

**Matematicko-fyzikálna fakulta
Univerzity Komenského v Bratislave**

Dizertacná práca

**DETEKCIA A LOKALIZÁCIA RÁDIOAKTÍVNYCH
ZDROJOV V ŽIVOTNOM PROSTREDÍ**

Prácu vypracoval: RNDr. Štefan Húštava

Školiteľ: Doc. RNDr. Martin Chudý, CSc.

Bratislava, január 2004

Rád by som podakoval niekoľkým spolupracovníkom za pomoc pri zostavovaní mojej dizertacnej práce a na príprave a realizácii experimentov:

Svojmu školiteľovi Doc. RNDr. Martinovi Chudému, CSc. za pomoc počas doktorandského štúdia a cenné rady pri zostavení a písaní dizertacnej práce. V neposlednom rade aj za pomoc a technickú realizáciu pri príprave experimentov.

Svojmu vedúcemu na pracovisku Doc. RNDr. Petrovi Cernanskému, PhD za pomoc a realizáciu mojich predstáv, za ochotu a ústretovosť popri pedagogických povinnostiach.

Svojmu priateľovi zo Slovenskej akadémie vied Bratislava Doc. RNDr. Ladislavovi Haladovi, PhD za pomoc pri realizácii výpočtov na matematickom modeli.

Majiteľovi firmy Bitt Technology Ing. Helmuthovi Bittovi a Ing. Károlyovi Kautnemu za zapožičanie detektorov a meracích prístrojov a za finančnú podporu pri realizácii experimentov v Železiarnach v Podbrezovej.

OBSAH	
ÚVOD	3
I. CIELE DIZERTACNEJ PRÁCE	5
II. SÚCASNÝ STAV PROBLEMATIKY	6
II.1. Možnosti zistovania rádioaktívnej kontaminácie železného šrotu	6
II.2. Experimenty v teréne	9
II.2.1. Výsledky experimentu a závery	18
II.3. Výsledky testov v Českom metrologickom inštitúte	19
II.3.1. Podmienky meraní	19
II.3.2. Výsledky skúšok	22
II.3.2.1. Stanovenie detekčných limitov	22
II.3.2.2. Percento falošných hlásení	23
II.3.2.3. Schopnosť zaznamenania prejazdu súpravy	23
II.3.2.4. Závislosť odozvy na aktivite	24
II.3.2.5. Nepreťažiteľnosť meradla	24
II.3.2.6. Závislosť odozvy na energii primárnych fotónov	25
II.3.2.7. Polohová závislosť účinnosti detekcie ^{137}Cs	26
II.3.2.8. Pohotovosť detekcie	26
II.3.2.9. Odozva v závislosti na teplote	26
II.4. Monitorovanie umelej a prírodnej rádioaktivity	30
II.4.1. Kontinuálne meranie externého príkonu dávkového ekvivalentu žiarenia gama	31
II.4.2. Kontinuálne vzorkovanie a meranie aerosólových častíc	33
III. VLASTNÉ DLHODOBÉ KONTINUÁLNE MERANIA ŽIARENIA GAMA	36
III.1. Výsledky merania a diskusia	37

IV. EXPERIMENTÁLNE STANOVENIE CITLIVOSTI MERACIEHO SYSTÉMU V ŽELEZIARNACH PODBREZOVÁ	41
IV.1. Ciele experimentu	41
IV.2. Zostava experimentu	41
IV.3. Opis jednotlivých častí	42
IV.4. Priebeh experimentu	44
IV.5. Usporiadanie merania	47
IV.6. Závery experimentu	51
V. NÁVRH URČENIA POLOHY RÁDIOAKTÍVNYCH ZDROJOV V 2D PRIESTORE	52
V.1. Základný model pre určenie dávky	53
V.2. Lokalizácia zdroja v statickom režime v rovine (2D)	57
V.3. Experimentálne overenie výpočtu polohy zdroja v priestore 2D	61
V.4. Záver	64
VI. ZHRNUTIE VÝSLEDKOV A DISKUSIA	66
V.1. Výber detektora	66
VI.2. Dlhodobé merania	67
VI.3. Experimenty v Železiarnach Podbrezová	67
VI.4. Voľba počtu detektorov	67
VI.5. Návrh meracej brány	68
VI.6. Lokalizácia zdroja žiarenia	70
ZÁVER	74
ZOZNAM LITERATÚRY	76
PRÍLOHA	

ÚVOD

Výsledky skúšok jadrových zbraní, využívanie rádioaktívnych izotopov, prevádzka jadrových elektrární, možnosť pašovania rádioaktívnych izotopov a nelegálneho prevozu štiepnych materiálov a rádioaktívneho odpadu nás vedie k nepretržitej kontrole úrovne radiácie v životnom prostredí.

V posledných rokoch bolo viacero prípadov rádioaktívneho zamorenia železného šrotu, ktoré priniesli so sebou značné problémy. Keď sa rádioaktívnym materiálom zamorený šrot dostane do tavby, následky je ťažko odstrániť. Rádioaktívny materiál môže pochádzať z medicínskej techniky, skúšok materiálu pomocou defektoskopie, ťažby uránovej rudy a i. Vzhľadom na to, že podiel železného šrotu pri výrobe surovej ocele sústavne stúpa, narastá aj význam a úžitok z kontroly rádioaktívneho zamorenia železného šrotu. Cieľom je preto, kontamináciu železného šrotu zavčas odhaliť, t.j. už na vstupe šrotu do železiarní.

Možno povedať, že rádioaktivita zasahuje do všetkých oblastí života cloveka. Spolu s kladnými sprievodnými javmi sa môže niekedy prejavovať aj záporná stránka tohto procesu, čo vedie k nežiadúcemu zvýšeniu expozície obyvateľstva. Vzťah rádioaktivity k životnému prostrediu má zásadný význam, lebo na zmenu rádioaktivity v životnom prostredí citlivo reaguje clovek, ostatné živé organizmy aj samotná neživá príroda. Je známe, že prírodné pozadie môže spôsobiť v živých organizmoch aj škodlivé mutácie. Preto je užitočné študovať zmeny a fluktuácie prirodzeného pozadia a účinok tohto pozadia na živé organizmy a na životné prostredie. Prírodné rádioaktívne pozadie na Zemi v podmienkach stáleho pôsobenia hrá dôležitú úlohu aj v životnej činnosti cloveka. Pohyb a kolobeh rádioaktívnych látok možno pozorovať v prírode či sa už jedná o rádioaktívne izotopy prirodzené, alebo umelé.

S využívaním jadrovej energie a jadrovej energetiky úzko súvisia rôzne merania a monitorovania vo veľmi širokom rozsahu na kontrolu a ochranu životného prostredia. Stále narastajú požiadavky na takéto merania u nás aj v zahraničí. Po niektorých menších haváriách na jadrových zariadeniach a najmä po černobyľskej katastrofe zvláštny význam nadobudli radičné

monitorovacie siete a kontrolné meracie body pre nákladnú a osobnú dopravu. Jednou zo základných úloh týchto monitorovacích meraní je kontinuálne meranie a dozor nad úrovňou dávkového príkonu žiarenia pochádzajúceho od prírodného pozadia, respektíve následná včasná informácia o prekročení povolenej hranice. Zvláštny význam nadobudli teledozimetrické systémy najmä v okolí jadrových elektrární. Na kontinuálne meranie dávkového príkonu, alebo príkonu dávkového ekvivalentu sú veľmi rozšírené plynom plnené detektory, teda detektory založené na ionizácii plynovej náplne detektora.

Teledozimetrické systémy a monitorovacie siete pozostávajúce z viacerých detektorov je možné využívať nielen na vyhodnotenie úrovne signálu z jednotlivých detektorov, ale aj na určenie polohy rádioaktívneho zdroja, prípadne aj na určenie trasy šírenia rádioaktívnej látky.

Aj napriek rozpracovanosti problematiky merania rádioaktivity v životnom prostredí a sústredení sa na kontrolu železného šrotu pri vstupe do železniarní, transporte rádioaktívnych materiálov a rádioaktívneho paliva, transporte a kontrole rádioaktívneho odpadu a meraní úrovne rádioaktivity v životnom prostredí je potrebné v riešení problematiky pokračovať. Je niekoľko otázok, ako výber vhodnej geometrie zdroj žiarenia-detektor, rozbor dlhodobého merania rádioaktivity v životnom prostredí a vplyv rôznych efektov na meranie, ktoré je potrebné doriešiť. Pokračovaním riešenia tohto problému je aj výpočet dávky v meracom detektore od statického a pohybujúceho sa zdroja žiarenia. Rozšírením riešenia tohto problému je nie len jednoduchá detekcia, ale aj určenie polohy zdroja žiarenia v kontrolovaných a meraných objektoch. V závere je konkrétny projekt meracieho systému na určenie polohy zdroja žiarenia v kontrolovanom železničnom vozni, alebo v kamióne.

Predkladaná práca nadväzuje na možnosti kontroly železného šrotu na vstupe do železniarní. Sú zhrnuté podrobné výsledky experimentov z jednej väčšej železiarne.

Na základe výsledkov testov metrologického ústavu je vykonaná analýza a porovnanie najdôležitejších parametrov od rôznych výrobcov meracích systémov na kontrolu rádioaktívneho zamorenia železného šrotu.

V ďalšej časti práce sa rozoberá problematika merania umelej rádioaktivity a možností rozlíšenia umelej rádioaktivity od prírodnej. Porovnanie regionálnych a lokálnych monitorovacích sietí. Rozšírenie merania príkonu dávkového ekvivalentu žiarenia gama metódou alfa, beta a gama merania aerosólov.

Na základe vlastných experimentálnych výsledkov merania rádioaktívneho zamorenia železného šrotu v Železiarnach Podbrezová vznikla myšlienka nie len detekovať, ale aj pokúsiť sa o lokalizáciu polohy zdroja rádioaktívneho žiarenia v 2D priestore.

Analýza dlhodobého merania rádioaktivity životného prostredia meraním príkonu dávkového ekvivalentu žiarenia gama prispela k zdokonaleniu a optimalizácii projektu kontrolnej meracej brány na detekciu a lokalizáciu polohy zdroja rádioaktívneho žiarenia v skúmanom dopravnom prostriedku. Využili sa pritom skúsenosti z experimentálnych meraní v Železiarnach v Podbrezovej, a výsledky rôznych meraní v životnom prostredí.

I. CIELE DIZERTACNEJ PRÁCE

Pri stanovení cieľov dizertacnej práce sa vychádzalo z potrieb ďalšieho riešenia problematiky merania rádioaktivity v životnom prostredí na Slovensku, ale aj z trendov riešenia problematiky merania rádioaktivity v životnom prostredí v zahraničí.

- 1) Štúdium uplatnenia experimentálnych metód merania rádioaktivity pre dozor nad radiacnou situáciou v životnom prostredí. Zdokonalovanie metód merania rádioaktivity v životnom prostredí.
- 2) Analýza a rozbor dlhodobého merania rádioaktivity v životnom prostredí. Klasifikácia úrovne kontaminácie životného prostredia a príspevok rôznych efektov na meranie.
- 3) Výpočet dávky v meracom detektore od statického a pohybujúceho sa zdroja žiarenia. Analýza možností riešenia optimálnej geometrie zdroj žiarenia-detektor.

- 4) Okrem detekcie, aj určenie polohy zdroja žiarenia v kontrolovaných a meraných objektoch.
- 5) Návrh na konštrukciu meracej brány pre kamióny a železnice vagóny na detekciu a lokalizáciu zdroja žiarenia.

Porovnaním vlastností parametrov vybraného proporcionálneho detektora s ostatnými najčastejšie používanými detektormi na daný účel monitorovania životného prostredia bude možné vypracovať vhodnejšie a dokonalejšie metódy merania rádioaktivity v životnom prostredí. Pre dlhodobé, alebo krátkodobé merania treba klasifikovať jednotlivé príspevky k pozadiu pri kontinuálnom aj nekontinuálnom meraní. Pre monitorovanie úrovne dávkového príkonu kamiónov a vlakových súprav je navrhnutá vhodná geometria merania zdroj-detektor. Bol vykonaný výpočet príspevku dávkového príkonu od pohybujúceho sa zdroja žiarenia. Je vykonaný a experimentálne overený výpočet polohy zdroja na základe nameraného signálu z vhodne voleného počtu detektorov. Konkrétnym konečným výstupom je projekt meracej brány pre nákladné autá a železnice vagóny.

II. SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Súčasný stav problematiky je analyzovaný hlavne z hľadiska výberu detektora a detekčného bloku, ale aj z hľadiska prenosu a vyhodnotenia meraného signálu. S tým súvisia otázky: aké detektory voliť, rozbor a porovnanie vlastností, výhod, nevýhod jednotlivých detektorov na rôzne účely použitia. Analýza bola zameraná na monitorovanie dopravných prostriedkov na hranicných prechodoch a na vstupe do rôznych výrobných závodov.

II.1. Možnosti zistovania rádioaktívnej kontaminácie železného šrotu

Zistovanie rádioaktívnej kontaminácie železného šrotu rôznymi detekčnými systémami závisí od mnohých faktorov ako sú:

- intenzita zdroja rádioaktívneho žiarenia

- poloha zdroja rádioaktívneho žiarenia v železnom šrote
- hustota železného šrotu (čím väčšia je hustota železného šrotu , tým intenzívnejšie bude zdroj žiarenia odtienený okolitým materiálom)
- prierez kontajnera železného šrotu a vzdialenosť zdroja žiarenia od detektora
- druh zdroja žiarenia (zdroje s nižšou energiou sú ťažšie odhaliteľné než zdroje s vyššou energiou)
- kolísanie žiarenia pozadia (spôsob ako zohľadniť žiarenie pozadia predstavuje veľmi dôležité kritérium, aby bolo možné zaregistrovať len zdroje žiarenia , ktoré sa od pozadia líšia)
- druh a citlivosť detektorov

Radičné monitorovacie systémy sa úspešne využívajú v železiarnach, oceliarnach, na šrotoviskách už niekoľko rokov. Použitím vhodného softveru a dynamického scanningu takéto systémy umožňujú zaregistrovať nárast umelého prírodného pozadia už o 20 %, hoci signál od prírodného pozadia ešte klesne vplyvom vlastného tieniaceho efektu meraného vozidla pri vstupe k monitorovaciemu systému. Pri prechode meraných vozidiel, či už hranicným prechodom, alebo do železiarní, čas merania pre detekciu je veľmi krátky (často len niekoľko sekúnd). Opakované merania sú takmer nemožné. Tienené rádioaktívne zdroje (hoci aj vysoko aktívne) ktoré sú hlboko uložené v šrote nie sú detekovateľné bez vyloženia nákladu, čo často nie je možné. Vysokocitlivé systémy nastavené na nízky prah detekcie môžu spôsobiť časté falošné alarmy. Zvlášť častým problémom býva vrátenie dodávky šrotu zo štátnych hraníc v dôsledku kontaminácie prírodným ^{60}Co , alebo aj vo vyrobených plechoch určených pre osobné autá, nákladné autá a železničné vozne. Ku kontaminácii prírodným ^{60}Co môže dôjsť použitím železného šrotu z likvidovaných jadrových zariadení, alebo nukleárných medicínskych zariadení.

V práci [1] bolo vykonaných 721 analýz na vzorkách z oceliarní polovodivovým detektorom. V 62% vzoriek sa nenašiel žiaden rádioaktívny kobalt, čiže aktivita bola pod hranicou štatistickej významnosti. V 95,5% vzoriek koncentrácia aktivity bola pod $10 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ a v 3,4% vzoriek koncentrácia aktivity

^{60}Co bola medzi 100 až 1000 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$. Vzorky boli vyberané náhodne a v ôsmich prípadoch prekročila koncentrácia aktivity ^{60}Co hodnotu 1000 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

V práci [2] autor informuje o analýze kontaminácie 100 kusov nákladných automobilov, z ktorých tri dávali vo vzdialenosti 1 meter príkon dávkového ekvivalentu v rozsahu 0,2 až 0,3 $\text{mSv}\cdot\text{h}^{-1}$. Takáto kontaminácia môže byť spôsobená rutinnou metódou tavby a príčinou je výskyt ^{60}Co v šamotovej výplni vysokých pecí v rôznych hĺbkach výplne. Ak sa takto kobalt dostane do tavby výsledná koncentrácia aktivity môže dosahovať niekoľko 100 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, čo je značne pod dovolenou úrovňou medzinárodnou normou (IBSSS – International Basic Safety Standards) 10 $\text{kBq}\cdot\text{kg}^{-1}$. Vrátenie takéhoto tovaru, alebo produktu nie je len finančne náročné, ale môže ohroziť a zdržovať slobodný pohyb tovaru. Niekoľko zbytočných alarmov denne môže daný kontrolný monitorovací systém ukázať neúžitocným a nedôveryhodným. Čo sa týka počtu a úrovne vybavenia hranicných priechodov monitorovacími systémami je to dané aj ekonomickými obmedzeniami z hľadiska efektívneho zabezpečenia štátnych hraníc.

Na rozdiel od situácie v železiarnach, kde by každá významná kontaminácia šrotu mala byť detekovaná, aby nedošlo ku kontaminácii tavby, na hraniciach takáto procedúra musí byť založená na kompromise. Tento kompromis má vychádzať zo širokého spektra štúdií a experimentov s monitorovacími systémami na hraniciach. Pri transporte železného šrotu je určená hranica príkonu dávkového ekvivalentu v blízkosti kontrolovaného vozidla 0,3 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ [3]. Táto hranica je približne ekvivalentná trojnásobku úrovne prírodného pozadia a je podporovaná skutočnosťou, že prídavné merania na zabezpečenie kvality budú vykonávané priemyselne. Je snaha eventuálne získať medzinárodný súhlas na túto procedúru [3].

Vplyvom samotieniaceho efektu meraného vozidla sa zaoberal aj autor v [4] Zistil tiež pokles úrovne prírodného pozadia, ktoré je v rozsahu 20 až 30 % v závislosti od nákladu. Pri štatistickom vyhodnocovaní nameraných výsledkov vychádzal z piatich štandardných odchýlok 5σ .

Často je problémom ako rozlíšiť prírodnú rádioaktivitu s nejakou pevne stanovenou hornou hranicou a umelú rádioaktivitu s nižšou úrovňou za

pomerne krátky detekčný čas merania. V práci [5] ako indikacný nuklid zvolili ^{60}Co a signalizačnú úroveň nastavili na 100 Bq.kg^{-1} s pravdepodobnosťou na 4σ , takže falošný alarm je takmer nepravdepodobný. Na meranie gama žiarenia použili NaI(Tl) scintilačný detektor v integračnom režime, takže nemôžu jednotlivé nuklidy identifikovať. Po prekročení signalizačnej úrovne vykonáva sa spektrometrické meranie polovodivovým Ge-detektorom. Na kalibráciu meracieho systému sa doporučuje kalibračný štandard o aktivite v rozsahu 1 až 100 kBq.kg^{-1} .

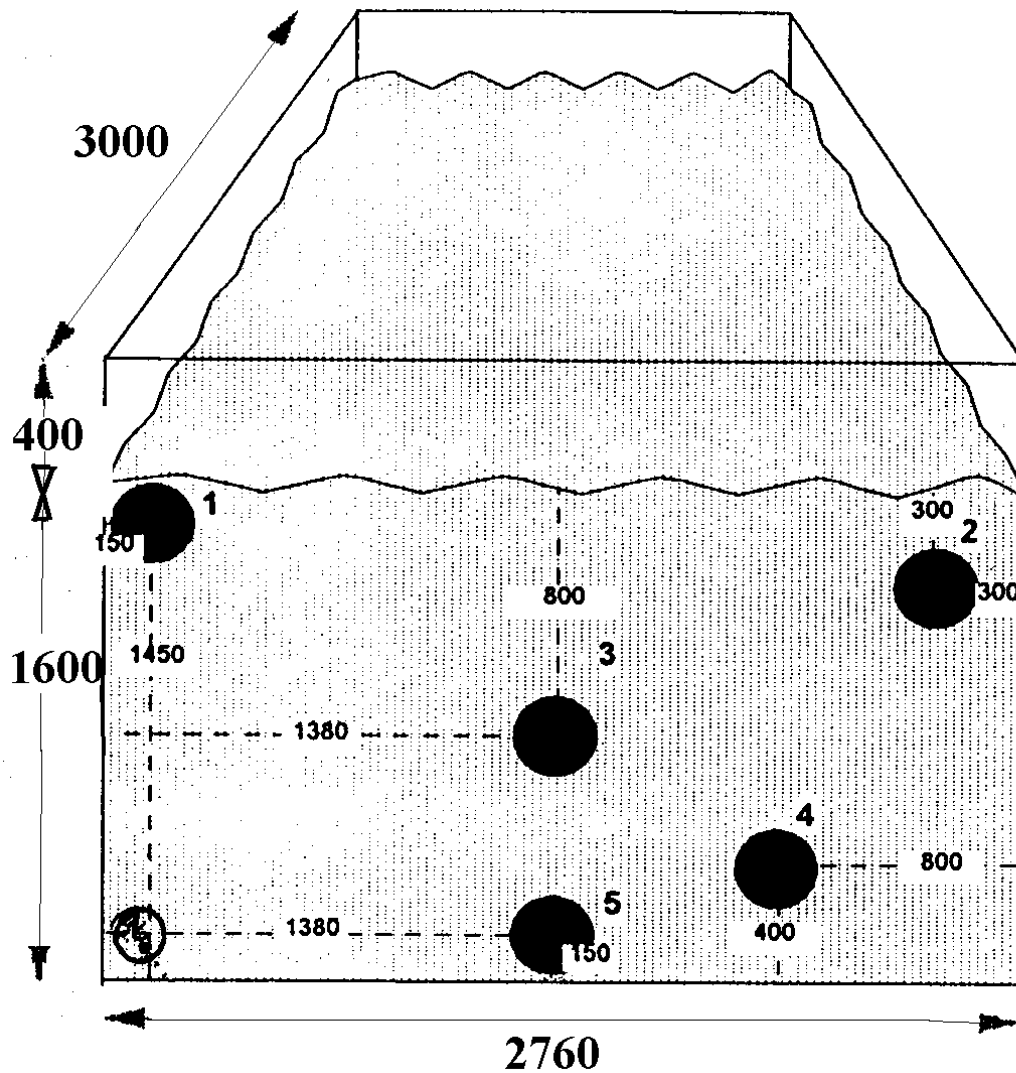
V niektorých štátoch Európy (Slovensko, Česko, Taliansko, Španielsko, ...) sa už neraz stalo, že došlo ku kontaminácii železného šrotu rádioaktívnymi látkami. Väčšinou to býva spôsobené rádioaktívnymi látkami uvoľnenými pri likvidácii jadrových zariadení. Takáto kontaminácia sa zistí v mnohých prípadoch už pri vstupe železného šrotu do železiarní ak je tam kontrolný merací systém. Od roku 1998 bolo vykonaných v Španielsku niekoľko kontrol Španielskou národnou spoločnosťou ENRESA a vo väčšine prípadov zistili kontamináciu nuklidmi ^{226}Ra a ^{232}Th , deponované vo vnútri trubiek. Príkon dávkového ekvivalentu od týchto zdrojov bol v rozmedzí $0,2$ až $10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ [6]. Dávka na nádvorí železiarní závisí od veľkosti zariadenia a množstva nahromadeného šrotu. Výsledok tejto štúdie je, že ak sa zataví malé množstvo materiálu s aktivitou medzi 10 až 100 Bq.g^{-1} do tavby, dávky sú veľmi malé. Globálny záver z tejto práce je potom, že nie je žiadne riziko pre pracovníkov železiarní ani pre verejnosť, keď sa detekujú podobné aktivity ako vyššie uvedené.

