000 puta više propušta radon.

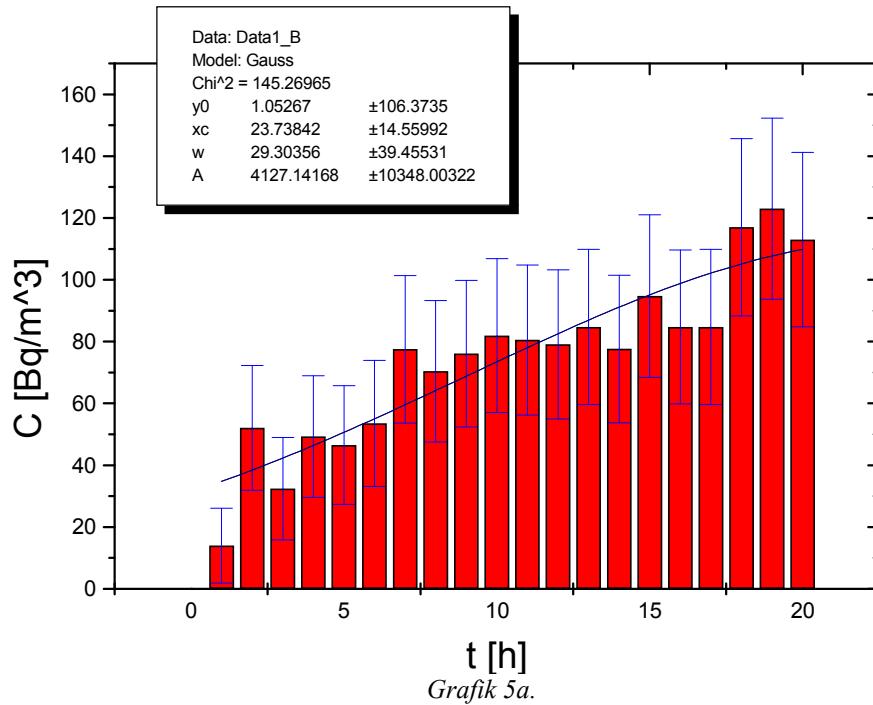
5. Tarket Laminat

t [h]	C [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$]	δ [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$]
1	14	12.1
2	52.1	20.2
3	32.4	16.6
4	49.3	19.7
5	46.5	19.2
6	53.5	20.4
7	77.5	23.9
8	70.4	22.9
9	76.1	23.7
10	81.9	24.9
11	80.5	24.3
12	79.1	24.1
13	84.7	25.1
14	77.6	23.9
15	94.7	26.3
16	84.7	24.9
17	84.7	25.1
18	117	28.7
19	123	29.3
10	113	28.2

Tabela 5.



Grafik 5.



Grafik 5a.

Gauss fit to Data1_B:

Area	Center	Width	Offset	Height
4127.1	23.738	29.304	1.0527	112.37

Prema Grafiku 5a. određena je saturaciona koncentracija za Tarket laminat, $C_s = 94.7 \frac{Bq}{m^3}$, a merna nesigurnost je $\delta(C_s) = 26.3 \frac{Bq}{m^3}$ koja odgovara petnaestom ciklusu merenja, što određuje vreme nakon početka merenja detektorom - $t_{sd} = 15h$, dok se prema dnevniku rada može odrediti da je ukupno vreme difuzije, pre uključenja uređaja - $t_d = 1424 \text{ min}$. Pa je ukupno vreme dostizanja saturacije je $t_s = 139440s$. Debljina materijala je $d = 7 \cdot 10^{-3} m$. Prema predhodnim poznatim vrednostima koje su invarijantne u odnosu na ispitivani materijal dobija se vrednost za koeficijent difuzije u iterativnom postupku, prema formuli 3.1.15, uz poznate vrednosti $C_1 = 973 \frac{Bq}{m^3}$, $\delta(C_1) = 77.5 \frac{Bq}{m^3}$ i nakon izvršenog iterativnog postupka dobija se zadnja vrednost u iteraciji:

$$D_{e1} = 2.57225 \cdot 10^{-9} \frac{m^2}{s}$$

Ako se računa prema relaciji 3.1.17, što je uprošćena formula, dobija se vrednost koeficijenta difuzije:

$$D_{e2} = 2.5725 \cdot 10^{-9} \frac{m^2}{s}$$

Ukoliko uporedimo dobijene rezultate dobijamo relativno odstupanje $9.7 \cdot 10^{-3}\%$

