

Stanovení obsahu radonu ve vzduchu

Vadym Prokopec a Gabriela Broncová



**VYSOKÁ ŠKOLA
CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ
V PRAZE**

2018

**Pracovní text pro Podzemní výukové středisko Josef
Meziuniverzitní laboratoř pro *in situ* výuku transportních procesů**

Slouží jako zdroj informací během laboratorní úlohy, která je součástí předmětu „Laboratoře z analytické chemie II“ základního bakalářského programu VŠCHT Praha.

Podpořeno v rámci projektu PIGA C1_VSCHT_2018_053

„Udržitelnost a inovace *in situ* výuky transportních procesů v reálném horninovém prostředí v rámci vybraných předmětů bakalářského a magisterského studia na Ústavu analytické chemie“

Teoretický úvod

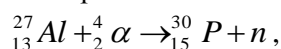
Radioaktivita

Jádra atomů mohou obecně podléhat určitým přeměnám, které jsou buď samovolné, nebo k nim dochází účinkem jiného jádra nebo částice. Tento proces se označuje jako jaderná reakce nebo jaderná přeměna, produktem jaderné reakce je nové jádro, jež je charakterizováno velkou specifickou energií a tím, že kolem sebe postupně zprvu vytváří chybějící nebo neúplný elektronový obal až do vzniku relativně stabilního útvaru. Druhým produktem jaderné reakce je jaderné záření povahy korpuskulární nebo elektromagnetické. Toto záření má velkou energii a může vyvolávat v látce další změny a to buď fyzikální, nebo chemické povahy. Radioaktivní rozpad látky je vlastností atomů, rozpad jader nezávisí na chemickém stavu radioaktivního prvku^{1,2}.

Samovolné přeměně jader nestabilních nuklidů na jiná jádra, při níž vzniká ionizující **radioaktivní záření**, se říká **radioaktivita** neboli **radioaktivní rozpad**. Pokud dojde ke změně počtu protonů v jádře, dojde ke změně prvku. Existuje radioaktivita **přirozená** a **umělá**.

Přirozená radioaktivita je důsledkem samovolného rozpadu atomového jádra. V přírodě se vyskytuje mnoho přirozeně **radioaktivních látek**, které obsahují i tkáně živých organismů. Vnější vlivem např. působením urychlených částic nebo řetězovou reakcí vznikají prvky s umělou radioaktivitu. Tyto jádra se v přírodě nevyskytují. Zákonitosti rozpadu uměle vytvořených jader jsou shodné se zákony popisujícími rozpad přirozeně radioaktivních jader.

Jev umělé radioaktivity lze přiblížit následujícím příkladem. Vložením radioaktivního izotopu polonia ${}_{84}^{210}\text{Po}$ do hliníkové nádoby vzniká pronikavé záření, které neustává ani po odstranění polonia z nádoby. Tato nádoba se působením radioaktivního polonia stala uměle radioaktivní. Polonium ${}_{84}^{210}\text{Po}$ je totiž přirozeně radioaktivní, přičemž při svém rozpadu vyzařuje α částice, které přeměňují hliník na izotop fosforu:



kde n označuje neutron.

Důležité teoretické pojmy a veličiny

Nuklid je soubor atomů se stejným protonovým i nukleonovým číslem (stejný počet protonů a nukleonů v jádře znamená, že se jedná o jeden prvek). Prvky se v přírodě vyskytují většinou jako směs několika nuklidů. Například uhlík se vyskytuje jako směs nuklidu ${}^{12}\text{C}$ a nuklidu ${}^{13}\text{C}$, proto je v tabulkách uváděna atomová hmotnost uhlíku jako 12,011 atomové hmotnostní jednotky, což odpovídá relativnímu zastoupení obou vyskytujících se nuklidů. Nuklidy jednoho prvku se nazývají izotopy (například ${}^{235}\text{U}$ a ${}^{238}\text{U}$). Jádra jednotlivých izotopů se obvykle liší svou stabilitou.

Poločas rozpadu T charakterizuje radioaktivní proces vzhledem k tomu, že počet atomů radioaktivní látky není obvykle přímo měřitelný a je definován jako doba, za kterou dojde k rozpadu poloviny z původního počtu atomů radionuklidu. Počet částic po uplynutí této doby je $n = n_0/2$, čímž dostaneme pro poločas rozpadu vztah:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx 0,693 \cdot \lambda^{-1}$$

$\lambda [s^{-1}]$ je tzv. **rozpadová konstanta**, která charakterizuje předpokládanou rychlost rozpadu radionuklidu a kvantitativně vyjadřuje stupeň jeho nestability.