II. 2. Experimenty v teréne

Pre získanie detailnejšieho prehľadu o situácii a možnosti meraní priamo v teréne v nasledujúcom sú uvedené podrobné výsledky experimentov podľa práce [7]. Pri dovoze železného šrotu železnicou do železiarní boli simulované podmienky s pohybujúcim sa železným vagónom. Cieľom experimentov bolo prešetriť nasledujúce faktory:

- vplyv usporiadania a počtu detektorov

- porovnávajúce merania pre pohybujúci sa a stojací vozen
- možnosti merania železných vagónov
- citlivosť spektrometrických detektorov v porovnaní s nespektrometrickými (integrálnymi)



Obr. 1. Náčrt kontajnera so železným šrotom [7].

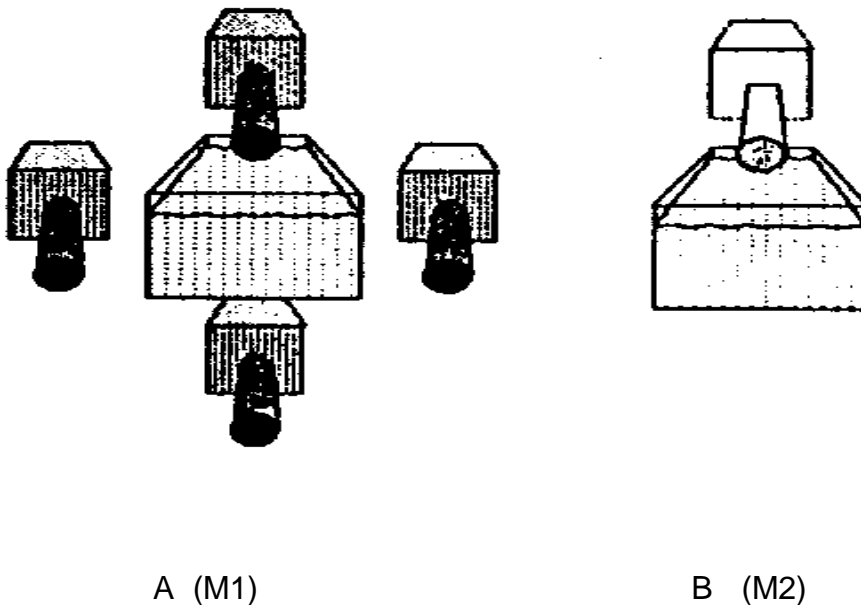
Posúdenie prahu citlivosti meracieho systému zasunutím rôznych zdrojov žiarenia do železného šrotu naloženého na vagóne. Na experimenty boli použité železnice vagóny o rozmeroch dĺžka = 12 000 mm, šírka = 2 760 mm,

výška = 2 020 mm. Na vagóne bol naložený kontejner naplnený železným šrotom do 80 % výšky teda do výšky 1 600 mm.

Rozmery kontajnera s naloženým železným šrotom boli 3 000 x 2 760 x 2 020 mm. Priemerná hustota železného šrotu naloženého v kontejneri bola 1 080 kg.m⁻³. Aby bolo možné rádioaktívne žiarice (etalóny) vkladat medzi železný šrot, boli uložené ocelové rúry o vnútornom priemere 181 mm vo vodorovnom a rovnobežnom smere s pohybom vagóna. Bolo uložených oznacených päť ocelových rúr, ktorých presná poloha je oznacená na obr. 1 [7]. Do týchto rúr boli vkladané vybraté zdroje žiarenia pre jednotlivé druhy experimentu.

Detektorový systém M1 pozostáva zo štyroch detektorov CsJ(Tl) merajúcich v integrálnom režime.

Detektorový systém M2 pozostáva z jedného detektora CsJ(Tl) merajúceho v spektrometrickom režime.



Obr.2. Usporiadanie detektorového systému M1 a M2 okolo kontajnera so železným šrotom [7].

Na experimenty boli použité štyri rádioaktívne žiarice, ktorých parametre sú zhrnuté v nasledujúcej tabulke 1.

Tab. 1

Zdroj žiarenia	Priemer kontejnera [mm]	Aktivita [Bq]	Príkon dávkového ekvivalentu na povrchu kontejnera [mSv.h ⁻¹]
¹³⁷ Cs	165	8,048	550 – 1500
¹³⁷ Cs	165	0,644	65 – 95
¹³⁷ Cs	165	0,161	15 – 30
Neznámy	-	-	7,5 na povrchu zdroja žiarenia 1,0 vo vzdialenosti 82,5 mm od povrchu zdroja

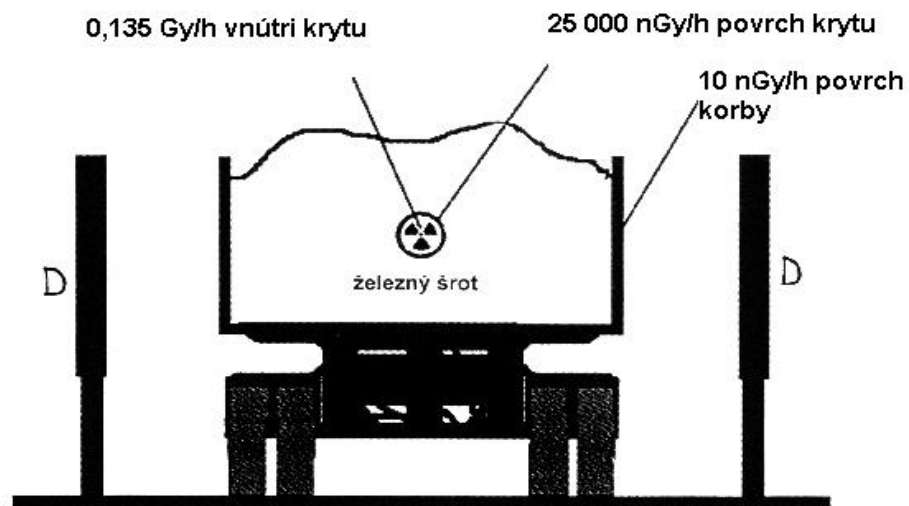
Meracie zariadenie pozostáva z detektorového systému:

- štyroch M1 detektorov (pozri obr. 2 A) rozložených v rovine kolmej na smer pohybu vagóna zo štyroch strán: zospodu, zvrchu, z pravého a ľavého boku vo vzdialenosti 1 000 mm od železného šrotu. Tieto detektory merali v integrálnom režime a boli to scintilacné detektory CsJ(Tl).
- jedného M2 detektoru (pozri obr. 2 B), ktorý je vo vzdialenosti 1 000 mm nad povrchom železného šrotu. Tento detektor bol scintilacný so scintilátorom CsJ(Tl) a pracoval v spektrometrickom režime.

Na obidva detektorové systémy bol pripojený mikroprocesor s displejom, tlačiarňou a možnosťou archivácie nameraných údajov. Merania boli vykonané v statickom a dynamickom režime s detektorovým systémom M1 aj M2. V statickom režime meraný vagón stál počas merania v pokoji 30 sekúnd v meracom mieste. V dynamickom režime sa pohyboval konštantnou rýchlosťou 3 km.h⁻¹. Pred meraním vagóna so zdrojmi žiarenia bolo vykonané meranie pozadia, ktoré sa odcítalo od signálu so

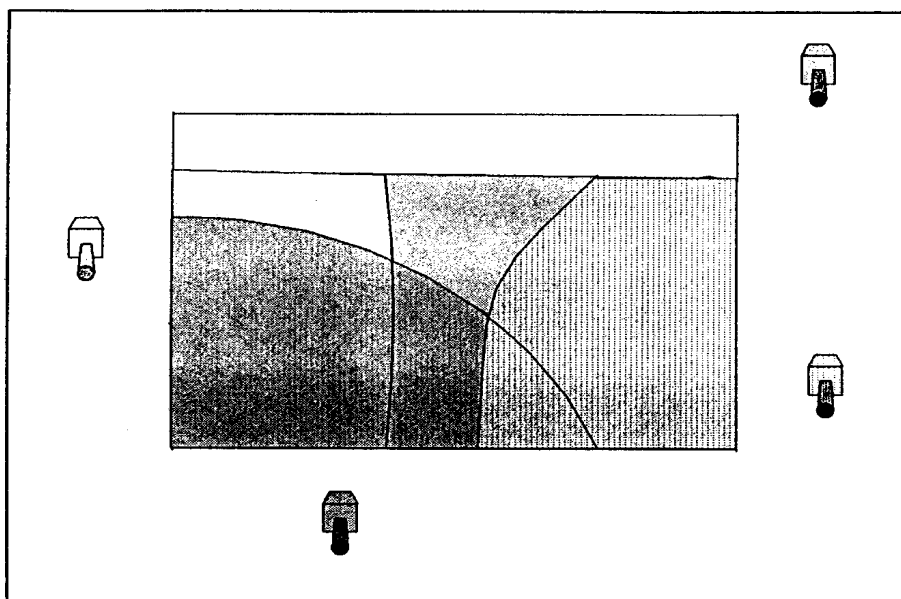
zdrojom žiarenia. Merací systém meral žiarenie gama ako všetky doteraz prístupné meracie systémy. Vo väčšine prípadov sa použili plastické scintilátory, alebo scintilátory CsJ(Tl), alebo NaJ(Tl). Fotobunka zisťuje, či sa blíži k meraciemu miestu meraný vagón. Ak sa nevykonáva meranie vagóna, prebieha meranie pozadia a namerané údaje z detektora mikroprocesor využíva na kalibráciu a vytvára z posledných meraní priemerné hodnoty. Z tejto hodnoty sa určuje hodnota signalizacnej úrovne tak, aby nedochádzalo k falošným alarmom a na druhej strane úroveň signalizácie treba nastaviť na čo možno najnižšiu hodnotu. Keď vchádza vagón do meracieho miesta fotobunka vyšle signál na spustenie porovnávacieho merania, pričom sú súčasne namerané údaje porovnávané s poslednými zaregistrovanými. Meraný vagón ovplyvní, teda tieni žiarenie pozadia a pri meraní nekontaminovaného vagóna nastáva pokles žiarenia pozadia, pokiaľ je meraný vagón v dosahu detektorového systému. Keď sa nachádza vo vagóne rádioaktívny žiaric, nedochádza k poklesu signálu o očakávanú hodnotu poklesu úrovne pozadia, alebo dochádza k zvýšeniu signálu. Po prekročení nastavenej úrovne dojde k signalizácii o prekročení. Po ukončení merania systém znovu prejde na meranie pozadia.

Ako pre prehľadnú informáciu ukazuje obr.3 zmeny dávkového príkonu od štandardného žiarica v kryte. Sú to ilustracné údaje vnútri krytu, na povrchu krytu a na povrchu korby nákladného auta. Získame tým predstavu o samotieniacom efekte železného šrotu a korby dopravného prostriedku.

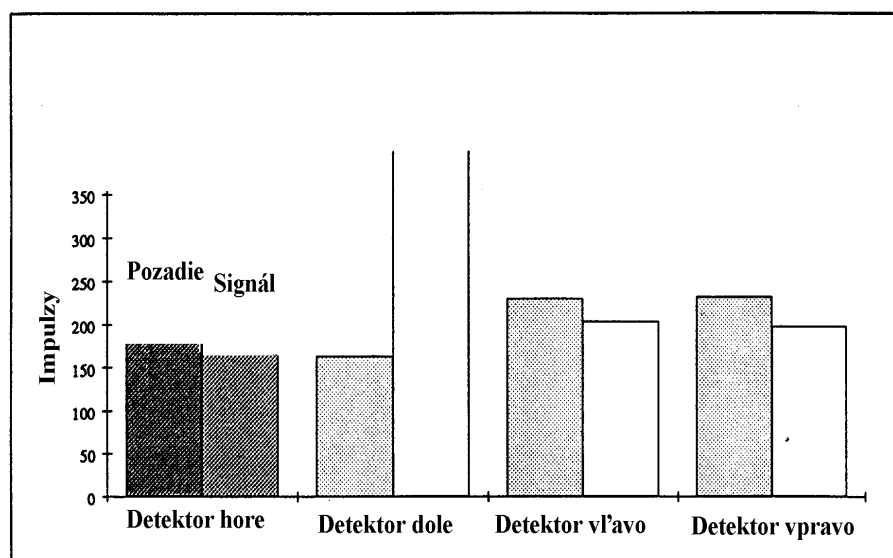


Obr. 3. Typické rozloženie železného šrotu na korbe nákladného auta.

Detektorový systém M1 môže kontrolovať vagóny v statickom aj dynamickom režime. Detektorový systém M2 je ďalším stupňom vývoja CsJ scintilátorov a umožňuje aj spektrálnu analýzu a tiež je možné merať vagóny v statickom aj dynamickom režime.

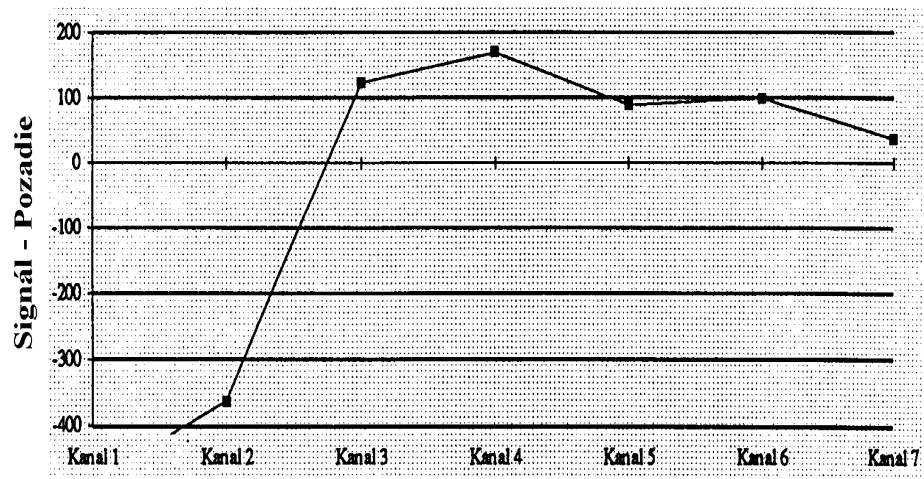


Obr.4. Usporiadanie detektorového systému M1 pre železničné vagóny, keď kvôli elektrickému vedeniu nad vagónom treba zmeniť polohu detektora nad vagónom.



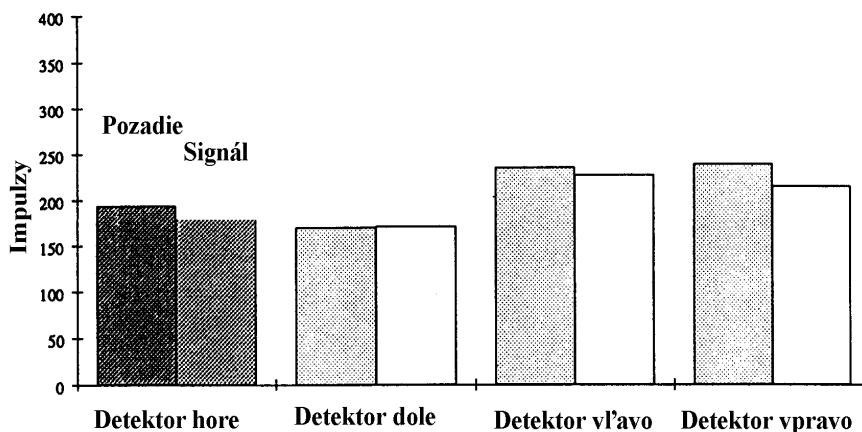
Obr.5 Výsledok merania s detektorovým systémom M1 so zdrojom žiarenia $550 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$. Zdroj žiarenia bol v pozícii 5.

Vidieť, že zdroj žiarenia nebol objavený s detektorom v polohe hore ani detektormi vpravo a vľavo. Meranie bolo vykonané v dynamickom režime.



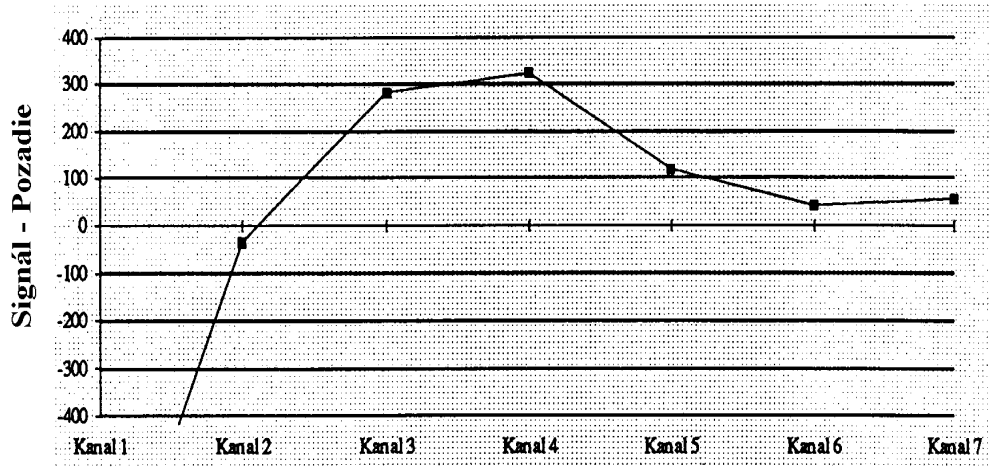
Obr.6 Výsledok merania s detektorovým systémom M2 so zdrojom žiarenia $550 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$. Zdroj žiarenia bol v pozícii 5.

Vidieť, že zdroj žiarenia bol jednoznačne objavený s detektorovým systémom M2. Meranie bolo vykonané v statickom režime.



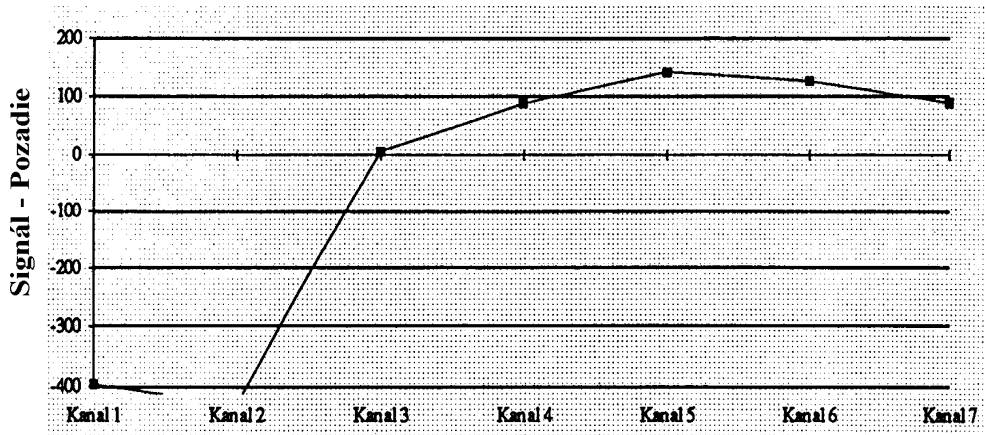
Obr. 7. Výsledok merania s detektorovým systémom M1 so zdrojom žiarenia $65 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$. Zdroj žiarenia bol v pozícii 3.

Vidieť, že zdroj žiarenia nebol objavený s detektorom v polohe hore, dole ani detektormi vpravo a vľavo. Meranie bolo vykonané v dynamickom režime



Obr.8. Výsledok merania s detektorovým systémom M2 so zdrojom žiarenia $65 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$. Zdroj žiarenia bol v pozícii 3 .

Vidieť, že zdroj žiarenia bol jednoznačne objavený s detektorovým systémom M2. Meranie bolo vykonané v statickom režime.



Obr.9. Výsledok merania s detektorovým systémom M2 so zdrojom žiarenia $15 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$. Zdroj žiarenia bol v pozícii 3 .

Vidieť, že zdroj žiarenia bol jednoznačne objavený s detektorovým systémom M2. Meranie bolo vykonané v statickom režime.

II. 2.1. Výsledky experimentu a závery

Vplyv usporiadania a počtu detektorov na meranie je významný a dôležité je uvážiť iný vplyv absorpcie žiarenia v železnom šrote ako vo vzduchu. Vzhľadom na väčšiu absorpciu žiarenia v železnom šrote, je vhodné použiť väčší počet detektorov. Pre experimenty sa zvolené usporiadanie systému detektorov M1 aj M2 ukázalo ako zmysluplné.

Porovnávacie merania v statickom a dynamickom režime – výhoda merania v dynamickom režime je v tom, že dĺžka nákladu nehrá prakticky žiadnu rolu. Okrem toho má detektor možnosť viac odchýlené lúče zachytiť. Rýchlosť pohybu by mala byť čo najmenšia, doporučuje sa maximálne $5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Pri experimentoch bola rýchlosť $3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Meranie v statickom režime, keď meraný vagón je v pokoji, nevykazovalo vyššiu citlivosť na nájdenie zdroja žiarenia v porovnaní s meraním v dynamickom režime, hoci doba zotrvania žiarica pri detektoroch je kratšia (v dynamickom režime).

Možnosti merania železnícnych vagónov – pri meraní nákladných aut a kamiónov je meranie možné vykonať aj opakovane, no pri meraní železnícnych vagónov táto možnosť nie je. Ďalšou zvláštnosťou železnícnych dráh je elektrické vedenie nad kolajnicami, čo komplikuje, alebo takmer vylučuje inštaláciu detektora zvrchu. Potom je už možné len umiestnenie z boku ako vidieť na obr. 4.

Porovnanie citlivosti detektorového systému M2 s detektorovým systémom M1.

Detektorový systém M2 ukazuje lepšie meracie výsledky ako detektorový systém M1.

- Zdroj žiarenia „ $550 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ “ v dolnej pozícii 5 (Obr.1), asi 1420 mm pod železným šrotom, nebol objavený M1 detektorovým systémom. Detektorový systém M2 objavil tento zdroj žiarenia s istotou ako vidieť z obrázku 5 a 6.
- Zdroj žiarenia „ $65 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ “ v strednej časti nákladu Pozícia 3, asi 720 mm pod železným šrotom, nebol objavený horným detektorom M1 pri žiadnom meraní. Spodný detektor M1 objavil zdroj len pri jednom zo 4 meraní.

