

VEDECKÁ RADA FAKULTY MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY  
UNIVERZITY KOMENSKÉHO V BRATISLAVE

RNDr. Štefan Húštava

Autoreferát dizertacnej práce

DETEKCIA A LOKALIZÁCIA RÁDIOAKTÍVNYCH ZDROJOV  
V ŽIVOTNOM PROSTREDÍ

Na získanie vedecko-akademickej hodnosti: Philosophiae Doctor  
v odbore doktorandského štúdia: 11-24-9 Jadrová a subjadrová fyzika

Bratislava, 2004

Dizertacná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia na Katedre jadrovej fyziky Fakulty matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského v Bratislave

Predkladateľ: RNDr. Štefan Húštava  
Katedra fyziky Pedagogickej fakulty Trnavskej univerzity  
Priemyselná 3, 918 43 Trnava

Školiteľ: Doc. RNDr. Martin Chudý, CSc  
Katedra jadrovej fyziky  
FMFI UK, Mlynská dolina  
842 48 Bratislava

Oponenti:

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertacnej práce sa koná dňa:                    na FMFI UK o  
Mlynská dolina, 842 48 Bratislava, miestnosť číslo  
Pred komisiou pre obhajobu dizertacnej práce doktorandského štúdia  
vymenovanou dňa                    predsedom spoločnej odborovej komisie  
Vo vednom odbore 11-24-9

Predseda spoločnej odborovej komisie:

Prof. RNDr. Jozef Masarik, DrSc.  
Katedra jadrovej fyziky FMFI UK, Bratislava

OBSAH	
ÚVOD	4
1. CIELE DIZERTACNEJ PRÁCE	4
2. SÚCASNÝ STAV PROBLEMATIKY	5
2.1. Výsledky experimentu a posúdenie citlivosti detektorového systému M1 a M2.	6
2.2. Výsledky testov v Ceskom metrologickom inštitúte	6
3. VLASTNÉ DLHODOBÉ KONTINUÁLNE MERANIA ŽIARENIA GAMA	9
4. EXPERIMENTÁLNE STANOVENIE CITLIVOSTI MERACIEHO SYSTÉMU V ŽELEZIARNACH PODBREZOVÁ	9
5. NÁVRH URCENIA POLOHY RÁDIOAKTÍVNYCH ZDROJOV V 2D PRIESTORE	10
5.1. Lokalizácia zdroja v statickom režime v rovine (2D)	11
5.2. Experimentálne overenie výpoctu polohy zdroja v priestore 2D	13
ZÁVER	17
ZOZNAM LITERATÚRY	20
ZOZNAM PRÁC DIZERTANTA	22
SUMMARY	24

## ÚVOD

Výsledky skúšok jadrových zbraní, využívanie rádioaktívnych izotopov, prevádzka jadrových elektrární, možnosť pašovania rádioaktívnych izotopov a nelegálneho prevozu štiepných 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.

Jednou zo základných úloh 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.

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.

## 1. 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 železničné vagóny na detekciu a lokalizáciu zdroja žiarenia.

## 2. SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Radiacné monitorovacie systémy sa úspešne využívajú v železniarnach, oceliarnach, na šrotoviskách už niekoľko rokov. V prácach [1], [2] informujú autori o analýze vzoriek z oceliarní a zistili koncentráciu aktivity  $^{60}\text{Co}$  medzi 100 až 1000  $\text{Bq.kg}^{-1}$ . Vo vzdialenosti 1 meter od meraného nákladného automobilu zistili príkon dávkového ekvivalentu v rozsahu 0,2 až 0,3  $\text{mSv.h}^{-1}$ . Takáto kontaminácia môže byť spôsobená rutinnou metódou tavby a príčinou je výskyt  $^{60}\text{Co}$  v šamotovej výplni vysokých pecí v rôznych hĺbkach výplne.

Pri transporte železného šrotu je určená hranica príkonu dávkového ekvivalentu v blízkosti kontrolovaného vozidla 0,3  $\mu\text{Sv.h}^{-1}$  [3]. Táto hranica je približne ekvivalentná trojnásobku úrovne prírodného pozadia.