Střední doba života τ vyjadřuje nejpravděpodobnější délku trvání života kteréhokoliv atomu daného radioaktivního nuklidu. Je to čas, po němž klesne původní počet atomových jader n_0 na hodnotu $n = n_0 / e$. Pro střední dobu života psát:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{\ln 2}$$

Aktivita (radioaktivita) A charakterizuje rychlost radioaktivní přeměny, což je úbytek celkového počtu atomů n za čas t . V daném okamžiku je tato veličina úměrná celkovému počtu radioaktivních atomů:

$$A = \left| \frac{dn}{dt} \right|$$

Velichina označená A uvádí střední počet přeměněných jader. **Jednotkou** je **Becquerel** [čti bekerel] $1Bq = 1s^{-1}$. Někdy se uvádí ještě starší jednotka curie $1Ci = 3,7 \cdot 10^{10} Bq$. Obvykle se používá hmotnostní (Bq/kg), objemová (Bq/m^3) nebo plošná (Bq/m^2) aktivita.

Rozpad se děje náhodnými akty, nikoli stárnutím částic. Rozpad jádra nezávisí na žádných fyzikálních podmínkách a je dán pouze vnitrojadernými podmínkami. Každé jádro podléhá v určitém okamžiku stejné pravděpodobnosti rozpadu, rozpad má statistický charakter a lze jej vyjádřit jako počet částic za jednotku času, počet rozpadlých částic je úměrný momentálnímu počtu atomů.

Zákon radioaktivního rozpadu je dán vztahem: $A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$,

kde A_0 označuje aktivitu v počátečním čase a A je aktivita v čase t . Aktivita, tedy rychlost rozpadu, klesá s časem¹⁻³.

Druhy radioaktivního záření

Existuje několik druhů radioaktivního záření, které se liší svou schopností pronikat látkou a chováním v elektrickém a magnetickém poli. Tyto druhy radioaktivního záření byly označeny jako záření α , záření β , záření γ či neutronové záření^{1,3}.

- **Záření α** je proud jader helia (α -částic) a nese kladný elektrický náboj, má nejkratší dosah, lze jej zastavit listem papíru nebo pokožkou ruky. Nebezpečnost záření je však v okamžiku, kdy se zářič alfa dostane do těla například v potravě. Přeměně alfa podléhá například uran ^{238}U , který se samovolně rozpadá a vzniká z něj lehčí jádro thoria ^{234}Th .
- **Záření β** je proud záporně nabitých elektronů. Někdy se rozlišuje záření β^- (elektrony) a β^+ (kladně nabitě pozitrony), jejich pohyb může být tedy ovlivňován elektrickým polem. Pronikavost beta záření je větší než u alfa částic, mohou pronikat materiály s nízkou hustotou nebo malou tloušťkou, lze jej zachytit 1 cm plexiskla nebo 1 mm olova. Často se k odstínění používá tenká hliníková fólie. Jednomu typu přeměny beta podléhá bismut $^{212}_{83}\text{Bi}$. Beta rozpadem bismutu takto vzniká polonium $^{212}_{84}\text{Po}$.
- **Záření γ** je elektromagnetické záření vysoké frekvence neboli proud velmi energetických fotonů s podobnými vlastnostmi jako světlo nebo rentgenové záření. Nemá elektrický náboj, a proto nereaguje na elektrické pole. Jeho pronikavost je velmi vysoká, pro odstínění se používají velmi tlusté štíty z kovů velké hustoty (např. olovo) anebo slitin kovů velké hustoty. Pro ochranu před škodlivými účinky gama záření byly stanoveny tzv. polotloušťky materiálů. Polotloušťka určitého materiálu udává tloušťku tohoto materiálu, která zachytí právě polovinu množství dopadajícího gama záření. Pro průchod gama záření má vzduch polotloušťku 120 m, olovo pak 13 mm. Platí, že čím vyšší hustota a tloušťka štítu, tím více je záření odstíněno.

Záření gama je pro živé organismy včetně člověka nebezpečné. Způsobuje podobná poškození jako rentgenové záření: popáleniny, rakovinu a genové mutace. Proto je nutno se před jeho účinky chránit.

- **Neutronové záření** je proud neutronů, jejichž zdrojem může být například jaderný reaktor. Nemá elektrický náboj a je velmi pronikavé. Toto záření pohlcují látky, které obsahují hodně vodíkových jader. V praxi se ke stínění před tímto druhem záření používá voda, parafin či beton^{1,3}.

Rozpadová řada (přeměnová nebo radioaktivní řada) popisuje postupný radioaktivní rozpad nestabilních jader těžkých prvků⁴. Pomocí kvantové mechaniky lze pro každý izotop spočítat pravděpodobnost, že se jádro v daném časovém intervalu rozpadne. Pro větší množství látky z toho lze určit poločas rozpadu, který udává, za jak dlouho se rozpadne právě polovina jader ve vzorku. U těžkých prvků jsou produkty rozpadu rovněž nestabilní a rozpadají se dále. Tento proces popisuje rozpadová řada.