Detektorový systém M2 objavil tento zdroj žiarenia s istotou ako vidieť z obrázku 7 a 8.

Posúdenie citlivosti detektorového systému M1 a M2.

- Zdroj žiarenia „65 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ “ nebol nikdy s istotou objavený s detektorovým systémom M1, ako vidieť z obr.7. Silnejšie zdroje s vyššou aktivitou už boli ale odhaliteľné.
- Zdroj žiarenia „15 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ “ v strednej časti nákladu pozícia 3, asi 720 mm pod železným šrotom predstavuje hranicu citlivosti merania pre detektorový systém M2 (pozri obrázok 9). Vo všetkých ostatných polohách bol zdroj žiarenia „65 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ “ s istotou objavený s detektorovým systémom M1 (pozri obrázok 8).
- Záverom možno povedať, že detektorový systém M2 zachytí cca štyrikrát slabšie zdroje žiarenia než detektorový systém M1.

II.3 Výsledky testov v Českom metrologickom inštitúte

II.3.1. Podmienky meraní

Výsledky jednotlivých skúšok boli posudzované tak, aby zodpovedali novej súčasnej dosahujúcej technickej úrovni pre predpokladané prevádzkové podmienky určené teplotným rozsahom, dôležitosťou percenta falošných hlásení, potrebným detekčným limitom, rýchlosťou pohybu meraného objektu a podobne.

Pre skúšky vykonané v Českom metrologickom inštitúte neexistuje platná norma CSN. Výsledky jednotlivých skúšok boli posudzované tak, aby zodpovedali novej súčasnej dosahujúcej technickej úrovni pre predpokladané prevádzkové podmienky určené teplotným rozsahom, dôležitosťou percenta falošných hlásení, potrebným detekčným limitom, rýchlosťou pohybu meraného objektu a podobne.

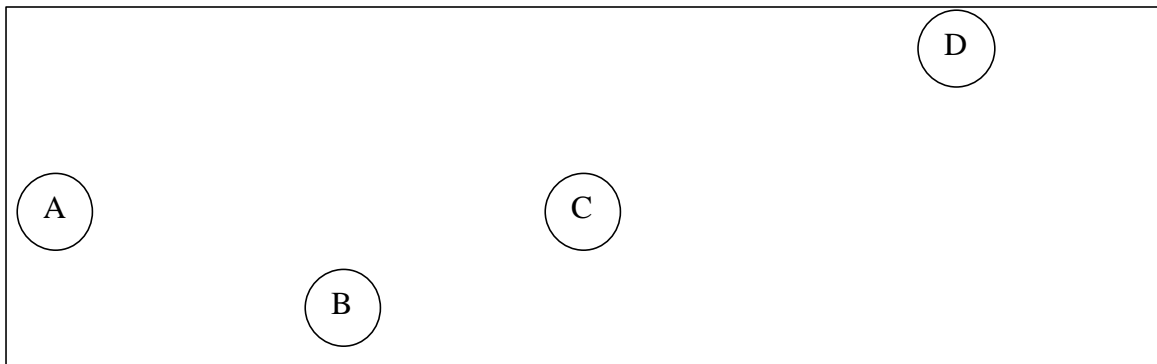
Skúšky boli zamerané na preukázanie schopnosti meradla detekovať prítomnosť zdroja ionizujúceho žiarenia v rôznych polohách na ložnej ploche vagóna a to v prázdnom aj naplnenom kovovým šrotom. Skúšky boli vykonané v dynamickom režime, takže vagón sa pohyboval popri meradle rýchlosťou v rozmedzí 5 až 30 km.h⁻¹. Schopnosť detekcie pri rôznych teplotách bola testovaná v klimateckej komore. Pre skúšky bol použitý štvornápravový otvorený vagón s medzinárodným označením Eas. Zdroje žiarenia boli umiestňované do prázdneho vagóna, alebo do vagóna naplneného železným šrotom (imitovaný železnými šponami) o priemernej hustote 870 kg.m⁻³. Poloha zdrojov žiarenia bola vymedzená umiestnením v zabudovaných zvislých ocelových trubkách a zavesením do výšok 50 cm, 100 cm a 150 cm nad dnom vagóna. Zabudované štyri ocelové trubky o hrúbke steny 4 mm boli označené a umiestnené nasledovne:

Trubka A: tesne v celnej stene v jej strede

Trubka B: 70 cm od bočnej steny, 320 cm od celnej steny

Trubka C: v geometrickom strede ložnej plochy

Trubka D: tesne pri bočnej stene, 320 cm od zadnej steny



Obr. 10. Schematické polohy usporiadania žiaricov.

Súprava sa pohybovala okolo meracieho zariadenia zvolenou rýchlosťou obidvomi smermi, ktoré boli rozlíšené z organizačných dôvodov na TAM a ZPÄT. Každý prejazd TAM a ZPÄT bol považovaný za samostatný prejazd.

Rýchlosť pohybu súpravy okolo meracieho zariadenia bola meraná dvomi nezávislými meradlami rýchlosti. Meradlá rýchlosti boli inštalované na koncoch testovacieho úseku, ktorý bol dlhý 90 metrov. Údaje meradiel rýchlosti boli zaznamenávané s chybou menšou než 10 %. Nominálne rýchlosti súpravy boli 5, 10, 15, 20, 25, a 30 km.h⁻¹.

Detekčné jednotky boli umiestnené symetricky vedľa kolajovej dráhy. Minimálna vzdialenosť medzi detekčnými jednotkami bola 4 600 mm. Testovacie pracovisko pozostávalo z testovacieho polygónu o dĺžke 90 m vymedzeného meradlami rýchlosti súpravy.

Pri skúškach boli použité nasledujúce etalónové zdroje uvedené v tabulke 2 :

Tab. 2

Nuklid	Oznacenie	Aktivita [MBq]	Nuklid	Oznacenie	Aktivita [MBq]
¹³⁷ Cs	HB 0576/96	0,065	¹³⁷ Cs	X6	217,3
¹³⁷ Cs	HB 0577/96	0,206	¹³⁷ Cs	X7	273,6
¹³⁷ Cs	HB 1258/95	0,591	¹³⁷ Cs	X8	314,6
¹³⁷ Cs	HB 0579/96	1,965	¹³⁷ Cs	X9	341,2
¹³⁷ Cs	HB 1250/95	5,504	¹³⁷ Cs	HB 1254/95	475,4
¹³⁷ Cs	HB 1251/95	16,65	¹³⁷ Cs	HB 1255/95	1643
¹³⁷ Cs	HB 1252/95	52,9	¹³⁷ Cs	X4	5000
¹³⁷ Cs	X5	88,03	⁵⁷ Co	ERX	615
¹³⁷ Cs	X1	101,8	¹³¹ I	ERX	2400
¹³⁷ Cs	X2	133,0	⁵⁷ Co	ERX	47
¹³⁷ Cs	X3	150,2	²⁴¹ Am	AMN	8500
¹³⁷ Cs	HB1253/95	164,4	²²⁶ Ra	EP	185

Klimatické skúšky prebiehali podľa CSN IEC 1017/1 „Závislosť odozvy na vonkajšej teplote. Pri skúške bolo zmerané pozadie a odozva na zdroj ¹³⁷Cs vhodnej aktivity z uvedeného zoznamu. Odozva bola stanovená ako početnosť impulzov v jednotkách s⁻¹. Temperovanie pre každú teplotu prebiehalo do ustálenia vnútornej teploty.

II.3.2. Výsledky skúšok

II.3.2.1 Stanovenie detekčných limitov

Najpodstatnejšie parametre z hľadiska detekcie zdrojov na frekventovaných meracích miestach sú „Detekčný limit“ a „Percento falošných hlásení“. Oba parametre je možné zlepšovať, ale len protichodnými opatreniami a treba nájsť vhodný kompromis. U väčšiny meracích zariadení je možné toto kompromisné nastavenie vykonať programovo.

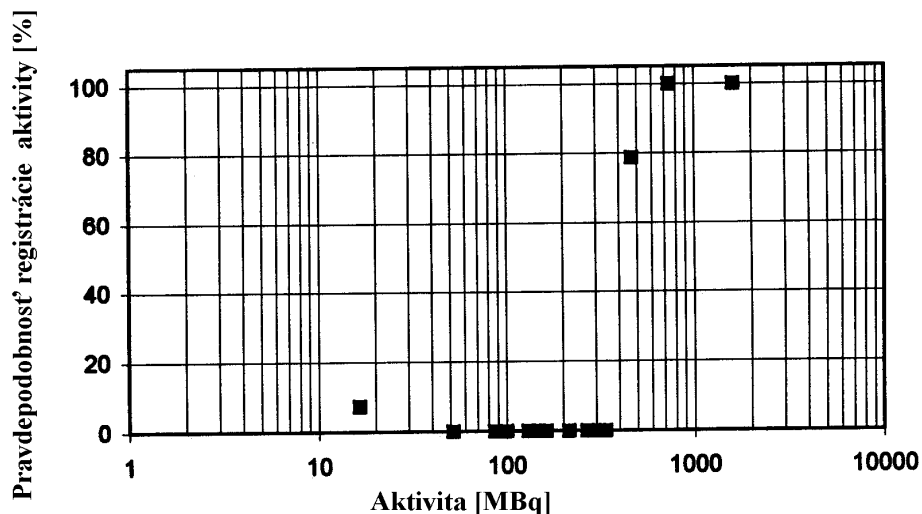
Detekčné limity boli stanovené pre dve usporiadania:

1. pre zdroj ^{137}Cs umiestnený v šrote o mernej hmotnosti $870 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, v trubke C vo výške 100 cm nad dnom vagónu.
2. pre zdroj ^{137}Cs umiestnený v strede prázdneho vagónu.

Detekčný limit je spoľahlivo detekovaná aktivita stanovená grafickým vyhodnotením histogramu početností detekcie zdroja o rôznej aktivite.

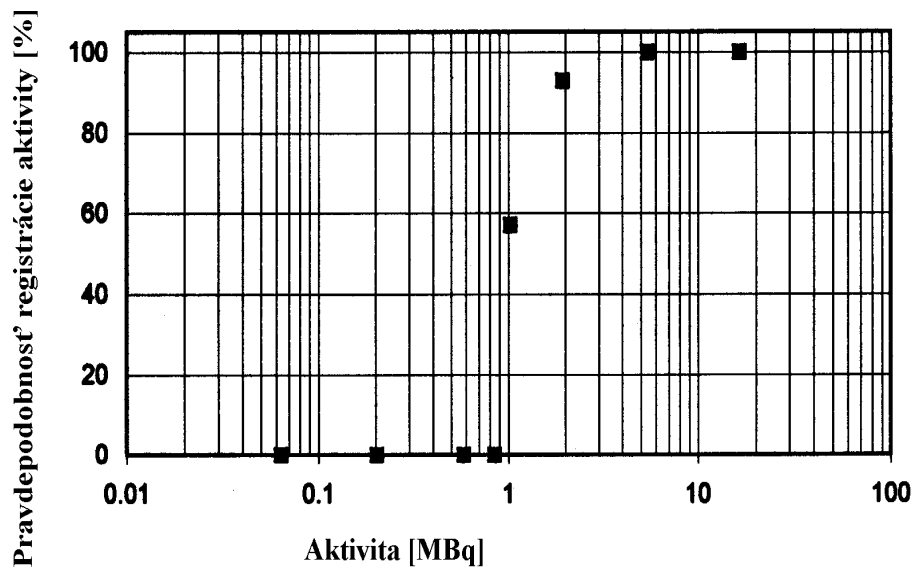
Histogramy pre obe usporiadania sú uvedené na nasledujúcich obrázkoch.

Pre názornosť a prehľad sú uvedené v nasledujúcom, príslušné výsledky testov meracieho zariadenia [8], [9].



Obr.11. Detekčný limit v šrote [8]

Z obrázku vidieť, že detekčný limit pre usporiadanie so šrotom je 600 MBq.



Obr.12. Detekčný limit v prázdnom vagóne [9]

Detekčný limit pre prázdny vagón je 1 MBq.

Neistota stanovenia detekčných limitov je 30%

Nebola preukázaná závislosť detekčného limitu na rýchlosti v rozsahu 5 až 30 km.h⁻¹.

II.3.2.2. Percento falošných hlásení

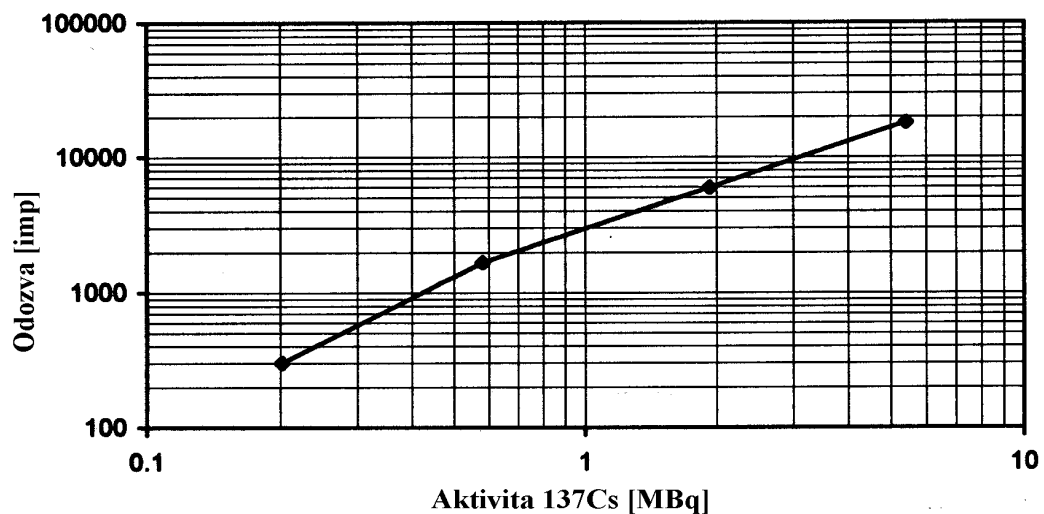
Pocet detekcií zdroja žiarenia pre viac než 200 prejazdov súpravy bez zdroja: 0.43 % [9].

II.3.2.3. Schopnosť zaznamenania prejazdu súpravy

Meradlo zaznamenalo všetky prejazdy súpravy (so zdrojom i bez zdroja). Nebol zaznamenaný falošný prejazd [9].

II.3.2.4. Závislost odozvy na aktivite

Linearita bola testovaná zdrojmi ^{137}Cs o aktivitách 53 MBq až 1640 MBq umiestnenými vo vagóne so šrotom v polohe C vo výške 100 cm nad dnom v rozsahu rýchlostí 5 až 30 km/h. Hodnota odozvy je priemer z viacerých prejazdov.



Obr.13. Závislost odozvy na aktivite [9]

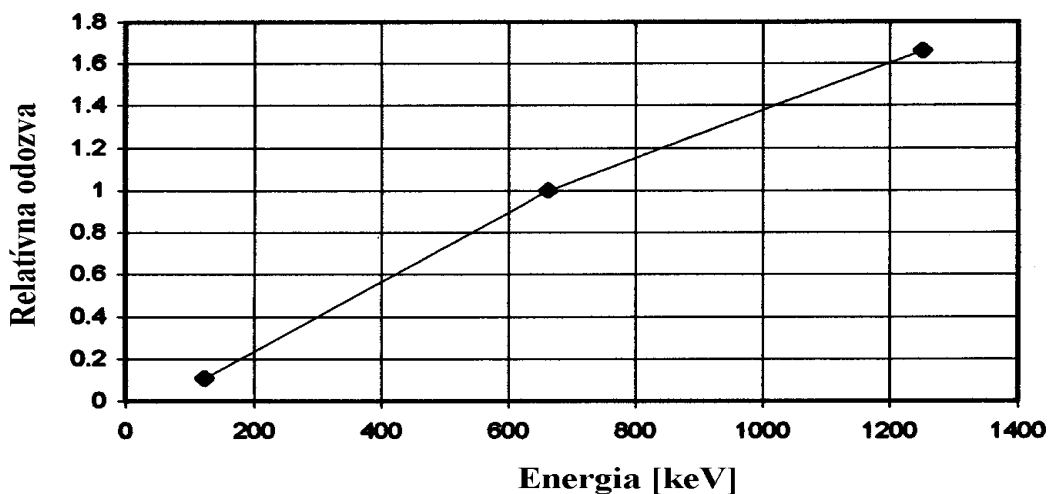
Bol preukázaný trend – vyššia aktivita – vyššia odozva. Odozva je v kontrolovanom rozsahu nelineárnou narastajúcou funkciou aktivity.

II.3.2.5. Nepreťažiteľnosť meradla

Nepreťažiteľnosť meradla bola testovaná prejazdom so zdrojom Cs-137 o aktivite 5 000 MBq umiestnenom v prázdnom vagóne v polohe D vo výške 100 cm. Počet alarmov v tomto usporiadaní je 100%.

II.3.2.6. Závislost odozvy na energii primárných fotónov

Schopnosť meradla detekovať žiarenie o rôznych energiách bola testovaná pomocou zdrojov ^{241}Am , ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{60}Co umiestňovanými do prázdneho vagóna. Relatívna závislosť účinnosti detekcie fotónov o rôznych primárných energiách (vzhľadom k energii 662 keV) je znázornená na nasledujúcom obrázku.



Obr.14. Energetická závislosť odozvy [8]

Pri netienenom zdroji je meradlo schopné detekovať fotóny s energiou väčšou než 60 keV.

Pri zdroji umiestnenom v šrote v polohe C, výška 100 cm je meradlo schopné detekovať fotóny s energiou väčšou než cca 300 keV.

Relatívna účinnosť detekcie ^{226}Ra (prirodzený rádionuklid) vzťahnutá k účinnosti detekcie ^{137}Cs je 1,04 [9].

II.3.2.7. Polohová závislosť účinnosti detekcie ^{137}Cs

Relatívna účinnosť detekcie fotónov ^{137}Cs v rôznych polohách zdroja vo vagóne so šrotom vzťahnutá k polohe C, výška 100 cm je uvedená v nasledujúcej tabulke 3 [9].

Tab.3

Výška [cm], Trubka	B	C	D
150	9,6	1,26	21,9
100	11,2	1,0	21,6
50	9,1	2,0	20,8

II.3.2.8. Pohotovosť detekcie

Pohotovosťou detekcie sa rozumie schopnosť meradla detekovať zdroj v prípade, keď je umiestnený na začiatku súpravy v trubke A so šrotom. Zdroj ^{137}Cs aktivity 475 MBq bol detekovaný pri všetkých prejazdoch. Zdroj ^{137}Cs o aktivite 53 MBq bol detekovaný pri všetkých prejazdoch [9].

II.3.2.9. Odozva v závislosti na teplote

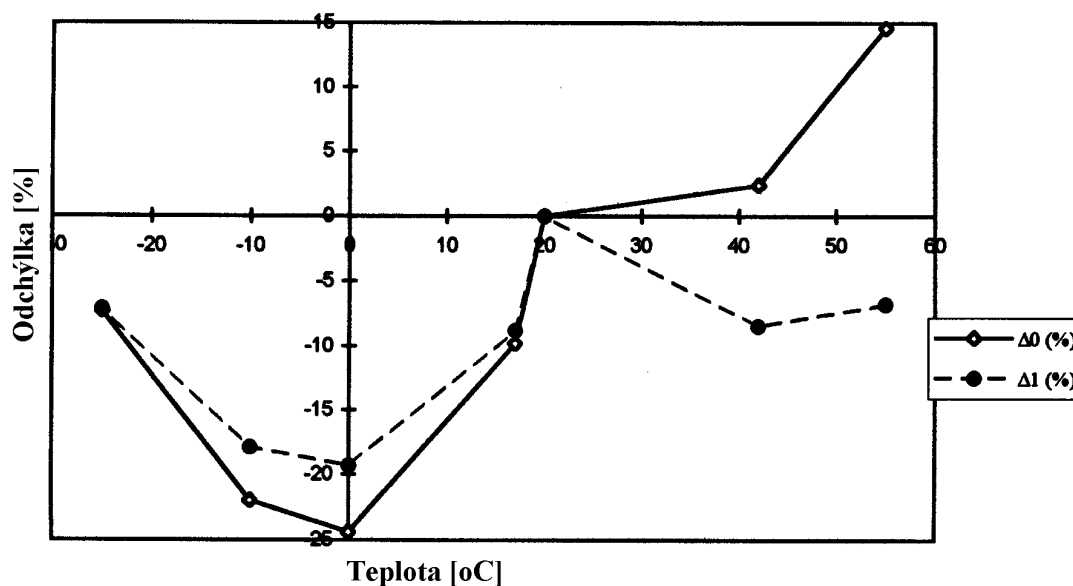
Výsledky teplotných skúšok sú uvedené v nasledujúcej tabulke 4 v početnostiach a v grafe ako odchýlka od hodnoty pri referencnej teplote.

Tab. 4

T(°C)	$n_0(\text{s}^{-1})$	$n_1(\text{s}^{-1})$
56	5204	35259
43	4432	35394
23	4592	37757
22	4326	36968

-2	5097	43746
-11	5312	45875
-26	6318	53988

Tabulka ukazuje nameranú početnosť pozadia n_0 , a početnosť so žiaricom n_1 pre rôzne teploty.



Obr.15 Graf odchýlky odozvy na pozadí (Δ_0) a na zdroj ^{137}Cs (Δ_1) od hodnôt pri referencnej teplote [8].

V nasledujúcej tabulke 5 je uvedený prehľad výsledkov testov od všetkých dodávateľov, zámerne sa neuvádzajú ich presné názvy, len typ meracieho zariadenia.

Tab. 5.

Typ meracieho prístroja	Detekčná jednotka	Teplotný rozsah	Detekčný limit bez šrotu [MBq]	Detekčný limit so šrotom [MBq]	Energetický rozsah [keV]	Závislosť signálu od aktivity	Relatívna účinnosť detekcie Ra-226 vzhľadom na CS-137	Teplotná závislosť
Y 911 [8]	Plastový scintilátor	-35°C až +60°C	3	600	150 až 1 500	Kvázi lineárna	1,36	-25 až +15%
RTM 910 [9]	Plastový scintilátor	-25 až +50°C	1	200	60 až 1 400	Narastajúca funkcia	1,04	-10 až +45%
FHT 1388 [10]	Plastový scintilátor	-40 až +60°C	1	200	60 až 1 400	Narastajúca funkcia	1,26	-10 až +5%
GR 526 [11]	Plastový scintilátor	-40 až +50°C	0,2	50	60 až 1 300	Narastajúca funkcia	0,79	-5 až +10%
FZM [12] 0700.003	Plastový scintilátor	-20 až +40°C	1	300	90 až 1 300	Kvázi lineárna	0,88	-25 až +55%

NE ASM [13]	Plastový scintilátor	-35 až +50°C	1	160	80 až 1 300	Kvázi lineárna	0,87	-20 až +5%
CTM 304 [14]	Plastový scintilátor	-20 až +50°C	0,4	200	60 až 2 000	Kvázi lineárne	0,75	0 až +140%
GR 526/400 [15]	Plastový scintilátor	-40 až +50°C	0,2	100	60 až 1 300	Narastajúca funkcia	0,40	-10 až +5%
SRDS – M2 [16]	CsJ(Tl) scintilátor	-30 až +45°C	1	900	60 až 1400	Narastajúca funkcia	0,86	-10 až +5%

II.4. Monitorovanie umelej a prírodnej rádioaktivity.