Vplyvom samotieniaceho efektu meraného vozidla sa zaoberal aj autor v [4]. Zistil tiež pokles úrovne prirodzeného pozadia, ktoré je v rozsahu 20 až 30 % v závislosti od nákladu.

Pre získanie detailnejšieho prehľadu o situácii a možnosti meraní priamo v železniarnach sú uvedené podrobnejšie výsledky experimentov podľa práce v [5]. Priemerná hustota železného šrotu naloženého v štandardnom železničnom vagóne bola 1 080  $\text{kg.m}^{-3}$ . Meranie sa vykonávalo pomocou detektorového systému M1(4 detektory  $\text{CsJ(TI)}$ ) merajúce v integrálnom režime

a rozložené vo vzdialenosti 1 m zo 4 strán okolo železnícneho vagóna) a detektorového systému M2 (1 detektor CsJ(Tl) merajúci v spektrometrickom režime).

### **2.1. Výsledky experimentu a 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. Silnejšie zdroje s vyššou aktivitou už boli ale odhaliteľné.
- Zdroj žiarenia „15  $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ “ v strednej časti nákladu, asi 720 mm pod železným šrotom predstavuje hranicu citlivosti merania pre detektorový systém M2 . Vo všetkých ostatných polohách bol zdroj žiarenia „65  $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ “ s istotou objavený s detektorovým systémom M1.
- Záverom možno povedať, že detektorový systém M2 zachytí cca štyrikrát slabšie zdroje žiarenia než detektorový systém M1.

### **2.2. Výsledky testov v Českom metrologickom inštitúte**

V Českom metrologickom inštitúte boli vykonané experimentálne merania rádioaktívnej kontaminácie železného šrotu o mernej hmotnosti 870  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  naloženého na štandardnom železničnom vozni. Pri testoch meracích systémov od rôznych výrobcov sa zamerali hlavne na:

Stanovenie detekčných limitov, percento falošných hlásení, schopnosť zaznamenania prejazdu súpravy, závislosť odozvy na aktivite, nepreťažiteľnosť meracieho systému, závislosť odozvy na energii primárnych fotónov, polohová závislosť účinnosti detekcie  $^{137}\text{Cs}$ , pohotovosť detekcie, odozva v závislosti na teplote. V nasledujúcej tabuľke 1 je uvedený prehľad výsledkov testov od všetkých dodávateľov meracích systémov zúčastnených na testoch.

Tab. 1.

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 [6]	Plastový scintilátor	-35°C až +60°C	3	600	150 až 1 500	Kvázi lineárna	1,36	-25 až +15%
RTM 910 [7]	Plastový scintilátor	-25 až +50°C	1	200	60 až 1 400	Narastajúca funkcia	1,04	-10 až +45%
FHT 1388 [8]	Plastový scintilátor	-40 až +60°C	1	200	60 až 1 400	Narastajúca funkcia	1,26	-10 až +5%
GR 526 [9]	Plastový scintilátor	-40 až +50°C	0,2	50	60 až 1 300	Narastajúca funkcia	0,79	-5 až +10%
FZM [10] 0700.003	Plastový scintilátor	-20 až +40°C	1	300	90 až 1 300	Kvázi lineárna	0,88	-25 až +55%
NE ASM [11]	Plastový scintilátor	-35 až +50°C	1	160	80 až 1 300	Kvázi lineárna	0,87	-20 až +5%

CTM 304 [12]	Plastový scintilátor	-20 až +50°C	0,4	200	60 až 2 000	Kvázi lineárne	0,75	0 až +140%
GR 526/400 [13]	Plastový scintilátor	-40 až +50°C	0,2	100	60 až 1 300	Narastajúca funkcia	0,40	-10 až +5%
SRDS – M2 [14]	CsJ(Tl) scintilátor	-30 až +45°C	1	900	60 až 1400	Narastajúca funkcia	0,86	-10 až +5%