Známé jsou čtyři základní rozpadové řady:

- **Uranová**, začínající uranem ^{238}U a končící olovem ^{206}Pb
- **Aktinuranová**, začínající uranem ^{235}U a končící olovem ^{207}Pb
- **Thoriová**, začínající thoriem ^{232}Th a končící olovem ^{208}Pb
- **Neptuniová**, (umělá) začínající plutoniem ^{241}Pu a končící bismutem ^{209}Bi

Počet rozpadových řad vyplývá z toho, že vyzařováním alfa se počet nukleonů mění právě o čtyři, zářením beta se nemění.

Přírodní radioaktivita a její rozdělení

Přírodní ozáření je způsobeno dvěma odlišnými zdroji⁴:

A. kosmickým zářením dopadajícím na Zemi z vesmíru, které ozařuje člověka v závislosti na nadmořské výšce a poloze na Zemi.

B. přírodními radionuklidy, které se vyskytují v našem životním prostředí. Ty se dají podle původu rozdělit do tří skupin:

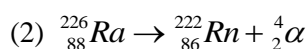
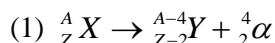
- **Kosmogenní radionuklidy**, které vznikají průběžně jadernými reakcemi při interakci kosmického záření se stabilními prvky zejména ve vnějším obalu Země (např. izotop ^{14}C , ^3H , ^7Be , ^{22}Na aj).
- Původní **primordiální radionuklidy**, které vznikly v raných stádiích vesmíru a díky velmi dlouhému poločasu rozpadu ($>10^8$ roků) se dosud vyskytují na Zemi ve významném množství (např. ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{87}Rb aj.). Řada dalších původně přítomných radionuklidů kvůli kratšímu poločasu již vymřela nebo jsou prakticky nedetekovatelné.
- Radionuklidy vznikající **sekundárně** z původních radionuklidů tvořících rozpadové řady. Ze čtyř možných rozpadových řad: uran-radiové (vychází od ^{238}U), thoriové (od ^{232}Th), aktiniové (od ^{235}U) a neptuniové (od ^{237}Np) se v přírodě setkáme pouze s prvními třemi.

Poslední dvě skupiny přírodních radionuklidů jsou "Zemního" původu, a proto se označují jako **terestrální**. Z hlediska ozáření člověka jsou významné jen některé přírodní radionuklidy. Zevní ozáření gama člověka způsobuje především přítomnost ^{226}Ra (resp. uranu), ^{232}Th a ^{40}K v horninách a půdách povrchové vrstvy Země (jde o vrstvu několik desítek centimetrů). Z hlediska vnitřního ozáření je zcela dominantní radon (^{222}Rn) a thoron (^{220}Rn) a jejich produkty přeměny. Radonu jsou proto věnovány podrobně další stránky⁴.

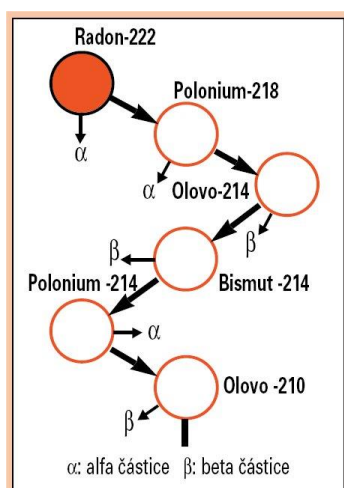
Vlastnosti radonu a jeho charakteristika

Radon, jehož chemická značka je **Rn**, je přírodní bezbarvý nehořlavý radioaktivní plyn bez chuti a zápachu, který je trvalou složkou životního prostředí, kterou nelze regulovat. Byl objeven roku 1900

německým vědcem Frederickem Dornem. Radon nemá žádný stabilní izotop*, v současné době je známo asi dvacet nestabilních izotopů radonu. Radon vzniká radioaktivním rozpadem radia a uranu³. Při rozpadu radia a vzniku radonu se uvolňuje záření α podle schématu (1)¹, respektive (2):



Radon je nestálý a postupně zaniká dalším radioaktivním rozpadem (viz obr. 1)⁵.



Obrázek 1: Schematické znázornění radioaktivního rozpadu radonu.

Radon je velmi dobře rozpustný ve vodě (rozpustnost při 20°C 230 cm³/kg) a v nepolárních organických rozpouštědlech. Je možno ho při velmi nízkých teplotách zachytit na aktivní uhlí. Chemické sloučeniny tvoří pouze s kyslíkem, fluorem a chlorem, přičemž všechny jsou nestálé. Uvedené sloučeniny jsou mimořádně silnými oxidačními činidly.