Monitorovanie rádioaktivity v životnom prostredí sa používa ako pre lokálne aj pre regionálne systémy s tým istým cieľom: vyvolať odozvu „včasného varovania“ v prípade objavenia sa rádioaktivity v životnom prostredí. Lokálne monitorovacie systémy sa sústreďujú na pravidelné, alebo potenciálne zdroje možných únikov rádioaktívnych látok najmä z jadrových elektrární, jadrových výskumných zariadení, úložiska rádioaktívneho odpadu. Štruktúra lokálnych systémov je závislá od skutočnej prevádzky zariadenia. Prvotné merané médium môže byť rôzne. Emisie z jadrových reaktorov môžu byť monitorované napríklad meraním dávkového príkonu aj so súčasným monitorovaním rôzneho druhu rádioaktivity vzduchu. Úložiska rádioaktívneho odpadu sú monitorované prostredníctvom kontroly podzemných vôd. Na druhej strane regionálne monitorovacie systémy majú všeobecný charakter: sú založené na detekcii rádioaktivity v atmosfére. Popis a porovnanie lokálnych a regionálnych monitorovacích systémov nájdeme v literatúre [17],[18],[19],[20]. Dôležitou požiadavkou monitorovania životného prostredia je častokrát schopnosť rozlíšiť prirodzenú a umelú rádioaktivitu. Je to veľmi náročné aj pomocou rádiochemickej analýzy, hoci proces rádioizotopickej separácie by sa automatizoval.

Druhou generáciou systému včasného varovania v životnom prostredí okrem „tradičného“ merania dávkového príkonu je aj použitie aspoň jednej vzduchovej filtračnej jednotky, či už s pohyblivým filtračným pásom, alebo so statickým filtrom. Modelové systémy sú porovnávané a vyhodnocované na základe ich schopnosti odozvy pre dva marginálne prípady:

- 1) objavenie sa náhleho kontaminantu (kontaminácie) s pôvodom z blízkosti meracieho zariadenia
- 2) pomalé narastanie (zvyšovanie) kontaminantu prichádzajúceho z väčšej vzdialenosti.

Štruktúra a komponenty vzorkovania, zber dát, proces vyhodnocovania dát sú navrhované a prispôbované podľa požiadaviek prevádzky „včasného varovania.“

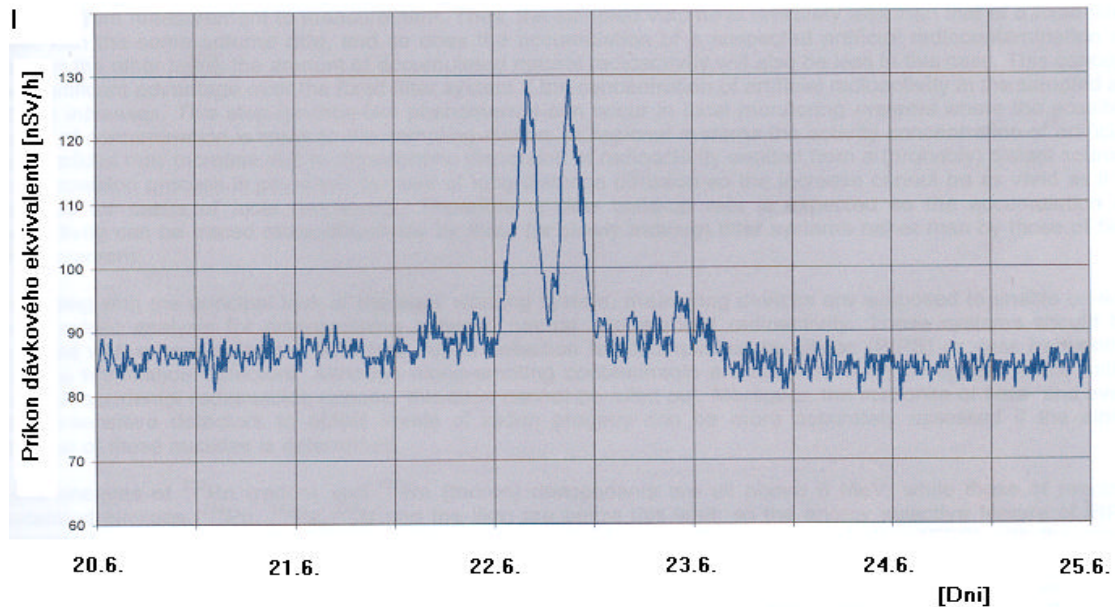
Na takýto účel bol vyvinutý merací systém AMS 02 [21]. Merací systém je možné automaticky aj manuálne prevádzkovať. Niektoré reprezentatívne merania a výsledky z testovacích meraní sú uvedené v nasledujúcom.

II.4.1. Kontinuálne meranie externého príkonu dávkového ekvivalentu žiarenia gama

Velmi rozšírenou metódou monitorovania rádioaktivity životného prostredia je kontinuálne meranie externého príkonu dávkového ekvivalentu žiarenia gama. Prístroje používané na tento účel sú podrobne prebrané Momenim v [22]. Táto priama metóda nie je schopná rozlíšiť umelú a prírodnú rádioaktivitu. Jedinou cestou ako získať spoľahlivé riešenie takej úlohy je nastavenie dostatočne vysokej signalizačnej hladiny, ktorá nebude prekročená prírodnou radiáciou za normálnych podmienok. Externý príkon dávkového ekvivalentu žiarenia gama je ovplyvňovaný mnohými faktormi a podmienkami. Všetky musia byť starostlivo určené a preskúmané pred nastavením varovných úrovní na signalizáciu umelej rádioaktivity nad prirodzeným pozadím. Úroveň prirodzeného pozadia ovplyvňujú väčšinou nasledujúce faktory: koncentrácia aktivity ^{222}Rn a ^{220}Rn a ich dcérske produkty v atmosfére, vyzrážanie častíc adsorbujúcich dcérske produkty radónu zo vzduchu na zemský povrch, rádioaktivita povrchových vrstiev pôdy, kozmické žiarenie, iné zložky v danom mieste životného prostredia napr. ako rádioaktivita stavebných materiálov. Žiadna z týchto zložiek z dlhodobého hľadiska nie je konštantná. Dôkladný proces kalibrácie vyžaduje pomerne presné určenie týchto zložiek ako funkciu času. Takáto procedúra obvyčajne zahŕňa rádioanalytické, inštrumentálne a rádiochemické metódy uvádzané Büngerom [23], Whelpdaelom [24].

Citlivosť regionálneho monitorovacieho systému sa môže o niečo zlepšiť pre individuálne meracie stanice ak sa im nastaví havarijná a varovná úroveň na základe lokálnej kalibrácie. Všeobecná prax býva, že pre celú krajinu sa nastaví rovnaká havarijná aj varovná úroveň signalizácie. Kontinuálna kontrola regionálneho monitorovacieho systému je zabezpečená centrálnym PC dozorujúcim nad celou sieťou, ktorý porovnáva namerané údaje s vopred

nastavenými. Napr. prírodné pozadie vo väčšine európskych krajín spadá do intervalu 70 až 160 nSv.h⁻¹. Najnižšia varovná úroveň nastavená napr. pre Rakúsko je 500 nSv.h⁻¹ a podobne je to aj inde v Európe. Meracie jednotky regionálnych systémov sú volené rovnakého druhu a ich inštalácia by mala predchádzať sériou detailných kontrol príslušného národného metrologického úradu.



Obr.16. Meranie príkonu dávkového ekvivalentu prírodného pozadia žiarenia gama prístrojom RS 03 v dnoch 20 – 25.6.1999

Odozva meracieho prístroja na meranie príkonu dávkového ekvivalentu RS 03 v monitorovacej sieti Rakúska [25] na obrázku 16 ukazuje kolísanie príkonu dávkového ekvivalentu v priebehu jedného týždňa. Dva píky narastajúce z priemernej hodnoty príkonu dávkového ekvivalentu 85 nSv.h⁻¹ až k hodnote 130 nSv.h⁻¹ vyjadrujú dva silné búrkové dažde, čím sa vyzrážali aerosolové častice dcérskych prvkov radónu na zemský povrch.

II.4.2. Kontinuálne vzorkovanie a meranie aerosólových častíc

Niektoré európske monitorovacie systémy (napr. rakúske [26]) majú kontinuálne prevádzkované (automatické diaľkovo ovládané) vzorkovacie a meracie jednotky, ktoré zberajú určité atmosferické častice (v Rakúsku aerosóly a jód). Tieto jednotky vykonávajú filtráciu a následnú prístrojovú analýzu. Filter spojený so vzduchovou pumpou je schopný akumulovať aerosólové častice z veľkého objemu vzduchu na malú plochu, ktorých rádioaktivita môže byť určená s dobrou efektivitou merania, čo umožňuje zvoliť výhodné detekčné a varovné úrovne. Detailnú diskusiu o nízkoobjemovom zariadení na vzorkovanie aerosólov publikoval Dunker [27]

Všeobecne môžeme uvažovať tri druhy rádioaktívnych látok pri úniku do životného prostredia po nejakej jadrovej havárii:

1. vzácne plyny
2. častice rádionuklidov viazané (väčšinou ióny)
3. komponenty plyno-parovej fázy, ktoré sa ľahko adsorbujú na vhodnom materiáli (napr. zložky molekulárneho a organického jódu).

Zložky „prírodného pozadia“ patria k prvým dvom skupinám. Vzorky odobraté filtráciou môžu zlepšiť citlivosť merania len pre posledné dve skupiny. Je veľmi rozšírená prax, že jódový filter je pripojený na odberový systém tak, aby vzduch najprv prechádzal aerosólovým filtrom a potom jódovým filtrom. Vzduchové pumpy používané v monitorovacích zariadeniach majú prietoky od desiatich $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ do niekoľko sto $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Zber aerosólov na filter môže byť riešený na pohyblivý pás, alebo na pevný filter. Obidve riešenia majú svoju výhodu aj nevýhodu a zrejme vyžadujú rôzne meracie zariadenie a rôzne algoritmy vyhodnotenia nameraných údajov. V prípade pohybujúceho sa filtra znamená, že adsorbujúca plocha je (čiastočne, alebo úplne) obnovovaná od merania k meraniu. Presávaný objem vzduchu je relatívne menší, než pri fixnom filtri pre rovnaký prietok vzduchu a úmerne k tomu sa mení aj množstvo naakumulovaných aerosólov. Koncepcia pohyblivého filtra má značnú výhodu v porovnaní s fixným filtrom ak koncentrácia umelej rádioaktivity v presávanom vzduchu postupne narastá.

Takýto jav sa môže vyskytnúť v lokálnom monitorovacom systéme, keď zdroj možnej kontaminácie je v blízkosti meracieho zariadenia. V regionálnych systémoch môže koncentrácia aktivity umelých rádionuklidov stúpať vplyvom atmosferickej disperzie emitovanej rádioaktivity (pravdepodobne) zo vzdialeného zdroja. Tento disperzný proces prebieha podľa zákonov difúzie na veľké vzdialenosti a zvyšovanie aktivity nemožno interpretovať ako v prípade lokálneho monitorovacieho systému. Preto sa pre pomalé narastanie očakáva, že akumulácia rádioaktivity sa môže efektívnejšie rozlíšiť pre fixný filter (alebo pomaly sa pohybujúci) ako pre rýchlo sa pohybujúci.

V súlade s hlavnou úlohou systému včasného varovania, predpokladá sa že meracie zariadenia umožňujú on-line spektrometrickú analýzu na rozlíšenie prírodnej a umelej rádioaktivity. Tieto systémy majú byť preto vybavené spektrometrickými detektormi. Meranie alfa aktivity je riešené polovodivovým detektorom na báze Si, alebo menej často aj scintilacným detektorom ZnS(Ag). Hoci alfa častice emitujúce kontaminanty sa nevyskytujú s veľkou pravdepodobnosťou v začiatocnej fáze rádioaktívneho úniku, táto možnosť by sa nemala zanedbávať.

Energie všetkých alfa emitérov dcérskych produktov ^{222}Rn (radón) a ^{220}Rn (thorón) majú energiu častíc nad 6 MeV, kým nuklidy pridružené reaktoru (^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{235}U a podobné) sú pod touto hranicou. Potom spektrometrická vlastnosť polovodivového alfa detektora dáva možnosť na určenie radónovej rovnovážnej koncentrácie (EEC-equivalent equilibrium concentration) s tým istým zariadením. Táto rozšírená úloha vyžaduje novú algoritmickejšiu štruktúru riešenia problému s dvomi druhmi vzorkovacích cyklov:

- kratší v trvaní 5 až 10 minút
- dlhší v trvaní 12 hodín až niekoľko dní

pri použití toho istého filtra. Rádioanalytická metóda nemôže byť optimálna za podmienok kontinuálneho vzorkovania a vyhodnocovania, lebo hrúbka alfa emitujúceho povrchu nie je dostatočne definovaná – mení sa počas vzorkovania. Hoci vyhodnocujúci program indikuje prítomnosť umelej rádioaktivity, fixné filtre sú vhodné na dodatočnú off-line rádiochemickú analýzu a alfa spektrometriu, na identifikáciu a kvantifikáciu každého alfa-emitujúceho

kontaminanta. Systémy s pohybujúcim sa filtrovým pásom je problematické použiť na tento účel.

Meranie beta aktivity sa rieši väčšinou pomocou silikonového polovodivového detektora, alebo organického scintilátora, prípadne CsJ(Tl). Spektrometrická vlastnosť detektorov je veľmi dôležitá, hoci priama identifikácia rádiokontaminantov je sotva možná. Ak povrch filtra obsahuje len prírodnú rádioaktivitu, beta aktivita sa použije na výpočet skutočnej koncentrácie dcérskych produktov radónu. Napriek tomu, alfa (prípadne gama) prieniky dcérskych produktov radónu a taktiež beta emisia týchto nuklidov sa musia odčítať, aby zostávajúca čistá početnosť mohla prejsť významné testy a celková beta aktivita umelých rádiokontaminantov sa môže následne určiť.

Filtre obsahujúce umelú rádioaktivitu môžu sa následne analyzovať rádiochemickou separačnou metódou na identifikáciu čistých beta žiarivcov ako $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$.

Gama nuklidy sú analyzované spektrometricky pomocou scintilacných napr. NaJ(Tl) a polovodivových Ge detektorov. Komponenty prírodnej rádioaktivity majú byť identifikované a po odčítaní pozadia čisté početnosti impulzov použité na kvalitatívne a kvantitatívne určenie umelých aktivít.

Odber jódu sa realizuje záchytom na „tradičný“ uhlíkový filtračný blok a v prípade molekulárneho jódu špeciálny filter pozostávajúci z vrstvy uhlíka obsahujúceho impregnačný materiál. Výhodou toho posledného je, že filtre sa môžu ľahko a automaticky vymeniť a ich geometria merania je značne výhodnejšia. Čo sa týka regionálneho monitoringu, takzvané „očakávané“ rádioizotopy jódu majú relatívne dlhý polčas rozpadu ako ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I . Všetky tieto nuklidy sú beta a gama žiarivce a tak jódomé filtračné vrstvy sú spojené s vhodnými detektormi vyššie spomenutými. Ak je počet očakávaných pravdepodobných izotopov malý, použitie drahého meracieho systému s polovodivovým detektorom sa nedoporučuje. Ak sa použijú uhlíkové filtračné bloky, len meranie gama spektier je aktuálne. Toto je prípad, keď sa majú odberať vzorky organického jódu. Ak sa vyžaduje ďalšia rádiochemická analýza filtračných vrstiev je možné analyzovať aj extrémne dlhožijúci ^{129}I , má však veľmi malý štípný výťažok.

III. VLASTNÉ DLHODOBÉ KONTINUÁLNE MERANIA ŽIARENIA GAMA

V nasledujúcom sú ukázané viac ako ročné dlhodobé kontinuálne merania dávkového príkonu γ - žiarenia prírodného pozadia. Boli posúdené príspevky jednotlivých príčin kolísania prírodného pozadia žiarenia gama. Merania boli vykonané s presne kalibrovanou sondou v jej celom meracom rozsahu, na meranie príkonu dávkového ekvivalentu $H^*(10)$. Z výsledkov meraní vyplýva požiadavka na výber sondy s potrebnou citlivosťou. Sú analyzované jednotlivé efekty rôznych príspevkov prírodného pozadia.

Pri rôznej výrobnej činnosti a spracovateľských technológiách v jadrovom výskume, energetike aj v zdravotníctve môže dôjsť k zvýšeniu úrovne žiarenia prírodného pozadia, alebo aj k úniku umelých rádionuklidov. Pri kontrole stavu rádioaktivity životného prostredia treba vykonať analýzu vplyvu prírodného pozadia na meranie možného úniku umelých rádionuklidov. V práci je vykonaná analýza príspevku jednotlivých pozadových efektov pri meraní príkonu dávkového ekvivalentu od žiarenia gama.

Pre väčšinu oblastí všetkých kontinentov úroveň prírodného γ - žiarenia obvyčajne spadá do intervalu 70 – 130 $nSv \cdot h^{-1}$ (Sv – jednotka dávkového ekvivalentu). Asi 80% - 90% tohto žiarenia tvorí terestriálna zložka, 10 – 15% zložka kozmického žiarenia a asi 2 – 3% pochádza zo vzduchu. Terestriálnu zložku v podstate tvoria ^{40}K , ^{87}Rb , ^{226}Ra , ^{232}Th a prírodný urán.

Kozmické žiarenie je tvorené vysokoenergetickými mióňmi a ich sekundárnymi časticami fotónmi. Človekom vytváraná umelá rádioaktivita za normálnych podmienok zatiaľ významnejšou mierou neprispieva k rádioaktivite prírodného prostredia.

Merania prírodného pozadia žiarenia gama boli vykonané s presne kalibrovanou sondou na metrologické účely. Sonda obsahuje proporciálny detektor s veľmi širokým rozsahom merania a nízkym prahom detekcie. Merania boli vykonané proporciálnym detektorom umiestneným v inteligentnej sonde hermeticky vodotesnej a odolávajúcej akýmkoľvek podmienkam počasia, v priebehu celého roka. Meracia sonda bola inštalovaná

na rovnej streche trojposchodovej budovy rozmerov 10 x 20 m, v strede strechy vo výške 1m. Meranie je kontinuálne vykonávané od decembra 1996.

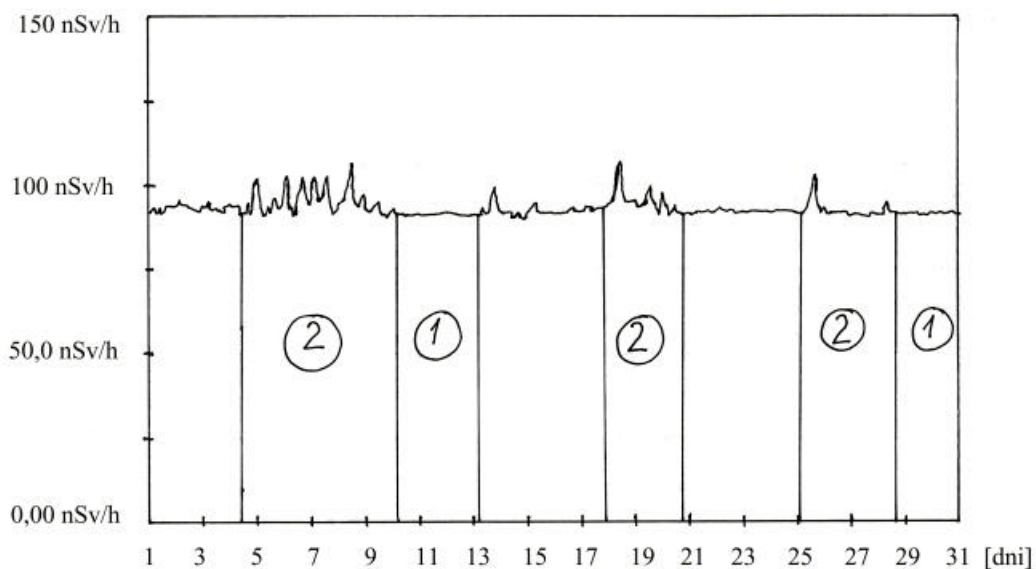
Sonda je napájaná zo siete a v prípade jej výpadku z batérií. Vzorkovací čas pri meraní je 200 ms a doba jedného merania je 10 min. Sonda je inteligentná (ukladajú sa a vyhodnocujú sa namerané údaje pomocou softveru v PC) má vlastnú pamäť a je pripojiteľná na PC cez komunikacný prechod RS 232.

Technické parametre prístroja:

Meraná velicina:	$H^*(10)$ (Sv.h ⁻¹)
Merací rozsah:	10 nSv.h ⁻¹ až 10 Sv.h ⁻¹
Relatívna chyba:	< 5% v celom meracom rozsahu
Energetická závislosť:	±20%, 70 – 1500 keV vzhľadom na ¹³⁷ Cs
Teplotný rozsah.	-30 až +70 °C
Citlivosť detekcie:	4 imp.s ⁻¹ na 100 nSv.h ⁻¹

III.1 Výsledky merania a diskusia

Keď analyzujeme typický záznam dávkového príkonu, na ktorom sú výsledky meraní z júla 1997 (obr. 17) vidíme, že úroveň pozadového žiarenia nie je konštantná. Možno pozorovať časté kolísania smerom nahor aj nadol – signál je zdanlivo zašumený. Tento zdanlivý šum je spôsobený fluktuáciami pozadového γ - žiarenia. Rozhodujúcim problémom vyhodnocovania záznamu je identifikácia umelej rádioaktivity v životnom prostredí. Kvôli identifikácii menšieho množstva gama žiarivcov, musíme správne interpretovať a vysvetliť prírodné fluktuácie. Hoci nepoznáme hlavné mechanizmy ovplyvňujúce úroveň prírodného dávkového príkonu gama žiarenia, môžeme však identifikovať náhlu zmenu príspevku umelých rádionuklidov s „prijateľným“ prahom detekcie.



Obr. 17. Kontinuálny záznam merania príkonu dávkového ekvivalentu za júl 1997.

Na základe vyhodnotení doterajších meraní je možné vypracovať určitý návod klasifikácie a hodnotenie meracieho miesta za účelom predpovedať vplyv miestnych špecifických efektov na meranie dávkového príkonu γ - žiarenia. Je niekoľko zdrojov γ - žiarenia v prírodnom prostredí. Prehľad o týchto zdrojoch, charaktere trvania účinku a typickej veľkosti je zhrnutý v nasledujúcej tabuľke 5.