### 3. VLASTNÉ DLHODOBÉ KONTINUÁLNE MERANIA ŽIARENIA GAMA

Pre väčšinu oblastí všetkých kontinentov úroveň prírodného  $\gamma$  - žiarenia obvyčajne spadá do intervalu 70 – 130 nSv.h<sup>1</sup>. Merania prírodného pozadia žiarenia gama boli vykonané s presne kalibrovanou sondou so širokým rozsahom merania 10 nSv.h<sup>1</sup> až 10 Sv.h<sup>1</sup>. Meracia sonda bola inštalovaná na rovnej streche trojposchodovej budovy rozmerov 10 x 20 m, v strede strechy vo výške 1m. Príkon dávkového ekvivalentu od prírodného pozadia nie je konštantný a možno pozorovať časté kolísania smerom nahor aj nadol – signál je zdanlivo zašumený. Tento zdanlivý šum je spôsobený fluktuáciami pozadového žiarenia gama. Tieto fluktuácie sú spôsobené najmä nasledujúcimi faktormi: Stochastické kolísanie bez fyzikálneho významu, efekt vymývania dcérskych produktov radónu (<sup>214</sup>Bi, <sup>214</sup>Pb na aerosoloch), vrstva snehovej pokrývky (v zime) [15], variácie kozmického žiarenia (spršky, slnečné škvrny), ľudský faktor (žulové stavby, fosfátové hnojivá), umelá rádioaktivita vznikajúca pôsobením človeka v životnom prostredí.

### 4. EXPERIMENTÁLNE STANOVENIE CITLIVOSTI MERACIEHO SYSTÉMU V ŽELEZIARNACH PODBREZOVÁ

Merací systém na kontrolu železného šrotu bol overený v reálnych podmienkach v Železiarnach Podbrezová. Pri experimente boli simulované podmienky existujúce pri vstupe železného vagónu so železným šrotom do železiarní. Boli simulované situácie statické a dynamické pri pohybujúcom sa vagóne rýchlosťou do 10 km.h<sup>1</sup>. Cieľom experimentu bolo stanoviť citlivosť meracieho systému. Priemerná hustota železného šrotu bola 1 120 kg.m<sup>-3</sup>.

#### Záver z experimentu

- Merací systém na proporcionálnych 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 postacuje 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 softwar.
- 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).
- Pre statickú citlivosť meracieho systému z experimentov vychádza 1 MBq a pre dynamickú 3 MBq.

## 5. NÁVRH URCENIA POLOHY RÁDIOAKTÍVNYCH ZDROJOV V 2D PRIESTORE

Výpočet dávky  $D$  nameranej v bodovom detektore za čas  $T$  od bodového zdroja žiarenia, ktorý sa v oči detektoru pohybuje vychádza zo všeobecne platného vzťahu uvádzaného v mnohých odkazoch [16] [17]

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

kde  $A$  je aktivita zdroja žiarenia,

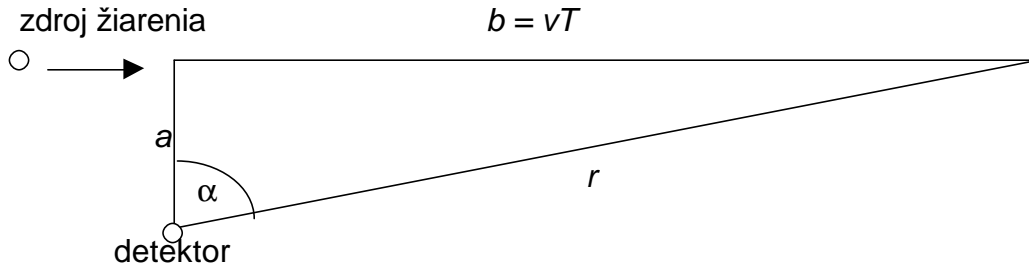
$r$  je vzdialenosť zdroja žiarenia od detektora,

$\Gamma$  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 dávky v  $i$ -tom detektore je

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

V prípade, že dávku  $D$  získame od pohybujúceho sa bodového zdroja žiarenia, tak ako je to znázornené na obr.1, pre zdroj žiarenia pohybujúceho sa rýchlosťou  $v$  platí



obr. 1.