Računajući relativno odstupanje preko formule 3.4.3 dobija se tarket laminat $\delta(D_{e2}) = 1.79884 \cdot 10^{-9} \frac{m^2}{s}$, pa je ukupna vrednost koeficijenta difuzije za tarket laminat:

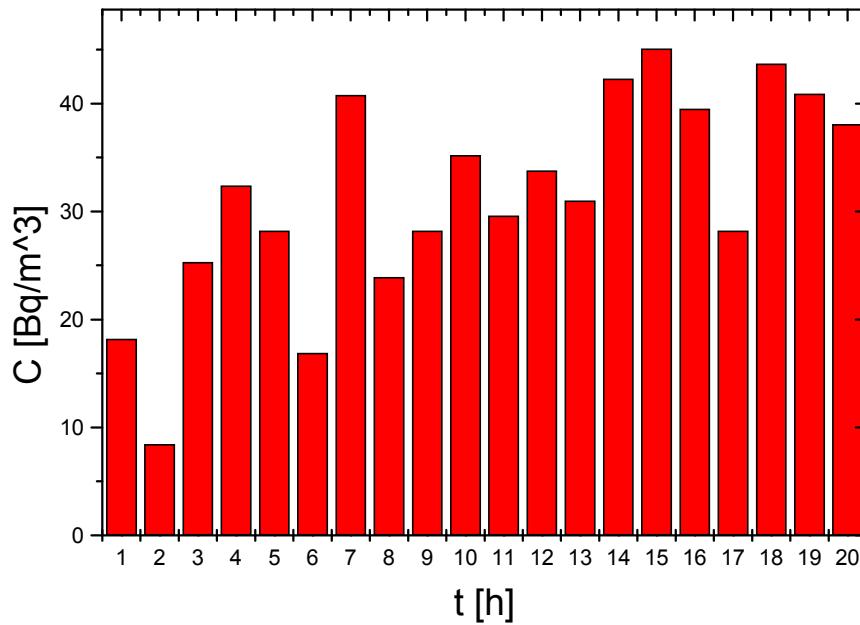
$$D_{e2} = 25(18) \cdot 10^{-10} \frac{m^2}{s}$$

Vrednost koje su dobijena pri proceni saturacione koncentracije pri merenju koeficijenta difuzije radona za slučaj kada je postavljen materijal je 3 puta manja od saturacione vrednosti kada nije postavljen tarket laminat i zato je procenjena vrednost mernog odstupanja manja u odnosu na dobijen podatak u odnosu na druge slučajeve. Tarket laminat u odnosu na aluminijum, kondor, ili tarket linoleum predstavlja lošiji izolator radona, gde je koeficijent difuzije je oko 30 puta veći od koeficijenta za aluminijum. Ipak tarket laminat predstavlja značajan izolator, sa relativnom niskom cenom za efikasnu upotrebu ovog materijala, ovu odliku ima tarket laminat zahvaljujući PVC slojevima kojim je obložen ovaj materijal. Povećanjem udela PVC zaštitnih slojeva smanjuje koeficijent difuzije radona.