Tab.5

	Príslušný príspevok	Typický tvar (prípadne trvanie)	Typická veľkosť
1.	Stochastické kolísanie bez fyzikálneho významu	Nepravidelné kolísanie (cyklicky)	$\pm 2 - 3 \text{ nSv.h}^{-1}$
2.	Efekt vymývania dcérskych produktov radónu (^{214}Bi , ^{214}Pb na aerosoloch)	Hladké píky negausovské (niekoľko hodín počas trvania)	$+ 30 - 50 \text{ nSv.h}^{-1}$

		dažda)	
3.	Vrstva snehovej pokrývky [28]	Pozvoľný pokles (do roztopenia sa snehu)	~ -1 nSv.h ⁻¹ na 1 cm vrstvy snehu
4.	Variácie kozmického žiarenia (spršky, slnečné škvrny)	Velmi pomalá zmena (sezónny, príp. 11 ročný cyklus)	< 5 nSv.h ⁻¹
5.	Ludský faktor (žulové stavby, fosfátové hnojivá)	Náhle nespojité zmeny (v korelácii so zásahom cloveka)	± 30 nSv.h ⁻¹
6.	Umelá rádioaktivita vzniknutá v životnom prostredí	Závisí od intenzity a času trvania úniku	Bez obmedzenia v závislosti od veľkosti úniku

Vysvetlenie jednotlivých vplyvov uvedených v tabulke 5 je nasledujúce:

Stochastické kolísania o ± 2 až 3 nSv.h⁻¹ vidieť v case od 10. do 14. júla (**fluktuácia typu 1**, obr. 17, má charakter nepravidelného kolísania s neznámym hlavným mechanizmom, ktorý tieto kolísania môže spôsobiť.)

Efekt vymývania dcérskych produktov radónu usadnutých na aerosoloch závisí od intenzity a trvania dažďov (**fluktuácia typu 2**). Výrazne vidieť vplyvy intenzívnych dažďov od 4. do 10. 7., od 18. do 21. 7 a od 25. do 28. 7. s maximami dávkového príkonu až do 110 nSv/h v porovnaní s normálnym obdobím v ustálenom stave okolo 90 nSv.h⁻¹.

Tieniaci efekt vrstvy snehovej pokrývky v zimných mesiacoch (**fluktuácia typu 3**) nebolo možné pozorovať, lebo detektor je umiestnený na streche novej trojposchodovej budovy v Trnave (kde je malé množstvo snehu). Údaj o tomto efekte je prevzatý z meraní v literatúre [28] v Alpách.

Hrúbka snehovej vrstvy exponenciálne redukuje žiarenie gama pochádzajúce zo zemskej kôry do vzduchu podľa vzťahu DR

$$DR = 0,0317 \cdot e^{-0,000954 \cdot SWE} + 0,0548$$

kde DR je externý dávkový príkon v $\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$. Konštantu k exponenciálnej funkcii možno vysvetliť príspevkom kozmického žiarenia. SWE je ekvivalent množstva

snehu k vode (snow water equivalent) [29] . Autori ešte uvádzajú možnosť spresnenia hore uvedeného vzťahu nahradením ionizačnej komory scintilacným detektorom NaI(Tl) a následným uvážením príspevku ^{40}K z pôdy značne klesne pozadie od kozmického žiarenia.

Variácie kozmického žiarenia (**fluktuácie typu 4**), v období vtedajšieho trvania merania (niečo vyše roka) neboli pozorované.

Ludský faktor, predstavujú zásahy do prírody (**fluktuácie typu 5**), napr. veľké žulové komplexy stavieb v blízkosti detektora, alebo intenzívne prihnojovanie fosfátovými hnojivami, môžu spôsobiť kolísania v rozsahu $\pm 30 \text{ nSv}\cdot\text{h}^{-1}$. Menšie zmeny v rozsahu $\pm 10 \text{ nSv}\cdot\text{h}^{-1}$ spôsobujú rôzne porasty, alebo ich kosenie a rezanie.

Únik umelých rádionuklidov (ktorých radičná úroveň závisí od množstva úniku, **fluktuácia typu 6**) nebol pozorovaný v sledovanom období počas merania.

Záverom treba ešte zdôrazniť, že detektor je inštalovaný na rovnej streche budovy a neprejaví sa tu proces zachytu daždovej vody povrchovými vrstvami pôdy. Príspevok tohto efektu môže byť $8 - 10 \text{ nSv}\cdot\text{h}^{-1}$.

Pocas vyše ročného merania, nedošlo v okolí sondy k úniku umelých rádioaktív do životného prostredia, čo znamená, že výsledky neboli umelou rádioaktivitou ovplyvnené.

Na meranie dávkového príkonu ($80 - 100 \text{ nSv}\cdot\text{h}^{-1}$ úrovne prírodného pozadia) treba zvoliť detektor s prahom citlivosti minimálne o jeden rád pod meranou úrovňou. Pre merania v životnom prostredí je rozhodujúca spodná hranica meracieho rozsahu použitého detektora, čo je $10 \text{ nSv}\cdot\text{h}^{-1}$, takže použitá sonda s proporcionálnym detektorom plne vyhovuje. Pri kontinuálnom meraní, všetky vplyvy sú súčasne naložené na efekte typu 1. Pri vyhodnocovaní kontinuálneho merania jednoznačne možno pozorovať efekt 3, vymývanie dcérskych produktov radónu počas trvania zrážok. Pocas merania prírodného pozadia sa však môže prejavovať aj kombinácia všetkých efektov, alebo len niektorý z efektov 1, 2, 3, 4, 5. Pri vyhodnocovaní záznamu treba brať do úvahy možnosť príspevku všetkých efektov.

IV. EXPERIMENTÁLNE STANOVENIE CITLIVOSTI MERACIEHO SYSTÉMU V ŽELEZIARNACH PODBREZOVÁ

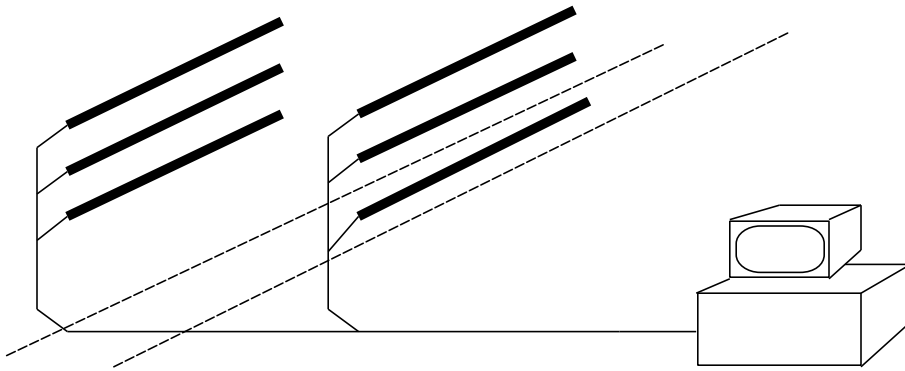
Merací systém na kontrolu železného šrotu bol predvedený v reálnych podmienkach v Železiarnach Podbrezová a.s. Pri experimente boli simulované podmienky existujúce pri vstupe železného šrotu do závodu železníc v vagóne. Boli simulované situácie statické aj dynamické pri pohybujúcom sa vagóne rýchlosťou do 10 km.h⁻¹. Experiment bol príslušným orgánom oznámený a vykonaný so súhlasom kompetentného krajského hygienika pre prácu s rádioaktívnymi látkami a etalónmi.

IV.1. Ciele experimentu

- vplyv usporiadania a počtu detektorov meracieho systému
- porovnávacie merania statické a dynamické
- meracie možnosti pre kamióny a železnicu
- možnosti približnej lokalizácie zdroja žiarenia vo vagóne
- citlivosť meracieho systému vybudovaného na detektoroch RGM200/sta vyrábaných firmou BITT Technology.

IV.2. Zostava experimentu

Na nasledujúcom obrázku 18. vidieť zostavu 6 ks detektorov typu RGM200/sta, signál z týchto detektorov vstupuje do koncentrátora DC 14. Na monitore pripojenom k tomuto koncentrátoru možno odcítavať výsledky meraní, súčasne je na tento koncentrátor pripojený akustický signalizátor kontaminácie.



Obr.18. Usporiadanie detektorov na meranie rádioaktívnej kontaminácie železného šrotu

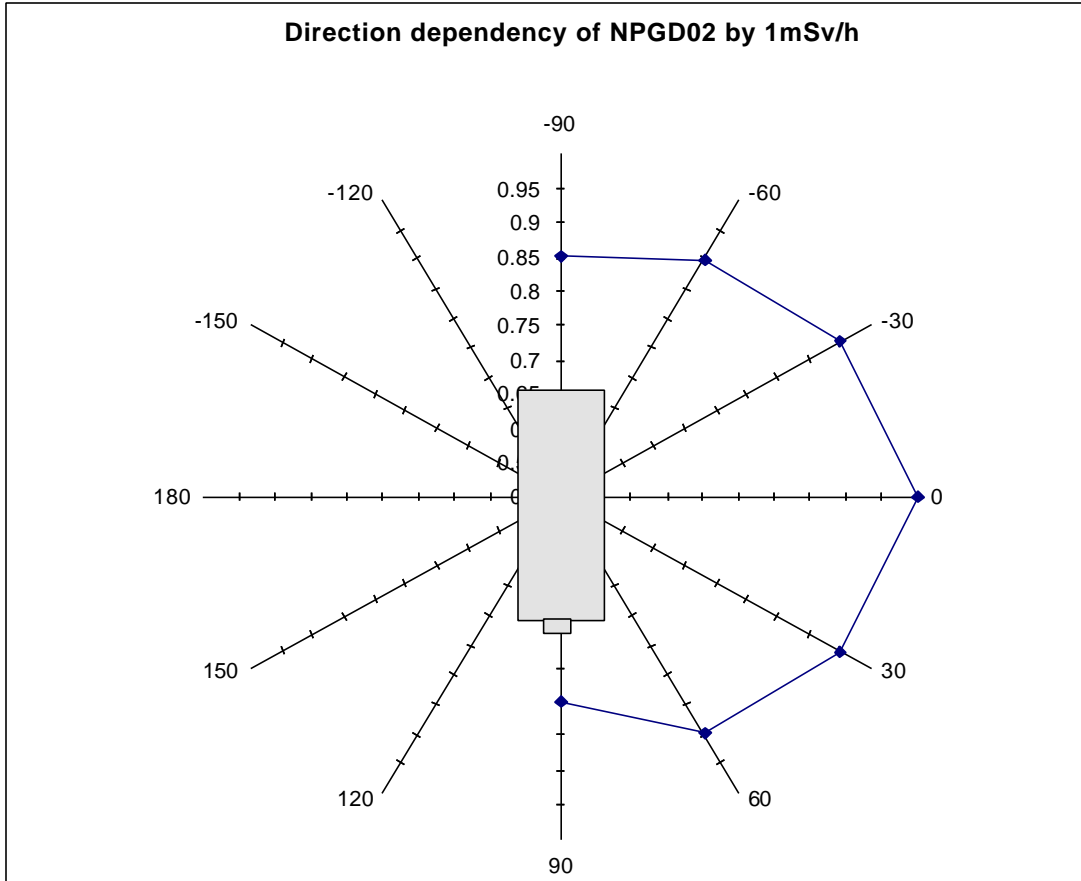
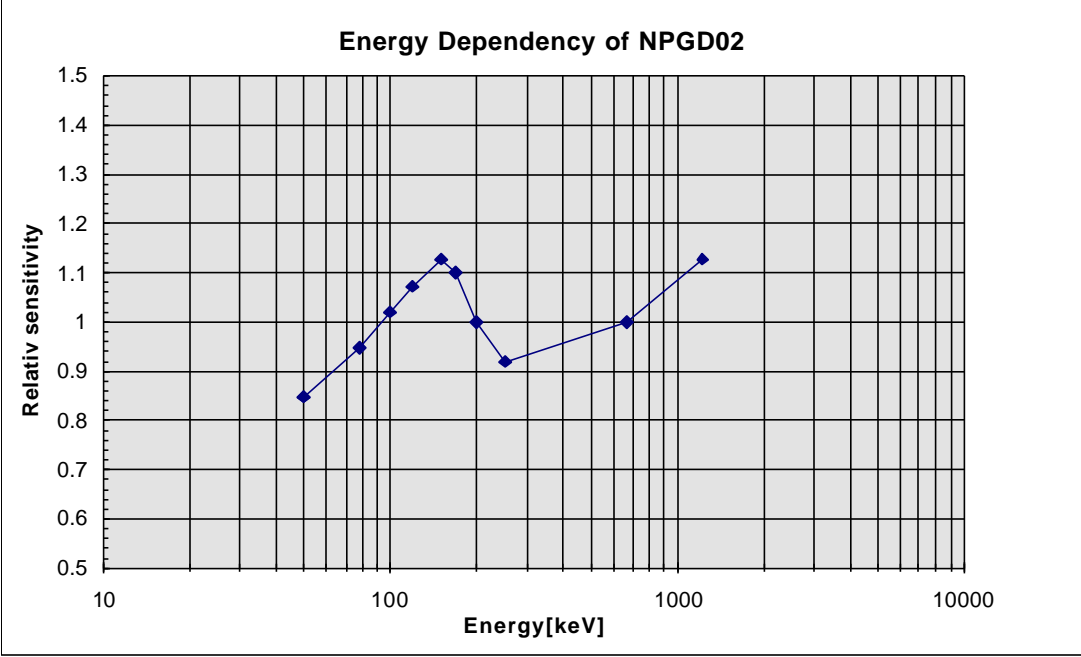
Experiment modeluje odhalenie rádioaktívneho etalónu v železnom šrote naloženom na štandardnom železničnom nákladnom vagóne (vagón zodpovedajúci medzinárodnej európskej norme). Železný šrot je imitovaný naloženými ocelovými rúrami priemeru \varnothing 133 mm a hrúbky steny 5 mm, rúry boli naložené na vagóne do výšky 1,6 m. Priemerná hustota takto imitovaného železného šrotu je $1\,120\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Zoznam použitých etalónov so všetkými potrebnými údajmi (nuklid, identifikácia, aktivita, dávkový príkon na 1 m vo vzduchu) je v priloženej tabuľke 6. na str. 45

IV.3. Opis jednotlivých častí

Ako detektory boli použité veľkoobjemové proporcionálne detektory RGM200/sta vyvinuté zo štandardných RS03/x, s ktorými má firma BITT Technology viac ako 20 ročné skúsenosti. Tieto detektory sú v prevádzke pomnoho rokov v monitorovacej sieti Rakúska(336 detektorov), Holandska , Madarska.

RGM200/sta: Je robustný proporcionálny detektor, ktorý je uložený v otrasuvzdornej hliníkovej rúre a má nasledujúce charakteristické parametre:

- aktívna dĺžka : 2000 mm, aktívny priemer \varnothing 60 mm
- energetická závislosť a smerová závislosť je na nasledujúcom diagrame:



- citlivosť: 40 cps/100 nSv.h¹
- prah citlivosti: 10 nSv.h¹
- teplotný rozsah: -30 až +70 °C
- výstup: 12 V/10 μs impulz
- napájacie napätie: 10, 5 V až 13, 8 V, max. 40 mA

DC 14 koncentrátor: Je to počítač prevádzkovateľný za priemyselných a prevádzkových podmienok (s vlastným vnútorným akumulátorom)

Vlastný nosič detektorov (meracia brána): čistá svetlosť 3700 mm šírka, 4500 mm výška (zodpovedá európskej norme), rozmery nosiča sú nastaviteľné podľa požiadaviek užívateľa.

Etalónové zdroje: Pozri priloženú tabuľku, kde je uvedené číslo položky, nuklid, identifikačné číslo, aktivita k dátumu experimentu, dávkový príkon vo vzduchu na vzdialenosti 1 m.

IV.4. Priebeh experimentu

Praktický priebeh experimentu: Do jednotlivých trubiek naložených na nákladnom vagóne boli zasúvané etalóny uvedené v priloženej tabuľke etalónov. Etalóny boli zasunuté až do stredu celkovej dĺžky rúry a takto bol vagón dotlačený lokomotívou do meracej brány tak, aby bol etalón v rovine meracej brány. Rovinou meracej brány rozumieme kolmú rovinu na smer pohybu vagóna vytvorenú stredmi citlivých častí detektorov. Takýmto spôsobom bolo možné zmerať statickú citlivosť meracieho systému. Potom bol vykonaný dynamický experiment pri rovnomernej rýchlosti do 10 km/h. Dynamické experimenty sme rozšírili aj pre nižšiu časovú konštantu softveru, aby sme demonštrovali rýchlosť systému. Prístrojom NB 3201 Tesla so scintilacným detektorom bola vykonaná kontrola intenzity etalónov. Kontrolu všetkých etalónov sme vykonali detektorom RS03/232 čo dobre súhlasilo s hodnotami vypočítaných dávkových príkonov na vzdialenosti 1 m vo vzduchu. Vyhodnocovacia časť v prípade prekročenia úrovne pozadia vydáva alarmujúci signál. Pre lepšiu možnosť sledovania činnosti systému je pripojený

k vyhodnocovacej jednotke aj displej. Takto je možné lepšie sledovať proces merania a priebeh ciastkových výsledkov.

Identifikačné údaje a aktivity etalónov k dátumu experimentu.

Tab. 6

Por. číslo.	nuklid	identif. číslo	aktivita	príkon dávk.ekv. *
1	^{60}Co	EG3 433 17	29. 90kBq	9, 13
2	^{60}Co	EG3 363 11	29. 37 kBq	8. 97
3	^{60}Co	CA 4/2	10. 07 MBq	3075
4	^{60}Co	ENM 730 01	3. 001 MBq	916
5	^{54}Mn	EG3 358 01	77, 96 MBq	8. 54
6	^{54}Mn	EG3 358 02	71. 35 kBq	7. 82
7	$^{60}\text{Co} \text{ ++}$	ENM 730 01	3. 001 MBq	412
8	$^{60}\text{Co} \text{ ++}$	CA 4/2	10. 07 MBq	1216. 4

*Vypocítaný príkon dávkového ekvivalentu (v nSv/h) vo vzdialenosti 1 m
 ++ etalón vložený do oloveného kontajnera s 15 mm hrúbkou steny

Obrazovka monitora :

				Ů
1		M/Bck 00147/00138	M/Bck 00185/00136	
2				
3		M/Bck 00144/00140	M/Bck 00224/00134	
4				
5		M/Bck 00159/00135	M/Bck 00229/00136	
6				
7				
8		VÝSLEDKY		
9				
10		1. 21*		
11		1. 07	1. 36*	ŮŮ
12		1. 05	1. 51*	ŮŮ ŮŮ
13	1. 09	1. 03	1. 67*	1. 57* ŮŮ ŮŮ ŮŮ
14		1. 10	1. 68*	ŮŮ ŮŮ ŮŮ
15		1. 17	1. 69*	ŮŮ ŮŮ ŮŮ
16		1. 43*		ŮŮ ŮŮ ŮŮ
17	ŮŮ ŮŮ ŮŮ ŮŮ			
18		1. 33*		ŮŮ ŮŮ ŮŮ ŮŮ
19	ŮŮ ŮŮ ŮŮ ŮŮ ŮŮ			
20	Úrovne signalizácie: 110 090 085 050 010			1 2 3 4 5

Vysvetlenie k zobrazeným údajom na obrazovke monitora :

1. až 6. riadok: Za posledné 3 sekundy nameraný počet impulzov /na 3 sekundy normalizovaný počet impulzov pozadia ++.

8. . 16 riadok: Pomer počtu impulzov za posledné 3 sekundy vzhľadom na pozadie. Hrubo vytlačené čísla sú namerané údaje detektorov, kým ďalšie čísla sú sumy z príslušných susedných údajov.

10. riadok :Je relatívna hodnota sumy zo 6 detektorov vzhľadom na pozadie.

11. až 18. riadok: znamená signifikantné prekroenie (prekroené hodnoty sú oznacené hviezdickou). +++

Pocet impulzov vzniká z plávajúceho priemeru, so 170 ms vyhodnocovacou pravidelnostou.

++ Hodnota pozadia $bgr = (\text{staré } bgr \cdot 4999 + \text{nová hodnota}) / 5000$

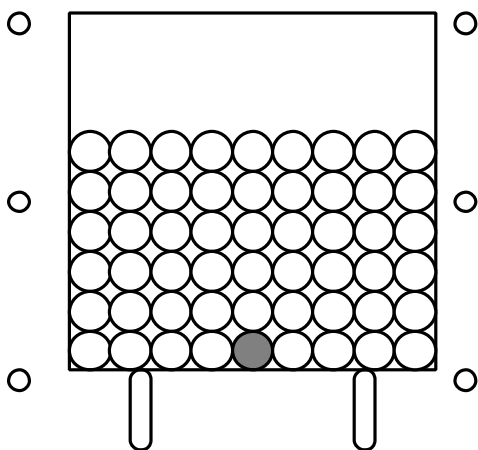
+++ Za signifikantné prekroenie považujeme hodnoty nad 3σ

IV.5. Usporiadanie merania

Statické pokusy

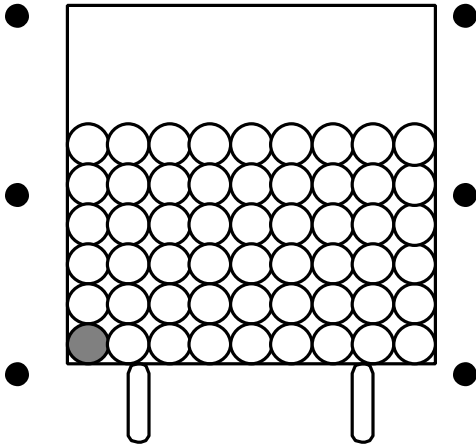
1. pokus, statická citlivosť.

Do stredu na podlahe (na obrázku vyšrafovaná rúra), bol vložený žiaric vytvorený z etalónov 1, 2, 5, 6 s celkovou aktivitou 208 kBq. Zvýšenie dávkového príkonu bolo pozorovateľné, ale nedošlo k prekroeniu signifikantnej úrovne.



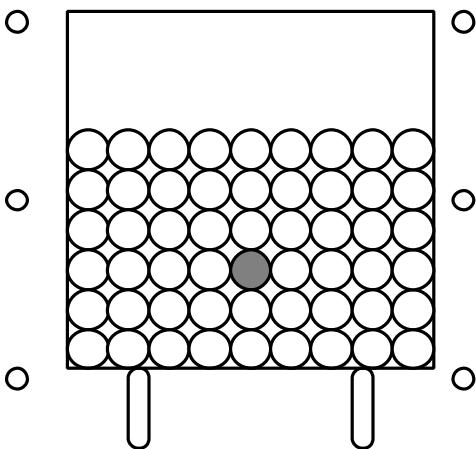
2. pokus, statická citlivost.