Výskyt, získávání, využití radonu a zdravotní rizika

Množství radonu v zemské atmosféře je velmi nízké, prakticky na hranici detekce těch nejcitlivějších analytických metod. Nejčastěji se nalézá ve vývěrech podzemních minerálních vod jako produkt rozpadu jader radia, thoria a uranu. V malých dávkách může vyvěrat z podloží přímo v plynné podobě nebo se radon absorbuje do podzemní vody a dostává se na povrch.

Studium obsahu izotopů radonu v podzemních vodách slouží v geologii k určení jejich původu a stáří. Převážná většina izotopů radonu funguje jako alfa-zářiče s poměrně krátkým poločasem rozpadu (nejznámější izotop ²²²Rn má poločas rozpadu 3,82 dne, další izotopy už jen: ²²⁰Rn 54,5 s a ²¹⁹Rn 3,92 s). Používají se proto někdy pro krátkodobé lokální ozařování vybraných tkání v medicíně. Radon je ale stále častěji využíván zejména v lázeňské léčbě. Radonová voda (voda obsahující rozpuštěný radon) se používá např. v jáchymovských lázních, kam je dopravována potrubím z bývalého uranového dolu Svornost, který se měrnou aktivitou přibližně 9-10 kBq/l řadí mezi velmi silné radonové vody (tj. více než 4 kBq/l). Pramen Agricola (navrtný v roce 2000) má měrnou aktivitu ještě přibližně dvakrát tak větší, ale jeho vydatnost je menší. Vydatnost všech Jáchymovských radioaktivních pramenů činí řádově 500m³/den^{3,6}. Typická délka pobytu pacienta ve vaně s radonovou vodou je dvacet minut. Voda z termálních minerálních radonových pramenů se používá k léčbě některých chronických chorob pohybového aparátu. Nejdůležitější z klinických účinků radonových koupelí je účinek analgetický. Koupele tlumí bolesti u chronických bolestivých stavů. V mechanismu

* Izotopy jsou atomy téhož prvku, které mají stejné chemické vlastnosti, ale mohou mít velmi rozdílné vlastnosti fyzikální, ve své molekule mají různý počet neutronů, liší se od sebe molekulovými hmotnostmi.

účinku terapie alfa zářením je však dosud mnoho nejasného a stále probíhá objektivizace těchto metod^{3,6}.

Radon se může z místa svého vzniku šířit vzduchem a při dlouhodobém styku zvyšuje riziko vzniku plicní rakoviny. Přitom nebezpečné nejsou ani tak samotné izotopy radonu, ale produkty jeho přeměny, zejména krátkodobé jako polonium ^{218}Po a ^{214}Po . Ty díky své vysoké ionizační schopnosti mohou zapříčinit nekontrolovatelné množení buněk - rakovinu. Pravděpodobnost tohoto rizika je u jedince úměrná míře a délce expozice ze strany radonu a produktů jeho přeměny. Produkty, vzniklé rozpadem radonových atomů jsou na rozdíl od radonu kovy a po svém vzniku tvoří buď shluky s aerosolovými částicemi, nebo např. s vodní párou. Takto vázané produkty přeměny radonu mohou být při vdechnutí zachyceny v dýchacím ústrojí a volně se přeměnit.

První pozorované účinky radonu na lidské zdraví jsou zmínky o tzv. hornické nebo jáchymovské nemoci, kterou onemocněli horníci v jáchymovských stříbrných dolech. Stříbrné žíly byly provázány uranovou mineralizací a při těžbě žil s vyšším podílem uranových minerálů klesaly obsahy stříbra. Je zřejmé, že v prostředí uranové mineralizace a při tehdejších nedostatečných ventilačních podmínkách byli horníci vystaveni vysoké expozici. Diagnóza nemoci – rakovina plic a dýchacích cest – byla stanovena teprve v minulém století.

Zdroj radonu může být několikerý, především stavební materiál a podloží domu. Radon se může uvolňovat i z dodávané vody. Pro všechny stavby, tedy i pro novostavby je významným zdrojem radonu geologické podloží, tedy horniny a zeminy pod domem. Ty obsahují různé množství stopového uranu a radia, ze kterého vzniká radon. Ten se jako plyn dostává do půdního vzduchu, se kterým může přes základovou konstrukci pronikat do interiéru stavby. Dalším možným zdrojem radonu je stavební materiál. Některé škvárobetonové tvárnice pocházející z rynholecké škváry obsahují vysoké aktivity radia. V současné době je radioaktivita všech stavebních materiálů dodávaných na Český trh pod kontrolou Státního úřadu pro jadernou bezpečnost⁷. Česká republika se díky geologické stavbě řadí k zemím s vyšší průměrnou koncentrací radonu v bytech. Volný nevázaný plynný radon je obsažen jak v půdním vzduchu, tak ve vnitřním ovzduší objektu.