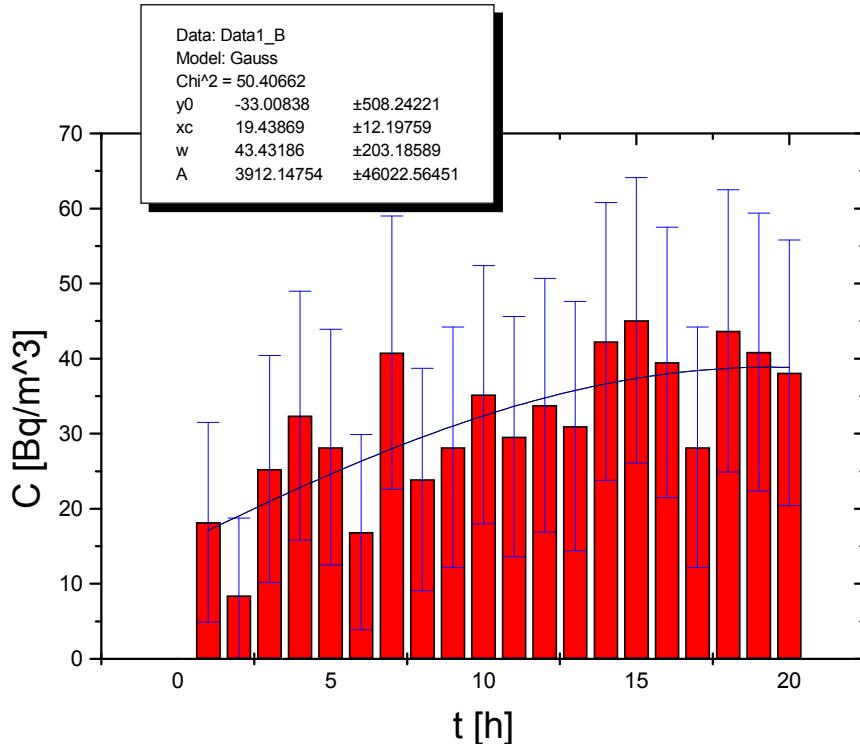
6. Aluminijum

t [h]	C [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$]	δ [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$]
1	18.2	13.3
2	8.44	10.3
3	25.3	15.1
4	32.4	16.6
5	28.2	15.7
6	16.9	13
7	40.8	18.2
8	23.9	14.8
9	28.2	16
10	35.2	17.2
11	29.6	16
12	33.8	16.9
13	31	16.6
14	42.3	18.5
15	45.1	19
16	39.5	18
17	28.2	16
18	43.7	18.8
19	40.9	18.5
20	38.1	17.7

Tabela 6.



Grafik 6.



Grafik 6a.

Gauss fit to Data1_B:

Area	Center	Width	Offset	Height
3912.1	19.439	43.432	-33.008	71.870

Prema Grafiku 6a. određena je saturaciona koncentracija za ploču aluminijuma, $C_s = 39.5 \frac{Bq}{m^3}$, $\delta(C_s) = 18 \frac{Bq}{m^3}$ koja odgovara šesnaestom ciklusu merenja, što određuje vreme nakon početka merenja instrumentom- $t_{sd} = 16h$, dok se prema dnevniku rada može odrediti da je ukupno vreme difuzije, pre uključenja uređaja - $t_d = 1534 \text{ min}$. Pa je ukupno vreme dostizanja saturacije je $t_s = 149640 \text{ s}$. Debljina materijala je $d = 7 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Prema predhodnim poznatim vrednostima koje su invarijantne u odnosu na ispitivani materijal ($C_1 = 973 \frac{Bq}{m^3}$, $\delta(C_1) = 77.5 \frac{Bq}{m^3}$) dobija se vrednost za koeficijent difuzije preko formule 3.1.15 izračunate preko iterativnog postupka, gde je poslednja dobijena vrednost:

$$D_{e1} = 9.40652 \cdot 10^{-11} \frac{m^2}{s}$$

Ako se računa prema relaciji 3.1.17 , preko pojednostavljene formule dobija se vrednost:

$$D_{e2} = 9.40648 \cdot 10^{-11} \frac{m^2}{s}$$

Ukoliko uporedimo dobijene rezultate dobijamo relativno odstupanje $3.43 \cdot 10^{-4}\%$