Do polohy na obrázku označené bol vložený žiaric vytvorený z etalónov 1, 2, 5, 6. Celková aktivita bola 208 kBq. . V tomto prípade hodnota dávkového príkonu prekročila významnú úroveň a systém vydal signál o prekročení nastavenej úrovne.



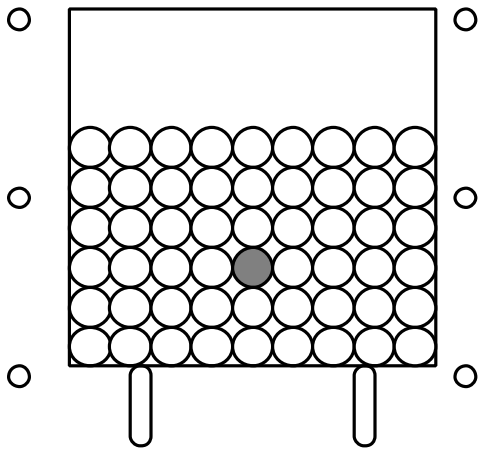
3. pokus, statická citlivost .

Do polohy na obrázku označené bol vložený etalón 4 o aktivite 3,001 MBq. Dávkový príkon prekročil významnú úroveň o 40%, systém vydal signál o prekročení.



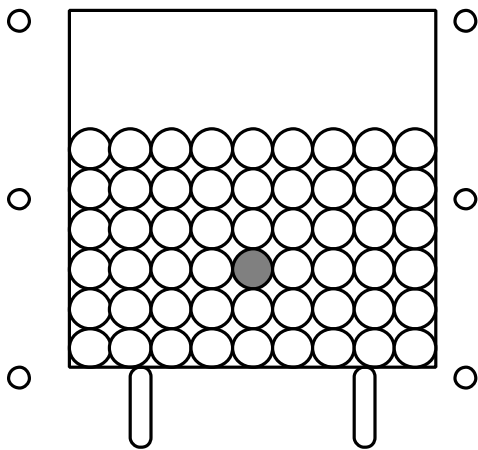
4. pokus, statická citlivost.

Do polohy označené na obrázku byl vložen etalón 7 (s 15 mm hrubou tieniacou vrstvou olova) s celkovou aktivitou 3,001 MBq. Dávkový příkon překročil významnou úroveň o 20 % a systém vydal signál o překročení úrovně.



5. pokus, statická citlivost.

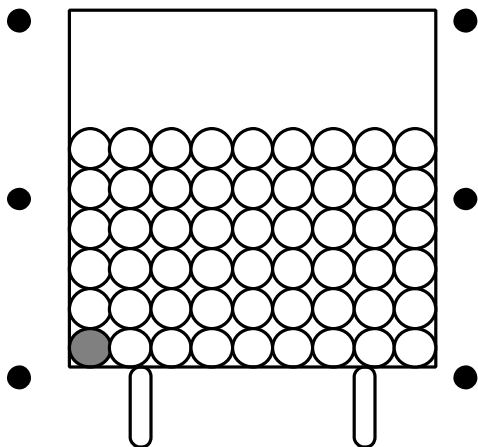
Do polohy na obrázku označené byl vložen etalón 3 o aktivitě 10,07 MBq. Dávkový příkon překročil významnou úroveň o 40 % a systém vydal alarm o maximální signalizační úrovni.



Dynamické pokusy

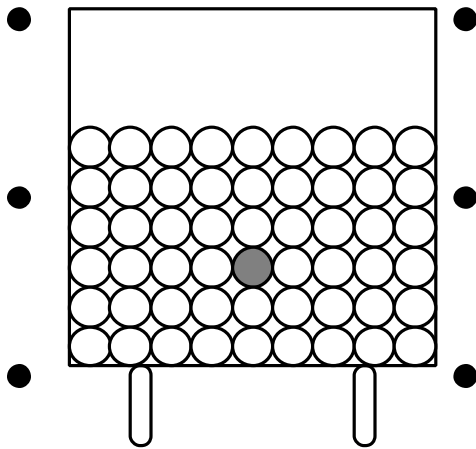
1. pokus, dynamická citlivosť.

Do polohy označenej na obrázku bol vložený žiaric vytvorený z etalónov 1, 2, 5, 6 a súprava sa pohybovala rýchlosťou 5 km/h. Dávkový príkon síce dosiahol signifikantnú úroveň, ale nedošlo k jej prekročeniu. Takže toto môžeme považovať za hranicnú citlivosť.



2. pokus, dynamická citlivosť.

Do polohy na obrázku označenej bol vložený žiaric vytvorený etalónom 4. Súprava sa pohybovala rýchlosťou 5 km/h, signalizácia bola jednoznačná, lebo došlo k 10 až 20 % prekročeniu signifikantnej úrovne dávkového príkonu. Systém vydal aj akustickú signalizáciu.



IV.6. Závěry z experimentu

- Merací systém na detektoroch RGM je vhodný na odhalenie rádioaktívnych izotopov v železnom šrote.
- V súlade s teoretickými výpočtami dynamická citlivosť je značne závislá od rýchlosti pohybu meranej súpravy. Z tohoto plynie dôležitý záver, že keď meracie miesto je tak pripravené, že meraný vagón stojí, alebo sa veľmi pomaly pohybuje postačuje aj menší počet detektorov napr. 4. Pri vyšších rýchlostiach naopak treba zvyšovať počet detektorov, aby sa dosiahla potrebná citlivosť.
- Vzhľadom na úroveň požadovanej citlivosti treba voliť počet použitých detektorov a príslušný softvér.
- Signalizačné úrovne treba voliť kompromisne s ohľadom na počet falošných alarmov o prekročení nastavenej signalizačnej úrovne.
- Výslednú statickú aj dynamickú citlivosť získame z predchádzajúcich pokusov pre najpriaznivejšie umiestnenie rádioaktívneho izotopu (v povrchovej časti vagóna) a pre najmenejpriaznivé umiestnenie rádioaktívneho izotopu (v strede vagóna).

V. NÁVRH URČENIA POLOHY RÁDIOAKTÍVNYCH ZDROJOV V 2D PRIESTORE

Úvod

V posledných rokoch bolo mnoho prípadov pri ktorých dochádzalo k závažnej kontaminácii železného šrotu rádioaktívnymi látkami. Keď sa rádioaktívnymi látkami kontaminovaný šrot dostane do tavby, vznikajú vážne problémy. Rádioaktívna kontaminácia môže mať rôzny pôvod, napríklad medicínska technika, skúšky materiálov, kontaminované náradie a prístroje pri ťažbe uránovej rudy, železný šrot z prevádzky jadrových elektrární a podobne. Mnohokrát sa stretáme s nedovoleným prevozom rádioaktívneho odpadu a štiepneho materiálu.

Na možnosti odhalenia rádioaktívnych látok pri akomkoľvek transporte, alebo aj v železnom šrote vplýva viacero rôznych faktorov, najmä :

- druh a veľkosť zdroja žiarenia (čo určuje energiu a pole žiarenia).
- poloha zdroja.
- priemerná hustota prevázaného materiálu na ložnej ploche dopravného prostriedku.
- spôsob rozloženia prevázaného materiálu na ložnej ploche dopravného prostriedku.
- rozmery ložnej plochy dopravného prostriedku a vzdialenosť zdroja žiarenia od detektorov meracieho systému.
- kolísanie úrovne žiarenia prirodzeného pozadia.
- druh a citlivosť použitých detektorov.

Vzhľadom na to, že transport železného šrotu sa najčastejšie vykonáva v železničnom vagóne alebo v nákladnom aute, v našej práci sa pri analýze možnosti detekcie rádioaktívneho zdroja sústreďujeme na tieto dopravné prostriedky. Získané výsledky práce je však možné aplikovať aj na iné prípady detekcie zdroja rádioaktivity napr. v životnom prostredí.

Je opísaný spôsob detekcie polohy zdroja žiarenia v stabilnom režime v 2D priestore použitím niekoľkých detektorov. Na základe výsledkov experimentu možno konštatovať, že aj v prípade keď hodnoty namerané detektormi sú zatažené chybami, vhodným usporiadaním polohy detektorov možno nami navrhnutými algoritmiami spoľahlivo určiť oblasť (priestor), v ktorom sa hľadaný zdroj nachádza. V závere sú uvedené možné aplikácie výsledkov tejto práce.

V.1. Základný model pre určenie dávky

Výpočet dávky D nameranej v bodovom detektore za čas T od bodového zdroja žiarenia, ktorý sa voči detektoru pohybuje vychádza zo všeobecne platného vzťahu uvádzaného v mnohých odkazoch [30] [31]

$$D = \int_0^T \frac{A\Gamma}{r^2} dt \quad (1)$$

kde A je aktivita zdroja žiarenia,

r je vzdialenosť zdroja žiarenia od detektora,

Γ je gama konštanta rádioaktívneho zdroja žiarenia.

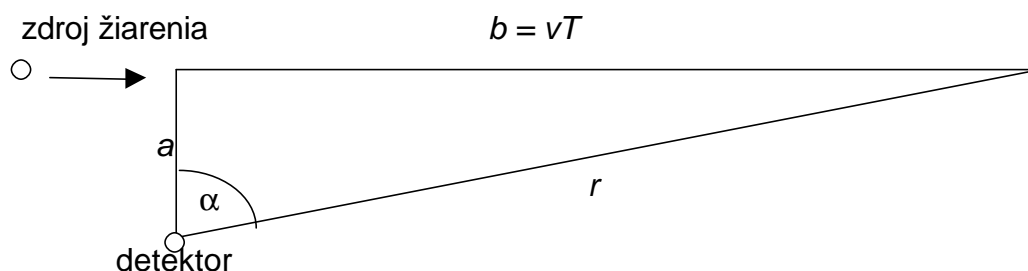
Je zrejmé, že ak máme k dispozícii „ n “ detektorov, ktorých vzdialenosť od bodového zdroja je r_i , $i = 1, 2, \dots, n$, potom hodnota tejto dávky v i -tom detektore je

$$D_i = \int_0^T \frac{A\Gamma}{r_i^2} dt. \quad (2)$$

Pre statický prípad, keď zdroj žiarenia ani detektory sa nepohybujú, teda r_i nie je funkciou času, možno písať

$$D_i = \frac{A\Gamma T}{r_i^2}. \quad (2a)$$

V prípade, že dávku D získame od pohybujúceho sa bodového zdroja žiarenia, tak ako je to znázornené na obr.19, pre zdroj žiarenia pohybujúceho sa rýchlosťou v platí



obr. 19.

$$D = \int_0^T \frac{A\Gamma dt}{a^2 + (v.t)^2} = A\Gamma \int_0^T \frac{\frac{1}{v^2}}{\frac{a^2}{v^2} + t^2} dt. \quad (3)$$

Použitím substitúcie $t = \frac{a}{v}x$, $dt = \frac{a}{v}dx$ dostávame pre dávku

$$D = \frac{A\Gamma}{av} [\arctg(x)]_0^{\frac{Tv}{a}} = \frac{A\Gamma}{av} \arctg\left(\frac{Tv}{a}\right), \quad (4)$$

$$\text{Ak } \operatorname{tg} a = \frac{Tv}{a}, \text{ potom } a = \arctg\left(\frac{Tv}{a}\right) \text{ a } D = \frac{A\Gamma}{av} a. \quad (5)$$

V praxi a reálnych podmienkach detektor je schopný zaregistrovať zdroj žiarenia len z určitej konečnej vzdialenosti. Pri matematických úvahách sa uvažovalo teoreticky s nekonečnou vzdialenosťou kvôli matematickému formalizmu. V kapitole III. sme videli, že úroveň signálu pozadia vykazuje určité kolísanie. Preto detektor registruje blížiaci sa zdroj žiarenia z určitej konečnej vzdialenosti b , keď signál od zdroja žiarenia prevyšuje kolísanie pozadia. Táto vzdialenosť je závislá od experimentálnych podmienok a od citlivosti detektora pre určitú definovanú úroveň prekročenia požadového signálu signálom od blížiaceho sa zdroja. Keď zadefinujeme, že koľko percent (napr. 10 %) nad úrovňou pozadia detektor jednoznačne registruje zdroj žiarenia, potom možno určiť $b = vT$. Má to určitý fyzikálny význam na začiatok citlivosti registrácie detektora.

Pre nevlastný integrál $D = A\Gamma \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2 + (vt)^2} dt$ platí

$$D = A\Gamma \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2 + (vt)^2} dt = A\Gamma \int_{-\infty}^0 \frac{1}{a^2 + (vt)^2} dt + A\Gamma \int_0^{\infty} \frac{1}{a^2 + (vt)^2} dt ,$$

pricom

$$D_- = A\Gamma \int_{-\infty}^0 \frac{1}{a^2 + (vt)^2} dt = \lim_{T \rightarrow -\infty} \int_T^0 \frac{A\Gamma}{a^2 + (vt)^2} dt = -\frac{A\Gamma}{av} \lim_{T \rightarrow -\infty} \operatorname{arctg}\left(\frac{Tv}{a}\right) = \frac{A\Gamma}{av} \cdot \frac{\mathbf{p}}{2} ,$$

$$D_+ = A\Gamma \int_0^{\infty} \frac{1}{a^2 + (vt)^2} dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T \frac{A\Gamma}{a^2 + (vt)^2} dt = \frac{A\Gamma}{av} \lim_{T \rightarrow \infty} \operatorname{arctg}\left(\frac{Tv}{a}\right) = \frac{A\Gamma}{av} \cdot \frac{\mathbf{p}}{2} ,$$

takže $D = D_- + D_+$ a $D = D_+$. Preto

$$D = A\Gamma \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2 + (vt)^2} dt = \frac{A\Gamma}{av} \mathbf{p} . \quad (6)$$

Označme počet detektorov okolo meraného pohybujúceho sa zdroja n . Dávka pre i -ty detektor je

$$D_i = \frac{\rho A \Gamma}{a_i v}, \quad i=1,2,\dots,n, \quad (7)$$

kde A je neznáma konštanta závislá od veľkosti rádioaktívneho zdroja,
 Γ je neznáma konštanta závislá od energie žiarenia,
 v je okamžitá rýchlosť,
 a_i je kolmá vzdialenosť i – teho detektora od rádioaktívneho zdroja
 (obr.19)

Ked oznacíme

$$g = \frac{\rho A \Gamma}{v}, \quad (8)$$

potom

$$D_i = \frac{g}{a_i}, \quad \text{pre } i=1,2,\dots,n. \quad (9)$$

Je zrejmé, že ako γ tak aj a_i , $i=1,2,\dots,n$, sú pre nás neznáme. Naším cieľom však je, určiť polohu (súradnice) rádioaktívneho zdroja tak, aby platilo (7).

Z (9) vyplýva, že

$$a_i = \frac{g}{D_i} \quad \text{pre } i=1,2,\dots,n \quad (10)$$

Vztah (10) má zmysel pre ľubovoľné kladné hodnoty γ a D_i , $i=1,2,\dots,n$. My však hľadáme také γ , aby po dosadení do (10) malo a_i fyzikálny (geometrický) zmysel.

Vztah (10) určuje kružnicu k_i so stredom v i -tom detektore s polomerom a_i . Rádioaktívny zdroj bude ležať na priesečnici kružníc k_i .

Je zrejmé, že presné určenie súradníc polohy rádioaktívneho žiarica závisí hlavne od citlivosti a stability použitých detektorov, rýchlosti pohybujúceho sa dopravného prostriedku, ako aj ďalších faktorov uvedených v úvode.

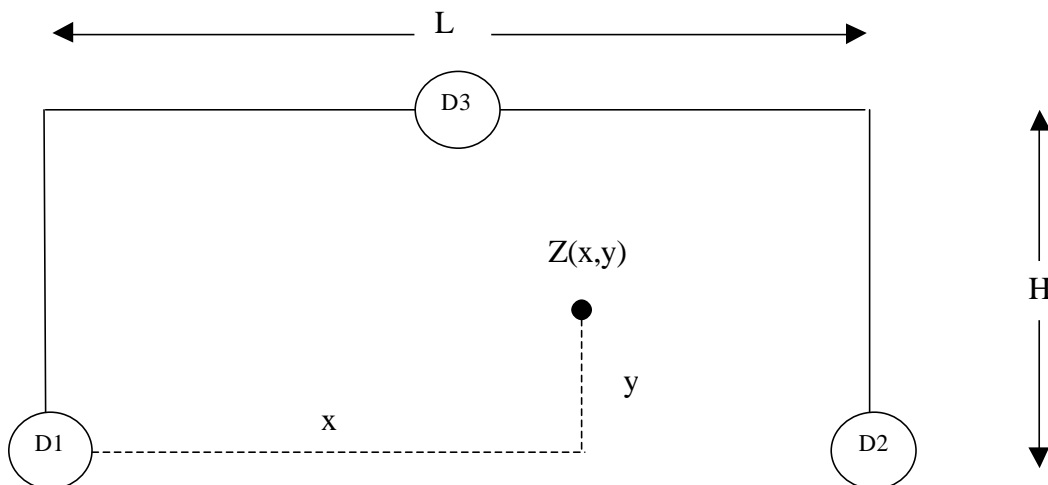
V.2. Lokalizácia zdroja v statickom režime v rovine (2D)

Predpokladajme, že v rovine XY (obr. 20) je umiestnený zdroj rádioaktívneho žiarenia a my máme za úlohu určiť jeho presnú polohu. Za tým účelom rozmiestnime v rovine 3 detektory. Nech súradnice ich polôh sú nasledujúce $D_1=(0,0)$, $D_2=(L,0)$, $D_3=(S,H)$. Predpokladajme, že súradnice polohy zdroja žiarenia sú (x,y) a vzdialenosti tohto zdroja od jednotlivých detektorov sú $a_i, i = 1,2,3$. Ak zvolíme $S=L/2$, potom rozmiestnenie detektorov bude také ako je na obrázku 20. Na základe (2a) pre nameranú hodnotu D_i v jednotlivých detektoroch platí

$$D_i = \frac{A\Gamma T}{a_i^2} = \frac{G}{a_i^2}, \quad i=1,2,3, \quad (11)$$

odkiaľ vyplýva, že

$$a_i^2 = \frac{G}{D_i}, \quad i=1,2,3. \quad (12)$$



Obr. 20.

Ak teraz a_i^2 vyjadríme v danej súradnej sústave, dostaneme

$$\begin{aligned}x^2 + y^2 &= \frac{G}{D_1}, \\(x-L)^2 + y^2 &= \frac{G}{D_2}, \\(x-S)^2 + (y-H)^2 &= \frac{G}{D_3}.\end{aligned}\tag{13}$$

Riešením tohto systému nelineárnych rovníc získame nasledujúce vzťahy

$$\begin{aligned}y &= \pm \sqrt{\frac{G}{D_1} - x^2}, \\x &= \frac{1}{2} \left[L + \frac{G}{L} \left(\frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right) \right],\end{aligned}\tag{14}$$

pricom hodnotu G získame riešením rovnice

$$aG^2 + bG + c = 0,\tag{15}$$

kde

$$a = \frac{1}{H^2} \left[\left(\frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_3} \right) - \frac{S}{L} \left(\frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right) \right]^2 + \frac{1}{L^2} \left(\frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right)^2,\tag{16}$$

$$b = \frac{2}{H^2} [(S-L)S + H^2] \left[\left(\frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_3} \right) - \frac{S}{L} \left(\frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right) \right] + 2 \left(\frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right) - \frac{4}{D_1},\tag{17}$$

$$c = \left(\frac{1}{H} \right)^2 (S(S-L) + H^2)^2 + L^2.\tag{18}$$

Je zrejmé, že takýmto spôsobom získame vo všeobecnosti 4 možné riešenia, a to

$$(G_1, x_1, \pm y_1,) \text{ a } (G_2, x_2, \pm y_2,),$$

z ktorých iba jedno bude mať súradnice z vymezenej oblasti $\langle 0, L \rangle \times \langle 0, H \rangle$ a súčasne kladnú hodnotu G . Práve toto riešenie predstavuje hľadanú pozíciu zdroja a jeho skutočnú hodnotu G .

Zo vzťahu (14) ľahko vidno, že v prípade ak $D_1 = D_2$, t.j. ak zdroj žiarenia je rovnako vzdialený od detektorov D_1, D_2 potom x -ová súradnica zdroja sa rovná $L/2$, čo je správna hodnota.

Takto, algoritmus na výpočet polohy zdroja v rovine v statickom režime je nasledujúci :

Algoritmus 2Dstatic :

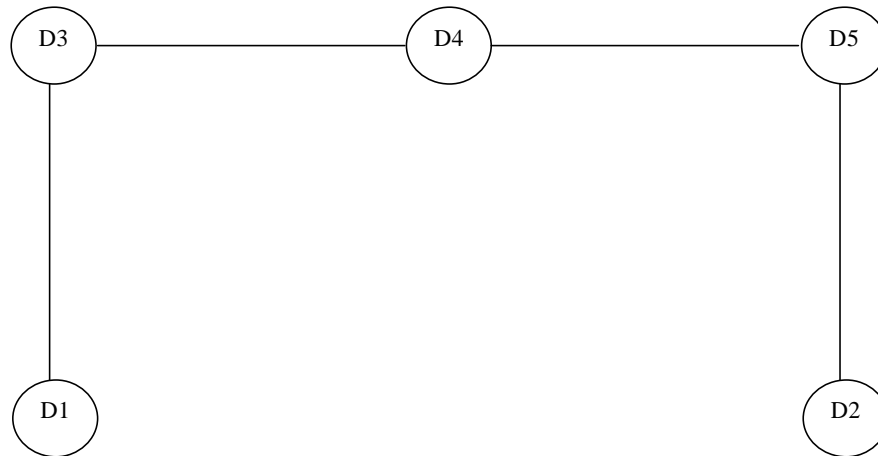
1. Zadáť hodnoty L, S, H .
2. Zadáť hodnoty D_1, D_2, D_3 .
3. Vypočítaj hodnoty a, b, c podľa vzťahov (16) až (18).
4. Vypočítaj korene $G_i, i = 1, 2$ rovnice (15).
5. Vypočítaj x, y , pre každé $G_i, i = 1, 2$.
6. Vyber z vypočítaných hodnôt také (G, x, y) pre ktoré platí :
 $G > 0$ a súčasne odpovedajúce $(x, y) \in \langle 0, L \rangle \times \langle 0, H \rangle$.

Pripomíname, že uvedený algoritmus ako aj vzťahy (13) - (18) zostanú v platnosti aj v prípade, ak by sme za S dosadili hodnotu 0 resp. L , t.j. ak by sme detektor D_3 umiestnili do pozície $(0, H)$ resp. (L, H) .

Z praktického hľadiska dokonca odporúčame taký postup, ktorý umožní získanie väčšieho počtu meraní, z ktorých potom možno vypočítať aspoň čiastočne od seba nezávislé riešenia.