Radon a jeho dceřiné produkty nejsou detekovány přímo. Měření je založeno na detekci ionizujícího záření, vznikajícího při radioaktivních rozpadech. Částice alfa a beta vyvolávají v detektorech elektrické, světelné nebo chemické jevy, které jsou pak přístrojem vyhodnoceny a převedeny na objemovou aktivitu⁸.

Měření radonu ve stavbách a na stavebních pozemcích

V polovině osmdesátých let byly nalezeny budovy s vysokými koncentracemi radonu, jejichž příčinou bylo pronikání radonu z podloží. Postupně bylo zahájeno systematické proměřování území republiky. Legislativně byla tato problematika upravena vyhláškou ministra zdravotnictví č. 76/1991 Sb. a usnesením vlády k radonové problematice č.150/1990 a č.709/ 1993. V „Atomovém zákoně“ (zákon č.18/97 Sb.) a jeho prováděcích vyhláškách (307/02 Sb. a 499/05 Sb.) je řešena mimo jiné i problematika měření radonu. Současně s těmito předpisy se měřením radonu zabývá i novela „Stavebního zákona“ (zák.č.83/1998 v čl. VI). Povinnost měřit radon v uzavřených objektech (zpravidla pro kolaudaci či před rekonstrukcí), nebo zjišťovat radonový index pozemku přímo na stavebních parcelách zákon stanovuje stavebníkovi nebo majiteli nemovitosti⁹.

Měření obsahu radonu je prováděno ze dvou základních důvodů. 1. Požadavky legislativy (plnění programů monitorování, plnění požadavků na obsah radonu v horninách pro stavební řízení atd.) 2. Z vlastní zvědavosti na stav věcí. Měření pro první skupinu může zajistit pouze akreditovaná osoba s metodikami schválenými Státním úřadem pro jadernou bezpečnost a přístroji ověřenými Českým metrologickým institutem, inspektorátem pro ionizující záření. Měření pro druhou skupinu může zajistit kdokoli. První skupina měřitelů zajišťuje potřebné razítko, druhá skupina pouze číselnou hodnotu. Koncentrace radonu v ovzduší stavby a příkon fotonového dávkového ekvivalentu záření gama by proto měly být důležité informace při rozhodování o koupi nemovitosti. Sledování

koncentrace radonu má dále užití při ložiskovém průzkumu (uranu, ropy), při hydrologických studiích a používá se jako environmentální indikátor.

Vybrané metody měření plynného radonu¹⁰

Adsorpce na aktivním uhlí

Kontejner s aktivním uhlím je po dobu vzorkování vystaven na otevřeném prostoru na vzduchu, kdy dochází k adsorpci radonu z ovzduší. Kontejner je následně odeslán do laboratoře. K měření gama aktivity je používán scintilační detektor, výpočet koncentrace radonu se provádí na základě předešlé kalibrace. Nevýhodou je kontinuální adsorpce a desorpce radonu během celé doby vzorkování.

Detekce stopy alfa částic

Jako detektor se používá kus speciálního plastického materiálu uloženého do vzorkovací nádoby. Vzduch difunduje filtrem na otvoru nádoby. α -částice vzniklé při rozpadu dopadají na detektor a zanechávají na něm stopy po svém nárazu. Po ukončení depozice se nádoba vrací do laboratoře. Vyhodnocuje se plocha detektoru a pod mikroskopem se počítají stopy po jednotlivých částicích na definované ploše, tyto údaje pak slouží k výpočtu koncentrace radonu.

Kontinuální monitorování

V této technice se používají přístroje umožňující kontinuální záznam koncentrace plynného radonu v reálném čase. Vzduch samovolně difunduje do vzorkovací a vyhodnocovací jednotky anebo je do ní přiváděn čerpadlem. Vzorkovací jednotkou je obvykle scintilační cela nebo ionizační komora. Scintilačně detekované fotony jsou zaznamenány pomocí fotonásobiče, výstupní údaje jsou elektronicky zpracovány a převedeny na koncentraci radonu pro předem definovaný interval.

Elektretová ionizační komora

Do ionizační komory je umístěn elektrostaticky polarizovaný diskový detektor (tzv. elektret). Během měření dochází k difuzi vzduchu s obsaženým radonem přes polopropustný filtr v otvoru komory. V důsledku ionizačních procesů způsobených rozpadem radonu dochází k poklesu napětí na diskovém detektoru. Na základě předchozí kalibrace je ze změny napětí vypočtena koncentrace radonu. Tento typ detektoru lze využívat pro dlouhodobá měření, což je výhodné zejména při nízkých koncentracích radonu.