Računajući vrednost merne nesigurnosti dobija se numeričkom metodom propagacije grešaka vrednost: $\delta(D_{e2}) = 4.609656 \cdot 10^{-11} \frac{m^2}{s}$

Ukupna vrednost za koeficijent difuzije aluminijuma je:

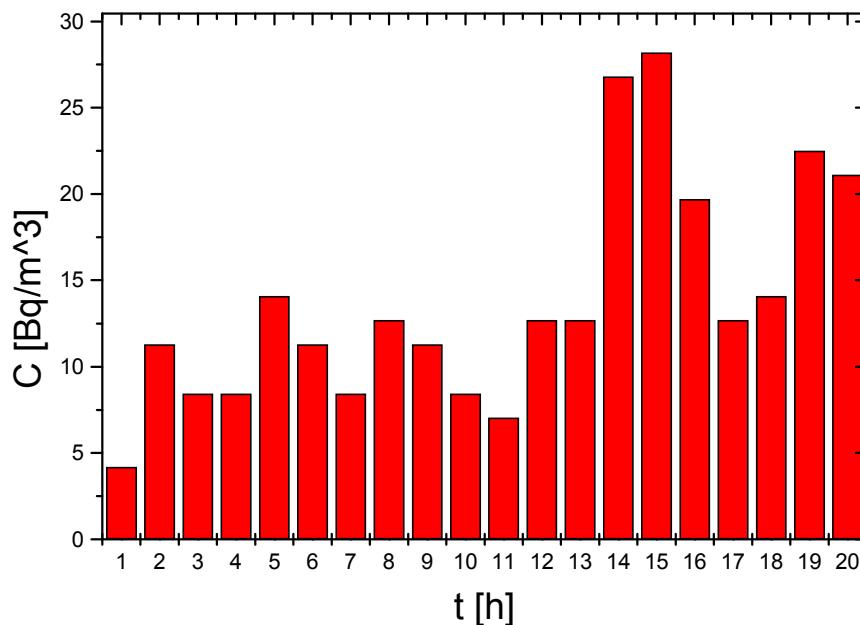
$$D_{e2} = 9(4) \cdot 10^{-11} \frac{m^2}{s}$$

Aluminijum je najbolji izolator od radona od ispitivanih materijala koji su opisani u ovom diplomskom radu. I pored male debljine i merenja koja u prvi plan nisu govorila da će aluminijum imati najmanji koeficijent difuzije radona pri interpretaciji podataka dobijena je mala vrednost. Ova vrednost je oko 2 puta manja nego za kondor materijal. Složenost postavljanja i veća cena aluminijumskog lima čini ovaj materijal manje ekonomičnijim nego kondor ili tarket linoleum, ipak u prostorijama posebne namene, kao što su to unutrašnjost laboratorijskih za niskofonska merenja, imaju veoma dobre rezultate u sprečavanju difuzije radona u unutrašnjost laboratorijskih prostora.