Ak by sme mali k dispozícii napríklad 5 detektorov a rozmiesnili by sme ich tak ako je znázornené na nasledujúcom obrázku (obr.21), výpočet môžeme vykonať pre 5 rôznych trojíc detektorov, čím získame 5 výsledkov pre detekciu

polohy zdroja. V ideálnom prípade, ak by namerané hodnoty v detektoroch boli absolútne presné, potom vypočítané polohy zdroja budú identické. V opaknom prípade nám výsledné hodnoty vymedzia vo všeobecnosti päťuholník, v ktorom sa zdroj nachádza.



Obr. 21.

Podobne možno výpočet vykonať aj pre iné pozície polohy detektorov, alebo pre iné než tu uvedené počty detektorov. V časti V.3. uvidíme experimentálne overenie výpočtu polohy zdroja pri použití piatich detektorov a pre päť rôznych pozícií polohy zdroja žiarenia v 2D priestore.

V.3. Experimentálne overenie výpoctu polohy zdroja v priestore 2D

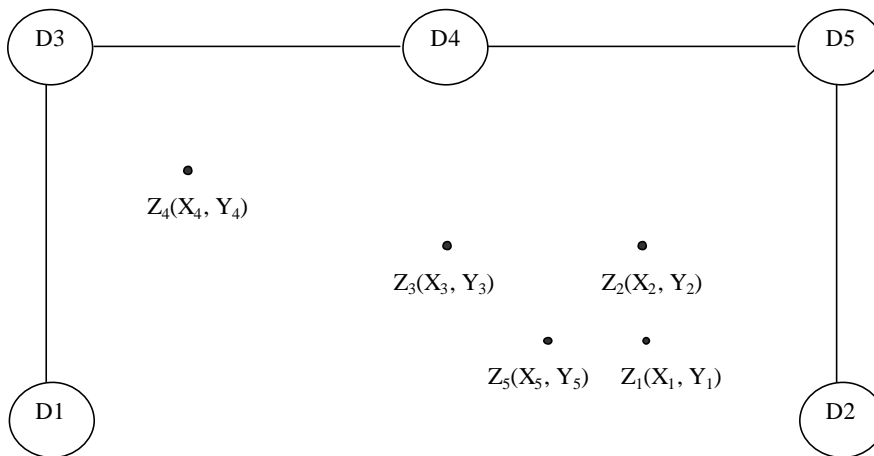
Na experimentálne overenie výpoctu polohy zdroja bolo navrhnuté usporiadanie detektorov podľa obr. 22. D1 až D5 je poloha jednotlivých detektorov, z ktorých bol zaznamenávaný signál príkonu dávkového ekvivalentu. Z_1 až Z_5 je príslušná zvolená poloha rádioaktívneho zdroja. Ak umiestnime zaciatok súradnicovej sústavy v mieste detektora D1, potom môžeme nasledovne zadať súradnicami polohu jednotlivých detektorov v metroch a tým získame presnú predstavu o experimentálnom rozložení detektorov.

Súradnice detektorov v metroch sú: D1= (0 ; 0) , D2= (3,5 ; 0), D3= (0 ; 3), D4= (1,75 ; 3), D5= (3,5 ; 3).

Zvolili sme päť rôznych polôh pre zdroj žiarenia, takých aby sa dost dobre mohol overiť výpočtový model na určenie polohy rádioaktívneho zdroja.

Súradnice zdroja v metroch sú: Z_1 (2,8 ; 0,7), Z_2 (2,8 ; 1,5), Z_3 (1,75 ; 1,5), Z_4 (0,7 ; 2,5), Z_5 (2,3 ; 0,7).

Ako zdroj žiarenia bol použitý etalón ^{137}Cs o aktivite 17,01 MBq.



Obr.22.

Namerané hodnoty príkonu dávkového ekvivalentu sú uvedené v Tabulke 7 aj s vypočítanými a skutočnými polohami hľadaného rádioaktívneho zdroja. Vypočítané hodnoty polohy zdroja sme získali pomocou Algoritmu 2Dstatic. Výpočet sme aplikovali postupne na päť trojíc detektorov, a to (D1,D2,D3), (D1,D2,D4), (D1,D2,D5), (D1,D3,D5), (D3,D2,D5), čím sme získali 5 výsledkov (G_i, x_i, y_i) , $i = 1,2,3,4,5$. V oblasti, ktorú vymedzuje päťuholník daný vrcholmi (x_i, y_i) , $i = 1,2,3,4,5$ leží zdroj žiarenia. Jeho parametre môžeme získať z veľkosti hodnôt G_i , $i = 1,2,3,4,5$.

Tabulka 7.

Zdroj v polohe Z₁:						
	Vypočítaná poloha zdroja [m]			Signál [nSv/h]	Trojholníky	Skutočná poloha zdroja [m]
Trojholník	G	x	y			x ; y
1	1862	2.780	0.738	225	D1, D2, D3	
2	1828	2.761	0.706	1750	D1, D2, D4	
3	1841	2.768	0.719	145	D1, D2, D5	2,80 ; 0,70
4	1797	2.721	0.765	291	D1, D3, D5	
5	1859	2.754	0.711	321	D2, D3, D5	
Zdroj v polohe Z₂:						
	G	x	y			
Trojholník	G	x	y			
1	1813	2.738	1.482	187	D1, D2, D3	
2	1783	2.722	1.458	653	D1, D2, D4	
3	1833	2.749	1.498	185	D1, D2, D5	2,80 ; 1,50
4	1846	2.770	1.482	537	D1, D3, D5	
5	1825	2.758	1.498	651	D2, D3, D5	

Zdroj v polohe Z₃:						
Trojuholník						
	G	x	y			
1	1830	1.752	1.494	345	D1, D2, D3	
2	1815	1.752	1.480	346	D1, D2, D4	
3	1840	1,752	1,505	343	D1, D2, D5	1,75 ; 1,5
4	1840	1.761	1.494	786	D1, D3, D5	
5	1830	1.760	1.505	348	D2, D3, D5	
Zdroj v polohe Z₄:						
Trojuholník						
	G	x	y			
1	1898	0.767	2.508	276	D1, D2, D3	
2	1626	0.908	2.251	138	D1, D2, D4	
3	1727	0.856	2.350	2287	D1, D2, D5	0,70 ; 2,50
4	1846	0.733	2.480	1281	D1, D3, D5	
5	1890	0.709	2.430	233	D2, D3, D5	
Zdroj v polohe Z₅:						
Trojuholník						
	G	x	y			
1	1840	2.288	0.741	318	D1, D2, D3	
2	1814	2.280	0.708	912	D1, D2, D4	
3	1832	2.286	0.732	178	D1, D2, D5	2,30 ; 0,70
4	1820	2.272	0.749	328	D1, D3, D5	
5	1843	2.278	0.727	277	D2, D3, D5	

V.4. Záver

Z riešenia rovnice (15) pre 2D priestor jednoznačne vyplýva (uvedená rovnica má analyticky presné riešenie), že by pri použití „absolútne presných detektorov“ nám absolútne presne by bola určená poloha rádioaktívneho zdroja. Samozrejme toto je možné len teoreticky, lebo nikdy nemáme absolútne presný a stabilný detektor. Na presnosť merania má veľký vplyv najmä štatistika merania, teda početnosť nameraných impulzov od jednotlivých detektorov, čo je funkciou aktivity zdroja žiarenia. Z tabulky 7 vidieť, keď porovnáme vypočítané a skutočné súradnice polohy rádioaktívneho zdroja, že odchýlky sú veľmi malé, rádovo len niekoľko centimetrov. Prehľadný súhrn týchto výsledkov je v tabulke 7. Svedčí to o dobrej stabilite použitých detektorov a vhodne navrhnutom experimentálnom overení. Vhodné rozmiestnenie detektorov a najrôznejšie volené polohy zdroja umožňujú dostatočné overenie matematického modelu.

Parameter G je funkciou aktivity, gama konštanty a času merania ako to vyplýva aj zo vzťahu (2a). Z tabulky 7 vidieť, že parameter G je naozaj konštantou súvisiacou s presnosťou merania. Keď G sa značne líši od hodnoty G vypočítanej z iných trojuholníkov, potom väčšiu chybu pozorujeme aj pre vypočítané súradnice. Preto nie je vhodné urobiť aritmetický priemer pre súradnice zo všetkých meraní, ale len z tých ktoré majú málo odlišné G . Pre vyhodnotenie a nájdenie súradníc zdroja žiarenia je vhodné použiť údaje z tých trojíc detektorov, pre ktoré sa líši hodnota parametra G o menej ako 20 %. Výrazne to vidieť pre zdroj v polohe Z_4 a príslušné trojice detektorov (trojuholníky) $D1, D2, D4$, kde chyba vo vypočítanej súradnici polohy zdroja je v rozsahu 20 až 25 cm. Podobné je to pre polohu zdroja Z_1 a príslušné detektory $D1, D3, D5$, kde chyba v súradniciach polohy je do veľkosti 10 cm. Keď sa podrobnejšie pozrieme na výsledky v tabulke 7 vidíme, že najväčšia chyba vzniká, keď počítame súradnice zdroja mimo trojuholníka vymedzeného trojicou detektorov. Najlepšie výsledky získame ak hľadaný zdroj sa nachádza čo najbližšie k ťažisku trojuholníka vytvoreného trojicou detektorov. Dokazuje to

výsledok pre Z_4 pre trojicu detektorov D1, D3, D5, alebo pre Z_1 , Z_5 pre trojicu detektorov D1, D2, D5, kde je odchýlka v súradniciach len 2 až 3 cm v porovnaní s experimentálne presne zvolenou hodnotou.

V prípade, že vieme o aký druh žiarica ide, potom samozrejme poznáme Γ konštantu tohto zdroja a z hodnoty parametra G je možné určiť aktivitu hľadaného zdroja.

VI. ZHRNUTIE VÝSLEDKOV A DISKUSIA

Na základe výsledkov kapitol II, III, IV môžeme urobiť konkrétny projekt meracej brány s meracím systémom na detekciu a lokalizáciu zdrojov žiarenia. Náčrt takej meracej brány je na obr 23. Pri návrhu brány sa vychádzalo hlavne z matematického modelu a riešenia súradníc polohy hľadaného zdroja. Pri riešení detekcie a hlavne lokalizácie rádioaktívneho zdroja bola riešená voľba typu detektorov a ich počet. V ďalšej časti bol riešený rozmer kontrolnej meracej brány s rozmiestnením detektorov a nastavením meracieho systému. Boli pritom využité skúsenosti z dlhodobých meraní rádioaktivity v životnom prostredí a výsledky experimentov v Železiarnach Podbrezová.

VI.1. Výber detektora

Pri výbere detektora sa vychádzalo z doterajších skúseností merania s proporcionálnymi detektormi. Proporcionálny detektor vzhľadom na jeho citlivosť, mrtvu dobu, životnosť, spoľahlivosť, cenu, vyplňa medzeru medzi Geiger-Müllerovými detektormi a ionizačnými komorami. Vyžaduje zložitejšiu a náročnejšiu elektroniku, ale to vzhľadom na dnešnú úroveň elektrotechniky nerobí žiadne technické problémy. Podrobnejšie je toto porovnanie vykonané v [32]. Proporcionálne detektory sú porovnateľné aj so scintilacnými detektormi, síce majú nižšiu citlivosť, ale na druhej strane sú teplotne menej závislé. Nižšia citlivosť sa dá vylepšiť použitím väčšieho počtu proporcionálnych detektorov. Dalším dôležitým parametrom pri výbere detektora je nízky prah detekcie vzhľadom na merací rozsah. Nami použité detektory boli kalibrované a merali príkon dávkového ekvivalentu s prahom $10 \text{ nSv}\cdot\text{h}^{-1}$. Na to aby sme mohli vykonávať merania na úrovni pozadia v životnom prostredí, čo v bežných podmienkach býva v rozsahu 80 až $120 \text{ nSv}\cdot\text{h}^{-1}$, treba použiť detektory s prahom detekcie aspoň o rád nižším. Túto podmienku splňajú nami použité proporcionálne detektory.

VI.2. Dlhodobé merania

Pocas vlastných dlhodobých kontinuálnych meraní bola overená stabilita, kvalita, spoľahlivosť použitých proporcionálnych detektorov. Súčasne bol overený príspevok jednotlivých zložiek prírodného pozadia na výsledný signál nameraný detektorom. Bola vykonaná kvalitatívna aj kvantitatívna analýza príspevku jednotlivých zložiek pozadia [33].

VI.3. Experimenty v Železiarnach Podbrezová

Merací systém na proporcionálnych detektoroch RGM je vhodný na odhalenie rádioaktívnej kontaminácie železného šrotu [34]. Pre statickú citlivosť meracieho systému (keď kontrolovaný vagón stojí pod meracou bránou) z experimentálnych údajov vychádza hodnota ~ 1 MBq. Dynamická citlivosť pre pohybujúci sa vagón rýchlosťou $10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ z experimentálne získaných údajov je ~ 3 MBq. Pre zvýšenie citlivosti, či už statickej, alebo dynamickej hlavne pre vyššie rýchlosti treba zvýšiť počet detektorov zo 6 na 10 až 15 kusov podľa požadovanej citlivosti pre užívateľa. Takisto podľa požiadaviek užívateľa treba realizovať prístrojové aj softverové vybavenie meracieho systému na kontrolu kontaminácie železného šrotu rádioaktívnymi látkami.

VI.4. Volba počtu detektorov

Možnosť zvyšovania počtu proporcionálnych detektorov umožní zvýšenie citlivosti merania (meracieho systému), čím je možné priblížiť sa k vyššej citlivosti, na úroveň citlivosti scintilacných detektorov. Máme výhodu lepšej teplotnej závislosti a stability proporcionálnych detektorov. Proporcionálne detektory sú vhodnejšie na merania v životnom prostredí a v laboratórnych podmienkach, lebo neobsahujú fotonásobic, ktorý je značne citlivý na otrasy a teplotné zmeny. Za ideálnych laboratórnych podmienok majú svoje opodstatnenie a výhodu scintilacné detektory. Vyšší počet detektorov znamená, väčšia početnosť zaregistrovaných impulzov, lepšia štatistika merania.

Súčasne väčší počet detektorov je možné využiť nie len na detekciu, ale aj na lokalizáciu zdroja žiarenia, čo vyplýva zo záverov a výsledkov kapitoly V. V nasledujúcom porovnajme početnosť impulzov od nami použitých proporcionálnych detektorov s početnosťou impulzov od plastových scintilátorov a anorganických scintilátorov NaI(Tl) a CsI(Tl).

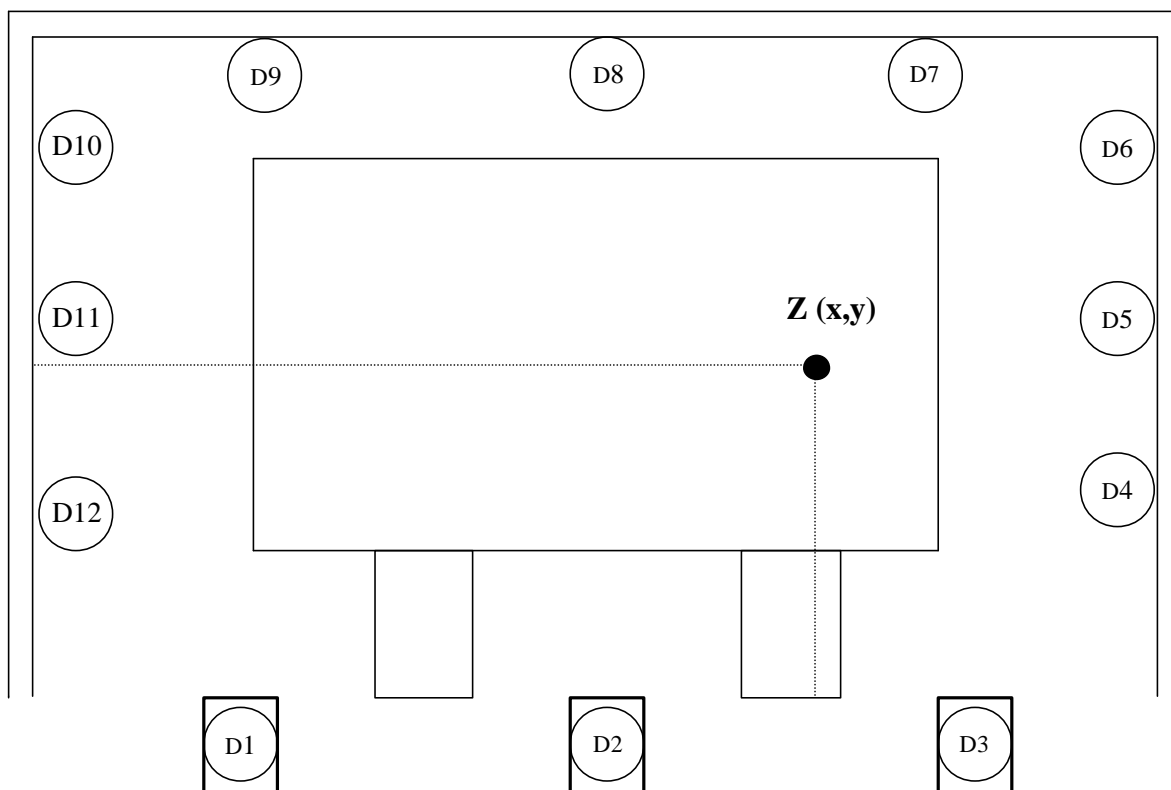
Plastové scintilátory dodávané rôznymi výrobcami majú objem v rozsahu 20 až 40 litrov. Úmerne s objemom samozrejme rastie aj početnosť impulzov od detektora. Pri úrovni prírodného pozadia (cca 80 až 100 nSv.h⁻¹) početnosť impulzov v závislosti od objemu scintilátora je v rozsahu 2 000 až 3 000 imp.s⁻¹.

Anorganický scintilátor s väčším objemom NaI(Tl), alebo Cs(Tl) pri žiarení na úrovni prírodného pozadia dáva početnosť ~ 1000 imp.s⁻¹.

Proporcionálny detektor (1 kus) o objeme 5,65 litra od výrobcu [35] pri úrovni prírodného pozadia dáva ~ 60 imp.s⁻¹. Použitím 12 ks takýchto detektorov dostaneme početnosť impulzov 720, čo už je porovnateľné s plastovými a anorganickými scintilátormi. Takto sme dosiahli podobnú početnosť impulzov a navyše máme možnosť vykonať aj lokalizáciu na základe výsledkov kapitoly V.

VI.5. Návrh meracej brány

V našom prípade sme sa sústredili na meraciu bránu pre kontrolu železnícnych vagónov a kamiónov. Rozmery brány musia vychádzať z veľkosti monitorovaného predmetu a z dosahu citlivosti použitých detektorov, teda z akej vzdialenosti je schopný detektor rozlíšiť signál od hľadaného zdroja rádioaktivity v porovnaní so signálom od prírodného pozadia. Ináč je možné v prírode vytvoriť aj inú konfiguráciu rozloženia detektorov pre úplne iné účely a realizovať meranie na lokalizáciu polohy zdroja žiarenia. Z experimentálnych údajov a zo skúseností z doterajších meraní vychádza šírka brány pre kontrolu železného šrotu v rozsahu 3 až 4 metre a výška 3 až 3,5 metra. Tieto rozmery sa môžu prispôbiť konkrétnym požiadavkám na mieste merania. Náčrt takejto meracej brány je na obr.23 s počtom dvanástich detektorov.



Obr.23. Projekt meracej brány na detekciu a lokalizáciu rádioaktívneho zdroja žiarenia.

Príprava merania a nastavenie meracieho systému. Pri realizácii meracej brány podľa projektu treba vykonať dlhodobé merania pozadia, lebo signál od jednotlivých detektorov značne závisí aj od polohy detektora, najmä výšky, čo je spôsobené terestriálnou zložkou prírodného pozadia. Príspevok zložky zo vzduchu a od kozmického žiarenia na danom mieste merania má zanedbateľné zmeny počas kontroly dopravného prostriedku.

Vplyv vlastného tienenia meraného vozidla na pozadie treba ošetriť vhodným softverom, lebo pokles pozadia vlastným tinením môže spôsobiť možnosť nezaregistrovania zdroja, ktorý má príspevok k zvýšeniu pozadia na úrovni tieniaceho efektu.

VI.6. Lokalizácia zdroja žiarenia

Zo základného matematického modelu bola vypočítaná dávka v detektore od pohybujúceho sa zdroja a bola vykonaná analýza možností riešení v závislosti od počtu detektorov. Použitím reálneho rádioaktívneho zdroja bol vykonaný experiment na overenie matematického modelu. V laboratórnych podmienkach bola vytvorená meracia brána a z nameraných signálov v jednotlivých detektoroch bola vypočítaná poloha rádioaktívneho zdroja v piatich rôznych polohách. Vypočítaná a experimentálne zvolená poloha zdroja boli vo veľmi dobrom súlade.

ZÁVER

Hlavnou úlohou tejto práce bolo využitie experimentálnych metód merania rádioaktivity v životnom prostredí s aplikáciou na kontrolu, bezpečnosť a spoľahlivosť. Dôležitou úlohou bola nie len detekcia, ale aj lokalizácia rádioaktívnych žiaricov v životnom prostredí. V súlade s predstavanými cieľmi tejto práce boli tieto úlohy riešené v nasledujúcich ucelených celkoch.

- 1) Vychádzajúc z doterajšieho stavu výberom detektorov s vhodnými detekčnými blokmi a vyhodnocovacími prístrojmi bola zdokonalená metóda na dozor nad radiacnou situáciou v životnom prostredí.
- 2) Výsledok analýzy dlhodobého merania rádioaktivity v životnom prostredí umožnil dôkladnú prípravu a presné nastavenie kontrolnej meracej brány na detekciu a lokalizáciu zdrojov žiarenia v úložnom priestore dopravných prostriedkov. Takto bolo možné analyzovať príspevok rôznych efektov na meranie.
- 3) Použitím vhodného matematického aparátu bola vypočítaná dávka a dávková rýchlosť od pohybujúceho sa zdroja v meranom detektore. Na základe týchto nameraných údajov bola potom vypočítaná poloha hľadaného rádioaktívneho zdroja. Tieto veličiny boli použité pri návrhu optimálnej geometrie zdroj žiarenia detektor a z týchto veličín vhodnou voľbou určitého počtu detektorov bola vypočítaná a experimentálne overená poloha hľadaného zdroja žiarenia.
- 4) Úplným záverom práce je projekt meracej brány, ktorou je možné nie len detekovať, ale aj lokalizovať zdroj žiarenia. Tento matematický model je možné využiť na detekciu a lokalizáciu zdrojov žiarenia nie len v dopravných prostriedkoch, ale aj vo voľnej prírode pri splnení určitých podmienok merania.