Integrované měření v evakuované scintilační komoře.

V prázdné scintilační cele opatřené napouštěcím ventilem je vytvořen podtlak. Regulací průtoku ventilem lze docílit naplnění cely okolním vzduchem v předem definovaném časovém horizontu podle stanovených podmínek a předpokládané koncentrace radonu. Na konci měření je ventil uzavřen a komora je podrobena analýze. Okénko scintilační komory je umístěno před fotonásobič a jsou zaznamenávány fotony vzniklé v průběhu nárazu α -částic z rozpadových procesů do stěn komory pokrytých sulfidem zinečnatým.

Princip měření radonu v laboratorní úloze.

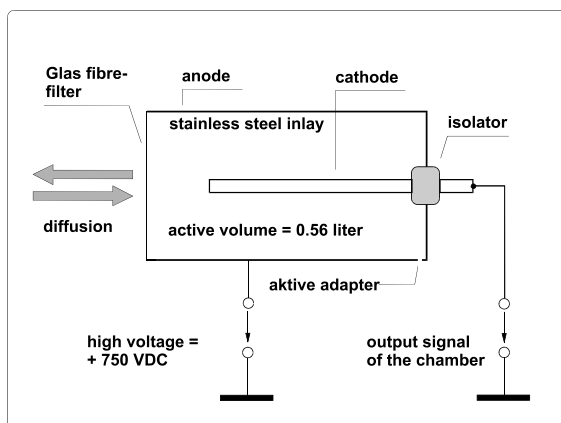
Měření radonu je realizováno na přístroji AlphaGuard PQ 2000 PRO (obr. 2), což je mobilní měřič pro mapování hodnot objemové aktivity radonu v jednotlivých lokalitách štol Josef. Množství radonu lze měřit ve vzduchu, půdě, stavebních materiálech či vodě. Analýza vzorků za reálných podmínek umožní studentům poznat, jak lze měřit obsah radonu v různých materiálech v praxi, což je požadováno např. při posuzování vhodnosti pozemku pro stavbu domů a také jako kontrolní měření před kolaudací.



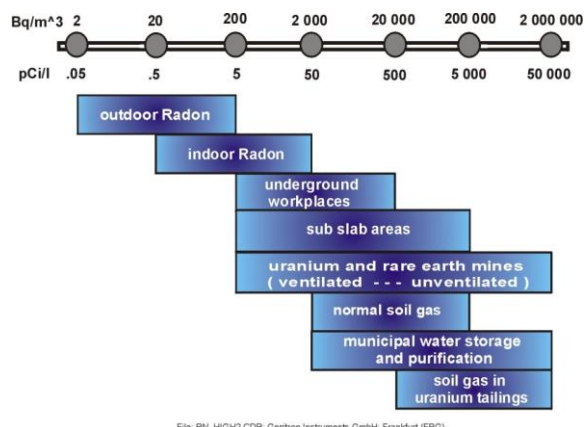
Obrázek 2: Přenosný přístroj AlphaGuard pro monitorování radonu.

Přístroj pracuje na principu čítání pulsů v ionizační komůrce (proporcionální komora, obr. 3), na kterou je vkládáno vysoké napětí. Ionty vzniklé ionizací plynové náplně se shromažďují na elektrodách a ve vnějším obvodu vznikají impulzy. Jejich velikost je přímo úměrná energii záření. Tento typ detektorů slouží k měření počtu a energie lehkých i těžkých částic¹¹. Detektor je navržen pro pasivní rychlou difuzi vzorku dovnitř v rozmezí jedno- až 60 minutových cyklů, objem vzorku může být až 0,56 l. Citlivost detektoru je 1 CPM (counts per minute) při 20 Bq/m³. Přístroj poskytuje vysokou účinnost detekce v širokém rozmezí měřené aktivity alfa záření od 2 do 2 000 000 Bq/m³, rychlou odezvu, permanentní snímání signálu s dlouhodobě trvající stabilní kalibrací.

Výskyt radonu a jeho množství v různých materiálech je znázorněno na obrázku 4. Obsah radonu venku (ve volné přírodě) se pohybuje v rozmezí od 2 do 200 Bq/m³. Ve vnitřních prostorech (stavby, obytné domy) je obsah radonu asi 10x vyšší (20-2000 Bq/m³). V podzemních pracovištích (stavby, uranové doly, laboratoře) se může úroveň radonu pohybovat v rozmezí 200 až 20 000 Bq/m³. V půdních plynech pak může být množství radonu až 200 000 Bq/m³. Nejvyšší možný obsah radonu se vyskytuje v půdách uranových rud.