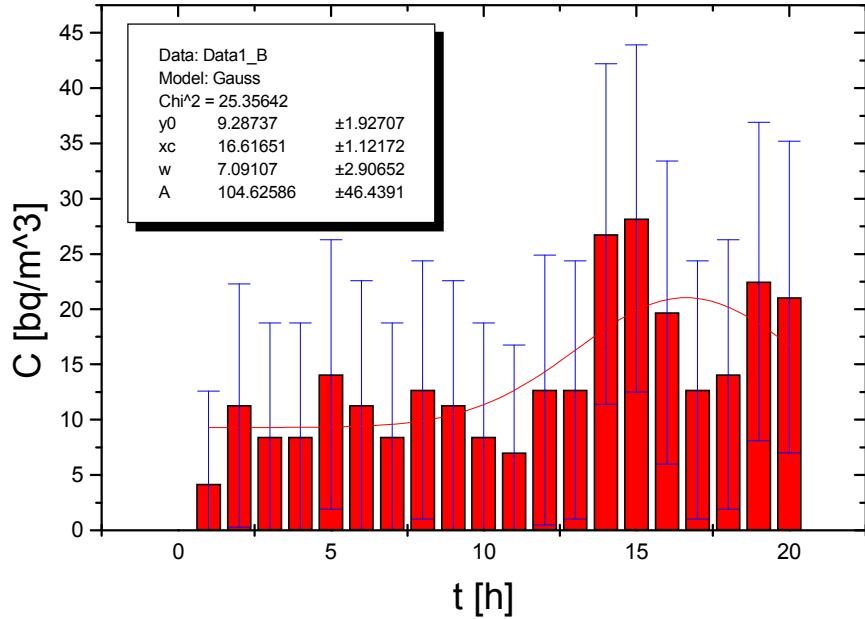
7. Guma

t [h]	C [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$]	δ [$\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$]
1	4.19	8.38
2	11.3	11
3	8.44	10.3
4	8.44	10.3
5	14.1	12.2
6	11.3	11.3
7	8.44	10.3
8	12.7	11.7
9	11.3	11.3
10	8.44	10.3
11	7.04	9.71
12	12.7	12.2
13	12.7	11.7
14	26.8	15.4
15	28.2	15.7
16	19.7	13.7
17	12.7	11.7
18	14.1	12.2
19	22.5	14.4
20	21.1	14.1

Tabela 7.



Grafik 7.



Grafik 7a.

Gauss fit to Data1_B:

Area	Center	Width	Offset	Height
104.63	16.617	7.0911	9.2874	11.772

Prema Grafiku 7a. određena je saturaciona koncentracija za gumeni materijal, $C_s = 19.7 \frac{Bq}{m^3}$, dok za mernu nesigurnost $\delta(C_s) = 13.7 \frac{Bq}{m^3}$ koja odgovara šesnaestom ciklusu merenja, što određuje vreme nakon početka merenja instrumentom - $t_{sd} = 16h$, dok se prema dnevniku rada može odrediti da je ukupno vreme difuzije, pre uključenja uređaja - $t_d = 1496\text{ min}$. Pa je ukupno vreme dostizanja saturacije je $t_s = 147360\text{ s}$. Debljina materijala je $d = 1.88 \cdot 10^{-3} m$. Prema predhodnim poznatim vrednostima koje su invarijsantne u odnosu na ispitivani materijal dobija $C_1 = 973 \frac{Bq}{m^3}$, $\delta(C_1) = 77.5 \frac{Bq}{m^3}$ se vrednost za koeficijent difuzije, za izraz koji zahteva iterativni postupak. Posle izvršenog iterativnog postupka, prema predhodno ispitivanim materijalima, zadnja dobijena vrednost u procesu iteracije je:

$$D_{e1} = 1.25288 \cdot 10^{-10} \frac{m^2}{s}$$

Ako se računa prema uprošćenoj relaciji 3.1.17 , dobija se vrednost od:

$$D_{e2} = 1.25746 \cdot 10^{-10} \frac{m^2}{s}$$

Ukoliko uporedimo dobijene rezultate dobijamo relativno odstupanje od 0.36%

Računajući mernu nesigurnost numeričkom metodom propagacijom grešaka, prema formuli 3.4.3 dobija se:

$$\delta(D_{e2}) = 9.03127 \cdot 10^{-11} \frac{m^2}{s}$$

Ukupna vrednost koeficijenta difuzije radona za gumu je

$$D_{e2} = 13(9) \cdot 10^{-11} \frac{m^2}{s}$$

Takođe i guma ima mali koeficijent difuzije radona, usled veoma gustog pokovanja polimernih molekula ugljovodonika, na osnovu toga se dobija homogena struktura bez pukotina ili vazdušnih pukotina i time su ispunjeni uslovi za smanjenu vrednost koeficijenta difuzije. Guma je nešto lošiji izolator radona u odnosu na aluminijum 1.35 puta, tako da po odnosu cene predstavlja jedan od najekonomičnijih izolatora koji se mogu koristiti široko u upotrebi radi zaštite unutrašnjosti prostorija od radona.