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

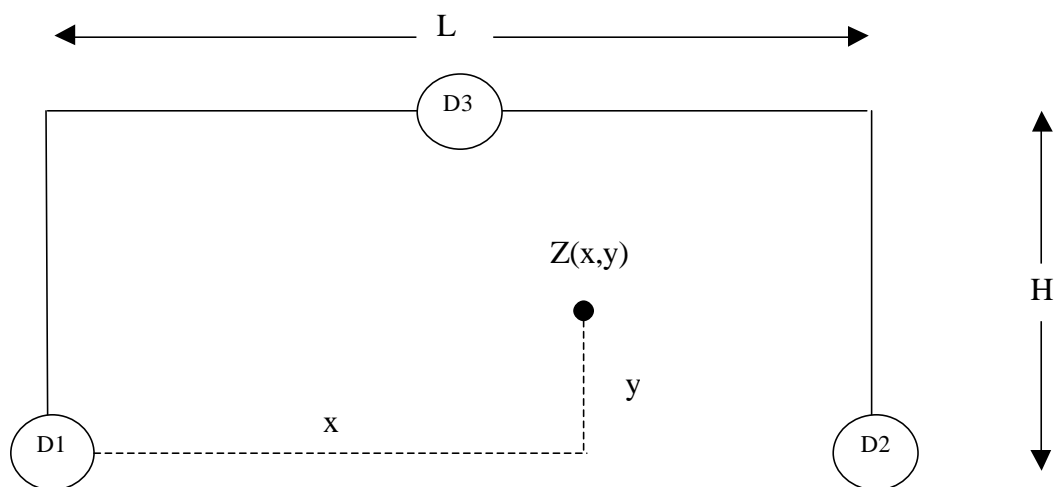
### 5.1. Lokalizácia zdroja v statickom režime v rovine (2D)

Predpokladajme, že v rovine  $XY$  (obr.2) 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  $D1=(0,0)$ ,  $D2=(L,0)$ ,  $D3=(S,H)$ . 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 rozmiesnenie detektorov bude také ako je na obrázku 2. Na základe (2) pre nameranú hodnotu  $D_i$  v jednotlivých detektoroch platí

$$D_i = \frac{A\Gamma T}{a_i^2} = \frac{G}{a_i^2}, \quad i = 1,2,3, \quad (4)$$

odkiaľ vyplýva, že

$$a_i^2 = \frac{G}{D_i}, \quad i = 1,2,3. \quad (5)$$



Obr. 2.

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

$$\begin{aligned}
 x^2 + y^2 &= \frac{G}{D_1}, \\
 (x-L)^2 + y^2 &= \frac{G}{D_2}, \\
 (x-L)^2 + (y-H)^2 &= \frac{G}{D_3}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Riešením tohto systému nelineárnych rovníc získame nasledujúce vzťahy

$$\begin{aligned}
 y &= \pm \sqrt{\frac{G}{D_1} - x^2}, \\
 x &= \frac{1}{2} \left[ L + \frac{G}{L} \left( \frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right) \right]
 \end{aligned} \tag{7}$$

pricom hodnotu  $G$  získame riešením rovnice

$$aG^2 + bG + c = 0 \tag{8}$$

kde

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{1}{H^2} \left[ \left( \frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_3} \right) - \frac{S}{L} \left( \frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right) \right]^2 + \frac{1}{L^2} \left( \frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right)^2, \\
 b &= \frac{2}{H^2} [(S-L)S + H^2] \left[ \left( \frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_3} \right) - \frac{S}{L} \left( \frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right) \right] + 2 \left( \frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right) - \frac{4}{D_1}, \quad (9) \\
 c &= \left( \frac{1}{H} \right)^2 (S(S-L) + H^2)^2 + L^2.
 \end{aligned}$$

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 vymedzenej 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  $G$ .