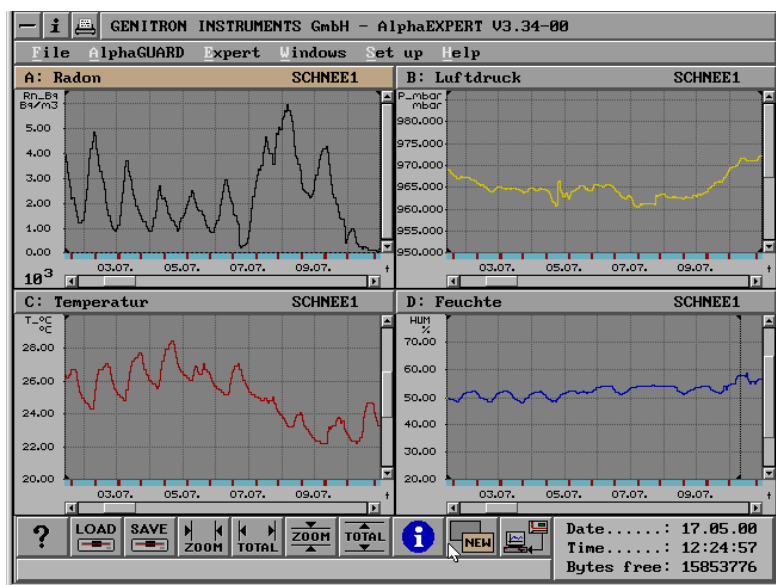
Obrázek 3: Princip měření s přístrojem AlphaGuard.



Obrázek 4: Výskyt a rozmezí měření objemové aktivity radonu v různých materiálech.

Přístroj může pracovat ve dvou módech: i) difúzní mód v režimu měření 10-60 min cyklu, ii) průtočný mód v režimu 1-10 min cyklu.

Vedle aktivity radonu v ovzduší štoly lze současně sledovat další klimatické parametry/veličiny jako tlak vzduchu (700 – 1100 mbar), teplotu (-10 až +50°C) a vlhkost vzduchu (0 – 99% rH (relative humidity)) s rozlišením 0,1 jednotky pomocí integrovaných senzorů, jak je patrné z obrázku 5.



Obrázek 5: DataEXPERT-okno představuje sérii simultánního měření parametrů jako koncentrace radonu, tlak vzduchu, teplota a vlhkost vzduchu

Naměřená data ve formátu ASCII lze snadno exportovat do MS Excel.

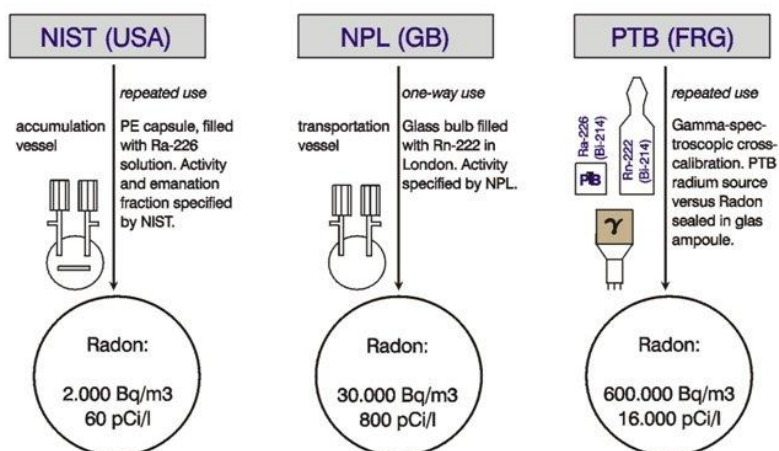
Přístroj umožňuje sledovat množství radonu i v kapalných vzorcích. Po odebrání vzorků vody vyvěrající z vrtů ve štole, se v laboratoři na konci štoly připojí adaptéry, např. pumpa a absorbér a naměří se aktivita radonu rozpuštěného ve vzorcích podzemní vody (viz obr. 6).



Obrázek 6: Sestava pro měření radonu ve vzorcích vody s připojením adaptérů: pumpy pro nasávání vzorku a absorbéru.

Přístroj je nutné po určité době (po 5 letech) kalibrovat na vyhrazeném místě pomocí standardů. Používají se tři standardy označené: NIST, NPL a PTB. Standardy jsou např. ve formě polyethylenové kapsule, která je plněna roztokem obsahující Ra²²⁶ nebo skleněné baňky naplněné Rn²²² a další (viz obr. 7). Kalibraci přístroje provádí specializované mezinárodní laboratoře s oprávněním. Přístroj se

vloží do kontajneru z nerezové oceli, který je na obrázku 8 označen číslem (1), připojí se k nádobě obsahující standard, nejprve se provede nastavení přístrojové nuly pomocí aktivního uhlí, které je umístěno ve zvláštní nádobě (2) a pak následuje kalibrace pomocí standardu (3).