4. ZAKLJUČAK

Budući da čovek sve veći deo vremena provodi u zatvorenim prostorijama stambenih objekata, podložan je štetnom uticaju radona i radonovih potomaka pri inhalaciji vazduha. Zato je od velikog značaja analiza difuzije radona kroz različite vrste materijala, kako bi se što više sprečilo povećanje njegove koncentracije u unutrašnjosti građevinskih objekata. Istraživanjima vezanim za ovu oblast omogućava se bolja i ekonomičnija zaštita od radona. Na bazi rezultata eksperimenta opisanog u ovom diplomskom radu uočavaju značajne razlike u kvalitetu pojedinih materijala sa aspekta njihove moguće upotrebe radi poboljšanja zaštite unutrašnjosti postojećih objekata od radona, kao i pri izradi novih građevinskih objekata.

Osim u stambenim objektima, važna je i eliminacija radona iz niskofonskih laboratorijs za gama spektrometriju da bi se smanjio njegov uticaj na rezultate merenja, odnosno poboljšala granica detekcije radionuklida u ispitivanim uzorcima. Primer za ovo predstavlja podzemna Laboratorija Instituta za fiziku u Zemunu, gde je unutrašnjost prekrivena aluminijumskim limom. Poboljšanje trenutnog rešenja moglo bi da se ostvari proverom hermetičnosti svih postojećih spojeva, kao i kombinacijom sa drugim, dodatnim, izolacionim slojem materijala.

Eksperiment koji je realizovan i koji je predmet ovog diplomskog rada baziran je na uzorcima koji se mogu naći u svakodnevnoj primeni u građevinarstvu, te su dobijeni relevantni rezultati za koeficijent difuzije radona za ove materijale kao osobina koja karakteriše njihov kvalitet da se upotrebe u izolacione svrhe. Osnovnu nesavršnost u eksperimentu predstavlja je nemogućnost da se ostvari apsolutna hermetička razdvojenost donjeg dela eksikatorske posude u kojem se nalazio radonski izvor i gornjeg dela posude postavljenjem uzorka ogovaraajućeg materijala.

Od materijala upotrebljenih u ovom eksperimentu najniža vrednost difuzionog koeficijenta dobijena je za aluminijumski lim, i iznosi $D_{e2} = 9(4) \cdot 10^{-11} \frac{m^2}{s}$. Obzirom da je u pitanju metalna struktura unutar koje se ne nalaze pore i šupljine ovaj ispitivani material predstavlja izuzetno kvalitetnu zaštitu od prodora radona u unutrašnjost prostorija. Nešto višu vrednost (1.35 puta u odnosu na aluminijum) ima guma, pa slede kondor materijal i tarket linoleum. Za ove materijale je dobijena relativno visoka vrednost merne nesigurnosti koeficijenta difuzije, zbog malih saturacionih koncentracija prodifundovanog radona koje se približavaju graničnoj detektibilnoj koncentraciji primenom RAD7 detektora. Kako su izmerene vrednosti difuzionih koeficijenata za navedene materijale $\approx 10^{-10} m^2/s$, oni su veoma dobri izolatori od radona i preporučljivo ih je koristiti u zaštiti stambenih objekata. Za šper ploču i tarket laminat dobijene su znatno više vrednosti koeficijenta difuzije radona ($1.3 \times 10^{-6} m^2/s$ i $2.6 \times 10^{-9} m^2/s$ respektivno) te ovi materijali nisu dobri izolatori od radona, zbog njihove relativno visoke poroznosti.

Još jedan zaključak koji se može izvući iz eksperimenta je da se proces difuzije radona može dovoljno tačno opisati i relativno prostim relacijama za difuziju radona, ukoliko zanemarimo advekciju. Pošto se dobijeni rezultati veoma dobro slažu sa rezultatima merenja ostvarenim u drugim laboratorijama, primenom drugačijih metoda, ova aproksimacija je sasvim opravdana.