## 5.2. Experimentálne overenie výpočtu polohy zdroja v priestore 2D

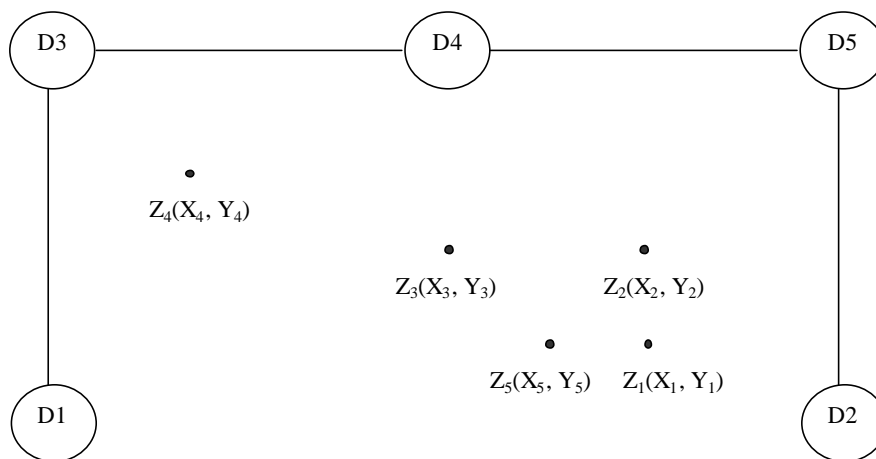
Na experimentálne overenie výpočtu polohy zdroja bolo navrhnuté usporiadanie detektorov podľa obr. 3. D1 až D5 je poloha jednotlivých detektorov, z ktorých bol zaznamenávaný signál príkonu dávkového ekvivalentu. Z<sub>1</sub> až Z<sub>5</sub> je príslušná zvolená poloha rádioaktívneho zdroja. Ak umiestnime začiatok 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<sub>1</sub> (2,8 ; 0,7), Z<sub>2</sub> (2,8 ; 1,5), Z<sub>3</sub> (1,75 ; 1,5), Z<sub>4</sub> (0,7 ; 2,5), Z<sub>5</sub> (2,3 ; 0,7).

Ako zdroj žiarenia bol použitý etalón <sup>137</sup>Cs o aktivite 17,01 MBq.



Obr. 3.

Namerané hodnoty príkonu dávkového ekvivalentu sú uvedené v tabulke 2 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 2.

Zdroj v polohe $Z_1$ :						
Trojholník	G	x	y	Signál [nSv/h]	Trojholníky	Skutočná poloha zdroja [m]
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	

<b>Zdroj v polohe Z<sub>2</sub>:</b>						
Trojuholník	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	
<b>Zdroj v polohe Z<sub>3</sub>:</b>						
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	
<b>Zdroj v polohe Z<sub>4</sub>:</b>						
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	
<b>Zdroj v polohe Z<sub>5</sub>:</b>						
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	

Z riešenia rovnice (8) 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 tabuľky 2 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 tabuľke 2. 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 (4). Z tabuľky 2 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 tabuľke 2 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  $\Gamma$  konštantu tohto zdroja a z hodnoty parametra  $G$  je možné určiť aktivitu hľadaného zdroja.

## ZÁVER

Pri výbere detektora sa vychádzalo z doterajších skúseností merania s proporcionálnymi detektormi. Proporcionálny detektor vzhľadom na jeho citlivosť, mrtvu dobu, životnosť, spoľahlivosť, cenu, výplň 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 [18]. 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.

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 [19].

Merací systém na proporcionálnych detektoroch RGM je vhodný na odhalenie rádioaktívnej kontaminácie železného šrotu [20]. Pre statickú citlivosť meracieho systému (keď kontrolovaný vagón stojí pod meracou bránou) z experimentálnych údajov vychádza hodnota  $\sim 1 \text{ MBq}$ . Dynamická citlivosť pre pohybujúci sa vagón rýchlosťou  $10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  z experimentálne získaných údajov je  $\sim 3 \text{ MBq}$ . 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. Takisto podľa požiadaviek na meranie treba realizovať prístrojové aj softverové vybavenie meracieho systému na kontrolu kontaminácie železného šrotu rádioaktívnymi látkami.