Obrázek 7: Schéma mezinárodních standardů pro kalibraci

Obrázek 8: Uspořádání nádob pro kalibrace přístroje

Literatura

1. Kahn B.: Radioanalytical Chemistry, Springer, 2007
2. Přednášky: Jan Fährich, Radioanalytické metody, Ústav analytické chemie, VŠCHT Praha, 2018
3. <http://cs.wikipedia.org/>
4. www.suro.cz/ Státní ústav radiální ochrany
5. Klener V.: Radon bulletin, červen 2001
6. <http://www.laznejachymov.cz>
7. <http://www.sujb.cz/> Státní úřad pro jadernou bezpečnost
8. <http://www.alfa-radon.com>
9. <http://www.radioaktivita.cz>
10. <http://www.epa.gov>
11. <http://www.cez.cz>

Pozn.: Následující text vytiskněte a přineste s sebou do školy Josef (ostatní – teorii a obecné povídání není třeba tisknout).

Ovládání přístroje

Spuštění zařízení provedte stisknutím postranního tlačítka **ON**.

Pokud je přístroj zcela nabitý, na předním panelu bude po spuštění svítit zelená kontrolka (při chodu přístroje na baterie tato kontrolka kontinuálně bliká až 75h).

Ovládání dalších funkcí přístroje se provádí pomocí tlačítek **Menu**, **Change**, **Accept** na pravé boční straně přístroje.

Stisknutím tlačítka **Menu** se dostanete do hlavní nabídky, kde je k dispozici 13 oken, která se přepínají stiskem tlačítka **Change**:

Okno 1	Analog 1 Analog 2	dva vstupy pro připojení dalších měřících jednotek
Okno 2	Date/time	Datum/čas
Okno 3	Measurement Nm.	Číslo měření
Okno 4	Rn mean (since ON)	průměrná hodnota objemové aktivity Rn [Bq/m ³] od doby spuštění přístroje
Okno 5	Rn mean (last hour)	průměrná hodnota objemové aktivity Rn [Bq/m ³] během poslední uplynulé hodiny
Okno 6	Set Marker: OFF	signální znak (ukazatel) pro sérii opakovaného měření (funkce na tomto typu přístroje není aktivní)
Okno 7	Sounder: ON	Signalizace zvuku pro konec měření
Okno 8	Set cycle	Nastavení měřícího módu*
Okno 9 -13	Set cycle	Tato okna obsahují technické parametry přístroje, např. měřený rozsah, typ propojení s počítačem atd., které se během úlohy nemění

*Přístroj umožňuje 4 měřící módy:

- difúzní mód s cyklem měření 10 min
- difúzní mód s cyklem měření 60 min
- průtočný mód s cyklem měření 10 min
- průtočný mód s cyklem měření 1 min

Přepínání mezi jednotlivými módy se provádí opakovaným stisknutím tlačítka **Change** a potvrzením volby tlačítkem **Accept**.

Po nastavení parametrů metody následuje samotné měření, kdy na displeji přístroje se budou zobrazovat aktuální hodnoty: objemová aktivita, teplota, vlhkost a tlak. Tyto hodnoty se ukládají průběžně do paměti přístroje.

Úkoly:

1. Evidence (podepsání prezenční listiny) a proškolení studentů (bezpečnost práce) před vstupem do štoly Josef.
2. Při vstupu do štoly zapněte přístroj AlphaGuard a seznamte se s jeho obsluhou.
3. Monitorujte množství radonu ve vzduchu štoly během cesty k podzemní laboratoři podle pokynu asistenta. Změřte koncentraci radonu v difúzním módu.
4. V místě, kde zjistíte maximální koncentraci radonu, připojte pumpu (AlphaPump) a proveďte měření v průtokovém módu při třech různých rychlostech průtoku.
5. Průběžně sledujte další parametry - teplotu, tlak a vlhkost vzduchu při průchodu štolou.
6. Porovnejte naměřené hodnoty s hodnotami uvedenými ve vyhlášce Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SUJB) pro daný typ stavby, kde směrná hodnota pro objemovou aktivitu radonu ve stávajících stavbách za podmínek běžného užívání je **400 Bq/m³**, pro novostavby je směrná hodnota **200 Bq/m³**. Mezní hodnota aktivity pro uzavřené objekty je stanovena na **4000 Bq/m³**.
7. Uveďte stručně princip měření a zpracujte výsledky jednotlivých měření přehledně do protokolu (získané hodnoty tlaku vzduchu uveďte v základních jednotkách, tj. Pa). Porovnejte výsledky difúzního a průtokového měření.
8. Do závěru podle vlastního uvážení navrhněte zlepšení stávající úlohy.