5. LITERATURA:

1. G. Keller, B. Hoffmann: The Radon Diffusion Length as a criterion for the Radon tightness, Hamburg-Saar, Nemačka (2002)
2. J.H.Lubin, J.D.Boice, C.H.Edling: Radon and Lung Cancer Risk, a Joint analysis of 11 Underground Miners Studies, US National Institute of Health, publikacija br. 94-3644 SAD (1994)
3. K.H.Folkerts, G.Keller, H.Muth: Experimental Investigation on Diffusion and Exhalation od radon from building materials, Hamburg (1984)
4. W.J.Speelman: Modeling and measurments of radon diffusion through soil for application on mine tailing dams, univerzitet u Western Capu (2004)
5. A.B.Tanner: Radon migration in the ground, Springfield (1980)
6. M.Jiranek, Z.Svoboda: Verification of radon protective measures by means of a computer model, Tehnički univerzitet u Pragu
7. K.P.Strong, D.M.Levins: Effects of moisture content on radon emanation from uranium ans tailings, časopis Health Physics vol. 42, pp27 (1982)
8. M.Markkanen, H. Arvela: Radon emanation from soils, Vol. 45, no.1 (1992)
9. R.Colle, R.J.Rubin, L.I.Knab, J.M.R.Hutchinson: Radon transport through and exhalation from building materials, U.S. Department of commerce, (1981)
10. K.K.Nielson: The retread model of radon generation and transport from soils into slab-on-grade house, naučni časopis Health Physics, Vol.54, No.5, (1988)
11. D.J. Breton: Ventilation and radon dynamics in Maine seasonal snowcover, Univerzitet u Mejnu, Orono SAD (2005)
12. P.Y.Meslin, F.Forget: Radon, as a geochemical probe for water, studija za meteorologiju Paris (2008.)
13. R.J.Mowris, W.J. Fisk: Modeling the effects of exhaust ventilataion on radon entrz rates and indoor radon concentrations, naučni časopis Health Physics, Vol.54, No5, (1988)
14. Q.Guo, K. Sun, J. Čeng: Methology study of radon flux from soil in China, Peking, odeljenje za fizička i tehnička istraživanja (2003.)
15. B.J.Gileti, J.L.Kulp: Radon leakage from radioactive minerals, geološka opservatorija, Larmont, univerzitet u Kolumbiji
16. I.Kozmuta, E.R. van der Graf, R.J.Meijer: Modeling radon transport in concrete, univerzitet u Groningenu (2004)
17. V. Radmilović: Prirodni radionukleidi u građevinskim materijalima sa osvrtom na nivo radona u stambenim prostorijama, Jonizujuća zračenja iz prirode (monografija), 241, Beograd (1995).
18. R. Pavlović, S. Pavlović: Razvoj concepcije smanjenja izlaganja prirodnom zračenju i novi međunarodni standardi u zaštiti od radona, Jonizujuća zračenja iz prirode (monografija), 413, Beograd (1995)
19. B.Pavlić: Modeliranje nastanka radona i transporta iz zemljišta u građevinske objekte, Seminarски rad, Novi Sad (1997)
20. D.Branković: Ispitivanje koncentracije radona u stambenim prostorijama, Diplomski rad, Novi Sad (1994)

21. D.Petrović, S.Lukić: Eksperimentalna fizika kondenzovane materije, Novi Sad 2000.
22. Lj. Čonkić, I. Bikit, M.Krmar, N.Žikić, Ž.Đurčić, M.Vesković, J.Slivka: Određivanje koncentracije radona u zatvorenim prostorijama, Novi Sad (1998)
23. S. Ćurčić: Gama-spektrometrijsko određivanje koncentracije radona, Diplomski rad, PMF, Novi Sad (1999)
24. Literatura sa internet sajtova: Wikipedia - The free encyclopedia (online) <http://en.wikipedia.org/wiki/Radon>
25. <http://web.ead.anl.gov/resrad/datacoll/radon.htm>
26. http://www.kvi.nl/~annrep/ar2000/kviar_2000_c7_2_7.html
27. <http://www.springerlink.com/content/f886w073x274025r/>
28. http://www.aarst.org/proceedings/2004/2004_11_Radon_Diffusion_Emanation_Fraction_for_NIST_Poly.pdf
29. http://www.jstage.jst.go.jp/article/jnst/45/7/45_647/_article