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 5.

V nasledujúcom porovnajme početnosť impulzov od nami použitých proporcionálnych detektorov s početnosťou impulzov od plastových scintilátorov a anorganických scintilátorov NaI(Tl) a CsI(Tl).

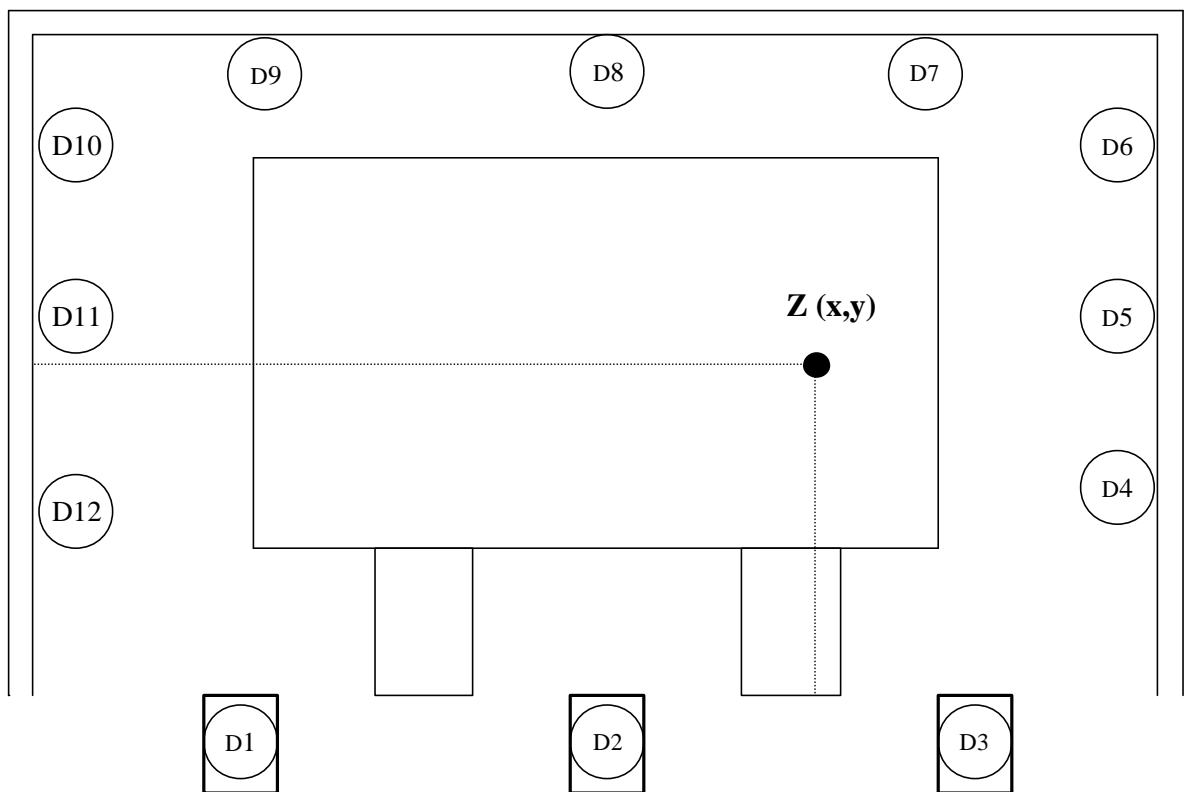
Plastové scintilátory dodávané rôznymi výrobcami majú objem v rozsahu 20 až 40 litrov. Úmerne s objemom samozrejme rastie aj početnosť impulzov od detektora. Pri úrovni prírodného pozadia (cca 80 až 100 nSv.h<sup>-1</sup>) početnosť impulzov v závislosti od objemu scintilátora je v rozsahu 2 000 až 3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

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

Proporcionálny detektor (1 kus) o objeme 5,65 litra od výrobcu [21] pri úrovni prírodného pozadia dáva ~ 60 imp.s<sup>-1</sup>. 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 5.