Vzhľadom na väčšie objemy ako je napr. veľkosť železného vagónu mliečny sme predpokladali dostatočne homogénne rozloženie železného šrotu čo

sa týka špecifickej hmotnosti. Nehomogenita skúmaného objemu (napr. železný vagón) skresluje vypočítanú polohu žiarica. Ak na spojnici medzi detektorom a zdrojom žiarenia vyskytne sa nehomogenita s väčšou špecifickou hmotnosťou ako je priemerná, vypočítaná súradnica (vzdialenosť) bude v skutočnosti menšia. Pri nehomogenite menšej ako je priemerná špecifická hmotnosť budeme pozorovať práve opačný jav.

Dalej môže vzniknúť problém v prípade výskytu dvoch, alebo viacej zdrojov (v praxi to môže nastať vo výnimočných prípadoch), potom predpokladáme, že poloha bude nájdená na analógiu ťažiskového princípu ako jeden zdroj žiarenia. Tento problém môže byť jedným z ďalších cieľov riešenia tejto problematiky.

Matematický aparát a model by sme chceli rozšíriť aj na nájdenie súradníc zdroja v trojrozmernom priestore. Bude to vyžadovať viacej detektorov a riešenie väčšieho počtu nelineárnych algebraických rovníc pre súradnice hľadaného zdroja.

Dalším problémom môže byť aj nebodovosť rádioaktívneho zdroja, hlavne pri kontrole železného šrotu obsahujúceho väčšie kusy železa s homogénne rozptýlenou kontamináciou v nejakej vyradenej súčiastke.

Pri kontrole viacerých železných vozňov idúcich za sebou cez meraciu bránu budeme hľadať možnosti rozlíšenia aj dvoch, alebo viacerých vozňov so zdrojmi žiarenia. Existujú nato určité matematické modely na základe veľkosti a nábehu nameraného signálu v detektoroch.

V posledných rokoch výrobcovia sa zameriavali len na detekciu a na vybudovanie čo najcitlivejšej meracej brány z dvoch plastových scintilátorov po oboch stranách kontrolovaného vagóna, alebo nákladného vozidla. Stretol som sa zatiaľ v literatúre len s jedným výrobcom, ktorý použil tri veľkoobjemové plastové scintilátory (dva po stranách a tretí zvrchu). Ani tento výrobca sa nepokúšal o lokalizáciu, ale zameriaval sa len na detekciu. Vzhľadom na rozmery kontrolovaného vozňa, tu už nie je zarúčená „kvázi bodovosť“ veľkoobjemových plastových scintilátorov. Takže, lokalizáciu zdroja žiarenia s veľkoobjemovými plastovými scintilátormi nie je možné realizovať.

ZOZNAM LITERATÚRY

- [1] Malátová I., Foltánová S., Rulík P.: Contamination of Steel Produced in the CR by ^{60}Co Workshop on Radioactive Contaminated Metallurgical Scrap, Czech republic, Prague 1999.
- [2] Dollani K.: Some Results from Radioactive Control of Trucks Workshop on Radioactive Contaminated Metallurgical Scrap, Czech republic, Prague 1999 .
- [3] Duftschmid K. E.: Detection of Contaminated Metallurgical Scrap at Borders, Workshop on Radioactive Contaminated Metallurgical Scrap, Czech republic, Prague 1999 .
- [4] G. Baillet: Detecting the Presence of abnormal Radioactivity in Scrap Using the Statical Method, Workshop on Radioactive Contaminated Metallurgical Scrap, Czech republic, Prague 1999 .
- [5] Wachtendonk H. J., Luengen S., Wilke N.: Measurement of Radioactivity in SteelG. Workshop on Radioactive Contaminated Metallurgical Scrap, Czech republic, Prague 1999 .
- [6] T. Ortiz: Melting of Metallic Scraps Contaminated with Natural Radionuclides Seventh International Symposium NATURAL RADIATION ENVIRONMENT, (NRE – VII) Rhodes, Greece, 2002
- [7] Entdeckung Radioaktiver Verunreinigungen in Stahlschrott, Untersuchungsbericht, Symposium in Ratingen, BRD Ratingen 1994.
- [8] Protokol o technické zkoušce meridla – Y 911, Český metrologický institut, Praha 1997
- [9] Protokol o technické zkoušce meridla – RTM 910, Český metrologický institut, Praha 1997
- [10] Protokol o technické zkoušce meridla – FHT 1388, Český metrologický institut, Praha 1997

- [11] Protokol o technické zkoušce meridla – GR 526, Český metrologický institut, Praha 1997
- [12] Protokol o technické zkoušce meridla – FZM 0700.003, Český metrologický institut, Praha 1997
- [13] Protokol o technické zkoušce meridla – NE ASM , Český metrologický institut, Praha 1997
- [14] Protokol o technické zkoušce meridla – CTM 304, Český metrologický institut, Praha 1997
- [15] Protokol o technické zkoušce meridla – GR 520/400, Český metrologický institut, Praha 1997
- [16] Protokol o technické zkoušce meridla – SRDS M2, Český metrologický institut, Praha 1997
- [17] Annual Report on Radioactive Discharges and Monitoring of the Environment, BNFL Safety, Health and Environment Directorate Risley, U.K. 1997
- [18] C. W. Nakhleh, W. D. Stanbro, B. L. Fearey: Science and Global security 6 (3), 357-379, 1997
- [19] CH. Kunze: Nuclear Engineering International 42, 26-28 , 1997
- [20] A. Bayer: Strahlenschutzpraxis 2 (4), 3-8 , 1996
- [21] Zagyvai P, Fehér Á, Nemes L, Bitt H, Kautny K, Vinkovits S.: Applicability of Early Warning systems for Detecting Airborne Environmental Radiocontamination, Third International Meeting on Low-level Air Activity Monitoring, September 25-29, 2000, Dabrownó, Poland
- [22] M. H. Momeni: Trans. American Nuclear Society 74, 39-40, 1996
- [23] T. Bünger, D. Obrikat, H. Rühle, H. Viertel: Jahresbericht – Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, BMU, Berlin 1995
- [24] D. M. Whelpdale, P. W. Summers, E. Sanhuzea: Environmental Monitoring and Assessment 48 (3), 217-247, 1997
- [25] Bitt Technology Data, Wienerstrasse 70, A-2104 Austria 1999

- [26] P. Zagvai, Á. Fehér, L. Nemes Proc. IRPA Regional Symp. „Radiation Protection in Neighbouring Countries of Central Europe“ Prague, Czech Republik, 1997
- [27] R. E. Dunker, B. W. Graham: Health Physics 70 (suppl. 6.), 67B, 1996
- [28] Radioaktivitäts – Messungen in Österreich 1992 und 1993, Daten und Bewertung, Bundesministerium für Gesundheit und Konsumentenschutz, Radetzkystraße 2, Wien, 1995
- [29] Paatero J., Kyro E., Hatakka J., Aaltonen V., Viisanen Y.: Measurement of Snow Seventh International Symposium NATURAL RADIATION ENVIRONMENT (NRE – VII) Rhodes, Greece, 2002
- [30] J. Šeda a kol.: Dozimetrie ionizujícího záření, SNTL Praha 1983
- [31] Glenn F. Knoll: Radiation Detection and Measurement, John Wiley and Sons, New York 1989
- [32] Š. Húštava: Monitorovanie rádioaktivity v životnom prostredí, Projekt dizertacnej práce MFF – UK Katedra jadrovej fyziky, Bratislava , 1998
- [33] Š. Húštava: Analýza a meranie jednotlivých zložiek pozadia prírodného žiarenia gama, ACTA Facultatis Paedagogicae Universitatis Tyrnaviensis, Séria C, Trnava 2001
- [34] Protokol o experimentálnej kontrole rádioaktívnej kontaminácie železného šrotu v Železiarnach Podbrezová 1995
- [35] Bitt Technology – A, Wienerstrasse 70, A – 2104 Austria

PRÍLOHA – Referát na konferencii NATURAL RADIATION ENVIRONMENT

(NRE-VII), 20.-24.5.2002, Rhodes, Grécko

DETECTION AND LOCALISATION OF RADIOACTIVE SOURCES IN ENVIRONMENT AND FOR INDUSTRIAL PURPOSES.

Štefan Húštava
Trnava University, Department of Physics, Priemysel'ná 4,
918 43 Trnava, Slovakia

Introduction

In the recent years there have been a lot of cases of contamination of scrap-iron with radioactive materials. When with radioactive materials contaminated scrap get to melt it brings serious problems. Radioactive contamination has various origin e.g.: medical techniques, testing materials, contaminated tools and apparatus used in the mining of the ore, scrap-iron used in the nuclear power stations, etc. Many times we are facing the problem of the illegal transport of radioactive waste and nuclear fuel material transportation.

On possibilities for revelation and detection of radioactive materials in various transports and in scrap-iron there is influence of several various factors e.g. :

- * sort and size of the radioactive source (which defines energy and intensity).
- * position of the source of the radiation.
- * average density of the transported material on the loading area of the means of transport.
- * way of distribution of the transported material on the loading area of the means of transport.
- * dimensions and size of the loading area of the means of transport and distance of the source of radiation from the detector of measuring system.
- * fluctuation of the natural background level.
- * sort and sensitivity of the used detectors.

1. The basic rules of dose calculation

A dose D from a radiation point source, measured by point detector, fulfils the well known relation [1]

$$D = \int_0^T \frac{A\Gamma}{r^2} dt \quad (1)$$

where A is the activity of the source,
 r is the distance between the source and detector,
 G is gamma constant factor of the radioactive source.

It is evident that in case of n detectors, where r_i is the distance from the point source and
and
 $i = 1, 2, \dots, n$, the value of the dose in the i -th detector is

$$D_i = \int_0^T \frac{A\Gamma}{r_i^2} dt. \quad (2)$$

In the static case when neither the source nor detectors are moving, r_i is not a function of time and therefore we can write

$$D_i = \frac{A\Gamma T}{r_i^2}. \quad (2a)$$

As shown in Fig. 1, in the case of a moving radioactive point source with velocity v at distance r , the dose D is defined as follows:

$$D = \int_0^T \frac{A\Gamma dt}{a^2 + (vt)^2} = A\Gamma \int_0^T \frac{\frac{1}{v^2}}{\frac{a^2}{v^2} + t^2} dt. \quad (3)$$

By substitution $t = \frac{a}{v} x$, $dt = \frac{a}{v} dx$, we get

$$D = \frac{A\Gamma}{av} [\text{arctg}(x)]_0^{\frac{Tv}{a}} = \frac{A\Gamma}{av} \text{arctg}\left(\frac{Tv}{a}\right). \quad (4)$$

In case $\text{tg} \mathbf{a} = \frac{Tv}{a}$, $\mathbf{a} = \text{arctg}\left(\frac{Tv}{a}\right)$ and the dose equals

$$D = \frac{A\Gamma}{av} \mathbf{a}. \quad (5)$$

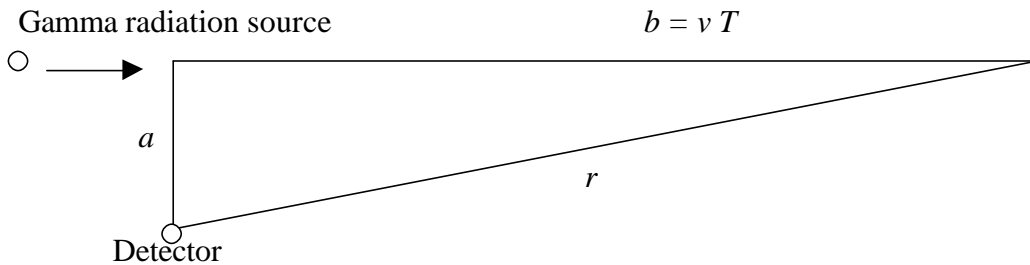


Fig. 1.

For the infinite integral $D = A\Gamma \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2 + (vt)^2} dt$

$$D = A\Gamma \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2 + (vt)^2} dt = A\Gamma \int_{-\infty}^0 \frac{1}{a^2 + (vt)^2} dt + A\Gamma \int_0^{\infty} \frac{1}{a^2 + (vt)^2} dt ,$$

while

$$D_- = A\Gamma \int_{-\infty}^0 \frac{1}{a^2 + (vt)^2} dt = \lim_{T \rightarrow -\infty} \int_T^0 \frac{A\Gamma}{a^2 + (vt)^2} dt = -\frac{A\Gamma}{av} \lim_{T \rightarrow -\infty} \arctg\left(\frac{Tv}{a}\right) = \frac{A\Gamma}{av} \cdot \frac{\mathbf{p}}{2} ,$$

$$D_+ = A\Gamma \int_0^{\infty} \frac{1}{a^2 + (vt)^2} dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T \frac{A\Gamma}{a^2 + (vt)^2} dt = \frac{A\Gamma}{av} \lim_{T \rightarrow \infty} \arctg\left(\frac{Tv}{a}\right) = \frac{A\Gamma}{av} \cdot \frac{\mathbf{p}}{2} ,$$

Thus, $D = D_- + D_+$ and $D_- = D_+$.

Therefore

$$D = A\Gamma \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2 + (vt)^2} dt = \frac{A\Gamma}{av} \mathbf{p} . \quad (6)$$

If n is the number of detectors around the measured moving source, then the dose for the i -th detector is

$$D_i = \frac{\mathbf{p}A\Gamma}{a_i v} , \quad i=1,2,\dots,n, \quad (7)$$

where A is an unknown quantity constant factor dependent on the radioactivity source size,

Γ is an unknown quantity constant factor dependent on the radiation source energy,

v is velocity,

a_i is the distance between the i -th detector and radioactive source (Fig. 1).

When we designate

$$\mathbf{g} = \frac{\mathbf{p}A\Gamma}{v} , \quad (8)$$

then

$$D_i = \frac{\mathbf{g}}{a_i} \quad i=1,2,\dots,n. \quad (9)$$

It is evident that \mathbf{g} as well as a_i for $i=1,2,\dots,n$ are unknown quantities for us. It follows from equation (9), that

$$a_i = \frac{\mathbf{g}}{D_i} \quad i=1,2\dots n. \quad (10)$$

Relation (10) is true for any positive values of \mathbf{g} and D_i , $i=1,2\dots n$. However, we have to look for such a \mathbf{g} -value that, after substituting to (10), has physical (geometrical) meaning. More precisely, relation (10) defines a circle k_i with centre in the i -th detector with radius a_i . The radioactive source will be situated in the point where circles k_i intersect.

It is obvious that accurate determination of coordinates of the radioactive source depends on the sensitivity and stability of used detectors upon, the velocity of moving means of transport, and other factors given in the introduction of this paper.

1.1. A short mathematical experiment

For appropriateness and lucidity let us make a simple calculation with choice of 3 detectors. So for $n = 3$, because of simplicity of the next calculations let us locate the detectors to points:

$$B_0 = [0,0], B_1 = [1,0], B_2 = [0,1]$$

We know, that $[x, y]$ co-ordinates of the radiation source must meet three following formulae (lie on circles k_i).

$$x^2 + y^2 = \left(\frac{\mathbf{g}}{D_0}\right)^2 \quad (11)$$

$$(x-1)^2 + y^2 = \left(\frac{\mathbf{g}}{D_1}\right)^2 \quad (12)$$

$$x^2 + (y-1)^2 = \left(\frac{\mathbf{g}}{D_2}\right)^2 \quad (13)$$

Our task is to designate parameter γ so, that circles (11), (12), (13) ought to have a common point. After modification and solution of this formula it is possible to find location of radioactive source.

The radioactive source coordinates x, y designation depends on the accumulated dose D_0, D_1, D_2 in separate detectors during a pass-by of a vehicle around the detectors. Sensitivity and stability of used detectors, the speed of moving vehicle, fluctuations of natural background, etc. especially influence the precision and reliability of measured data. On the precision and reliability of measured data itself especially influences sensitivity and stability of used detectors, velocity of means of transport, fluctuations of natural background and others.

2. Experimental estimation of sensitivity of the measuring system in Metal Works Podbrezová

Concerning the measuring systems available on the market at the present time, there is hardly anything known about the sensitivity of the devices gained by practical verification.

Therefore the measuring system was performed by BITT Technology in real conditions in Metal Works Podbrezová. The experiment was a simulation of conditions of a railway carriage full of iron waste at the entry into a factory. Static and dynamic conditions were simulated at the speed of 10 km/h

2.1 Aims of the experiment

- * the influence of arrangements and the number of detectors in the measuring system
- * static and dynamic comparison measurements
- * measuring possibilities for a lorry and a railway carriage
- * possibilities of localization of the radioactive source in the carriage
- * sensitivity of the measuring system build up on detectors RGM200/STA made by the BITT Technology company .

2.2 Settings of the experiment

The following Fig.2 shows formation of 6 detectors RGM 200/STA. A signal from these detectors enters the concentrator DC 14. The result of measurements is possible to read on the screen attached to the concentrator. An acoustic indicator of contamination 6xRGM 200 is also attached to the concentrator.

The experiment represents the detection of a radioactive etalon in a standard railway carriage full of iron waste (a carriage corresponding with universal international European Norm). The iron waste is simulated by iron bars with an outer diameter of 133 mm and the wall thickness of 5 mm. The bars were placed on the railway carriage up to 1,6 m high. The average density of the simulated iron waste is 1120 kg/m³.

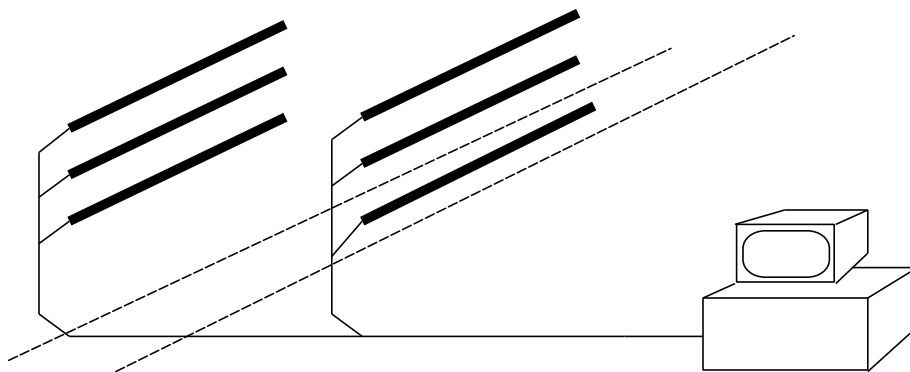


Fig.2

A description of separate parts [2]

High volume proportional detectors RGM200/STA were used. These were developed from standardised detectors (200 mm long) RS03/x with which the BITT Technology company has got a rich experience.

1. RGM200/STA is a robust proportional detector, which is put in antivibration aluminium coating pipe and has following characteristic parameters:

- active length : 2000 mm
- active diameter : $\varnothing 60$ mm
- measuring range : 10 nSv/h till 300 mSv/h
- energetic dependence : according to norm IEC (+/- 20% in measuring range)
- sensitivity: 40 cps/100 nSv/h
- threshold sensitivity: 10 nSv/h
- temperature range: -30 till +70 °C

When installing the measuring system for detection and localization of radioactive sources one has to carefully consider the high position of the detector and make a long-time measurement of the natural background for separate detectors. For determination of such dependence an experiment of measurement of the dependence dose rate equivalent from the height of the detector RS 03/x above the earth surface was performed. The results from measurement are graphical presented in Fig. 3.

Dose rate equivalent vs. height

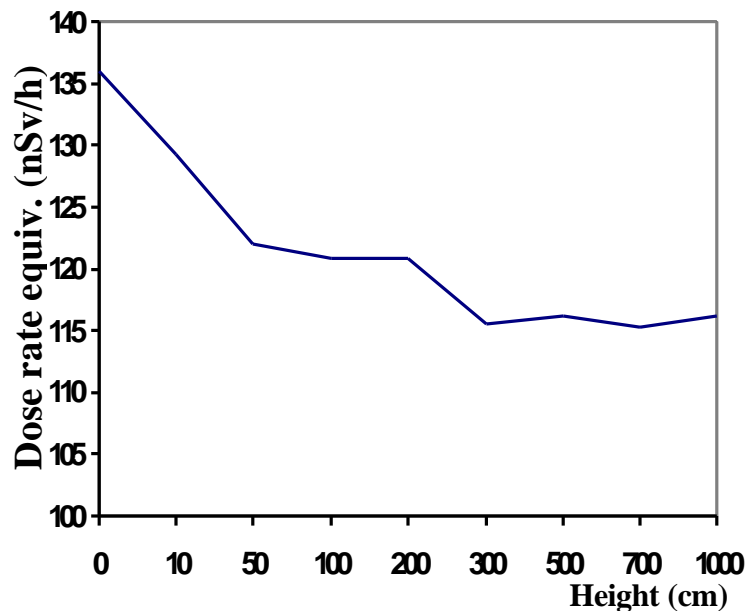


Fig.3

In the following draft in Fig. 4 is an experimental arrangement of height dependence. Detector was in a horizontal position according to the following draft.

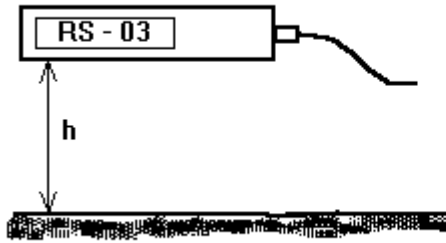


Fig.4

From the experimental measured results follows, that the self-shielding effect of the load has considerable influence on the measurement of background level and thereby on the sensitivity of the measurement [3]. Depending from the density and size of the load, the effect of the self-shielding (considerably that depends on position of the detector) can reach up to 30% and therefore reduction of the background up to about 1/3.

Conclusion

- From the first part of this article, from mathematical point of view, results that proper choice of number of detectors and their location enables finding a location of the radioactive sources.
- For more precise determination of a radioactive source position it is necessary to prepare and set up a long time measurement of existing background with a measuring system, which consists of several detectors. When measuring one has to consider the self-shielding effect of the load (transported material).
- Measuring system on the detectors RGM200/STA is sufficient for detection of radioactive isotopes in scrap-iron.
- In correlation with theoretical calculations dynamic sensitivity is considerably dependent on the motion velocity of the measured carriage.

An important conclusion results from this:

If the measuring conditions are set up in the way that the measured carriage stops or is moving at a very low speed a smaller number of detectors is sufficient, for example 4. On the other hand, at higher speeds it is essential to raise the number of detectors to reach necessary sensitivity

- According to low detection level, in average ten times under the current natural background (as early as 10nSv/h), high stability and low temperature dependence the proportional detectors RGM200/STA are suitable for such a measuring system.

References:

- [1] Glenn F. Knoll: RADIATION DETECTION AND MEASUREMENT, Sec. Edition John Willey and Sons, New York, 1989
- [2] Manual of company BITT Technology GmbH for Gamma meter RS 03/X, Wiener Strasse 70, A-2104 Spillern, Austria, 2002
- [3] Experiments in Metal Works in Podbrezová, BITT Technology, Wiener Strasse 70, A-2104 Spillern, Austria, 1995