Kratka biografija

Rođen sam u Novom Sadu 26. jula 1982. godine. Pohađao sam osnovnu školu „Đura Daničić“ u Novom Sadu. 1997. godine sam upisao gimnaziju „Jovan Jovanović Zmaj“ prirodno-matematički smer u Novom Sadu. 2001. sam položio za CAE-Second English Certificate, posle osam godina slušanja nastave engleskog jezika na „Novosadskom otvorenom univerzitetu.“ Po završetku gimnazije 2001. godine sam upisao studije fizike na Departmanu za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu, smer Diplomirani fizičar. 2008. godine sam položio sve ispite predviđene po starom nastavnom planu i programu studija.



UNIVERZITET U NOVOM SADU**PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET****KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA***Redni broj:***RBR***Identifikacioni broj:***IBR***Tip dokumentacije:*

Monografska dokumentacija

TD*Tip zapisa:*

Tekstualni štampani materijal

TZ*Vrsta rada:*

Diplomski rad

VR*Autor:*

Aleksandar Radukin Kosanović

AU*Mentor:*

Doc.dr Dušan Mrđa

MN*Naslov rada:*

Merenje koeficijenta difuzije radona kroz građevinske materijale

NR*Jezik publikacije:*

srpski (latinica)

JP*Jezik izvoda:*

srpski/engleski

JI*Zemlja publikovanja:*

Srbija

ZP*Uže geografsko područje:*

Vojvodina

UGP*Godina:*

2008

GO*Izdavač:*

Autorski reprint

IZ*Mesto i adresa:*Prirodno-matematički fakultet, Tgr Dositeja Obradovića 4,
Novi Sad**MA***Fizički opis rada:***FO***Naučna oblast:*

Fizika

NO*Naučna disciplina:*

Nuklearna fizika

ND*Predmetna odrednica/ključne reči:*

Difuzija radona

PO**UDK***Čuva se:*

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

ČU*Važna napomena:*

nema

VN*Izvod:***IZ***Datum prihvatanja teme od NN veća:***DP***Datum odbrane DO:*

25.11.2008.

Članovi komisije KO:

Doc.dr Dušan Mrđa

Predsednik:

Prof.dr Ištvan Bikit

član:

Prof.dr Radomir Kobilarov

član:

**UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS
KEY WORDS DOCUMENTACION**

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

Monograph documentation

DT

Type of record:

Textual printed materijal

TR

Content code:

Final paper/Final exam

CC

Author:

Aleksandar Radukin Kosanović

AU

Mentor/comentor:

Phd. Dušan Mrda

MN

Title:

Radon diffusion coefficient measurement through building
materijals

TI

Language of text:

Serbian (Latin)

LT

Language of abstract:

English

LA

Country of publication:

Serbia

CP

Locality of publication:

Vojvodina

CP

Publication year:

2008

PY

Publisher:

Author's reprint

PU

Publication place:

Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja
Obradovića 4, Novi Sad

PP

Physical description:

Physics

PD

Scientific field:

Nuklear physics

SF

Scientific discipline:

Radon diffusion

SD

Subject/Key words:

Radon diffusion

SKW UC

Holding data:

Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

HD

Note:

none

N

Abstract:

AB

Accepted bz the Scientific Board:

ASB

Defended on:

25.11.2008.

DE

Thesis defend board DB:

Phd. Dušan Mrda

President:

Profesor.Phd. Ištván Bikit

Member:

Profesor.Phd. Radomir Kobilarov