V našom prípade sme sa sústredili na meraciu bránu pre kontrolu železných 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. 4 s dvanástimi detektormi.



Obr.4. Projekt meracej brány na detekciu a lokalizáciu rádioaktívneho zdroja žiarenia.

## ZOZNAM LITERATÚRY

- [1] Malátová I., Foltánová S., Rulík P.: Contamination of Steel Produced in the CR by  $^{60}\text{Co}$  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] Entdeckung Radioaktiver Verunreinigungen in Stahlschrott, Untersuchungsbericht, Symposium in Ratingen, BRD Ratingen 1994.
- [6] Protokol o technické zkoušce meridla – Y 911, Český metrologický institut, Praha 1997
- [7] Protokol o technické zkoušce meridla – RTM 910, Český metrologický institut, Praha 1997
- [8] Protokol o technické zkoušce meridla – FHT 1388, Český metrologický institut, Praha 1997
- [9] Protokol o technické zkoušce meridla – GR 526, Český metrologický institut, Praha 1997
- [10] Protokol o technické zkoušce meridla – FZM 0700.003, Český metrologický institut, Praha 1997
- [11] Protokol o technické zkoušce meridla – NE ASM , Český metrologický institut, Praha 1997
- [12] Protokol o technické zkoušce meridla – CTM 304, Český metrologický institut, Praha 1997

- [13] Protokol o technické zkoušce meridla – GR 520/400, Český metrologický institut, Praha 1997
- [14] Protokol o technické zkoušce meridla – SRDS M2, Český metrologický institut, Praha 1997
- [15] Radioaktivitäts – Messungen in Osterreich 1992 und 1993, Daten und Berwertung, Bundesministerium fur Gesundheit und Konsumentenschutz, Radetzkystraße 2, Wien, 1995
- [16] J. Šeda a kol.: Dozimetrie ionizujícího záření, SNTL Praha 1983
- [17] Glenn F. Knoll: Radiation Detection and Measurement, John Wiley and Sons, New York 1989
- [18] Š. Húštava: Monitorovanie rádioaktivity v životnom prostredí, Projekt dizertacnej práce MFF – UK Katedra jadrovej fyziky, Bratislava , 1998
- [19] Š. Húštava: Analýza a meranie jednotlivých zložiek pozadia prírodného žiarenia gama, ACTA Facultatis Paedagogicae Universitatis Tyrnaviensis, Séria C, Trnava 2001
- [20] Protokol o experimentálnej kontrole rádioaktívnej kontaminácie železného šrotu v Železiarnach Podbrezová 1995
- [21] Bitt Technology – A, Wienerstrasse 70, A – 2104 Austria

## ZOZNAM PRÁC DIZERTANTA

1. Húštava Š., Melichar Z.: Štúdium vplyvu fotoneutrónov na meranie oneskorených neutrónov na primárnom okruhu reaktora VVER, výsk. správa , EGÚ J. Bohunice, 1977
2. Melichar Z. , Húštava Š.: Kontrola porušenia obalu palivových článkov reaktora VVER, výsk. správa EGÚ J. Bohunice 1977
3. Húštava Š.: Návrh detektorového bloku na meranie oneskorených neutrónov, výsk. správa EGÚ J. Bohunice 1978
4. Húštava Š., Melichar Z.: Vplyv fotoneutrónov na meranie oneskorených neutrónov na primárnom okruhu jadrového energetického bloku VVER, Jaderná energie c.8, 1979
5. Húštava Š., Melichar Z: Výpočet hustoty toku oneskorených neutrónov na primárnom okruhu jadrového energetického bloku VVER, výsk. správa EGÚ J. Bohunice 1980
6. Kolektív a Húštava Š.: Kontrolné systémy radiacnej bezpečnosti JE s VVER, Etapová výsk. správa EGÚ J. Bohunice 1980
7. Húštava Š.: Vplyv obalu palivového článku JE A1 na meranie neutrónového toku z paliva, výsk. správa VÚJE J. Bohunice 1982
8. Húštava Š.: Testovanie neutrónových detektorov na meranie neutrónových tokov okolo aktívnej zóny reaktora VVER, výsk. správa ŠKODA Plzen - Závod energetické strojírenství , 1984
9. Škulec Š., Húštava Š.: Meteorologický subsystém havarijného monitorovacieho systému CSFR, výsk. správa SHMÚ J. Bohunice 1990
10. Húštava Š., Škulec Š.: Meteorologický subsystém v rámci monitorovacej siete CSFR pre radiacné havárie, Konferencia : Nadprojektové havárie jadrových elektrární, Piešťany, 1991 s. 196 - 202
11. Húštava Š., Pták V.: Moderacný blok pre testovanie detektorov neutrónov, Autorské osvedčenie (patent) 260510-PV 8003-86 W, Praha 1990
12. Húštava Š.: Systemy radiacionnogo kontrolja , II. Meždunarodnyj seminar – Ekologiceskie problemy demilitarizacii, 17. – 20. Apríl 1995 Naroc, Belorussija

13. Húštava Š.: Meranie prírodného gama žiarenia, konferencia DIDMATTECH '98, Olomouc 1998
14. Štubna I., Košina S., Valko L., Húštava Š., Perichta P.: Zbierka príkladov z fyziky k prijímacím pohovorom, Trenčianska univerzita, Trenčín 1999
15. L. Valko, I. Štubna, S. Košina, P. Perichta, Š. Húštava, V. Bockay.: Návod na laboratórne cvičenie z Fyziky I a II. Trenčianska univerzita, Trenčín 2000.
16. Š. Húštava, H. Bitt, K. Kautny: Radiation Control systems of Firm Bitt Technology, The III. International Conference „Radiation Safety: Transportation of Radioactive Materials“ 31. October – 4. November 2000, St. Petersburg, Russia
17. Š. Húštava: Analýza a meranie jednotlivých zložiek pozadia prírodného žiarenia gama. Acta Facultatis Paedagogicae Universitatis Tyrnaviensys, Séria C, Trnava 2001
18. Š. Húštava: Detection and Localisation of Radioactive Sources in Environment and for Industrial Purposes. Zborník z konferencie NATURAL RADIATION ENVIRONMENT (NRE-VII) 20-24 May 2002, Rhodes Greece
19. Š. Húštava: Design for Detection and Localisation of Radioactive Sources in Environment. Acta Facultatis Paedagogicae Universitatis Tyrnaviensys, Séria C, Trnava 2002
20. Š. Húštava, L. Halada.: Metóda urcenia polohy rádioaktívneho zdroja. 5. Banskoštiavnické dni 2003, Súčasný úlohy Environmentalistiky a Rádioenvironmentalistiky 1. – 3. 10. 2003, Banská Štiavnica

## **SUMMARY**

In the paper there is made an actual survey on radioactive contaminated metallurgical scrap control systems niveau. The experimental results are sufficiently described in detail in metal works and then experimental results and tests on the polygon of the metrological institutes. In the next part is analysed the impact of separated components of the natural background gamma radiation for measurement the dose rate equivalent. Coming out from this measuring and experiences was designed a measuring system on the base of proportional detectors and verified in Metall Works Podbrezova. There was designed a mathematical model for counting of dose from moving radiation source along the stable located detectors. From the measured signal recorded in definite number of detectors is calculated and experimentally verified location of the radioactive source on the base of the designed mathematical model. In conclusion is made an analysis and conclusion of possibility for application of proportional detectors instead of plastic and inorganic scintillators. Simultaneously there are pointed out some possibilities for detection and localisation of radioactive sources in environment. Altogether in conclusion there is presented a project of measuring gate on the proportional detectors for localisation and detection of radioactive sources.